

文章编号:1000-8551(2019)02-0389-09

土壤中水分和镉供应量对油菜器官中镉分布特征的影响

史新杰² 李卓^{1,3,*} 庄文化^{2,3} 刘超²

(¹四川省农业科学院作物研究所,四川 成都 610066;²四川大学水利水电学院/水力学与山区河流开发保护国家重点实验室,四川 成都 610065;³南方丘区节水农业研究四川省重点实验室,四川 成都 610066)

摘要:为探究油菜作为镉(Cd)污染农田修复植物的可行性,本研究以德油5号为试验材料,采用全生育期土培盆栽试验,设置高、中、低3个水平的土壤水分及4个水平的土壤镉含量,研究不同土壤水分条件下油菜对镉的吸收和富集规律。结果表明,土壤水分与镉浓度对油菜的吸镉能力影响显著,且其吸收量随着土壤水分与镉浓度的增加而增大;油菜不同器官的镉含量差异较大,其地上部分吸镉量为土壤总镉含量的0.41%~1.17%,叶片镉含量为总吸收量的46.4%~72.6%;不同水分条件下,油菜器官的镉富集量差异明显,高水、中水处理下油菜各器官的镉富集表现为叶>茎>根>角果壳>籽粒,低水处理下表现为叶>根>茎>角果壳>籽粒。综上,油菜整体具有较强的吸镉能力,但镉离子不溶于菜籽油,说明油菜可吸收土壤中的镉,又不影响菜籽油食用,是修复镉污染农田土壤的理想植物。本研究为利用油菜进行重金属土壤综合治理提供了理论依据。

关键词:土壤水分;镉;油菜;分布

DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2019.02.0389

近年来,农业化肥不合理施用和污水灌溉及工业金属冶炼,导致土壤重金属污染问题日益严重^[1],特别是重金属造成的农田土壤污染问题已成为国内外研究热点^[2-6]。镉(Cd)污染是最常见的重金属污染之一。Cd污染除了具备重金属污染的一般特点(隐蔽性、不可逆性和长期性)外,还具有移动性强、毒性高、难降解等特点,因而更易被作物的果实部分吸收与积累^[7],通过食物链危害人体和动物的健康^[8]。因此,控制和减少土壤Cd污染,对保证食品安全及农业可持续发展具有重要意义^[9]。植物修复技术是一项利用绿色植物清除土壤重金属的环境友好型土壤修复技术^[10],近年来得到迅速发展,土壤修复植物的选择是土壤修复的关键。经过长期的筛选研究,国内外学者发现十字花科芸苔属植物具有较强的Cd吸收特性,而油菜(*Brassica napus* L.)作为最具代表性的十字花科芸苔属植物,在我国种植极为广泛,其种植面积及总产量均居世界首位。研究表明,油菜籽实经加工后,

Cd主要存在于饼粕部分,油中Cd浓度不高,并不影响人类食用^[11]。因此,油菜在Cd污染土壤的修复中具有十分广阔的应用前景。

研究发现植物根系从土壤溶液中吸收Cd后,根系中的Cd经过根系细胞的固定及区室化、共质体运输到中柱,最后经木质部装载运输到地上部^[12],并经韧皮部向籽实进一步迁移^[13]。此运输过程均为溶液状态,而土壤水分的欠丰势必会影响Cd运输介质溶液,即Cd在植物体内吸收迁移累积过程与土壤水分密切相关,管理和控制土壤水分是Cd污染土壤植物修复技术田间管理的重要措施。目前,关于土壤水分对植物Cd吸收及Cd在植株体内分布影响的研究尚鲜见报道。本研究采用盆栽试验,探究不同土壤水分下油菜的吸Cd特征,以期Cd污染土壤的植物修复提供理论参考。

收稿日期:2017-06-12 接受日期:2017-08-18

基金项目:四川省科技支撑计划项目(2014NZ0008),四川省财政创新能力提升工程(2016GYSH-007),国家科技支撑计划(2014BAD11B00)

作者简介:史新杰,男,主要从事农业水土研究。E-mail:414680396@qq.com

* 通讯作者:李卓,男,副研究员,主要从事节水农业与油菜栽培研究。E-mail:lizhuo_2000@sina.com

1 材料与方 法

1.1 试验区概况及供试材料

试验在四川省农业科学院新都试验园区内的移动式防雨棚进行,供试土壤取自紫色农田的 0~20 cm 表层壤土,基本理化性质:pH 值 6.14、全磷 4.2 mg·kg⁻¹、有效磷 2.8 mg·kg⁻¹、全钾 0.0132 g·kg⁻¹、有效钾 96.5 mg·kg⁻¹、全氮 73.4 mg·kg⁻¹、有效氮 42.9 mg·kg⁻¹、有机质 8 g·kg⁻¹、全镉 0.13 mg·kg⁻¹、有效镉 0.037 mg·kg⁻¹。土壤经自然风干后,过 5 mm 筛,室温保存备用。

供试作物:在成都平原地区各个油菜品种富集镉含量的调查基础上,供试油菜品种选择四川省广泛种植,且经前期研究^[3]表明,其吸 Cd 能力较强的德油 5 号 (*Brassica napus* L.),属甘蓝型中熟两系杂交种,全生育期约 223 d。

1.2 试验设计

于 2015 年 9 月-2016 年 5 月进行盆栽试验,采用直径 35 cm、高 28 cm,下底自带托盘的塑料盆,每盆盛过筛风干土 10 kg。各种肥料在油菜移栽前一次性施加,后期不再追肥,施加量分别为:氮肥 0.1 g·kg⁻¹ (尿素)、磷肥 0.15 g·kg⁻¹ (磷酸二氢钾)、有机肥 15 g·kg⁻¹,与供试土壤充分混匀。以分析纯 CdSO₄ (无结晶水)作为污染试剂,用去离子水配成母液,再逐级稀释,分别按照土壤 Cd 含量为 0、5、15、30 mg·kg⁻¹ 的水平设计,喷洒到盆栽试验的土壤中,边喷边搅拌,以保证 Cd 的均匀分布,在温室中稳定 7 d。

于 2015 年 9 月中下旬播种,油菜长出 3 片真叶时定苗,于 2015 年 10 月 15 号移入大小、性状、长势一致的幼苗。盆栽定苗(每盆 1 株),每处理设 3 次重复。移入后,为保证油菜生长,充分灌水,苗期不做任何处理。2015 年 12 月 18 日起,对油菜进行水分处理,分别设置高水 (high water content, HW)、中水 (media water content, MW)、低水 (low water content, LW) 3 个处理,各处理水分控制标准依次为田间持水量的 70%~80%、60%~70% 和 50%~60%。试验过程中采用称重法控制土壤水分,用电子台秤(精度为 1 g)称重,以土壤水分占干土重的田间持水量的百分数表示。各水分处理均以土壤含水率降至试验设计的灌水下限时开始灌水,达到试验设计灌水上限时停止灌水,用量筒精准量取所需水量,并记录各处理每次的灌水量。补水间隔为 1~2 d,按照天气、植株、土壤水分状况而定。生长过程中,收集落叶待测。油菜成熟后,收获植株,

用蒸馏水洗净整个植株,晾干,将油菜各器官(根、茎、叶、角果壳、籽粒)分开,70℃烘干至恒重,称取各部分质量,烘干样品粉碎过 0.425 mm 筛,用于测定重金属 Cd 含量。

1.3 测定项目及分析方法

1.3.1 样品处理及 Cd 含量测定 将植株样于 70℃ 烘干,按照不同水分和 Cd 浓度处理分别脱粒,分别将同一处理的根、茎、叶、角果壳粉碎后混合,同一处理的籽粒混合,用于测定各器官 Cd 含量。

1)土壤全 Cd 含量:利用 900H 原子吸收光谱仪(美国 PE 公司)采用石墨炉原子吸收光谱法(GB/T 17141-1997)^[14]进行测定;2)土壤有效 Cd 含量:采用 0.1 mol·L⁻¹ HCl(酸性)和二乙三胺五乙酸(DTPA)(中碱性)浸提,然后采用石墨炉原子吸收光谱法(GB/T 23739-2009)^[15]进行测定,在土壤全 Cd 含量测定过程中采用国家标准土壤样品(GSS-14)进行分析质量控制;3)油菜各器官 Cd 含量:采用石墨炉原子吸收光谱法(GB 5009.15-2014^[16])测定,加入国家标准植物样品(GBW10015 菠菜)进行分析质量控制;4)土壤 pH 值:采用电位计法进行测定(LY/T 1239-1999)^[17];5)生物量为各器官干物质之和。

1.3.2 相关参数计算方法 富集系数(bioconcentration factors, BCF)指植物体中某元素含量与基质中该元素含量的比值,通常用来表征某种植物对元素的吸收、累积能力^[18]。富集系数在一定程度上反映了沉积物-植物系统中元素迁移的难易程度,说明重金属在植物体内的富集情况。富集系数计算公式如下:

$$\text{富集系数} = \text{植物地上部或根部 Cd 含量} / \text{土壤 Cd 含量} \quad (1)$$

迁移系数(translocation factors, TF)指植物体地上部某元含量与根中该含量元素的比值,迁移系数能够反映重金属在植物不同器官中的分配情况,通常迁移系数越大,植物修复该重金属的能力越好。迁移系数计算公式如下:

$$\text{迁移系数} = \text{地上部 Cd 含量} / \text{根 Cd 含量} \quad (2)$$

移除率指植物体内某元素含量占土壤中该元素的百分比,本研究以油菜地上部镉含量来计算移除率。移除率计算公式如下:

$$\text{移除率} = \text{地上部 Cd 含量} / \text{土壤 Cd 含量} \times 100\% \quad (3)$$

1.3.3 数据处理 采用 SPSS 17.0 和 Microsoft Excel 2007 进行数据统计和相关性、显著性检验。

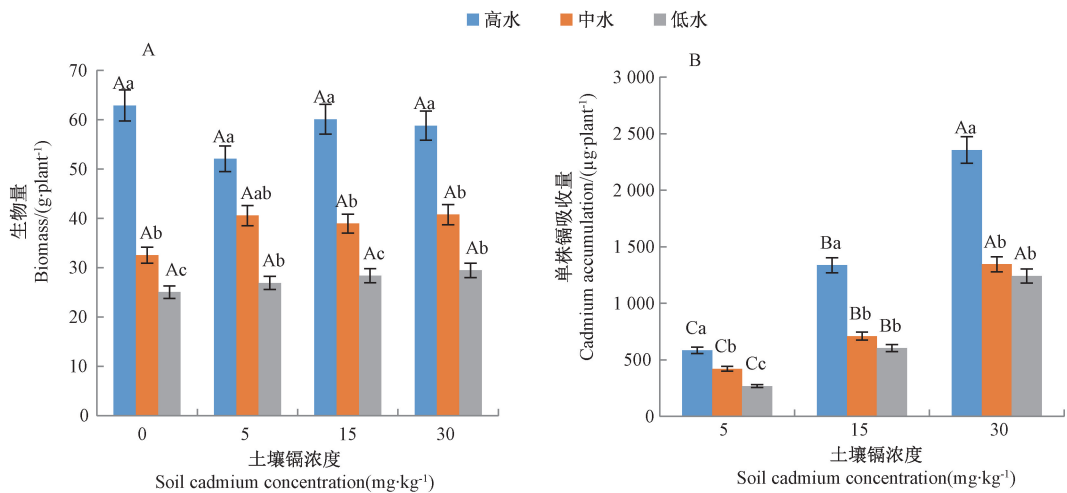
2 结果与分析

2.1 不同水 Cd 处理对油菜生物量及其 Cd 积累的影响

生物量是反映植物对重金属修复效果的重要因素。由图 1-A 可知,相同水分处理下,油菜生物量对不同土壤 Cd 的响应并不明显,且各处理间无显著性差异,表明 Cd 未对油菜产生毒害作用,同时也说明油菜对 Cd 具备较好的耐受性。土壤水分对油菜生物量的影响显著,且随着土壤水分的增加,油菜生物量显著提高;当 Cd 浓度为 $15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,不同土壤水分处理间均差异显著,与中水和低水处理相比,高水处理油菜生物量增幅分别为 93.3% 和 151.3%。结果表明,在一定的土壤 Cd 浓度范围内,增加土壤水分可以显著

增加油菜生物量。

由图 1-B 可知,Cd 浓度为 $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,随着土壤水分的增加,油菜单株吸 Cd 量分别为 268.58、421.29、584.41 μg ,且差异显著。Cd 浓度为 $30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,油菜单株吸 Cd 量达到最大,低水、中水、高水处理油菜单株吸 Cd 量分别为 1 242.96、1 345.93 和 2 356.72 μg 。比较不同水分处理下不同 Cd 浓度的油菜吸 Cd 量可知,土壤 Cd 浓度分别为 15、30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,低水、中水处理的油菜吸 Cd 量差异均不显著,而高水处理的吸 Cd 量显著增加,与中水、低水相比,分别增加 88.2%、121.1% 和 75.1%、89.6%。结果表明,土壤水分和 Cd 浓度对油菜吸 Cd 影响显著,且随着土壤水分和 Cd 浓度的增加,油菜对 Cd 的吸收量显著增加。



注: 图中数值为平均值 \pm 标准差。不同大写字母表示同一土壤水分不同 Cd 浓度下差异显著 ($P < 0.05$); 不同小写字母表示同一 Cd 浓度不同水分处理下差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Values are mean \pm SD. Different capital letters mean significant different at 0.05 level with the same soil water under different Cd concentration. Different lowercase letters mean significant difference at 0.05 level with the same Cd concentration under different water treatment

图 1 不同水分处理下不同 Cd 浓度对油菜生物量及其 Cd 积累的影响

Fig.1 Effect on biomass and Cd accumulation of oilseed rape with different Cd concentrations under different water treatments

2.2 不同水 Cd 处理下 Cd 在油菜植株中的分布

由图 2-A 可知,随着土壤 Cd 含量的增加,根的 Cd 含量显著增加,而相同土壤 Cd 浓度的不同水分处理下,油菜根部的 Cd 含量均无显著性差异,结果表明,土壤 Cd 浓度是影响油菜根部 Cd 富集量的主要原因。在 Cd 的吸收、转运与储藏过程中,茎是油菜吸收积累 Cd 的中间转运环节,而叶则是 Cd 的主要储存库。由图 2-B、C 可知,油菜茎、叶中 Cd 含量的富集规律基本一致。茎和叶中 Cd 含量均随着土壤水分和 Cd

浓度的增大而增加;Cd 浓度为 $30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,高水处理的茎和叶中 Cd 含量均达到最大,分别为 29.00 和 $61.35 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。不同 Cd 处理下,油菜茎和叶中 Cd 含量均差异显著,但受土壤水分的影响,其富集规律并不一致。高水、中水处理下,不同 Cd 浓度处理间差异显著;低水处理下,土壤 Cd 浓度为 15、30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,油菜茎器官中 Cd 含量均差异显著;土壤 Cd 浓度为 $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,土壤水分对油菜茎、叶中 Cd 含量影响明显,但差异不显著。随着土壤水分的增加,重金属

Cd 越易在油菜茎部和叶部积累。Cd 浓度为 15 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,高水与低水处理下的茎和叶中 Cd 含量差异显著;Cd 浓度为 30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,不同水分处理的茎和叶中 Cd 含量存在显著性差异。由图 2-D 可知,油菜角果壳中 Cd 含量随着土壤 Cd 浓度的增加而增大,且不同处理间存在差异;同-Cd 浓度处理不同水分处理间差异不显著。由图 2-E 可知,不同水分处理下,油菜籽粒中 Cd 含量均随着土壤 Cd 浓度的增大而增加。高水处理下,土壤 Cd 浓度为 30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,油菜籽粒

中 Cd 含量显著高于 15 和 15 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理,但各水分处理下差异均不显著。

研究表明,作物的不同器官之间因生长及功能不同,其结构与成分存在较大差异,从而导致器官间 Cd 积累的差异^[19]。土壤水分通过影响油菜植株水分运输,进而影响 Cd 从地下部部分到地上部分的运移,植株体内总体的分布依次为叶>茎或根>角果壳>籽粒。中、高水分条件下,茎中 Cd 含量大于根;低水条件下,根中 Cd 含量大于茎。

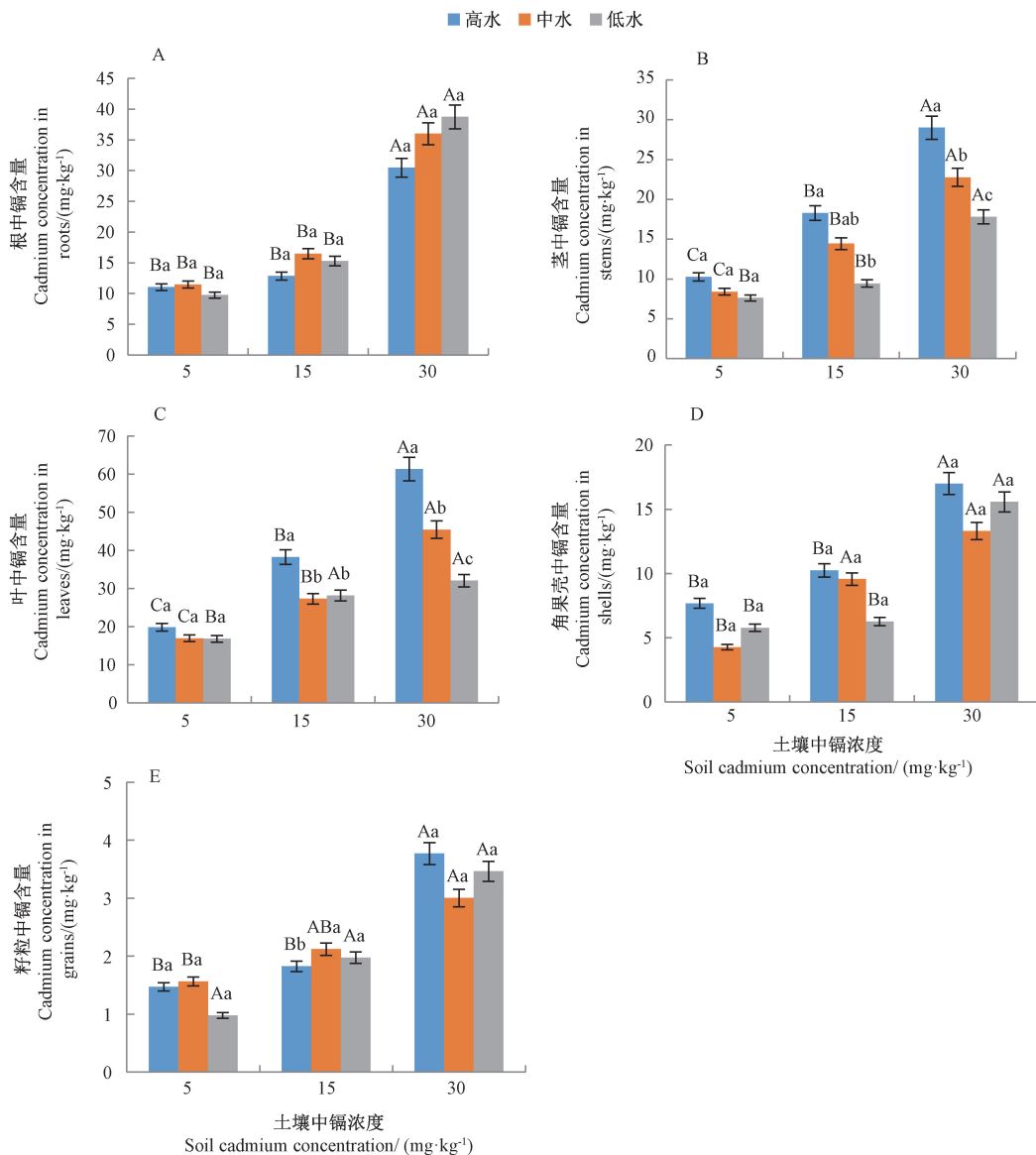


图 2 Cd 在油菜各器官的分布

Fig.2 Cd distribution in different organs of oilseed rape in different Cd concentrations under different water treatments

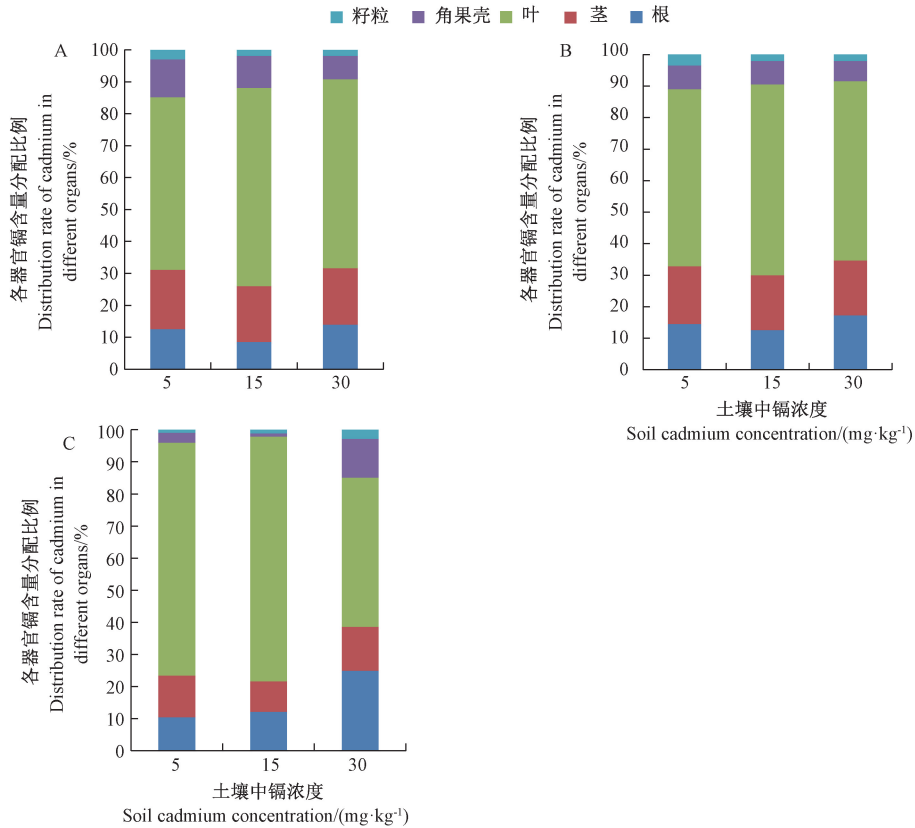
2.3 不同土壤含水量下油菜器官镉分配比例

由图 3 可知,不同水分条件不同 Cd 浓度处理下,以油菜叶中累积 Cd 量百分比最大,占油菜植株总吸

镉的 46.4%~72.6%,说明 Cd 优先在油菜叶中积累,这与 Patrick 等^[20]的研究结论相似。高水处理下,随着土壤中 Cd 浓度的增加,角果壳与籽粒中累积 Cd 量

百分比逐渐降低,而茎和根中累积镉量百分比则呈先下降后上升趋势(图 3-A)。中水处理下,各器官 Cd 含量分配比例与高水处理基本一致(图 3-B)。低水

处理下,叶中累积 Cd 含量百分比随着土壤中 Cd 浓度的增加而降低,而根中累积镉量百分比则相反,角果壳和籽粒积累镉含量百分比变化不明显(图 3-C)。



注: A:高水;B:中水;C:低水。

Note: A: High water content. B: Media water content. C: Low water content.

图 3 不同土壤水分下油菜各器官镉含量分配比例

Fig.3 Dsitribution proportion of cadmium in different organs of oilseed rape in different Cd concentration under different water treatments

2.4 富集系数和迁移系数

由表 1 可知,各处理的油菜富集系数与迁移系数均大于 1,说明油菜对 Cd 有较强的富集和转运能力。相同土壤 Cd 浓度下,不同水分处理的根部富集系数与地上部富集系数无显著性差异;不同水分处理下,根部富集系数对土壤 Cd 浓度的响应存在差异,其中高水处理的富集系数随着土壤 Cd 浓度的增加而逐渐下降;中水和低水处理的根部富集系数均随着土壤 Cd 浓度的增大呈先减小后增加的趋势;而相同水分条件下,地上部富集系数均随着土壤 Cd 浓度的增加而逐渐下降;与土壤 Cd 浓度为 5 mg·kg⁻¹处理相比,高水、中水处理下,土壤 Cd 浓度分别为 15 和 30 mg·kg⁻¹的地上部富集系数差异显著;低水处理下不同土壤 Cd 浓度处理的地上部富集系数无显著性差异。同一水分处理下,随着土壤 Cd 浓度的增加,迁移系数呈先增加

后减小趋势。而同一土壤 Cd 浓度下,迁移系数对土壤水分的响应规律则不明显。土壤 Cd 浓度为 15 mg·kg⁻¹时,不同水分处理的迁移系数均达到最大值,分别为 4.45、3.50、3.57,说明此土壤 Cd 浓度下油菜对 Cd 的迁移效率最佳。

2.5 移除潜力

由表 2 可知,同一水分处理下,随着土壤 Cd 浓度的增加,油菜对土壤中 Cd 的移除率呈逐渐减小趋势;土壤 Cd 浓度为 30 mg·kg⁻¹时,高水、中水和低水处理的 Cd 移除率较 Cd 浓度为 5 mg·kg⁻¹时分别降低了 48.7%、44.3%和 78.0%。受土壤水分和 Cd 浓度的影响,油菜移除潜力存在差异。高水、中水处理下,当土壤 Cd 浓度分别为 5 和 30 mg·kg⁻¹时,移除率差异显著;相同 Cd 浓度处理下,高水和中水处理的移除率差异显著;随着土壤 Cd 浓度的增加,高水处理的移除率

表1 不同水分条件不同 Cd 浓度处理下油菜富集系数和迁移系数

Table 1 BCF and of oilseed rape with different Cd concentration under different water treatments

| 镉浓度 Cadmium concentration /(mg·kg ⁻¹) | 根部富集系数 BCF of root | | | 地上部富集系数 BCF of upper | | | 迁移系数 TF | | |
|--|--------------------|--------|--------|----------------------|--------|--------|---------|--------|--------|
| | 高水 | 中水 | 低水 | 高水 | 中水 | 低水 | 高水 | 中水 | 低水 |
| 5 | 2.63aA | 2.79aA | 1.43aA | 2.20aA | 1.93aA | 1.98aA | 2.93aA | 2.38aA | 3.49aA |
| 15 | 1.18bA | 1.10bA | 1.02aA | 1.53bA | 1.25bA | 1.78aA | 4.45aA | 3.50aA | 3.57aA |
| 30 | 1.02bA | 1.20bA | 1.29aA | 1.37bA | 1.08bA | 1.22aA | 3.87aA | 2.56aA | 1.98aA |

分别为 1.17%、0.89% 和 0.79%，分别为中水处理的 1.80、1.90 和 1.75 倍。结果表明，随着土壤水分的降低和 Cd 浓度的增加，油菜对土壤 Cd 的移除率逐渐下降，以土壤 Cd 浓度为 5 mg·kg⁻¹ 的高水处理下移除效果最佳。

表2 不同水分条件不同 Cd 深度处理下油菜移除率

Table 2 Shoot extraction rate of oilseed rape with different Cd concentrations under different water treatments

| Cd 浓度 Cd concentration/(mg·kg ⁻¹) | water treatments | | | /% |
|--|------------------|----------|----------|----|
| | 高水 HW | 中水 MW | 低水 LW | |
| 5 | 1.17aA | 0.65aB | 0.74aB | |
| 15 | 0.89abA | 0.47bB | 0.48aB | |
| 30 | 0.79bA | 0.45bB | 0.41aB | |

3 讨论

土壤水分条件是控制土壤物理、化学及生物性质的重要因素，能够影响土壤 pH 值、氧化还原电位 (Eh)、有机质含量等，进而影响土壤重金属的活性^[21]。高茜蕾等^[22]研究表明，高蒸腾强度和发达根系均能促进油菜地上部 Cd 的累积量，且蒸腾速率、油菜根表面积、根体积均与油菜地上部 Cd 浓度、吸 Cd 总量呈显著正相关 ($P < 0.01$)。土壤 pH 值的增大会使土壤胶体上的负电荷量增加，促进土壤胶体对 Cd 的吸附，同时也会促进 CdCO₃ 和 Cd(OH)₂ 沉淀的生成^[23-24]，减少土壤溶液中 Cd 的释放，进而减少植物对 Cd 的吸收量，而土壤 pH 值的降低有利于碳酸盐和铁锰结合态等作物难利用态 Cd 的溶解和释放，从而促进植物对重金属的吸收^[25]。水淹环境下，兼性厌氧微生物和厌氧微生物将土壤中氧化物作为呼吸作用的电子受体，形成各种还原性物质，土壤 Eh 迅速下降^[26]，进而导致土壤 SO₄²⁻ 被还原为 S²⁻，而 S²⁻ 可将重金属结合为难溶的硫化物沉淀^[27]。而当土壤处于渍水状态

时，由于物理、化学及生物的还原作用，使得土壤中 Fe²⁺、Mn²⁺ 浓度急剧增加，在根系表面形成氧化物，并通过氧化物吸附土壤 Cd²⁺，使其失去迁移能力^[28]，进一步影响根系的吸收^[29]。此外，土壤水分还会影响有机质的腐殖质化过程，从而使羧基、烯醇羧基、醇羧基等土壤功能团形成有机 Cd 络合物，降低植物对 Cd 的吸收^[30]。

土壤水分充足环境下，一方面有利于 Cd 向土壤溶液中释放，使土壤溶液中有效 Cd 含量增加，另一方面植物根系代谢活动旺盛，有利于植物根系对土壤中 Cd 的吸收。研究表明，土壤 Cd 浓度是影响植物吸收 Cd 的主要因子，绝大多数植物体内的 Cd 浓度与土壤中 Cd 浓度呈显著正相关^[31]。本研究结果也进一步证实了上述观点。本研究中，土壤水分和 Cd 浓度对油菜 Cd 分布特征影响明显，随着土壤水分和 Cd 浓度的增加，油菜对 Cd 的吸收量也随之增大，且吸收量与 Cd 浓度呈显著正相关。土壤 Cd 浓度为 30 mg·kg⁻¹ 时，高水处理的单株 Cd 吸收量达到 2 356.72 μg。研究表明，根部吸收的 Cd 在根压和蒸腾作用下，经木质部薄壁细胞和导管向地上部转移和运输^[32]，但随着土壤水分的降低以及植株蒸腾作用的减弱，蒸腾拉力逐渐减小，Cd 向地上部的运输量减缓，促使 Cd 在油菜地下部积累。同一植物的不同部位，以及不同物种及品种间在 Cd²⁺ 积累量方面存在较大差异^[33]。这与本研究结果一致。本研究表明，随着土壤 Cd 浓度的增加，油菜器官的 Cd 累积量显著增加，植株体内总体的分布规律为叶 > 茎或根 > 角果壳 > 籽粒。植物对土壤 Cd 的移除潜力不仅取决于其吸收能力，还取决于土壤中的全 Cd 量和有效 Cd 量。本研究还发现不同水分条件下不同 Cd 浓度处理的油菜地上部吸 Cd 量占土壤总 Cd 量的 0.41% ~ 1.17%，可以有效减少土壤中有效 Cd 含量；与一些 Cd 超富集植物相比 (表 3)，油菜对土壤 Cd 的移除效果更好，具备一定的 Cd 污染土壤修复潜力。此外，由于盆栽试验的影响，油菜生物量 (25.03 ~ 62.9 g) 明显低于大田生物量 (约 100 g)，从而导致对土壤 Cd 的移除率低于大田。

表 3 Cd 超富集植物对土壤 Cd 的移除率

Table 3 Cd extraction rate of soil by hyperaccumulators

| Cd 超富集植物 Cd hyperaccumulators | 移除率 Extraction rate/% | 参考文献 References |
|---|--------------------------|--------------------|
| 印度芥菜 <i>Brassica juncea</i> L. | 0.09 | [34] |
| 天蓝遏蓝菜 <i>Thlaspi caerulescens</i> | 0.06 | [35] |
| 天蓝遏蓝菜 <i>T. caerulescens</i> | 0.3~4.1 | [36] |
| 龙葵花 <i>Solanum nigrum</i> 鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>) | 3~5 | [37-38] |
| 油菜 <i>Brassica napus</i> L. | 0.41~1.17 | |

综上,油菜对 Cd 具有较强的耐受能力,土壤 Cd 浓度为 $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下也可以顺利生长,生物量自然积累;同时,油菜对 Cd 有较强的吸收能力,地上部 Cd 含量高于地下部,更易于机械化收割;与一些 Cd 超富集植物相比,移除率更高。因此,油菜是重金属 Cd 污染修复较理想的植物。

4 结论

本研究结果表明,油菜对 Cd 具有较强的耐受能力,可以在较高的 Cd 污染环境 中生长。增加土壤 Cd 浓度与水分含量能够显著增强油菜吸 Cd 能力。土壤水分通过影响油菜植株水分运输进而影响 Cd 运移,提高土壤水分可促进 Cd 向油菜地上部迁移,更易于机械化收割。油菜对土壤 Cd 的移除效果明显高于报道较多的其他 Cd 超富集植物,具备修复 Cd 污染土壤的潜力。本研究结果为利用油菜进行重金属土壤综合治理奠定了理论基础。

参考文献:

[1] Sundaramoorthy P, Nagarajan M. Organic soil amendments: potential source for heavy metal accumulation[J]. World Scientific News, 2015:28-39

[2] 贾永霞,张春梅,方继宇,李弦,张世熔,徐小逊,蒲玉琳,李婷,李云. 细叶百日草对 Cd 的生长响应及富集特征研究[J]. 核农学报, 2015, 29(8):1577-1582

[3] 田效琴,李卓,刘永红. 成都平原农田 Cd 污染情况及油菜 Cd 吸收特征[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(3):496-506

[4] 樊霆,叶文玲,陈海燕,鲁红娟,张颖慧,李定心,唐子阳,马友华. 农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J]. 环境科学学报, 2013, 22(10):1727-1736

[5] 李良忠,杨彦,蔡慧敏,向明灯,张艳平,高丹丹,李定龙. 太湖流域某农业活动区农田土壤重金属污染的风险评价[J]. 中国环境科学, 2013, 33(S1):60-65

[6] 韦绪好,孙庆业,程建华,窦智勇,王琛. 焦岗湖流域农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 农业环境科学学报,

2015, 34(12):2304-2311

[7] 董袁媛,孙竹,杨洋,徐小逊,张世熔,杨懿德,张雨豪,霍庆霖,邓玉兰. Cd 胁迫对黄麻光合作用及 Cd 积累的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(8):1640-1646

[8] Rafiq M T, Aziz R, Yang X E, Xiao W D. Cadmium phytoavailability to rice (*Oryza sativa* L.) grown in representative Chinese soils. A model to improve soil environmental quality guidelines for food safety[J]. Ecotoxicology & Environmental Safety, 2014, 103(1):101-107

[9] Neilson S, Rajakaruna N. Phytoremediation of agricultural soils: using plants to clean metal-contaminated arable land [J]. Phytoremediation, 2015, 11:159-168

[10] Hart J J, Welch R M, Norvell W A, Clarke J M, Kochian L V. Zinc effects on cadmium accumulation and partitioning in near-isogenic lines of durum wheat that differ in grain cadmium concentration[J]. New Phytologist, 2006, 172(2):261-271

[11] Yang Y, Li H L, Peng L, Chen Z P, Zeng Q R. Assessment of Pb and Cd in seed oils and meals and methodology of their extraction[J]. Food Chemistry, 2016, 197:482-488

[12] Pineros M A, Shaff J E, Kochian L V. Development, characterization and application of a cadmium-selective microelectrode for the measurement of cadmium fluxes in roots of *Thlaspi* species and wheat [J]. Plant Physiology, 1998, 116(4):1393-1401

[13] Hart J J, Welch R M, Norvell W A, Sullivan L A, Kochian L V. Characterization of cadmium binding, uptake, and translocation in intact seedling of bread and durum wheat cultivars [J]. Plant Physiology, 1998, 118(1):1413-1420

[14] 中国环境监测总站. GB/T 17141-1997 土壤质量铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法[S]. 北京:中国标准出版社, 1997

[15] 农业部环境保护科研检测所. GB/T 23739-2009 土壤质量有效态铅、镉的测定 原子吸收法[S]. 北京:中国标准出版社, 2009

[16] 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.15-2014 食品安全国家标准 食品中镉的测定[S]. 北京:中国标准出版社, 2014

[17] 中国林业科学研究院林业研究所森林土壤研究室. LY/T 1239-1999 森林土壤 pH 值的测定[S]. 北京:中国标准出版社, 1999

[18] Chen H, Zheng C R, Wang S, Cong T U. Combined pollution index of heavy metals in red soil[J]. Pedosphere an International Journal, 2000, 10(2):117-124

[19] Florijn P J, Van Beusichem M L. Uptake and distribution of cadmium in maize inbred lines[J]. Plant Soil, 1993, 150(1):25-32

[20] Patrick C, Aurore B, Michel H. . Cadmium distribution and microlocalization in oilseed rape (*Brassic napus*) after long-term growth on cadmium-contaminated soil[J]. Planta, 2003, 216(6):939-950

[21] 曾成城,陈锦平,马文超,刘媛,贾中民,魏虹,王婷. 水淹生境下秋华柳对 Cd 污染土壤的修复能力[J]. 生态学报, 2016, 36(13):3978-3986

[22] 高茜茜,郑瑞伦,李花粉. 蒸腾作用及根系特征对不同品种油菜吸收 Cd 的影响[J]. 生态学杂志, 2010, 29(9):1794-1798

[23] Bolan N S, Adriano D C, Mani P A. Immobilization and

- phytoavailability of cadmium in variable charge soils. II. Effect of lime addition [J]. *Plant and Soil*, 2003, 251(2):187-198
- [24] 刘广深, 许中坚, 周根娣, 刘维屏. 模拟酸雨作用下红壤 Cd 释放的研究 [J]. *中国环境科学*, 2004, 24(4):419-423
- [25] Lin C, Lin J. Heavy metals in a sulfidic minespoil: fractions and column leaching[J]. *Pedosphere*, 2003, 13(1):75-80
- [26] Pezeshki S R, DeLaune R D. Soil oxidation-reduction in wetlands and its impact on plant functioning[J]. *Biology*, 2012, 1(2):196-221
- [27] 郑顺安, 郑向群, 张铁亮, 刘书田. 水分条件紫色土中铅形态分布特征及影响因素[J]. *环境化学*, 2011, 30(12):2080-2085
- [28] Mendoza-Cozatl D G, Jobe T O, Hauser F, Schroeder J I. Long-distance transport, vacuolar sequestration, tolerance, and transcriptional responses induced by cadmium and arsenic [J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2011, 14(5):554-562
- [29] Otte M L. Heavy Metal and Arsenic in Vegetation of Salt Marshes and Flood Plains [D]. Amsterdam: Vrije University, 1991
- [30] Deinlein U, Weber M, Schmidt H, Rensch S, Trampczynska A, Hansen T H, Husted S, Schjoerring J K, Talke I N, Kramer U. Elevated nicotianamine levels in *Arabidopsis halleri* roots play a key role in zinc hyperaccumulation[J]. *The Plant Cell*, 2012, 24(2):708-723
- [31] 陈飞. 大麦 Cd 吸收与运转机制的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2009
- [32] Kobayashi N I, Tanoi K, Hirose A, Nakanishi T M. Characterization of rapid intervascular transport of cadmium in rice stem by radioisotope imaging[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2013, 64(2):507-517
- [33] Jalil A, Selles F, Clarke J M. Effect of cadmium on growth and the uptake of cadmium and zinc in relation to other elements by durum wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1994, 17(11):1839-1858
- [34] Leitenmaier B, Küpper H. Cadmium uptake and sequestration kinetics in individual leaf cell protoplasts of the Cd/Zn hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* [J]. *Plant Cell Environ*, 2011, 34(2):208-219
- [35] Goswami S, Das S. A study on cadmium phytoremediation potential of Indian mustard, *Brassica juncea* [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2015, 17(6):583-588
- [36] Mc G S P, Lombi E, Gray C W, Caille N, Dunham S J, Zhao F J. Field evaluation of Cd and Zn phytoextraction potential by the hyperaccumulators *Thlaspi caerulescens* and *Arabidopsis halleri* [J]. *Environmental Pollution*, 2006, 141(1):115-125
- [37] Solís-Domínguez F A, González-Chávez M C, Carrillo-González R, Rodríguez-Vázquez R. Accumulation and localization of cadmium in *Echinochloa polystachya* grown within a hydroponic system [J]. *J Hazard Mater*, 2007, 141(3):630-636
- [38] Sun Y, Zhou Q, Wang L, Liu W. Cadmium tolerance and accumulation characteristics of *Bidens pilosa* L. as a potential Cd hyperaccumulator[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 161(2/3):808-814

Effect of Soil Water and Cadmium Content on Distribution Characteristics of Cadmium in Oilseed Rape

SHI Xinjie² LI Zhuo^{1,3,*} ZHUANG Wenhua^{2,3} LIU Chao²

(¹ Crop Research Institute of Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu, Sichuan 610066; ² State Key Laboratory of Hydraulic and Mountain River Engineering/College of Hydraulic and Hydroelectric Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065; ³ Key Laboratory of Water Saving Agriculture in Hill Areas in Southern China of Sichuan Province, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu, Sichuan 610066)

Abstract: To explore the feasibility of oilseed rape as a repair plant of Cd polluted farmland, effects of Cd with different concentrations and water contents were studied through pot test. Three levels of soil moisture and four levels of soil cadmium content experiments were set to find out the law of absorption and accumulation ability of cadmium by oilseed rape. The absorbing capacity improved with the increasing water content and cadmium concentration; cadmium content varied a lot in different parts of the oilseed rape, with the above-ground parts absorbing 0.41% ~ 1.17% of the total cadmium applied in the soil and leaves absorbing 46.4% ~ 72.6% of the total volume. Under different water conditions, the increasing of Cd in different parts of the oilseed rape's amount of enrichment varied a lot. When the soil moisture levels were high and medium, amount of cadmium in enrichment followed the order of leaf > stem > root > shell > seed, while under low soil moisture level, it ranked as leaf > root > stem > shell > seed. In conclusion, oilseed rape had a great ability of Cd absorption, but cadmium ion was insoluble in rapeseed oil, which showed that oilseed rape can not only take up cadmium from soil, but also had no effect on edible quality of the rapeseed oil. Thus, oilseed rape is an ideal plant for Cd-contaminated farmland remediation. This study provides a theoretical foundation for the soil contaminated by heavy metals with oilseed rape.

Keywords: soil moisture, Cd, oilseed rape, distribution