

油菜-海州香薷轮作修复铜镉复合污染土壤:大田试验

朱俊艳, 于玲玲, 黄青青, 江荣风, 李花粉, 苏德纯*

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要:通过高积累镉油菜与高积累铜植物海州香薷轮作的田间试验,研究了铜镉复合污染土壤上植物轮作对重金属的吸收累积规律以及修复效率。结果发现:在铜镉复合污染土壤上,油菜-海州香薷轮作体系中,油菜地上部的生物量达到 $7.67 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,籽粒产量 $1.59 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,但是籽粒中镉和铜含量超过标准限值 90% 和 33%。油菜-海州香薷轮作体系,植物地上部吸收积累的镉和铜总量分别为 $35.16 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $400.68 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中油菜对镉积累的贡献占 83%,海州香薷对铜积累的贡献占 73%。轮作体系中植物对镉和铜的提取效率分别为 0.2% 和 0.07%。研究结果表明,油菜与海州香薷轮作不适用于该铜镉重度复合污染土壤,不仅油菜籽粒达不到食品卫生标准的要求,而且土壤修复的年限比较长。

关键词:铜镉复合污染;油菜;海州香薷;植物修复;轮作

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)06-1166-06 doi:10.11654/jaes.2013.06.012

Application of Rotation System of *Brassica Juncea* and *Elsholtzia Splendens* to Remediate Copper and Cadmium-Contaminated Soil: A Field Trial

ZHU Jun-yan, YU Ling-ling, HUANG Qing-qing, JIANG Rong-feng, LI Hua-fen, SU De-chun*

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Soil contamination with heavy metal has become an important issue that affects public health. So there is an urgent requirement for selecting appropriate technologies to solve food safety problems due to soil contamination. In this study, a field experiment was performed to study the accumulation and remediation efficiency of heavy metals in the rotation system of *Brassica juncea* and *Elsholtzia splendens* on a heavy metal-contaminated field. The results showed that the straw biomass of the oilseed rape reached $7.67 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ and the seed yield was $1.59 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. The concentrations of Cd and Cu in the seed were 90% and 33% higher than the permissible limits, respectively. In the rotation system of *Brassica juncea* and *Elsholtzia splendens*, the total uptake of Cd and Cu by shoots were $35.16 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $400.68 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively, in which *Brassica juncea* accounted for 83% of the total Cd uptake and *Elsholtzia splendens* accounted for 73%. The remediation efficiency was 0.2% for Cd and only 0.07% for Cu. These results indicated that the rotation of *Brassica juncea* and *Elsholtzia splendens* was not suitable for the highly copper and cadmium-contaminated soil. Not only the quality of the harvested seed does not meet the requirements of food hygiene standards, but also it will take a long time to remediate the polluted soil through the phytoremediation.

Keywords: combined pollution of cadmium and copper; oilseed rape; *Elsholtzia splendens*; phytoremediation; rotation

随着工农业的发展,土壤重金属污染日趋严重,尤其是工业区和矿区附近农田,重金属污染问题已经十分严峻^[1-3]。重金属污染以多种元素共存所造成的复合污染为主要表现形式,而且元素之间存在联合作用,从而产生复杂的生态环境效应^[4-6]。超积累植物修

复因具有经济性、环境友好性和能保持土壤生产力等优点,为土壤修复开辟了新的途径,成为近年来国内外重金属污染修复研究的热点^[7-11]。最早发现于铜矿区的“铜草”海州香薷在国内铜污染土壤的研究中广泛应用,已从实验室的生理生化反应研究^[12-13],进展到土壤污染修复研究及示范技术推广阶段^[14-15]。作物间轮作、间套作具有充分利用光、热、水、土资源的特点,是我国传统农业的精髓之一,在现代农业中占有重要的地位。选择适当的植物形成植物互作复合体系,利用不同植物特性提高植物对土壤重金属的强吸收和积累能力,从而提高修复效率^[16-17]。十字花科芸薹

收稿日期:2012-11-01

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(200903015);国家自然科学基金项目(40971261);国家 863 重点项目(2007AA061001)

作者简介:朱俊艳(1987—),女,硕士,主要从事污染治理与资源再利用方面的研究。E-mail: zhujunyan0220@126.com

* 通信作者:苏德纯 E-mail: dcsu@cau.edu.cn

属的油菜也是吸收累积镉能力较强的一类作物,有些油菜品种有较强的吸收累积镉能力,具有用来修复镉污染土壤的能力^[18-21]。然而,超积累植物往往只对一种重金属有很强的富集能力,单一的生物修复手段对复合污染的修复效果并不明显。目前,将各种修复技术合理地结合已成为现阶段修复复合污染土壤的研究热点之一,其中植物-微生物联合修复技术、植物间套作,已成为土壤污染修复的新方向。

本文利用不同植物生长季节的差异,通过高积累镉的油菜与高积累铜的海州香薷轮作,探讨通过两种不同累积特性的高积累植物轮作修复重金属复合污染土壤的效果,研究前茬植物对土壤中重金属的活化,以及对后茬植物吸收重金属的影响,为农田复合污染土壤的植物修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地与试验材料

试验地点位于浙江省杭州郊区(29°57.189'N, 119°55.523'E,海拔高度 11.0 m),土壤的理化性质如下:土壤 pH7.58(水土比 1:2.5),土壤有机质含量 32.31 g·kg⁻¹,总氮含量 2.06 g·kg⁻¹,速效磷含量 13.99 mg·kg⁻¹,速效钾含量 49.94 mg·kg⁻¹,全镉含量 7.75 mg·kg⁻¹,全铜含量 262 mg·kg⁻¹。对照国家《土壤环境质量标准(GB 15618—1995)》二级限量值(pH>7.5)镉为 0.6 mg·kg⁻¹,铜为 100 mg·kg⁻¹,该试验地土壤全 Cd 含量超出标准限值 12 倍,全铜含量超出标准限值的 1.62 倍。该地的污染源主要为周围作坊式小铜矿的粉尘。

第一茬供试作物为高积累镉油菜(*Brassica juncea* L.),本课题组通过苗期土培试验筛选出的高积累镉油菜品种川油 II-10^[22];第二茬为高积累铜植物海州香薷(*Elsholtzia splendens*),海州香薷由中国科学院南京土壤研究所提供。高积累植物对于重金属的吸收累积达不到超积累植物的标准,但是其对重金属的吸收比一般的植物高。由于油菜和海州香薷自身的生长特性,其生长季节在该地区可以错开,可以实现一年种植两种植物。

1.2 试验设置与样品采集

田间试验共 6 个小区,小区面积为 3 m×3 m。油菜于 10 月份播种育苗,11 月份移栽至小区内,每小区种植油菜 144 株。6 个试验小区均种植油菜川油 II-10,于盛花时收获 3 个小区,5 月份成熟时收获 3 个小区,期间按照当地油菜正常所需进行田间管理。油菜收获

后,第二茬种植海州香薷,由于 6 月份降水很多,海州香薷于 8 月份移栽,株间距为 45 cm×45 cm,12 月份收获。

油菜分别在初花期(3 月 10 日)、盛花期(3 月 25 日)、成熟期(5 月 11 日)进行采样。其中初花期每小区随机采集 5 株植物样,测定地上部的鲜重,用自来水与去离子水洗净后于 105℃杀青 0.5 h,在 65℃下烘干,称干重,植物样用粉碎机进行粉碎,保存待测。盛花期每小区采集 5 株植物样,并收获 3 个小区,样品洗净烘干,粉碎后待测。成熟期每小区采集 6 株植物样,将植物样品分为荚、秸秆、地下部,称鲜重。取回后洗净烘干,将籽粒与荚分离,秸秆粉碎待测。海州香薷收获后,每小区采集 5 株样品,分为地上部与地下部,与油菜处理方法相同,洗净烘干粉碎待测。

土壤每小区按 S 型选取 5 个点,采集 0~20 cm 的表层土壤后混合,四分法取一半带回实验室。将植物根系上附着的少量土壤抖落,作为根际土。土样采回后平铺风干 3 d,风干后研磨过 1 mm 筛备用。

1.3 测定项目和方法

土壤 pH:称取新鲜风干土样 10 g,加入无二氧化碳蒸馏水 25 mL,轻轻摇动使水土充分混合均匀,搅拌 1 min,放置 30 min,pH-HJ90 型酸度计测定。

DTPA 提取态 Cd 和 Cu:称取过 1 mm 筛的风干土壤 5.00 g 放入 100 mL 塑料瓶中,加入 DTPA 提取剂(pH7.30 的 0.005 mol·L⁻¹ DTPA + 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂ + 0.1 mol·L⁻¹ TEA 溶液)25.0 mL,放入振荡机中,以 180 r·min⁻¹ 的转速在室温(25℃)下振荡 2 h,滤纸过滤,最初滤液 2~3 mL 弃去。将过滤得到的滤液分别用火焰-原子吸收分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司 GF-990)测定镉、铜的含量。

植物样镉和铜含量:称取 0.250 0 g 左右植物样品,采用 HNO₃-H₂O₂ 密闭式微波消解法(美国 CEM 公司,MARS5)消解。消解液用石墨炉-原子吸收分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司 GF-990)和火焰-原子吸收分光光度计分别测定滤液中镉和铜的含量。在整个测定过程中植物样品采用西红柿叶子(GSBZ5 1001-94-ESP-1),进行全程质量控制。标准物质测定回收率在 90%~105%之间。

1.4 数据处理

油菜、海州香薷产量计算方法:在小区中随机采集 5 株样品,称重后计算单株植株重,产量=(单株重×小区总株数)/小区面积;植物吸收重金属的量=植物重金属含量×植物的生物量;重金属提取效率=植物吸

收重金属的量÷(土壤重金属含量×土壤质量)×100%。土壤质量计算按照耕层厚度为 20 cm, 由于土壤容重受土壤内部因素影响较大, 本研究中土壤容重按照一般土壤适合松紧程度取值为 $1.15 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

采用 Microsoft Excel 和 SPSS11.0 数据分析软件进行方差分析和多重比较。

2 结果与讨论

2.1 油菜和海州香薷的生物量

表 1 为油菜-海州香薷轮作体系植物地上部分生物量的变化。可以看出, 油菜地上部分生物量随着生长而增长, 在成熟时达到 $7.67 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 油菜籽粒产量为 $1.59 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 比正常水平偏低。前茬油菜成熟收获后种植的海州香薷地上部干重达到 $2.64 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 前茬油菜盛花收获后种植的海州香薷地上部干重为 $2.03 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 虽然两个试验处理收获的海州香薷生物量有差异, 但是差异性不显著 ($P>0.05$)。

表 1 油菜各时期地上部生物量和前茬不同处理海州香薷生物量
Table 1 Shoot biomass of oilseed rape at different growth stages and *Elsholtzia splendens* as affected by the previous planting of oilseed rape

油菜生长时期/前茬处理	初花	盛花收获	成熟收获
油菜地上部干重/ $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$	$3.00 \pm 0.70\text{b}$	$4.62 \pm 1.56\text{b}$	$7.67 \pm 1.24\text{a}$
油菜籽粒产量/ $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$	—	—	1.59 ± 0.33
海州香薷地上部干重/ $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$	—	$2.03 \pm 0.43\text{a}$	$2.64 \pm 0.54\text{a}$

注: 表中数据为平均值±标准偏差, 同一行不同字母表示不同时期间差异显著 ($P<0.05$)。

2.2 油菜和海州香薷对铜、镉的吸收和积累作用

表 2 为高积累镉油菜品种川油 II-10 各时期地上部分重金属含量及吸收量。各时期地上、地下部的镉含量差异均不显著。地上部分铜含量在成熟时比初花时和盛花时有显著降低, 比初花期降低了 46%, 地

表 2 油菜各时期重金属含量及吸收量

Table 2 Heavy metal concentrations and uptake of oilseed rape at different growth stages

生长时期	初花	盛花	成熟
地上部吸镉量/ $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$	$14.44 \pm 4.39\text{a}$	$24.30 \pm 13.60\text{a}$	$29.26 \pm 12.90\text{a}$
地上部吸铜量/ $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$	$49.77 \pm 8.62\text{a}$	$97.44 \pm 46.38\text{a}$	$108.83 \pm 17.46\text{a}$
镉含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$			
地上部	$4.76 \pm 0.50\text{a}$	$5.06 \pm 1.51\text{a}$	$4.99 \pm 1.96\text{a}$
地下部	$4.61 \pm 1.01\text{a}$	$4.40 \pm 1.43\text{a}$	$3.09 \pm 0.79\text{a}$
铜含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$			
地上部	$16.93 \pm 2.74\text{a}$	$20.60 \pm 4.47\text{a}$	$9.07 \pm 2.08\text{b}$
地下部	$29.77 \pm 7.64\text{a}$	$23.51 \pm 3.15\text{a}$	$20.41 \pm 9.00\text{a}$

注: 表中数据为平均值±标准偏差, 同一行不同字母表示不同时期间差异显著 ($P<0.05$)。

下部分铜含量差异也不显著, 但随着生长时间的增长而逐渐降低, 成熟时比初花期降低了 31%, 说明油菜在生长后期吸收铜的速度有所降低。油菜生长各时期地上部吸镉量差异不显著, 但随着油菜生长而增大, 成熟时地上部分吸镉量达到 $29.26 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。地上部吸铜量与吸镉量情况相似, 随生长时间增长有所增加, 成熟时达到 $108.83 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

表 3 为油菜籽粒中重金属含量。籽粒中镉含量为 $0.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 超出标准值近一倍 (GB 2762—2005 食品中污染物限量)。籽粒中铜的含量也超出标准值 33% (GB 15199—1994 食品中铜限量卫生标准)。籽粒中重金属含量与荚中含量之比表示重金属从荚到籽粒中的迁移累积能力, 镉的籽荚比为 0.11, 而铜的籽荚比为 0.44, 表明铜比镉更容易从油菜荚中累积到籽粒中。

表 3 油菜籽粒产量与重金属含量
Table 3 Heavy metal concentrations of rapeseed

荚镉含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	籽粒镉含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	荚铜含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	籽粒铜含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
3.38 ± 0.75	0.38 ± 0.13	30.58 ± 5.84	13.32 ± 5.84

表 4 为油菜-海州香薷轮作体系海州香薷地上部分重金属含量变化。前茬不同处理海州香薷地上部分镉和铜的含量虽然差异不显著, 但是油菜成熟收获后种植的海州香薷镉含量比盛花时收获后种植的海州香薷的镉含量高 9.5%, 而铜含量却低 7.4%。前茬油菜成熟收获后种植的海州香薷比前茬盛花时收获后种植的海州香薷地下部镉含量低 23%, 铜含量低 29%。

表 4 前茬不同处理对海州香薷铜镉含量的影响

Table 4 Heavy metal concentrations of *Elsholtzia splendens* as affected by the previous planting of oilseed rape

前茬处理	铜含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$		镉含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	
	地上部	地下部	地上部	地下部
油菜盛花收获	$116.85 \pm 12.74\text{a}$	$255.34 \pm 129.48\text{a}$	$2.00 \pm 0.52\text{a}$	$4.11 \pm 1.34\text{a}$
油菜成熟收获	$108.21 \pm 16.56\text{a}$	$181.78 \pm 53.14\text{a}$	$2.19 \pm 0.44\text{a}$	$3.15 \pm 1.03\text{a}$

注: 表中数据为平均值±标准偏差, 同一列相同字母表示不同处理间差异不显著 ($P>0.05$)。

图 1 为轮作体系植物地上部从土壤中带走的重金属总量, 其中(a)为带走的镉量, (b)为带走的铜总量。油菜成熟收获-海州香薷体系地上部带走的镉总量为 $35.16 \text{ g} \cdot \text{ha}^{-1}$, 其中油菜带走镉的量占 83%, 该体系上茬油菜与下茬海州香薷吸收镉的总量比油菜盛花收获-海州香薷体系高 24%。从图 1(b)可以看出, 对铜的吸收主要取决于海州香薷。前茬油菜的收获时

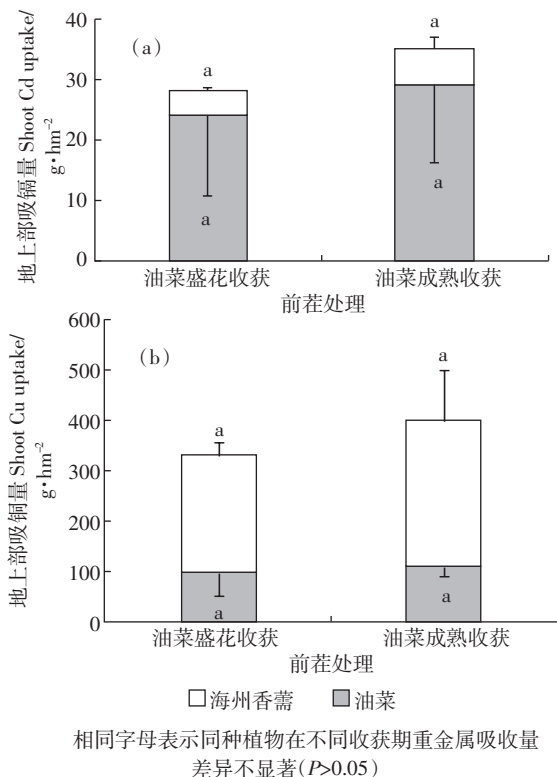


图1 油菜-海州香薷轮作体系植物对镉(a)和铜(b)的吸收量
Figure 1 Cd and Cu uptake by oilseed rape and *Elsholtzia splendens*

间对油菜地上部分吸铜量影响不大,但油菜成熟收获再种植海州香薷的处理,从土壤中吸收铜的总量为 $400.68\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$,比前茬盛花时收获处理的轮作体系吸铜量高21%,其中海州香薷吸铜量占73%。在油菜成熟收获-海州香薷轮作体系中,植物镉的提取效率为0.2%,铜的提取效率仅为0.07%。

2.3 土壤重金属有效含量和pH的变化

表5为油菜各生长期土壤pH值、DTPA提取态重金属的变化。初花时,油菜非根际土pH小于根际土pH,随着油菜生长,非根际土pH值逐渐升高,根际土pH值逐渐降低,成熟期根际土pH值小于非根际土,但是各时期pH的变化并不显著。

随着油菜的生长,土壤中根际土DTPA提取态镉含量先升高后降低,土壤中非根际土DTPA提取态镉含量逐渐降低。油菜成熟时,根际土中的DTPA提取态镉比初花时上升3.6%,而非根际土DTPA提取态镉较成熟时下降了13.6%。各时期根际土镉含量均高于非根际土,尤其是油菜成熟时,根际土DTPA提取态镉是非根际土的1.29倍。

土壤中DTPA提取态铜也随着油菜生长先升高后降低,在油菜成熟时,根际土DTPA提取态铜比初

表5 油菜各生长期土壤pH、有效态重金属含量变化
Table 5 Changes of soil pH and DTPA-extractable heavy metals at different growth stages of oilseed rape

生长时期		初花	盛花	成熟
DTPA 态镉/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	根际	$3.65\pm0.77\text{a}$	$3.91\pm0.07\text{a}$	$3.78\pm1.21\text{a}$
	非根际	$3.38\pm0.74\text{a}$	$3.20\pm0.19\text{a}$	$2.92\pm0.92\text{a}$
DTPA 态铜/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	根际	$57.03\pm8.94\text{b}$	$74.09\pm3.0\text{a}$	$60.36\pm2.20\text{b}$
	非根际	$62.88\pm8.32\text{a}$	$70.55\pm8.45\text{a}$	$52.89\pm5.96\text{a}$
pH 值	根际	$7.82\pm0.25\text{a}$	$7.72\pm0.14\text{a}$	$7.66\pm0.06\text{a}$
	非根际	$7.68\pm0.12\text{a}$	$7.80\pm0.06\text{a}$	$7.84\pm0.09\text{a}$

注:表中数据为平均值±标准偏差,同一行不同字母表示不同时期间差异显著($P<0.05$)。

花时升高5.8%,而非根际土的DTPA提取态铜则较初花时降低了15.9%。与初花时相反,成熟时根际土DTPA提取态铜高于非根际土。

表6所示为海州香薷收获后土壤中DTPA提取态重金属和pH值的变化。根际土壤的pH比非根际的要低,但是差异不显著;前茬油菜不同时期收获对后茬土壤中pH没有显著影响。前茬油菜收获后,油菜吸收了土壤中大量镉,使土壤中DTPA提取态镉降低;同时油菜随着生长时间的增长,在成熟时吸收了更多的镉和铜,前茬油菜成熟时收获种植海州香薷的土壤中DTPA提取态镉比前茬油菜盛花时收获的土壤中DTPA提取态镉低35%,DTPA提取态铜低8.4%。

随着油菜的生长,油菜吸收大量的铜,使DTPA提取态铜降低。海州香薷地上部吸收了大量的铜,但土壤中DTPA提取态铜仍然升高,显示海州香薷对土壤中铜起活化作用。

3 讨论

工农业的发展使土壤重金属的复合污染日趋严重,而超积累植物往往只是对某种单一的元素具有超

表6 海州香薷收获后土壤pH、有效态重金属含量变化
Table 6 Changes of soil pH and DTPA-extractable heavy metals after harvest of *Elsholtzia splendens*

生长时期		盛花收获	成熟收获
DTPA 态镉/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	根际	$3.45\pm0.81\text{a}$	$2.25\pm0.67\text{a}$
	非根际	$2.99\pm1.36\text{a}$	$1.83\pm0.48\text{a}$
DTPA 态铜/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	根际	$77.85\pm28.56\text{a}$	$71.31\pm8.40\text{a}$
	非根际	$61.71\pm13.94\text{a}$	$40.1\pm8.50\text{b}$
pH 值	根际	$7.98\pm0.16\text{a}$	$7.79\pm0.10\text{a}$
	非根际	$8.22\pm0.05\text{a}$	$8.16\pm0.17\text{a}$

注:表中数据为平均值±标准偏差,同一列相同字母表示根际和非根际差异不显著($P>0.05$)。

富集特性,因此本试验通过两种高积累植物的轮作来探讨对土壤中镉和铜的吸收与修复效率。虽然油菜的镉含量和海州香薷的铜含量未达到超积累植物镉 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和铜 $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的参考值^[23],但其重金属含量表现出比一般植物的背景含量高,油菜中镉的含量高于海州香薷,而海州香薷中铜的含量明显高于油菜。从矿区的调查结果看,很多情况下海州香薷铜的含量达不到 $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[24-27],这与本试验田间的结果一致。在田间条件下,油菜还是表现出对镉比较高的吸收,而海州香薷则表现出对铜的高吸收,这与盆栽试验的结果是一致的^[22]。如果按照油菜成熟收获-海州香薷轮作体系中,植物镉的提取效率每年 0.2%,铜的提取效率 0.07%来计算,通过植物修复使土壤中重金属含量达到我国土壤环境质量二级标准,至少需要上千年。一般情况下,田间的修复效率比盆栽试验的低很多,在盆栽条件下,土壤中添加 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 镉时,油菜川油 II-10 对镉的提取率为 1.2%^[22]。超积累植物对重金属污染土壤的修复效率,除了与植物的重金属含量和生物量有关外,还与土壤中的重金属含量有关,重金属含量较高,修复效率则相应较低,因此各试验研究中报道的修复效率也很不一致^[28]。McGrath 等^[10]于 1998 年至 2004 年在英国 Bedfordshire 进行的田间试验研究结果表明,遏蓝菜种植时间为 3~14 个月,遏蓝菜对镉的提取效率为 1.0%~8.7%,遏蓝菜对镉的提取效率随着种植时间的延长而增加。吴启堂等^[30]的田间试验结果表明,东南景天的种植时间约为 4 个月,东南景天对镉的修复效率可达到 1%左右。

土壤中重金属的毒性及其植物有效性不仅与其总量有关,更大程度上取决于重金属的存在形态,影响重金属赋存形态的因素较多,其中土壤 pH 是影响土壤中镉有效性的主要因素之一^[30]。在油菜的开花和成熟期,土壤根际 DTPA 提取态的镉含量略高于非根际,在成熟期差异比较明显,但是 DTPA 提取态的铜含量没有显著性差异(表 5);在盛花和成熟期根际与非根际的 pH、DTPA 提取态的重金属含量表现出的差异越来越明显,说明在盛花期油菜的根系比较活跃,植物根系的分泌物对根际 pH 有一定的影响,同时根系的分泌过程对于土壤中难溶性的重金属有一定的活化作用。而油菜收获后种植海州香薷,根际重金属的变化与油菜相同(表 6),海州香薷根际与非根际 DTPA 提取态铜的差异要高于镉的差异,说明海州香薷根系对铜的活化能力更强。在油菜成熟期收获,由于此时期油菜吸收了一定量的重金属,使土壤中

DTPA 提取态的镉和铜明显低于盛花期收获的处理(表 5),因而使得后茬的海州香薷根系吸收的铜和镉也比较低(表 4)。土壤中有效态重金属含量的变化与植物的吸收有一定的相关性^[31],油菜-海州香薷轮作体系对土壤中镉、铜起到了一定的活化作用,有利于高积累植物吸收更多的镉、铜。

4 结论

(1)重度污染土壤上种植的油菜籽粒中镉和铜的含量都超过了食品卫生标准的限值,表现出较强的生态危害性,已不适宜农作物种植。

(2)油菜-海州香薷轮作体系的两茬植物对土壤中的镉与铜都有一定的活化作用,促进了体系对土壤中重金属的吸收。

(3)油菜吸收镉量占轮作体系的 83%,海州香薷吸铜量占轮作体系的 73%。虽然超积累植物和高积累植物对重金属有比较强的吸收能力,但是从田间土壤提取的比例还是比较低的,使污染的土壤符合标准还是需要相当长的修复年限。

参考文献:

- [1] 林玉锁. 土壤环境安全及其污染防治对策[J]. 环境保护, 2007(1A): 35-38.
LIN Yu-suo. Soil environmental security and countermeasures of pollution prevention and control[J]. *Environmental Protection*, 2007(1A): 35-38.
- [2] 李梅, 吴启堂, 李锐, 等. 佛山市郊污灌菜地土壤和蔬菜的重金属污染状况与评价[J]. 华南农业大学学报, 2009, 30(2): 19-21.
LI Mei, WU Qi-tang, LI Rui, et al. The investigation and evaluation of heavy metal pollution in wastewater irrigated soils and vegetables in the suburb of Foshan[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2009, 30(2): 19-21.
- [3] 安琼, 董元华, 王辉. 苏南某市农田土壤有毒有害元素分布状况及影响因素[J]. 土壤, 2005, 37(2): 147-151.
AN Qiong, DONG Yuan-hua, WANG Hui. Distribution of harmful chemical elements in agricultural soil of South, China[J]. *Soils*, 2005, 37(2): 147-151.
- [4] 贾彦, 杨勇, 江荣风, 等. Cd Zn 交互作用对金针菇富集重金属的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7): 1368-1373.
JIA Yan, YANG Yong, JIANG Rong-feng, et al. Effects of interactions between Cd and Zn on accumulation of heavy metals in the *Flammulina velutipes*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(7): 1368-1373.
- [5] 陈怀满, 郑春荣. 复合污染与交互作用研究: 农业环境保护中研究的热点与难点[J]. 农业环境保护, 2002, 21(2): 192.
CHEN Huai-man, ZHENG Chun-rong. Research on combined pollution and interaction: Hotspots and difficulties in agricultural environmental protection[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2002, 21(2): 192.
- [6] 王吉秀, 祖艳群, 李元. 镉锌交互作用及生态学效应研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(Suppl 1): 256-260.

- WANG Ji-xiu, ZU Yan-qun, LI Yuan. The interaction of cadmium and zinc and its ecological effects[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(Suppl 1):256-260.
- [7] Zhao F J, McGrath S P. Biofortification and phytoremediation[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2009, 12(3):373-380.
- [8] Zhao F J, Lombi L E, McGrath S P. Assessing the potential for zinc and cadmium phytoremediation with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(1):37-43.
- [9] McGrath S P, Zhao F J. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2003, 14(3):277-282.
- [10] McGrath S P, Lombi L E, Gray C W, et al. Field evaluation of Cd and Zn phytoextraction potential by the hyperaccumulators *Thlaspi caerulescens* and *Arabidopsis halleri*[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 141(1):115-125.
- [11] 刘小梅, 吴启堂, 李秉滔. 超富集植物治理重金属污染土壤研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5):636-640.
- LIU Xiao-mei, WU Qi-tang, LI Bing-tao. Phytoremediation of heavy metal contaminated soil by hyper-accumulators: A review of researches in China and abroad[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(5):636-640.
- [12] Lou L Q, Shen Z G, Li X D. The copper tolerance mechanisms of *Elsholtzia haichowensis*, a plant from copper-enriched soils[J]. *Environmental and Experimental*, 2004, 51(2):111-120.
- [13] Yang M J, Yang X E, Romthel V. Growth and nutrient composition of *Elsholtzia splendens* Nakai under copper toxicity[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2002, 25(7):1359-1375.
- [14] Song J, Zhao F J, Luo Y M, et al. Copper uptake by *Elsholtzia splendens* and *Silene vulgaris* and assessment of copper phytoavailability in contaminated soils[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 128(3):307-315.
- [15] 彭红云, 杨肖娥. 香薷植物修复铜污染土壤的研究进展[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5):195-199.
- PENG Hong-yun, YANG Xiao-e. Progress on phytoremediation of copper contaminated soil by *Elsholtzia plants*[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2005, 19(5):195-199.
- [16] 蒋成爱, 吴启堂, 吴顺辉, 等. 东南景天与不同植物混作对土壤重金属吸收的影响[J]. 中国环境科学, 2009, 29(9):985-990.
- JIANG Cheng-ai, WU Qi-tang, WU Shun-hui, et al. Effect of co-cropping *Sedum alfredii* with different plants on metal uptake[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(9):985-990.
- [17] 卫泽斌, 郭晓方, 丘锦荣, 等. 间套作体系在污染土壤修复中的应用研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(Suppl 1):267-272.
- WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, QIU Jin-rong, et al. Innovative technologies for soil remediation: Intercropping or co-cropping [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(Suppl 1):267-272.
- [18] 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.
- [19] 茹淑华, 苏德纯, 王激清, 等. 积累 Cd 油菜吸收 Cd 潜力及其根分泌物对土壤 Cd 的活化[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(1):17-21.
- RU Shu-hua, SU De-chun, WANG Ji-qing, et al. Uptake of cadmium by oilseed rape Xikou Huazi (*Brassica juncea* L.) and bioavailability of the metal in rhizosphere[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(1):17-21.
- [20] 王激清, 张宝悦, 苏德纯. 修复镉污染土壤的油菜品种的筛选及吸收累积特征研究: 高积累镉油菜对土壤中难溶态镉的活化及吸收研究(Ⅱ)[J]. 河北北方学院学报:自然科学版, 2005, 21(2):35-38.
- WANG Ji-qing, ZHANG Bao-yue, SU De-chun. Selection and accumulation characteristics of oilseed rapes for phytoremediation of cadmium contaminated soil: Study on absorbing insoluble Cd of higher cadmium accumulating in oilseed rapes(Ⅱ)[J]. *Journal of Hebei North University(Natural Science Edition)*, 2005, 21(2):35-38.
- [21] Su D C, Wong J W C. Selection of mustard oilseed rape (*Brassica juncea* L.) for phytoremediation of cadmium contaminated soil[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2004, 72(5):991-998.
- [22] 王激清, 茹淑华, 苏德纯. 用于修复土壤超积累镉的油菜品种筛选[J]. 中国农业大学学报, 2003, 8(1):67-70.
- WANG Ji-qing, RU Shu-hua, SU De-chun. Selection of a hyperaccumulator for phytoremediation of cadmium contaminated soil[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2003, 8(1):67-70.
- [23] Brooks R. Geobotany and hyperaccumulators[Z]//Brooks R R, editor. Plants that hyperaccumulate heavy metals. Wallingford (UK): CAB International. 1998:55-94.
- [24] 束文圣, 杨开颜, 张志权, 等. 湖北铜绿山古铜矿冶炼渣植被与优势植物的重金属含量研究[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(1):7-12.
- SHU Wen-sheng, YANG Kai-yan, ZHANG Zhi-quan, et al. Flora and heavy metals in dominant plants growing on an ancient copper spoil heap on Tonglushan in Hubei Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2001, 7(1):7-12.
- [25] 柯文山, 王万贤, 杨毅. 海州香薷种群微量金属元素的累积分布特征[J]. 环境科学与技术, 2000(Suppl 1):41-44.
- KE Wen-shan, WANG Wan-xian, YANG Yi. The characteristic of some micrometal elements accumulation in *Elsholtzia splendens* population at Tonglushan copper mine area of Daye in Hubei Province[J]. *Environmental Science and Technology*, 2000(Suppl 1):41-44.
- [26] 柯文山, 席红安, 杨毅, 等. 大冶铜绿山矿区海州香薷 (*Elsholtzia haichowensis*) 植物地球化学分析[J]. 生态学报, 2001, 21(6):907-912.
- KE Wen-shan, XI Hong-an, YANG Yi, et al. Analysis on characteristics of phytogeochemistry of *Elsholtzia haichowensis* in Daye Tonglushan copper mine[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(6):907-912.
- [27] Tang S R, Wilke B M, Huang C Y. The uptake of copper by plants dominantly growing on copper mining spoils along the Yangtze River, the People's Republic of China[J]. *Plant and Soil*, 1999, 209(2):225-232.
- [28] Wu L H, Li Z, Han C L, et al. Phytoremediation of soil contaminated with cadmium copper and polychlorinated Biphenyls[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2012, 14(6):570-584.
- [29] Wu Q T, Wei Z B, Yang Y O. Phytoextraction of metal contaminated soil by *Sedum alfredii* H: Effects of chelator and co-planting[J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2007, 180:131-139.
- [30] Wu Q T, Morel J L, Guckert A. Effects of soil pH, texture, moisture, organic matter and cadmium content on cadmium diffusion coefficient [J]. *Pedosphere*, 1994, 4(2):97-103.
- [31] Jiang L Y, Yang X E, He Z L. Growth response and phytoextraction of copper at different levels in soils by *Elsholtzia splendens*[J]. *Chemosphere*, 2004, 55(9):1179-1187.