环境工程学报

第 11 卷 第 6 期

2017年6月

Chinese Journal of Environmental Engineering

2 种轮作模式对镉污染土壤修复潜力的比较 陈璘涵1，曾红远2，葛一陈2，曾清如1，2，\* 湖南农业大学资源环境学院，长沙 410128

摘 要 选取重金属Cd污染较严重的郴州矿区废弃农田土壤进行盆栽实验，以红叶甜菜潇苣和菊苣■油葵作为研究对象， 研究2种轮作模式对土壤重金属Cd的修复潜力。实验结果表明：3种作物在轮作期间生长状态良好且对重金属都表现出 较强的耐性及吸收积累能力。在红叶甜菜潇苣轮作模式中，甜菜和菊苣的地上部分对Cd的富集系数(BCF)分别为11. 34 和& 22;在菊苣■油葵轮作模式中，菊苣地下和地上部分对Cd的富集系数分别为14. 14和16. 32,成熟油葵各个部位的富集 系数都大于1，其中，叶和果肉的富集系数分别为2.57和2.19。因此，对于重金属Cd轻、中度污染的土壤来说，甜菜潇苣 轮作模式对于Cd的富集效果要优于菊苣■油葵。总的来说,利用这3种作物两两轮作的轮作模式，能充分利用四季的气候 特点，并能在不影响作物产量的前提下大大提高作物对重金属的提取总量。

关键词 轮作;重金属污染;农业种植模式;大生物量;植物修复

中图分类号 X53 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2017)06-3873-6 **DOI** 10. 12030/j．cjee．201603031

Comparison of remediation potential for two crop rotation patterns on Cd con­taminated soils

CHEN Linhan1，ZENG Hongyuan2，GE Yichen2 ，ZENG Qingru1 2 [[1]](#footnote-2) [[2]](#footnote-3)

College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

**Abstract** In this study，soil collected from farmland in Chenzhou polluted with the heavy metal Cd was used to conduct pot experiments． These were used to study the repair potential of planting patterns featuring pairing of two crop species，edible-leaf-beet with endive，and endive with oil sunflower，for extracting heavy metals from pollu­ted soil． The experimental results showed that three kinds of crops grew in good condition during the planting pe­riod ，and showed good tolerance and capacity for absorption of heavy metals． In the planting pattern edible-leaf­beet-endive pairing，the concentration coefficient ( BCF) of the above-ground part of the beet and endive reached 11. 34 and 8. 22 ，respectively;while in the endive-oil sunflower pairing，the concentration coefficient of the un­derground and above-ground parts of the endive reached 14. 14 and 16. 32 respectively． The concentration coeffi­cients of each part of mature oil-sunflowers were greater than ‘1 ';among which parts the concentration coeffi­cient of the leaf and flesh reached 2. 57 and 2. 19 ，respectively，and the flesh oil-yield was high． For soil slightly and heavily polluted with the heavy metal Cd ，the concentration effect from planting the beet-endive pair for Cd ， was better than that from the endive-oil sunflower pair． In general ，crop rotation of these three crops could make full use of the climate characteristics of the four seasons，and greatly improve the amount of heavy metals extrac­ted by these crops，while not affecting the crop yield．

**Key words** rotation ;heavy metal pollution;agricultural planting pattern ;large biomass;phytoremediation

随着我国经济的发展和对金属资源需求的日益增大，冶金、采矿行业迅猛发展，由此引发的多种环境 问题尤其是矿区周围的重金属污染问题逐渐引起了人们的强烈关注［1-2］。湖南是著名“有色金属之乡”， 矿产资源十分丰富［3-4］。据调查，湖南省有色金属开发所引起的 Cd、Pb、As 和 Hg 等重金属土壤污染面积

高达2.8万km2，占全省总面积的13%刃*。*矿区周边的蔬果、粮食和饮用水都受到了不同程度的污染，当 地癌症和其他慢性疾病的发病率远高于其他地区［6-9］。

植物修复相对化学、物理等其他修复方法属于环境友好型、安全、低成本的重金属污染治理措施［10-11］， 已经在矿区重金属污染和场地污染治理中得到了应用。在植物修复的'发展历程中，至今已发现多种Cd 的单重金属超富集植物［12］，但这些超富集植物生物量小、生长缓慢、对于环境的适应性较差，在农田中难 以正常生长，对重金属的富集修复很难达到预期效果［13-15］。 因此，在修复重金属污染土壤的研究中，找到 对重金属耐受能力强、大生物量、对环境温度和干湿度适应性强的大生物量农作物来进行修复［16-17］，相对 于超累积植物在实际运用中具有非常明显的优势，还能在修复重金属污染的同时带来一定的经济效 益［18］，更符合发展需求。 已有的对轮作模式的研究大多集中在春夏季作物轮作模式，而对冬季作物的相 关研究还未见报道。 红叶甜菜是我国长江流域地区广泛栽培的蔬菜;菊苣是常见的牧草，在夏季生长旺盛 期可以多次刈割，有良好的抗旱、耐寒特性，一年四季均可栽种;油葵是南方较常见的油料经济作物，从育 种到收获只需要60 d 左右的时间，可作为生物柴油的生产方式，经济价值高［19-20］，将它们应用到重金属污 染的农田容易被当地农民接受，且这3 种作物不仅地上部分生物量大而且都对重金属有很强的耐性和吸 收富集的能力。

以红叶甜菜-菊苣和菊苣-油葵的轮作模式研究对土壤中 Cd 污染的修复潜力。 目的在于研究这些作 物在中低浓度 Cd 污染土壤的富集特性及季节、环境适应性，探究在重金属污染地区利用红叶甜菜-菊苣和 菊苣-油葵2 种轮作模式代替传统水稻-蔬菜轮作模式及对复垦或治理重金属污染农田的可行性，以期在 轻、中度重金属污染土壤农田修复推广新型轮作模式提供技术参考。

1. 材料和方法

**1. 1** 供试土壤与作物

供试土壤用采自湖南桂阳县官溪村重金属污染农田，其基本理化性质如表1 所示。

表 1 土壤的基本理化性质与重金属本底值

Table 1 Soil physiochemical properties and the background value of heavy metal

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | CEC/  (cmol • kg\_1) | 有机质/  (g • kg"1) | As/  (mg • kg"1) | Cu/  (mg • kg"1) | Zn/  (mg • kg"1) | Pb/  (mg • kg"1) | Cd/  (mg • kg"1) |
| 供试土样 | 16. 32 | 24. 37 | 32 | 46. 02 | 243. 01 | 322. 2 | 1. 55 |

以中国《土壤环境质量标准》(GB156184995)为依据来评价土壤污染程度。农田区土壤属于二级标 准,研究区域土壤pH值为6. 21，属于偏酸性土壤(pH <6.5)，因此,其重金属限定值如表2所示。

表 2 国家土壤环境质量标准中的重金属限定值

Table 2 Limited value of heavy metals in national environmental quality standards of soil mg • kg\_1

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 土壤类型 | Cu | Zn | Pb | Cd | As |
| 偏酸性 | 50 | 200 | 250 | 0. 3 | 30 |

由此可见，实验土壤中 Cd 污染最为严重，与 GB 15618-1995《土壤环境质量标准》的自然背景值相比， 盆栽中重金属Cd的含量超标5.1倍。其次还伴随有一定程度的As、Zn与Pb污染,Cd是本研究考虑的主 要修复指标。

实验作物:红叶甜菜( Beta vulgaris L． var． cicla L． ) 、 菊苣( Cichorium intybus L． ) 和油葵( Helianthus ann- uus Linn． ) ，实验作物均为市售常规品种。

**1. 2** 实验设计

采用上缘口径25 c叫下缘口径20 c叫高30 cm的花盆进行盆栽实验。每盆装风干后过2 mm筛的土 壤&Okg,用去离子水调至持水率(WHC) 60%，放置5 d,使土壤保持湿度均匀。随后，播轮作物种子各 20粒/盆，植物发芽7 d后间苗，甜菜和菊苣每盆留3株，油葵每盆留2株。每组实验设3个重复。12月底 分别种植红叶甜菜和菊苣,于间苗时取样分别测定生长期重金属含量60 d后取样测定成熟期植物各部分 的重金属含量。来年4月份在菊苣收获后的盆栽土中轮作油葵,于开花7 d后及果实成熟后分别采样分 析，同年4月在红叶甜菜收获后的盆栽土中轮作菊苣，于成熟期间隔20 d刈割一次,对割下的地上部分进 行清洗、烘干后粉碎后保存。

**1. 3** 修复潜力的计算

植物各组织部位对重金属的富集系数BCF=植物各部位重金属的含量/土壤中重金属的含量。

植物地上部分提取重金属总量=茎的生物量x茎中重金属浓度+叶的生物量x叶中重金属浓度+花 的生物量x花中重金属浓度+果实的生物量(包括果壳和籽实)x果实中重金属浓度。

植物地下部分提取重金属总量=根的生物量x根中重金属的浓度 单株植物提取总量=植物地上部分提取重金属总量+植物地下部分提取重金属总量 植物的生物量为干物质量。 植物收获时，随机采取每个盆栽单位的3 株完整植物，计算平均每株完整 植物体的干物质量。

1. **4** 样品采集及重金属的测定

采集到的植物地上部分和地下部分，用自来水冲洗，再用去离子水清洗干净，滤干水分，在105 °C下杀 青2 h,0 C烘干至恒重后，用研磨机研磨成粉，装袋备用。采集相对应的盆栽土壤，样品搅匀后自然风 干，磨碎混匀，分别过10目和80目尼龙筛备用，用于测土壤重金属有效态与总量。

土壤样品采用 HCl\_HNO3"HF~HClO4 消解，用 ICP(ICPMA8300, Perkinelmer)测定，土壤有效态 Cd 用 0. 1 mol • L" HCl提取;植物样品采用HNO3-HCIO4消解，用ICP (ICPMA8300, Perkinelmer)测定及原子吸 收石墨炉(GTA120, Varian)测定*。*

土壤样品测定采用 GBW 07428 ( GSS-14) 土壤成分分析标准物质进行质量控制;植物样品测定采用 GBW 07602 (GSV-1)国家一级标准物质进行质量控制。

1. **5** 数据处理

盆栽实验重复3 次，所得实验数据使用 Excel2013 软件分析，所有数据均用平均值加标准偏差表示。

1. 结果和讨论

**2.1 2**种轮作模式中各作物的**Cd**富集

1. 1. 1 红叶甜菜-菊苣轮作模式

在红叶甜菜潇苣轮作模式中(表3)，生长期红叶甜菜体内Cd积累量为2.61 mg •kg-1，高于修复前 土壤Cd含量且富集系数大于1*。*Cd积累量在红叶甜菜体内随时间增长明显，成熟期根部和叶的Cd含量 分别为28. 68 mg • kg-1和16. 44 mg • kg-1,远高于生长期植物体内的含量，富集系数分别为18. 51和 10. 61，显示对Cd积累能力较强。菊苣生长期虽然Cd含量较高，但未表现出肉眼可见的重金属毒害作 用，有学者认为是由于重金属镉、铜离子被隔离在种皮外部如。成熟后，次刈割时地上部分Cd含量分 别为11.92,5.75和3.53 mg • kg-1*。*菊苣地上部分生长状况随刈割次数增加略微减弱，地上部分生物量 依旧较大，第3次刈割时，地上部分平均高度仍大于30 cm。3次刈割时Cd的富集系数分别为7. 69、. 71 和2.45,表明菊苣对Cd的积累能力随着刈割次数逐渐递减，但由于菊苣在春夏季节生长迅速，可多次刈 割，因此菊苣对重金属Cd的积累能力总体较高。红叶甜菜已经是一种优良的Cd、Pb,Zn复合污染植物 修复材料沏，Zn浓度的提高可在一定程度上提高红叶甜菜对Cd的积累量沏，我们的结果与其相类 似。菊苣在低于20 mg・L-1的外源Cd添加时不会产生胁迫作用两，因此，其能在高Cd污染土壤中正 常生长并积累较高浓度的镉固，而我们的实验结果显示，其同样适用于轻中度污染土壤的修复。Cd主要 分布在菊苣的叶和红叶甜菜的根和芽中固,因此红叶甜菜潇苣轮作模式适宜修复Zn和Cd复合污染 土壤。

表 **3** 甜菜 **-**菊苣轮作模式对 **Cd** 的富集

**Table 3 Enrichment of beet-chicory model on Cd**

甜菜 菊苣

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | 生长期 | 成熟期 | 生长期 | 第1次 | 第2次 | 第3次 | 第4次 |
| 地上  部分 | Cd 浓度/ (mg • kg"1) | 2. 61 ±0. 07 | 16.44 ±0. 10 | 10. 32 ±0. 11 | 11. 92 ±0. 10 | 5. 75 ±0. 13 | 3. 53 ±0. 11 d | 2. 42 ±0. 07 |
| 富集系数 | 1. 68 ±0. 06 | 10.61 ±0. 13 | 6. 66 ±0. 13 | 7. 69 ±0. 11 | 3. 71 ±0. 11 | 2. 28 ±0. 10 | 1. 56 ±0. 04 |
|  | 生物量/ （干重g •株"1） | 1. 32 ±0. 04 | 24.94 ±3. 04 | 1. 76 ±0. 03 | 29. 99 ±3. 03 | 30. 05 ±3. 19 | 29. 95 ±2. 18 | 29.97 ±3. 61 |
|  | Cd 浓度/ (mg • kg"1) | 3. 43 ±0. 11 | 28.68 ±0. 46 | 7. 58 ±0. 12 | 7. 98 ±0. 11 | 10. 92 ±0. 11 | 15. 38 ±0. 11 | 17.19 ±0. 08 |
| 地下  部分 | 富集系数 | 2. 21 ±0. 03 | 18.53 ±0. 15 | 4. 89 ±0. 09 | 5. 15 ±0. 10 | 7. 05 ±0. 10 | 9. 92 ±0. 07 | 11.09 ±0. 98 |
|  | 生物量/ （干重g •株"1） | 0. 65 ±0. 03 | 8. 44 ±0. 05 | 0. 87 ±0. 04 | 7. 56 ±0. 05 | 9. 13 ±0. 05 | 10. 95 ±0. 12 | 12.13 ±0. 21 |

2. 1. 2 菊苣-油葵轮作模式

在菊苣-油葵轮作模式中（表 4），菊苣对重金属 Cd 的积累效果非常明显，生长期 Cd 含量为

9. 34 mg • kg"1，富集系数为4. 40。成熟期根部和地上部分Cd含量分别为20. 51 mg • kg"1和23. 67 mg • kg"1，且地上部分含量高于根部，富集系数分别为14. 24和16. 44。于4月份菊苣收割后轮作油 葵，在开花期及成熟期分别采样分析，结果表明，随着时间增长，油葵体内各部位Cd含量呈递增趋势， 成熟期各部位Cd含量都在开花期的1.45倍以上。成熟期Cd含量最高的部位为根、叶和果肉，Cd含 量分别为5.57>3.72和3. 18 mg • kg"1。AL-DHAIBANI［27］证明了向日葵在2个生长季后可使Cd本底 值为124.6 mg・kg"1的土壤Cd含量下降67% ~72%，本实验中油葵Cd积累效果不如菊苣，可能与土 壤有效态Cd含量及生长环境有关。JADIA等函已证实油葵适合应用于50 mg • kg"1以下Cd污染土 壤的植物修复，对Cd的积累效果随温度升高呈下降趋势。实验表明，油葵秸秆的生物量较大，对Cd的 吸附能力显著［29］，有人证明油葵也是 Pb 的理想修复植物［30］。 因此，菊苣-油葵轮作模式可用于 Pb 和 Cd 复合污染土壤的植物修复。

表**4**菊苣**-**油葵轮作模式对**Cd**的富集

**Table 4 Enrichment of chicory-Oil Sunflower model on Cd**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 菊苣 | 地下 | | 地上 | |
| 生长期 | 成熟期 | 生长期 | 成熟期 |
| Cd 浓度/ (mg • kg"1) | 7. 23 ±0. 13 | 20. 51 ±2. 21 | 9. 34 ±0. 16 | 23. 67 ±0. 21 |
| 富集系数 | 4. 66 ±0. 11 | 13. 23 ±0. 62 | 6. 03 ±0. 21 | 15. 27 ±0. 14 |
| 生物量/ （干重g •株"1） | 0. 88 ±0. 13 | 9. 72 ±1. 21 | 1. 53 ±0. 32 | 30. 08 ±3. 91 |

地下 地上

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 油葵 | 生长期 | 成熟期 | 生长期 | | | 成熟期 | | | | |
| 茎 | 叶 | 花盘 | 茎 | 叶 | 花盘 | 果壳 | 果肉 |
| Cd 浓度/ | 2. 64 ± | 5. 57 ± | 1. 32 ± | 2. 56 ± | 1. 32 ± | 1. 97 ± | 3. 72 ± | 1. 94 ± | 1. 78 ± | 3. 18 ± |
| (mg • kg"1) | 0. 08 | 0. 17 | 0. 11 | 0. 13 | 0. 12 | 0. 14 | 0. 10 | 0. 10 | 0. 12 | 0. 09 |
| 富集系数 | 1. 70 ± | 3. 59 ± | 0. 85 ± | 1. 65 ± | 0. 85 ± | 1. 29 ± | 2. 40 ± | 1. 25 ± | 1. 15 ± | 2. 05 ± |
|  | 0. 12 | 0. 06 | 0. 09 | 0. 18 | 0. 09 | 0. 11 | 0. 10 | 0. 11 | 0. 13 | 0. 11 |
| 生物量/ | 100. 39 ± | 154. 39 ± | 95. 32 ± | 29. 71 ± | 38. 76 ± | 125. 12 ± | 34. 84 ± | 56. 39 ± | 13. 02 ± | 67. 98 ± |
| （干重g •株"1） | 3. 98 | 5. 98 | 0. 13 | 2. 94 | 4. 82 | 3. 92 | 2. 98 | 5. 37 | 2. 92 | 6. 23 |

**2.2 2**种模式对土壤中**Cd**修复效率

在本实验的2 种轮作模式下（甜菜和菊苣每盆

1. 株，油葵每盆 2 株），植物幼苗均能正常生长，且长 势旺盛，成熟期红叶甜菜和菊苣和油葵平均高度分

别为25、40和90 cm,未呈现明显重金属毒害作用。 植物修复提取重金属的有效性主要由植物对重金属 的提取总量决定，提取总量分为植物对重金属的积 累能力和植物的生物量两个方面［31］。 本实验中每 种轮作物对 Cd 的提取量都很高（表5），其中提取效 果最好的是春夏季栽种的油葵，每盆油葵地下部分 可提取0.86 mg的Cd,地上部分可提取每盆0.72 mg的Cd,高于其他3种作物。其次是春夏季种植的菊 苣，地下部分Cd提取量高于冬季种植的菊苣，每盆菊苣地下部分提取量达每盆0. 53 mg,地上部分Cd提 取量与冬季菊苣相当，均达到每盆0.71 mg。 红叶甜菜对 Cd 的提取总量不及菊苣和油葵，地下部分提取 量与冬季菊苣相当，地上部分提取量为每盆0.41 mg。

|  | 地下部分 | 地上部分 |
| --- | --- | --- |
| 菊苣（冬季） | 0. 20 ±0. 03 | 0. 71 ±0. 09 |
| 油葵 | 0. 86 ±0. 10 | 0. 72 ±0. 08 |
| 红叶甜菜 | 0. 24 ±0. 04 | 0. 41 ±0. 03 |
| 菊苣（夏季） | 0. 53 ±0. 05 | 0. 71 ±0. 07 |

表5 2种模式中的Cd提取量

Table 5 The extraction of Cd from two models

mg • pot

植物修复效率是指修复前后土壤中重金属之差 与修复前土壤中重金属的比值。 2 种模式对 Cd 污 染土壤的修复效率见表6。 2 种模式的植物收获后， 土壤 Cd 总量和有效态含量均有不同程度的降低， 污染土壤在种植植物前，重金 Cd 的含量超过了国 家土壤环境质量标准中的重金属限定值，但种植红 叶甜菜，菊苣，油葵后，底泥中重金属 Cd 的含量有 所降低。 其中，甜菜-菊苣轮作模式对土壤的修复效 率较高，轮作之后土壤有效态Cd含量减少了 0.17

|  | 修复前 | 修复后 | 修复效率 |
| --- | --- | --- | --- |
| 甜菜-菊苣 | 0. 73 | 0. 56 ±0. 04 | 23. 29% |
| 菊苣-油葵 | 0. 73 | 0. 58 ±0. 05 | 20. 55% |

表6 2种种植模式对Cd污染土壤有效态镉的修复效率

Table 6 Remediation efficiency of two planting patterns on Effective state Cd contaminated soil

土壤有效态Cd含量/ (mg・kg"1) 轮作模式

mg - kg-1，降低百分率为23.29%。菊苣"油葵轮作后土壤有效态Cd含量减少了 0. 15 mg - kg-1，这表明2 种轮作模式对被重金属 Cd 污染的土壤都具有一定的修复价值。

3 结论

1） 在红叶甜菜"菊苣轮作模式中，甜菜和菊苣地上部分的Cd富集系数（BCF）分别为11. 34和& 22;在 菊苣■油葵轮作模式中，菊苣地下和地上部分的Cd富集系数分别为14. 14和16. 32,成熟油葵各个部位的 Cd富集系数都大于1,表明这3种作物对重金属Cd有较好的积累效果。

2） 对于重金属Cd轻、中度污染的土壤来说，甜菜-菊苣轮作模式对于Cd的富集效果要好于菊苣■油 葵。一次轮作对土壤有效态Cd的修复效率达23. 29%。

3） 采用这2种轮作模式，不受季节限制，3 种作物在轮作期间生长状态良好，作物脱毒后进行简单重 金属脱除处理后可作为饲料产生经济效益。 所以，2 种轮作模式都是在合理利用重金属污染土壤并降低 风险的同时，逐步修复污染土壤。

参考文献

1. NATERAJAN K A，SUBRAMAMNIAN S，BRAUN J J，Environmental impact of metal mining-biotechnological aspects of water pollution and remediation-an Indian Experienc[J]． Journal of Geochemical Exploration，2006，88(1-3) ：45-48
2. LIM T T，CHUI P C，GOH K H． Process evalution for optimization of EDTA use and recovery for heavy metal removal from a contaminated soil[J]． Chemosphere，2005，58(8) ：1031-1040
3. 蒋颖，胡雪峰，舒颖，等.采矿活动对稻田土壤重金属累积与酶活性的影响J]. 土壤通报，2015(2):494-501

0]戴塔根.湖南有色金属生产矿山扩大接替资源的对策[J].地质通报，2005, 24(11): 10134015

B]郭朝辉，朱永官.典型矿冶周边地区土壤重金属污染及有效性含量.生态环境,004 ,4(5):2750

16]曾清如，杨仁斌,铁柏清，等.郴县东西河流域重金属污染农田的防治技术和生态利用模式J].农业环境保护,002,1 (5 ): 428-431

1. 张慧智，刘云国，魏薇，等.湖南省矿山尾砂土壤污染现状分析J].矿冶工程,004 ,4(5):27.30
2. 余玮，揭雨成,邢虎成，等.湖南冷水江锑矿区苎麻对重金属的吸收和富集特性J]农业环境科学学报,010,9 (1): 91-96
3. 曾敏，廖柏寒，曾清如，等.湖南郴州、石门、冷水江3个矿区As污染状况的初步调查J]农业环境科学学报,006 ,5 (2):418-421
4. WEBER O, SCHOLZ R W, B~HMANN R, et al. Risk perception of heavy metal soil contamination and attitudes toward decon­tamination strategies J] . Risk Analysis,2011,21(5) :967-977

11] WIESHAMMER G， UNTERBRUNNER R， GARC}A T B， et al. Phytoextraction of Cd and Zn from agricultural soils by Salix ssp. and in tercropping of Salix caprea and Arabidopsis halleri[J] . Plant and Soil，2007， 298(1-2) :255-264

[12]何兰兰，角媛梅，王李鸿，等.Pb、Zn、Cu、Cd的超富集植物研究进展J].环境科学与技术,009,2(11) : 120-123

1. HAMMER D， KAYSER A， KELLER C. Phytoextraction of Cd and Zn with salix viminalis in field trial[J] . Soil Use and Man- agement，2003，19(3):187-192
2. CHERIAN S， OLIVEIRA M M. Transgenic plants in phytoremediation: recent advance and new possibilities[J] . Environmen­tal Science ＆ Technology， 2005， 39(24) :9377-9390
3. ZHUANG P， YANG Q W， WANG H B， et al. Phytoextraction of heavy metals by eight plant species in the field[J] . Water， Air and Soil Pollution，2007，184(1-4):235-242
4. DICKINSON N M. Strategies for sustainable woodland on contaminated soil[J] . Chemosphere， 2000， 41 (1-2) : 259-263
5. 申时立，黎华寿,夏北成，等.大生物量植物治理重金属重度污染废弃地可行性的研究J].农业环境科学学报,013, 32(3):572-578
6. 李立.传统农区不同轮作模式对土壤重金属污染的影响CJ].生态环境学报,012,1 (10) : 1756-1762
7. 薛志忠，吴新海.国内外生物柴油研究进展CJ].现代农业科技,010,6:293297
8. 邓一蕾.葵油制取生物柴油的工艺技术研究[D].石家庄:河北科技大学,010
9. 丁园，刘继东，史蓉蓉，等.镉对黑麦草和菊苣幼苗生长的影响J].种子,008,7(11) :15J6
10. PONIEDZIAxEK M， SEKARA A， JEDRSZCZYK E， et al. Phytoremediation efficiency of crop plants in removing cadmium， lead and zinc from soil[J] . Folia Horticulturae， 2013，22(2) :25-31
11. Farhad B， Javad T S， Malakouti M H， et al. Effect of zinc and cadmium on growth， chlorophyll content， photosynthesis， and cad­mium concentration in red beet[J] . Iranian Journal of Soil Research， 2010， 24(1 ) : 31 -41
12. 詹金熹，陶宗娅，罗学刚，等.菊苣幼苗对铯、镉的生理响应J].农业环境科学学报，2013(5) : 902-909
13. 谷超,梁隆超，陈卓.4种牧草植物对红枫湖底泥中重金属污染的植物修复研究环境工程,015,3(7): 148-151
14. SEKARA A， PONIEDZIAxEK M， CIURA J， et al. Cadmium and lead accumulation and distribution in the organs of nine crops: Implications for phytoremediation[J] . Polish Journal of Environmental Studies， 2005， 14(4) :509-516
15. AL-DHAIBANI A N， EL-NAKHLAWY F S， ALSOLAIMANI S G， et al. Phytoremediation of cadmium contaminated soil by sunflower[J] . Australian Journal of Basic ＆ Applied Sciences，2013， 7(7) :888-894
16. JADIA C D， FULEKAR M H. Phytoremediation: the application of vermicompost to remove zinc， cadmium， copper， nickel and lead by sunflower plant[J] . Environmental Engineering ＆ Management Journal， 2008， 7(5) :547-558
17. SMALLEY I， SMALLEY G， O'HARA-DHAND K， et al. Sunflower stalks as adsorbents for the removal of metal ions from wastewater[J] . Industrial ＆ Engineering Chemistry Research，1998，37(4) :1324-1328
18. SIMON L， MARTIN H W， ADRIANO D C. Chicory ( Cichorium intybus L. ) and dandelion ( Taraxacum officinale Web. ) as phytoindicators of cadmium contamination[J] . Water Air ＆ Soil Pollution， 1996 ， 91(3-4) :351-362
19. MCGRATH S P， ZHAO F J. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils[J] . Current Opinion in Biotech- nology，2003，14(3) :277-282

1. 基金项目: 环境保护部公益性行业科研专项(201009047);湖南重金属污染耕地修复及农作物种植结构调整试点项目(农办财函(2014)28) 收稿日期:2016 －03 －03;录用日期:2016 －06 －27

   第一作者：陈璘涵(1989—),男，硕士研究生，研究方向：土壤重金属污染治理与修复。E-mail :417660884@qq. com [↑](#footnote-ref-2)
2. 通信作者，E—nail ： qrzeng@163. com [↑](#footnote-ref-3)