



文章栏目：土壤污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202105081

中图分类号 X703

文献标识码 A

盛昕, 顿梦杰, 肖乃川, 等. 不同品种油葵在镉严格管控类耕地的安全利用探索[J]. 环境工程学报, 2021, 15(8): 2711-2720.
SHENG Xin, DUN Mengjie, XIAO Naichuan, et al. Exploration on safe utilization of different varieties of oil sunflowers in cultivated land with strict cadmium control[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(8): 2711-2720.

不同品种油葵在镉严格管控类耕地的安全利用探索

盛昕¹, 顿梦杰¹, 肖乃川¹, 朱亮亮¹, 宋波^{1,2,*}

1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541004

2. 桂林理工大学岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 桂林 541004

第一作者: 盛昕(1998—), 女, 硕士研究生。研究方向: 重金属污染土壤修复。E-mail: 13972705719@163.com

*通信作者: 宋波(1972—), 男, 博士, 教授。研究方向: 重金属污染土壤修复与区域环境质量评价。E-mail: songbo@glut.edu.cn

摘要 为探索油葵在镉(Cd)严格管控类耕地安全利用的可行性, 采用田间实验, 研究了15个品种油葵的生长效应、各部分Cd富集能力差异, 并评估了该油葵所产食用油的安全性。结果表明, 油葵对Cd有一定的耐性, 不同品种油葵地上部生物量在1 605~5 500 kg·hm⁻²; 油葵中Cd质量分数在非食用部分的分布为茎叶>花盘>油枯; 油枯、花盘和茎叶的生物富集系数(BCF)分别在2.07~5.20、7.03~14.87和4.20~11.56, 均表现出较大差异。所有品种油葵食用油部分均未超过欧盟食品限量标准中规定的限值(Cd≤0.1 mg·kg⁻¹), 并且其富集能力极低。通过对不同品种油葵Cd富集能力的聚类分析、Cd提取量与修复效率的分析, 在Cd严格管控类耕地上边利用、边修复较合适的是Y13和Y4品种。所有品种油葵的茎叶、花盘和油枯的Cd质量分数均超过了国家规定的饲料标准(Cd≤1 mg·kg⁻¹)和有机肥料标准(Cd≤3 mg·kg⁻¹), 直接还田存在较高风险, 需要另外处理。本研究可为Cd严格管控类耕地的安全利用提供参考。

关键词 土壤污染防治; 油葵; 镉污染耕地; 严格管控类耕地

根据《全国土壤污染状况调查公报》^[1]显示, 全国土壤环境状况总体较为严峻。全国耕地土壤的点位超标率为19.4%, 其中镉(Cd)的点位超标率为7.0%^[2-3]。土壤中过量的Cd可以通过土壤转移、积累到作物的可食用部位, 并通过食物链进入人体, 严重威胁人群健康^[4-5]。

2020—2030年是中国农田重金属污染防治的关键时期。在《土壤污染防治行动计划》^[6]中, 明确将农用地土壤环境质量类别分为3类: 优先保护类、安全利用类和严格管控类。安全利用类有2种情况: 1) 土壤污染超过筛选值, 未超管制值, 测定种植的农产品超标; 2) 土壤污染超过管制值, 测定农产品不超标。严格管控类也是2种情况: 1) 土壤污染超过筛选值, 未超管制值, 测定种植的农产品严重超标; 2) 土壤污染超过管制值, 并且测定农产品超标。按照我国相关政策^[7]规定, 对于严格管控类耕地, 原则上不可以种植可食用农产品。但是, 很多受污染农田面积大、

收稿日期: 2021-05-16; 录用日期: 2021-07-18

基金项目: 广西农田重金属污染防治关键技术研究及应用示范(桂科AA17204047); 广西科技成果转化与推广计划(桂科转1599001-1)

污染程度严重,关系到当地村民的生计问题;将所有受污染农田均采用富集植物修复的方式进行治理,不符合当地村民的现实利益。在严格管控类耕地上实现安全利用,具有很强的现实意义。如何将严格管控类耕地变成安全利用类耕地,最主要的突破点就是将污染超标农产品替换成不超标农产品。

目前,针对Cd污染耕地的治理,因地制宜地开展农作物低积累品种筛选可使Cd污染农用地得到安全有效的利用^[8]。前人用不同评价指标筛选并研究了一系列Cd低积累型品种,得到了包括水稻^[9-10]、玉米^[11]、菜心^[12]和油菜^[13]等对Cd具有低积累特性的品种,筛选出的Cd低积累品种在一定程度上可有效应对Cd污染对农作物安全构成的威胁^[14]。但是,仅种植低积累品种不能使土壤中的Cd质量分数大幅减少,土壤污染状况并未改善。为了达到边利用、边修复的效果,种植可食用部分Cd富集能力弱、非食用部分Cd富集能力强的品种是未来治理Cd污染农田土壤的重中之重。

油葵属于菊科向日葵属,为一年生草本植物。它有很强的地域适应性,抗干旱、耐贫瘠、根系发达、产量高和籽粒含油量高等特性,是一种应用前景较广泛的油料作物^[15]。杨洋等^[16]研究表明,油葵地上部各组织器官对Cd的富集系数(BCF)大于1,且在油葵叶中的Cd质量分数高达 $41.05\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,富集系数为3.98,表现出了对Cd的超富集能力。ZEHRRA等^[17]在不同类型Cd污染土壤中筛选了40个向日葵品种,其研究发现华农667在不同类型土壤中均表现出对Cd较高的积累能力。目前的大多数研究都是仅以植物修复的角度研究油葵对Cd污染土壤的修复,选择富集能力强的品种,未考虑可食用油部分的安全性。我国人均耕地面积短缺,停止耕种大面积受污染土地,进行长期的高成本修复不现实。在短时间内,如果无法从土壤中移除Cd,同时又要避免作物中的Cd危害人体,那么必须筛选出可食用油部分低积累、非食用部分(包括油枯、花盘和茎叶)高积累的油葵进行种植。本研究基于田间实验,选取15个不同品种的油葵,研究其可食用油部分与非食用部分对Cd的富集能力;筛选出可食用油部分Cd富集能力弱,非食用部分Cd富集能力强的油葵品种。本研究可为Cd严格管控类耕地的安全利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

实验地点位于广西桂北地区某县,年平均温度 $28.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降雨量为 $1\,000\sim 2\,000\text{ mm}$ 。该县有1个平均海拔为 150 m 、面积为 21 km^2 的矿区。20世纪50年代起,该矿区正式投入开采工作,于2012年停产。造成污染的原因主要是开发初期矿业开采活动产生的尾砂在河流上游被随意堆放,尾砂堆积形成尾砂库。20世纪70年代,一场强降水导致该尾砂库塌陷,尾砂进入河流中,导致河流周边的耕地土壤受污染。该地区的主要农作物为柑橘、玉米和水稻等。

1.2 实验设计

选取15个油葵(Y1~Y15)品种作为供试材料,具体品种信息见表1。实验采用随机区组设计,15个油葵品种为15个处理,每个处理设3个重复,每个重复的种植面积为 $40\text{ m}^2(8\text{ m}\times 5\text{ m})$ 。同时实验区域四周设置2行油葵作为保护行,以消除边际效应。2019年4月17日在研究区受Cd污染耕地中播种,种植密度为

表1 不同品种油葵信息

Table 1 Information of different oil sunflower varieties

品种编号	品种名称	品种编号	品种名称
Y1	尚品GW567矮大头	Y9	矮大头667DW
Y2	DR667	Y10	矮大头FY928
Y3	XC5118	Y11	矮大头668
Y4	S606	Y12	矮大头FD2918
Y5	FY997	Y13	矮大头1280
Y6	FY998	Y14	矮大头987
Y7	矮大头968	Y15	美国至尊油王
Y8	超级矮大头		

50 cm×50 cm; 在油葵花期施用 40 kg 复合肥, 其他田间管理按照当地农业管理进行; 2019 年 7 月 22 日收获。

1.3 样品采集、处理分析测试

采集油葵地上部分(茎叶、花盘和籽粒样品), 分别用塑封袋装好、标记。同步采集植物根际 0~20 cm 深度的土壤, 约 500 g 土壤混合成为 1 个土壤样品。共计 45 组油葵茎叶、花盘、籽粒样品和 45 组土壤样品。

将采集的油葵茎叶、花盘和籽粒样品用自来水清洗干净, 再用流动的超纯水润洗 3~5 次, 放入纸质信封中; 于烘箱内在 105 ℃ 杀青 30 min 后, 置于 80 ℃ 烘箱中至恒重。取出油葵籽粒用脱壳机脱壳, 然后用榨油机进行榨油, 将油装入塑料瓶, 油枯装入牛皮信封袋内待测。油葵花盘和茎叶用不锈钢打磨机粉碎后装入牛皮信封中编号待分析。采集的土壤样品去除石块和植物根系等杂物后使其自然风干, 用研钵磨碎土壤样品, 分别过 0.841 mm 和 0.149 mm 尼龙筛网, 将处理好的样品装入牛皮信封袋保存, 对应编号待测。

土壤样品采用美国国家环保署 (US EPA) 推荐的 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 体系进行消解; 油样品采用食品安全国家标准-食品中多元素的测定 (GB 5009.268-2016) 推荐的微波消解法; 采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 方法 (EPA 3050B) 消解油枯、花盘和茎叶样品, 使用石墨炉原子吸收分光光度计 (AA-700) 测定 Cd 质量分数。同时, 选取 10%~15% 的样品进行重复测试, 控制相对误差结果在 $\pm 5\%$ 以内。分析过程加入国家标准土壤样品 (GSS-4 和 GSF-4)、国家标准植物样品 (GSB-11) 进行质量控制, 以确保数据的准确度和精确度。标样回收率 Cd: 83.78%~96.05%。

1.4 数据统计分析

富集系数 (BCF) 是植物地上部重金属质量分数与土壤中对应该重金属质量分数的比值, 反映植物从土壤中富集重金属的能力, 表达式见式 (1)。

$$\text{BCF} = \frac{C_p}{C_s} \quad (1)$$

式中: BCF 为富集系数; C_p 为植物地上部重金属质量分数, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; C_s 对应农田土壤中重金属质量分数, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。BCF 越大, 表明对重金属的富集能力越强。

2 结果与分析

2.1 研究区土壤 Cd 质量分数

在采集的研究区土壤中, 主要污染物为 Cd, 土壤 pH 为 5.1~7.0, 呈弱酸性。对研究区土壤 Cd 质量分数进行 Kolmogorov-Smirnov(K-S) 正态性检验, 结果如图 1 所示。由图 1 可知, 采集的研究区根系土壤 Cd 质量分数数据符合正态分布 ($P_{K-S} > 0.05$), 可用算数均值表示土壤 Cd 质量分数。Cd 质量分数为 0.92~2.97 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均质量分数为 1.96 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 与农用地土壤 Cd 的风险管制值 (GB 15618-2018)(Cd=2.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 相当。该研究区之前种植水稻和蔬果均存在较高的超标率^[18]。

2.2 不同品种油葵生物量差异性分析

在受 Cd 污染农田土壤上生长约 94 d 后, 15 个不同品种油葵地上部分的干生物量如图 2

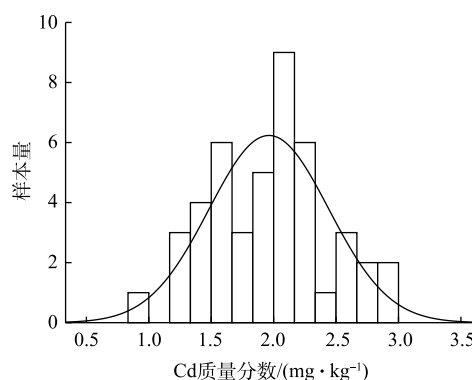


图 1 研究区土壤 Cd 质量分数分布特征

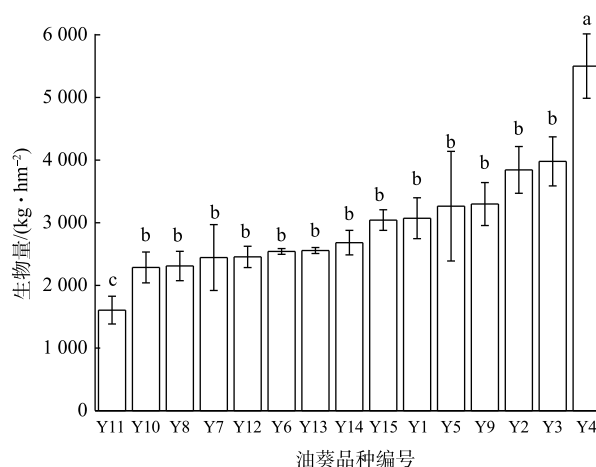
Fig. 1 Frequency distribution of Cd mass contents in the study area

所示。其中, Y4 品种地上部干生物量最高, 达 $5\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 并且其籽粒产量高、较饱满、出油率高, 与其他品种之间有显著性差异。考虑到我国南方雨水多, 可将 Y4 品种进行推广。矮大头系列品种油葵生物量普遍较低, 其中 Y11 品种生物量最低, 仅为 $1\,605\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 而且该品种籽粒大多存在空壳现象, 出油率低。不同品种油葵生物量高低相差 3.5 倍。其他 13 个品种之间无显著性差异, 生物量在 $2\,286\sim 3\,979\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

2.3 不同品种油葵各部分 Cd 质量分数特征

通过测定不同品种油葵地上部分的 Cd 质量分数, 以评价油葵各部分的富集能力, 其结果如表 2 所示。在可食用油部分, Y14 品种中

Cd 质量分数和富集系数均高于其他品种, 与大多数品种均存在显著差异; 其他 14 个品种之间不存在显著差异。Cd 质量分数在油葵非食用部分的顺序为: 茎叶>花盘>油枯。在油枯中, 不同品种油葵的 Cd 质量分数差异显著。其中, Y1 品种的 Cd 质量分数最高, 比 Cd 质量分数最低的 Y4 品种显著增加 56.9%; 其富集系数也存在显著差异, 富集系数最高和最低的品种分别为 Y13 品种和 Y5 品种。对于花盘而言, 不同品种油葵的 Cd 质量分数存在显著差异。其中, Y1 品种的 Cd 质量分数最高, 比 Cd 质量分数最低的 Y4 品种显著增加了 85.6%; 其富集系数也存在显著差异, 富集系数最高



注: 图中不同字母表示不同品种之间具有显著差异性($p<0.05$)。

图 2 不同品种油葵地上部生物量

Fig. 2 Shoot biomass of different oil sunflower varieties

表 2 不同品种油葵各部分 Cd 质量分数与富集系数

Table 2 Cd mass content in different parts of different oil sunflower varieties

油葵品种	Cd质量分数/(mg·kg ⁻¹)				Cd富集系数			
	可食用油	油枯	花盘	茎叶	可食用油	油枯	花盘	茎叶
Y1	0.022±0.008b	7.91±0.39a	23.96±1.10a	26.22±1.96a	0.008 5b	2.99d	9.05bc	9.90ab
Y2	0.024±0.008b	7.07±0.58ab	19.32±1.74b	21.67±6.55ab	0.010 4b	3.06d	8.36c	9.38ab
Y3	0.027±0.008ab	6.26±0.70b	16.38±4.85bc	25.77±0.44a	0.011 8b	2.76d	7.22c	11.36ab
Y4	0.026±0.019ab	5.04±0.37c	12.91±1.75c	15.44±3.01b	0.015 8ab	3.02d	7.73c	9.24ab
Y5	0.019±0.004b	5.63±1.86bc	20.12±0.85ab	20.51±0.32ab	0.007 0b	2.07e	7.40c	7.54bc
Y6	0.019±0.001b	6.28±1.01b	17.89±1.72bc	9.00±0.47c	0.008 9b	2.94d	8.36c	4.21c
Y7	0.016±0.006b	6.09±0.62b	14.39±1.55c	17.25±3.91b	0.007 8b	2.97d	7.02c	8.41b
Y8	0.019±0.004b	7.45±0.25ab	17.11±2.15bc	20.13±2.28ab	0.009 6b	3.82bc	8.77c	10.32ab
Y9	0.016±0.002b	6.44±0.70b	20.22±3.00ab	23.13±0.94ab	0.007 6b	3.01d	9.45bc	10.81ab
Y10	0.027±0.006ab	6.65±0.33b	14.03±1.99c	14.77±6.22b	0.016 0ab	3.89bc	8.20c	8.64ab
Y11	0.034±0.008ab	6.48±0.20b	15.60±2.19bc	12.40±1.33bc	0.019 8ab	3.79bc	9.12bc	7.25bc
Y12	0.032±0.004ab	6.00±0.53bc	16.21±1.95bc	15.64±3.20b	0.019 5ab	3.64c	9.82bc	9.48ab
Y13	0.023±0.006b	6.03±0.54bc	17.25±2.23bc	13.29±3.63bc	0.020 1ab	5.20a	14.87a	11.45ab
Y14	0.036±0.015a	6.02±0.76bc	13.98±3.77c	16.24±2.19b	0.020 5a	3.42cd	7.95c	9.23ab
Y15	0.019±0.009b	6.05±0.36bc	15.84±0.93bc	16.65±2.73b	0.013 4b	4.20b	11.00b	11.56a

注: 用LSD法检验不同品种间差异, 同列不同小写字母表示处理间差异显著($p<0.05$)。

和最低的品种分别为 Y13 品种和 Y7 品种。在茎叶中，不同品种油葵的 Cd 质量分数差异显著。其中，Y1 品种的 Cd 质量分数最高，比 Cd 质量分数最低的 Y6 品种显著增加 191.3%；其富集系数也存在显著差异，富集系数最高和最低的品种分别为 Y15 品种和 Y6 品种。

综上所述，在可食用油品中，所有品种油葵中 Cd 质量分数均小于 $0.05\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，未超过欧盟食品限量标准中规定的限值 ($0.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[19]。Y1 品种在油枯、花盘和茎叶中的 Cd 质量分数均最高；Y13 品种在油枯和花盘中的富集系数最高，并且在茎叶中与最高富集系数的 Y15 品种无显著差异。所有品种的油枯、花盘和茎叶的 Cd 质量分数均超过 GB 13078-2017 中植物性饲料原料的限值 ($\text{Cd}\leq 1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和 NY 525-2012 中有机肥料的限值 ($\text{Cd}\leq 3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。因此，所有品种油葵的茎叶、花盘和油枯均不宜直接用于饲料和有机肥料，若作为添加剂，需要控制用量占比。

2.4 不同品种油葵 Cd 富集能力的聚类分析

为筛选出可食用油部分 Cd 富集能力弱，非食用部分 (包括油枯、茎叶和花盘)Cd 富集能力强的油葵品种，根据油葵可食用油部分和非食用部分的生物富集系数 (BCF)，对 15 个油葵品种的富集能力进行了聚类分析，聚类变量有油、油枯、花盘和茎叶的 BCF。如图 3 所示，可以将可食用油的 Cd 富集能力的结果大致分为 3 类。第 1 类为 Y11、Y12、Y13 和 Y14 品种。这 4 个品种中油的 Cd 富集能力均高于其他品种，为 $0.019\ 6\sim 0.023\ 8$ ；第 2 类为 Y3、Y4、Y10 和 Y15 品种，富集能力中等，为 $0.012\ 2\sim 0.016\ 8$ ；第 3 类为 Y1、Y2、Y5、Y6、Y7、Y8 和 Y9 品种，这几个品种中，可食用油的 Cd 富集能力较弱，为 $0.006\ 9\sim 0.010\ 5$ 。如图 4 所示，可以将油葵中非食用部分的 Cd 富集能力的结果同样分为 3 类。第 1 类为 Y13 品种，由于其油枯、花盘和茎叶的富集能力均处在相对高的水平而自成 1 类；第 2 类为 Y5 和 Y6 品种，这 2 个品种的非食用部分的 BCF 相对其他品种较低，其中油枯的 $\text{BCF}<3$ 、花盘的 $\text{BCF}<8.5$ 、茎叶的 $\text{BCF}<7.6$ ；第 3 类为 Y1、Y2、Y3、Y4、Y7、Y8、Y9、Y10、Y11、Y12、Y14 和 Y15 品种，这些品种的 BCF 处于中间水平而自成 1 类。综和以上分类信息，分 2 种情况讨论。第 1 种是油作为食用部分，油枯、花盘和茎叶作为饲料和有机肥料来源来分析，那么所有部分的 Cd 富集能力均越低越好，15 个油葵品种中，只有 Y5 和 Y6 品种

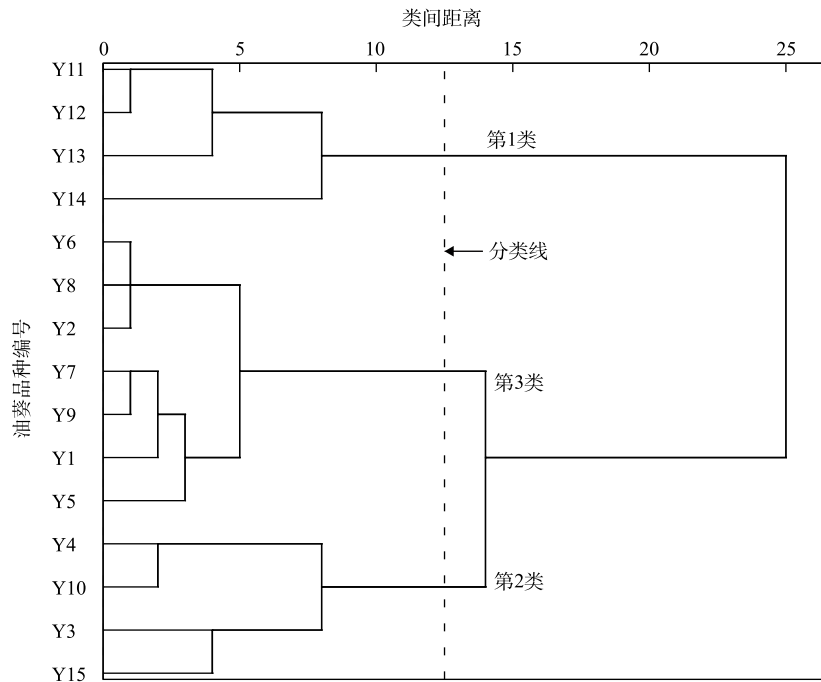


图 3 可食用油部分 Cd 富集能力的聚类分析

Fig. 3 Cluster analysis of Cd accumulation capacity of edible oil

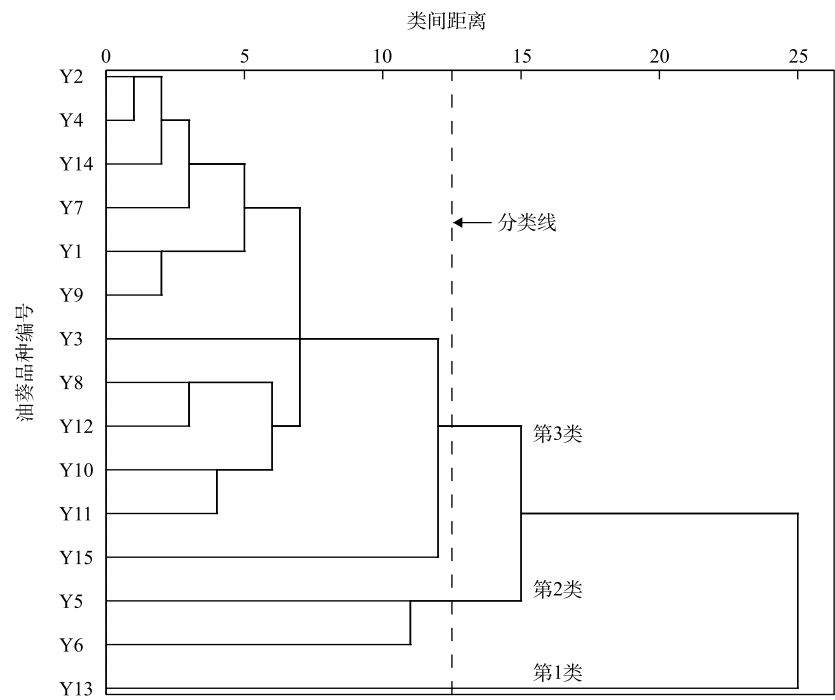


图 4 非食用部分 Cd 富集能力的聚类分析

Fig. 4 Cluster analysis of Cd accumulation capacity of non-edible parts

符合条件。第 2 种是非食用部分对 Cd 的富集能力越高越好，根据上文 2.3 所述，所有品种油葵中油的 Cd 质量分数均未超过欧盟食品限量标准中规定的限值 ($0.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)，可以将 Y13 品种进行推广应用。

2.5 不同品种油葵 Cd 提取量与修复效率

在种植 1 季油葵后，各品种油葵提取量及修复效率如表 3 所示，不同品种油葵提取量在 $0.020\sim0.079\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。结合根系土壤 Cd 质量分数计算去除率，各品种去除率在 $1.00\%\sim3.14\%$ ，每年种植 2 季油葵，土壤达到安全水平 ($\text{Cd}=0.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 所需种植时间为 $13.5\sim41.3\text{ a}$ 。不同品种间的修复效率表现出较大的差异性，其中 Y11 品种去除率仅有 1.00% ，种植 Y11 品种大约需要 41 a 才可以将受污染土壤恢复至安全水平。而 Y4 品种的去除率达到 3.14% ，种植 Y4 品种仅需要 13 a 左右就可以将受污染土壤恢复至安全水平。

3 讨论

我国有大面积受重金属污染的农田，其中 Cd 污染极为普遍，也最为突出。农田重金属质量分数与农产品质量安全、人类和动物的健康息息相关^[20]。短期内实现 Cd 严格管控类耕地食

表 3 不同品种油葵 Cd 去除率与达到安全水平所需种植年份

Table 3 Cd removal rate of different varieties of oil sunflowers and the planting year required to reach a safe level

油葵品种	Cd提取量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	耕层土壤Cd 质量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	Cd去 除率	达到安全水平 所需种植时间/a
Y1	0.071	3.180	2.23%	19.9
Y2	0.073	2.772	2.62%	16.6
Y3	0.079	2.724	2.89%	15.0
Y4	0.072	2.304	3.14%	13.5
Y5	0.061	3.132	1.94%	22.8
Y6	0.030	2.568	1.18%	36.3
Y7	0.036	2.436	1.47%	28.9
Y8	0.040	2.340	1.71%	24.8
Y9	0.066	2.568	2.57%	16.8
Y10	0.030	2.052	1.49%	27.8
Y11	0.020	2.052	1.00%	41.3
Y12	0.036	1.980	1.81%	22.6
Y13	0.035	1.392	2.54%	14.6
Y14	0.038	2.076	1.81%	22.8
Y15	0.046	1.728	2.64%	15.0

用或饲料作物安全生产的难度较大, 种植结构调整被认为是重金属污染农田实现安全生产的主要途径。油料作物种植的主要目的是榨取其油脂供日常食用。这类作物主要有花生、大豆、芝麻、油菜和油葵等。它们全是一年生草本植物, 具有很强的地域适应性。其茎叶的主要成分为纤维, 籽粒的主要成分是淀粉, 而重金属主要富集在纤维中, 淀粉对重金属的积累较弱^[21]。覃志英等^[22]调查发现, 广西市场花生籽粒中平均 Cd 质量分数为 $0.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 低于 GB 2762-2017 中规定的限值 ($0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。蔡葵等^[23]研究发现, 砷 (As)、汞 (Hg) 在花生植株中的富集量远大于在籽粒中的富集量, 且其籽粒中 As 和 Hg 的质量分数低于国家食品安全标准中规定的限值。陆晓怡等^[24]研究发现, 芝麻对 Cd 具有超强的耐性, 其临界毒害浓度为 $160 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。代天飞等^[25]研究得出, Cd 主要积累在油菜的壳部。YANG 等^[26]对油菜的油枯和油进行萃取分离后发现, Cd 大部分富集在油枯中, 而油中 Cd 质量分数低于欧盟食品限量标准中规定的限值 ($0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[19]。杨学乐等^[27]研究发现, 在中度-重度 Cd 污染区中油的平均 Cd 质量分数为 $0.037 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 低于欧盟食品限量标准。

本研究结果表明, 不同油葵品种地上部生物量具有差异性。其中, Y11 品种生物量最低, 并且该品种的籽粒大多存在空壳现象, 脱壳后出油率极低。而 Y4 品种不仅生物量高, 并且其籽粒产量高、较饱满, 脱壳后出油率高。其原因可能是因为不同品种油葵对测试区域的气候和土壤环境具有不同的适应性; 也有可能是因为不同品种油葵对土壤中 Cd 的耐受性不同。同时, 本研究还发现, 油葵可食用油部分的 Cd 质量分数远远低于其他非食用部分的 Cd 质量分数, 这可能是由于植物本身结构组织和自我解毒防御功能所致。油葵中的 Cd 从土壤中转运到籽粒时, 经过油葵的根、茎叶和花盘层层过滤作用, 而且茎叶和花盘对 Cd 有较高的 BCF, 所以转移到籽粒中的 Cd 就较少。由于一般把油葵的籽粒榨成油来食用, 所以研究了其籽粒中油枯以及油中 Cd 的质量分数, 发现油中 Cd 质量分数极少, 最高的是 Y14 品种, 为 $0.038 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。因为 GB 2762-2017 中, 油的重金属限值仅对 Pb 和 As 有明确规定 ($\text{Cd} \leq 0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 对 Cd 没有限量规定, 所以参照欧盟食品限量标准中规定的限值 ($\text{Cd} \leq 0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。这表明, 所有品种油葵中油的 Cd 质量分数均没有超过限值。油葵这一特性有利于保障在 Cd 严格管控类耕地成品油的安全性。

本研究通过聚类分析知, 在所有油葵品种中, 可食用油部分的富集能力均远远低于非食用部分的富集能力。将油同非食用部分的聚类分析结合来看, Y5 和 Y6 品种食用油、油枯、花盘和茎叶的富集能力小于其他品种; Y13 品种不仅油的富集能力在 15 个品种中较高, 并且其非食用部分富集 Cd 的能力最强。由此可知, 油葵可食用油部分与非食用部分富集 Cd 的能力成正比。通过不同品种油葵对 Cd 的提取量以及修复效率分析, Y11 品种对 Cd 的去除率仅为 1.00%, 而 Y4 品种对 Cd 的去除率可达到 3.14%, 这约为 Y11 品种的 3 倍。为使受污染土壤恢复安全水平, 每年在 Cd 严格管控类耕地上种植 2 季 Y4 品种, 大概需要 13 a。陈璘涵等^[28]研究表明, 在菊苣-油葵轮作模式下, 2 种植物对 Cd 均具有较好的积累效果。涂鹏飞等^[29]研究表明, 在油葵-花生轮作模式下, 2 种植物均具有较高的生物量, 且对 Cd 有较好的修复潜力。韩甘等^[30]研究表明, 施用整合剂对籽粒和茎中 Cd 质量分数影响不显著, 但是会使花盘中的 Cd 质量分数提高 30% 以上。同时, 还有研究表明, 施肥可以提高油葵对污染土壤中 Cd 的修复效果^[31]。因此, 种植油葵是修复 Cd 污染土壤有效途径之一, Y13 和 Y4 品种是 Cd 严格管控类耕地安全利用较合适的品种; 但仍然需要通过改进种植模式、栽培措施、添加可降解整合剂和改进施肥技术等强化措施来提高其修复效率。在 Cd 严格管控类耕地上, 一方面, 由于 15 个油葵品种中油的 Cd 质量分数均未超过欧盟食品限量标准中规定的限值 ($\text{Cd} \leq 0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 且其富集能力极低; 另一方面, 油葵非食用部分的 Cd 质量分数和富集能力较高, 甚至超过部分超富集植物; 所以, 种植油葵这种仅食油品的油料作物不仅可以防止 Cd 通过食物链进入人体, 还可以通过非食用部分带走污染农田中的 Cd。油葵榨完油剩下的油枯中 Cd 质量分数也较高, 可以通过化学萃取剂萃取油枯中的 Cd, 将油枯中的 Cd 质量分数降到安全

标准以下再进行利用。对于Cd质量分数较高的花盘和茎叶这些大生物量的植物残体,处理的方法主要有:焚烧法、堆肥法、灰化法、热分解法和填埋法等^[32]。利用上述方法对油葵残体进行处理,虽然都能达到减少体积和重量的目的^[33],但是经过处理后,物质中的Cd得不到最终的解决,必然还是会对土壤造成二次污染^[34]。改善这几种方法存在的问题,可以采用水泥窑协同处置方法。该方法以替代燃料与原料的形式安全地处置废弃物,不仅减少了废物处理的成本,还可以降低水泥工业的生产成本^[35-36]。油葵残体进入水泥窑后,残体中的Cd在水泥窑中的迁移转化规律可用挥发、吸附/冷凝2个过程来描述。挥发过程是指在高温煅烧下、Cd随废气排放;吸附/冷凝过程是指释放出来的Cd在在烟气流动的过程中冷凝或吸附在生料上。利用这种方法,不仅成本低、还可以有效地避免二次污染。

4 结论

1) 在Cd严格管控类耕地上种植不同品种油葵,它们之间的生物量、籽粒的产量和饱满度存在差异。其中,Y4品种生物量最高、花盘最大。

2) 所有品种油葵食用油部分均未超过欧盟食品限量标准中规定的限值($Cd \leq 0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),并且不同品种油葵油的富集能力都极低。

3) 聚类分析结果表明,Y13品种对Cd的富集能力最强;Y4品种对Cd的提取量与修复效率最高。Y13和Y4品种是Cd严格管控类耕地安全利用较合适的品种。

4) 根据GB 13078-2017和NY 525-2012中规定的饲料和有机肥料的限值($Cd \leq 1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $Cd \leq 3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),本研究中所有品种油葵的茎叶、花盘和油枯都不能直接用于饲料和有机肥料,建议采用水泥窑协同处置方法,降低后续处置成本的同时避免对土壤环境造成二次污染。

参考文献

- [1] 生态环境部,国土资源部.全国土壤污染调查公报[EB/OL]. [2021-05-15]. <http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/W020140417558995804588.pdf>.
- [2] 李小方.重金属污染农田安全利用:目标、可选技术与可推广技术[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(6):860-866.
- [3] 王丽,和淑娟.镉污染农用地安全利用技术与运用[J].环境与可持续发展,2019,44(5):134-137.
- [4] 欧阳燕莎,刘爱玉,李瑞莲.镉对作物的影响及作物对镉毒害响应研究进展[J].作物研究,2016,30(1):105-110.
- [5] 薛永,王苑颀,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.
- [6] 国务院.土壤污染防治行动计划[EB/OL]. [2021-05-15]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/31/content_5078377.htm.
- [7] 生态环境部,国家市场监督管理总局.土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行):GB 15618-2018[S].北京:中国环境出版社,2018.
- [8] 杜俊杰,李娜,吴永宁,等.蔬菜对重金属的积累差异及低积累蔬菜的研究进展[J].农业环境科学学报,2019,38(6):1193-1201.
- [9] 薛涛,廖晓勇,王凌青,等.镉污染农田不同水稻品种镉积累差异研究[J].农业环境科学学报,2019,38(8):1818-1826.
- [10] 陈京都,何理,林忠成,等.不同生育期类型水稻对镉积累的研究[J].生态与农村环境学报,2013,29(3):390-393.
- [11] 郭晓方,卫泽斌,丘锦荣,等.玉米对重金属累积与转运的品种间差异[J].生态与农村环境学报,2010,26(4):367-371.

- [12] 吕梦婷, 陈雪, 易忠惠, 等. 镉砷低积累菜心品种的筛选[J]. 西南农业学报, 2018, 31(1): 141-148.
- [13] 赵丽芳, 黄鹏武, 宗玉统, 等. 适于镉铜复合污染农田安全利用的油菜品种筛选[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(9): 1614-1616.
- [14] HUANG Y F, CHEN G F, XIONG L M, et al. Current situation of heavy metal pollution in farmland soil and phytoremediation application[J]. Asian Agricultural Research, 2016, 8(1): 22-24.
- [15] 王帅, 吕金印, 李鹰翔, 等. 几种油料作物对铬、铅的耐受性与积累研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(7): 1310-1316.
- [16] 杨洋, 陈志鹏, 黎红亮, 等. 两种农业种植模式对重金属土壤的修复潜力[J]. 生态学报, 2016, 36(3): 688-695.
- [17] ZEHR A, SAHITO Z A, TONG W B, et al. Identification of high cadmium-accumulating oilseed sunflower (*Helianthus annuus*) cultivars for phytoremediation of an Oxisol and an Inceptisol[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 187: 109857.
- [18] 宋波, 田美玲, 庞瑞, 等. 桂北某铅锌矿影响区土壤和柑橘中重金属含量及柑橘产业再优化研究[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(10): 1268-1273.
- [19] 马双进, 南忠仁, 臧飞, 等. 油料作物对重金属污染农田土壤修复的研究进展[J]. 中国农学通报, 2019, 35(36): 80-84.
- [20] 曾希柏, 徐建明, 黄巧云, 等. 中国农田重金属问题的若干思考[J]. 土壤学报, 2013, 50(1): 186-194.
- [21] 赵本行, 陈康姜, 何楚斌, 等. 大豆作物对污染土壤中重金属镉的富集研究[J]. 天津农业科学, 2013, 19(11): 15-17.
- [22] 覃志英, 唐振柱, 梁江明, 等. 2002~2004年广西主要农产品铅镉砷汞污染调查分析[J]. 微量元素与健康研究, 2006, 32(4): 29-32.
- [23] 蔡葵, 于秋华, 赵征宇, 等. 花生不同品种植株重金属As和Hg的富集与转运规律[J]. 中国农学通报, 2010, 26(24): 167-172.
- [24] 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.
- [25] 代天飞, 王昌全, 李冰. 油菜各部位对土壤中活性态重金属的累积特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊2): 471-475.
- [26] YANG Y, LI H L, PENG L, et al. Assessment of Pb and Cd in seed oils and meals and methodology of their extraction[J]. Food Chemistry, 2016, 197(Pt A): 482-488.
- [27] 杨学乐, 何录秋, 刘寿明. 不同品种油葵对土壤中镉的富集作用比较研究[J]. 作物研究, 2017, 31(5): 498-502.
- [28] 陈璘涵, 曾红远, 葛一陈, 等. 2种轮作模式对镉污染土壤修复潜力的比较[J]. 环境工程学报, 2017, 11(6): 3873-3878.
- [29] 涂鹏飞, 谭可夫, 陈璘涵, 等. 红叶甜菜-花生和油葵-花生轮作修复土壤Cd的能力[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 609-614.
- [30] 韩甘, 黄益宗, 魏祥东, 等. 螯合剂对油葵修复镉砷复合污染土壤的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 1891-1900.
- [31] 李涛, 程红艳, 王效举, 等. 不同肥料不同作物对Cd污染土壤中酶活性及Cd含量的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2013, 33(6): 467-470.
- [32] 望子龙. 富集植物体减容过程中枯草芽孢杆菌对铀及伴生重金属的固定机理[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2018.
- [33] 罗琼, 何录秋, 杨文森. 油葵修复重金属污染农田研究进展[J]. 现代农业科技, 2016(5): 225-226.
- [34] 吴万宁, 查勇, 王强, 等. 南京地区冬夏季大气重污染个例对比分析[J]. 中国环境科学, 2014, 34(3): 581-587.
- [35] 丛璟, 闫大海, 李丽, 等. 水泥窑共处置过程中水泥生料对Pb与Cd的吸附/冷凝特性[J]. 环境科学研究, 2015, 28(4): 575-

581.

[36] 崔敬轩, 闫大海, 李丽, 等. 水泥窑协同处置过程中Pb、Cd的挥发特性[J]. 环境工程学报, 2013, 7(12): 5001-5006.

(责任编辑: 金曙光)

Exploration on safe utilization of different varieties of oil sunflowers in cultivated land with strict cadmium control

SHENG Xin¹, DUN Mengjie¹, XIAO Naichuan¹, ZHU Liangliang¹, SONG Bo^{1,2,*}

1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

2. Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety Guarantee in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

*Corresponding author, E-mail: songbo@glut.edu.cn

Abstract In order to explore the feasibility of the safe use of oil sunflowers in Cd strictly controlled cultivated land, field experiments were used to study the growth effects of 15 oil sunflower varieties and the difference in Cd accumulation capacity of each part, and to evaluate the safety of edible oil. The results showed that oil sunflowers are tolerant to Cd. The aboveground biomass of different varieties of oil sunflowers is 1 605~5 500 kg·hm⁻², the distribution of Cd content in the non-edible parts of oil sunflowers is: stems and leaves>flower discs>oil cake. The bioconcentration coefficients (BCF) of oil cake, flower discs and stems and leaves are 2.07~5.20, 7.03~14.87 and 4.20~11.56, respectively, showing great differences. The edible oil part of all varieties of oil sunflowers did not exceed the limit specified in the European Union food limit standard (Cd≤0.1 mg·kg⁻¹), and its enrichment capacity is extremely low. Through the cluster analysis of the Cd enrichment capacity of different varieties of oil sunflower, the Cd extraction amount and the remediation efficiency, the Y13 and Y4 varieties are more suitable for use and restoration on the strictly controlled Cd cultivated land. The Cd content of the stems and leaves, flower discs and oil cake of all oil sunflower varieties exceeds Hygienical standard for feeds (Cd≤1 mg·kg⁻¹) and Organic fertilizers (Cd≤3 mg·kg⁻¹), and there is a higher risk of returning directly to the field and requires additional treatment. This study can provide a reference for the safe use in cultivated land with strict cadmium control.

Keywords prevention and control of soil pollution; oil sunflower; Cd contaminated cultivated land; strictly controlled cultivated land