

农田土壤重金属污染的农业生态修复技术

马铁铮, 马友华*, 徐露露, 付欢欢, 聂静茹

(安徽农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230036)

摘要:总结了常见的农田土壤重金属污染的农业生态修复技术,包括合理施用化肥、施用生物有机肥、秸秆还田、调整作物种植结构、筛选重金属低积累作物品种和耐性作物品种、深耕深翻、控制土壤水分以及施用石灰等修复措施,并对农田土壤重金属污染修复技术的前景进行了展望。

关键词:农田;土壤;重金属污染;农业生态修复

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:1005-4944(2013)05-0039-05

Agro-ecological Remediation Technologies on Heavy Metal Contamination in Cropland Soils

MA Tie-zheng, MA You-hua*, XU Lu-lu, FU Huan-huan, NIE Jing-ru

(School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: This article summarized the common agro-ecological remediation technology of heavy metal contamination in cropland soils, including the rational application of fertilizer, bio-organic fertilizer use, straw application, adjusting the crop planting structure, screening lowly-enriched heavy metal crop varieties and tolerant varieties, super-deep plow, soil moisture control, lime application and so on. The outlook of the remediation technology of heavy metal contamination in cropland soils was prospected.

Keywords: cropland; soil; heavy metal contamination; agro-ecological remediation technology

农田土壤重金属污染是指由于人类的活动致使农田土壤中重金属过量累积引起的污染,通常包括生物毒性显著的 Pb、Cr、Cd、Hg、As 以及具有毒性的 Cu、Zn 等污染物对土壤的污染。土壤重金属污染具有隐蔽性和滞后性,它不仅会对作物产生毒害,使农作物减产^[1],并且可通过食物链富集生成毒性更强的甲基化合物,最终在人体内积累,危害人类健康。

近年来,随着城市化和工业化的发展,工业废水、废气和废渣的排放量增加,固体废弃物处理不善,农业自身污染的加剧,致使全球农田土壤中重金属含量迅速增加^[2],部分农田土壤重金属污染状况严重。作为一个农业大国,我国部分耕地和很多城市近郊农田都受到了不同程度的重金属污染。例如北方大城市部分蔬菜基地和商品粮基地土壤存在着不同程度的重金

属污染的问题^[3]。据统计,我国约有 1/6 的耕地受到了不同程度的重金属污染^[4],每年受重金属污染的粮食达到了 1 200 万 t,并引起粮食减产高达 1 000 万 t^[5],这严重影响到我国的粮食安全,对人体的健康造成极大的威胁,并带来较大的经济损失。因此,采取适当的措施治理农田土壤的重金属污染,既是促进社会进步、经济发展的客观要求,也是保护人体健康、维持社会稳定的重要保障。

目前,国际上治理土壤重金属污染主要有 3 个途径:其一是将重金属污染地区与未污染地区隔离,防止污染物进一步扩散;其二是将重金属从土壤中去除;其三是改变土壤中重金属的价态和形态,降低其在环境中的迁移性和生物有效性^[6]。常用的方法包括工程技术措施、物理修复技术、化学修复技术、生物修复技术以及农业生态修复技术。农业生态修复技术是指在农业生产过程中,采用一些因地制宜的耕作管理制度,调节农田生态环境状况,以减轻重金属危害。该措施投资相对较少、操作较简便且基本不改变修复区种植习惯,可以充分发挥生态系统的自我修复能力^[7],比较符合我国的国情。农业生态修复技术主要包括农

收稿日期:2013-05-19

基金项目:农业部农业生态环境保护项目(2110402-1177)

作者简介:马铁铮(1991—),男,安徽灵璧人,在读研究生,主要从事农业面源污染与土壤生态环境研究。

E-mail:matiezheng@126.com

*通信作者:马友华 E-mail:yhma@ahau.edu.cn

艺修复和生态修复措施2个方面。

1 农艺修复措施

农艺修复措施是指因地制宜地改变耕作制度,通过选择重金属含量少的化肥,增施能够固定重金属的有机肥,调整作物品种,以减少农作物对重金属吸收。

1.1 合理施用化肥

随着社会发展与人口的快速增长,粮食安全已受到国际的广泛关注。有限的耕地数量和沉重的人口压力,导致大量施用甚至滥用化肥的现象屡见不鲜,使土壤结构破坏、质量下降,并产生土壤污染。因此,合理施用化肥,协调高产与优质、施肥与环境的关系已成为研究的热点。

不同的化肥品种在重金属含量以及化学性质上存在差异,对土壤中的重金属的数量和有效性产生影响。一些肥料中含有重金属,长期施用会导致土壤受重金属毒害,研究表明澳大利亚新南威尔士因长期超量使用磷肥,部分菜地土壤的Cd含量已上升了10倍^[8],而且施入土壤中的化肥通过改变土壤pH值,从而改变重金属的生物有效性,并影响作物对重金属的吸收。楼玉兰等^[9]的研究表明,施用铵态氮肥能降低根际土壤pH值,提高根际土壤重金属活性,促进玉米对重金属的吸收,硝态氮肥则相反。因此不同类型化肥的选择供应可以作为控制作物吸收重金属的一种措施。

合理施用化肥还体现在无机和有机肥料的合理搭配。近年来,由于重施化肥而轻施有机肥,导致很多地区土壤板结、酸化以及生物活性的降低,影响土壤的理化性质并最终使作物的生长受害^[10]。有机、无机肥配合使用,对于改善土壤肥力状况、提高土壤微生物和生物化学活性、促进养分循环等方面有重要的意义^[11]。这对于增强土壤对重金属的吸附,以及改善作物的生长状况都有一定的益处。

1.2 施用生物有机肥

生物有机肥是指特定功能微生物与主要以动植物残体为来源并经无害化处理、腐熟的有机物料复合而成的一类兼具微生物肥料和有机肥效应的肥料。

现有的研究表明,生物有机肥中富含有机质,可以改善土壤的理化性状,增加土壤的肥力,而且有机质对重金属离子有很强的吸附和螯合作用^[12],可以提高土壤对重金属的缓冲性,减少植物对其的吸收^[13]。刘秀春等^[14]研究发现生物有机肥对重金属有很强的富集能力且解吸率较小,即生物有机肥对重金属的吸

附固定能力较强。郑少玲等^[15]在施用生物有机肥对芥蓝及土壤重金属含量影响的研究中发现施用生物有机肥的芥蓝重金属含量低于不施肥处理的芥蓝,说明施用生物有机肥可以改变重金属的存在形态和土壤对重金属的吸附性能等,从而使重金属不进入食物链。

生物有机肥中有机物质对土壤中重金属的影响极其复杂,随有机物质类型、土壤的性质以及重金属种类的不同,修复效果也不同,因此应有针对性地选择合适的生物有机肥。

1.3 秸秆还田

秸秆还田是秸秆利用的一种重要方式,秸秆被土壤中微生物分解可生成腐殖质类物质,能提高土壤有机质含量,增加团粒结构,改善土壤紧实板结性状,协调土壤水肥气热等生态条件,还可以提高土壤微生物的生物量和土壤酶的活性,从而为根系生长创造良好的土壤环境^[16-18],提高作物的产量。

还田的秸秆在土壤中的周转对重金属的环境行为和生物有效性有显著的影响。秸秆在腐熟分解过程中产生的有机酸(如胡敏酸、富里酸、氨基酸等),糖类及含氮、硫杂环化合物,能与金属氧化物、金属氢氧化物及矿物的金属离子发生络合反应,形成化学和生物学稳定性不同的金属有机络合物^[19],通过改变土壤重金属的形态降低其生物有效性,从而减少其对土壤生物和农作物的毒害。贾乐等^[20]在研究中发现秸秆还田可显著提高2种镉污染土壤的pH值。在酸性土壤上,pH值的上升能增加土壤对镉的固定,从而降低其生物有效性。一些研究表明,秸秆还田配施有机肥、无机肥可以提高土壤中植物、动物和微生物活性,促使其分泌胞外酶,增强土壤酶的活性,对于促进有机物质矿化有显著的作用,这也可以增加土壤养分含量,提高土壤有机碳含量,从而促进作物增产^[21]。

需要指出的是,新鲜秸秆在腐熟过程中会产生各种有机酸,对作物根系有毒害作用,因此应施入适量的石灰,中和产生的有机酸。而且使用的秸秆应为未受重金属污染地区所收获,防治秸秆中的重金属进入土壤,加剧污染。

1.4 调整种植制度

改变种植制度,调整作物种类也是减轻农田土壤重金属危害的有效措施。对于污染严重不适宜种植粮食作物的地区,可以开展苗木花卉的生产;而对于污染较轻的区域,可以种植耐重金属较强的品种,减少农作物对重金属的吸收,降低重金属对人类健康的危害^[22]。

不同种类的植物生理学特性不同,对土壤重金属的吸收效应存在一定的差异。根据不同作物对重金属元素的吸收效应的特点,针对土壤重金属污染程度的不同,有选择地种植作物,有利于降低土壤重金属对农产品的污染,使受污染的农田得到合理的利用。董霁红等^[23]对徐州矿区充填复垦场地作物重金属含量进行了研究,结果表明复垦场地红豆受重金属的污染比小麦和水稻轻,因此复垦场地可以改变耕作制度,种植红豆或者利用红豆作为先锋作物。汪雅各等^[24]进行的菜田重金属低富集轮作实验的结果表明,种植对重金属富集较弱的植物与种普通植物相比,可使污染田块的蔬菜镉含量降低 50%~80%,而且可以明显提高蔬菜的产量。

1.5 筛选重金属低积累作物品种和耐性作物品种

不同的作物品种对重金属的富集存在差异^[25],同时不同的作物品种对重金属也体现出不同的耐性。因此可以通过田间试验或盆栽试验筛选重金属低积累作物品种和耐性作物品种来减弱重金属对农作物的危害,从而降低人类健康受重金属危害的风险。

水稻是我国第一大粮食作物,水稻的正常生产直接关系到我国的粮食安全。已有的研究表明,Cd 极易在稻米中富集^[26],但水稻对 Cd 的积累有明显的基因型特征^[27]。叶新新等^[28]采用温室盆栽试验研究不同水稻品种对 Cd、As 富集能力,研究发现 9 个水稻品种对 Cd、As 的吸收富集能力有显著的差异,其中南粳 32 对 Cd、As 的富集能力低且对 As 的耐性较高,因而更适合在 Cd、As 轻度污染的水稻土上种植,可降低对人体健康的风险。

一些野外的调查显示,在安庆、铜陵的部分铜尾矿库中,其他作物很难生长,而油菜却可以正常生长。这说明油菜对重金属有较强的耐性,比较适宜于受重金属污染的农田种植。已有的研究也表明甘蓝型油菜对重金属有很强的吸收能力,并且吸收的重金属主要储存在根和茎中^[29]。因此通过试验筛选出对重金属有较高耐性的甘蓝型油菜,可以在一定程度上实现对重金属污染土壤的修复。李军红等^[30]通过种子萌发试验发现,采自污染区铜尾矿的油菜种子对高浓度的重金属具有比正常油菜种子较好的耐性。筛选适宜污染区种植的油菜,对于保证农业生产,实现经济效益和环境效应的双丰收有较大的意义。

1.6 深耕、深翻措施

深耕、深翻措施是指利用旋耕机等机械,对污染耕地进行深翻和混匀,降低土壤重金属浓度的措施,

它适用于土壤重金属背景值较低或土壤底层重金属浓度较低的污染耕地。

深耕、深翻土壤可使聚积在表层的重金属物分散到更深的土层,达到稀释的目的。而且经过太阳曝晒,也可有效地杀死虫卵等病原微生物和有害杂草。已有的研究表明,通过深耕深翻,可以降低土壤容重,调节土壤的含水量,加速土壤有机物的腐殖化过程,提高土壤有机质的含量,还可提高土壤的全氮、速效磷和速效钾的含量。

深耕深翻措施应与增施有机肥结合起来,这样不仅可以改善土壤的结构,促进土壤矿物质的风化,提高地力,而且可以使根系生长的深度增加,形成较厚的根层,促进作物生长^[31]。

2 生态修复措施

生态修复措施,指通过调节诸如土壤水分、pH 值和 Eh 等生态因子,实现对土壤重金属所处环境介质的调控,从而改变重金属的生物有效性。

土壤中的重金属多为过渡元素,他们的化合价多有变价,随农田土壤 pH、Eh 等环境条件的变化,常有不同的化合态和结合态。而且形态不同的重金属,其稳定性和生物有效性有很大差异。因此调节土壤的 pH 和 Eh,降低重金属的活性和生物有效性,是农田土壤重金属污染修复可行的措施。

2.1 控制土壤水分,调节土壤 Eh

土壤 Eh 对变价重金属元素的活动性有很大的影响,尤其是根际 Eh,可以改变重金属的价态和存在形态,并影响根系的吸收性能和重金属在土壤中的溶解度,从而降低土壤重金属的危害。

有研究表明,在 Cd 污染水田上采取不同水分管理措施,水稻中 Cd 的含量有以下特征:采取干湿交替、排水烤田的常规水分管理方式,稻米中的 Cd 含量可达 $1.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而采取全生育期淹水管理,稻米含量仅为 $0.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,这与淹水造成的土壤氧化还原状况的改变有关^[32]。Elza Kovacs 等^[33]研究也发现,不同的土壤水分状况会影响 Pb-Zn 矿废渣中的重金属形态及其生物有效性。对于重金属 Cr,其六价的毒性比三价要高,而在氧化状态下土壤中的 Cr 是以六价态的形态存在,因此对于 Cr 污染的土壤可以将旱作改为水田降低其氧化还原电位,减少 Cr 的危害^[34]。

需要指出的是,污水灌溉是致使土壤和作物重金属污染的重要因素。因此在对农田进行水分管理时,首先就是要保证灌溉水的质量。由于工业污水重金

属、有机污染物等含量普遍过高,不宜作为灌溉水源。生活污水也必须经过处理并检测,达到农田灌溉水质量标准以后才能对农田进行灌溉。

2.2 施用石灰,调节土壤 pH 值

土壤中的重金属一部分以阳离子形式存在,这部分重金属的迁移性大、生物可利用性高、危害最大。加入石灰性物质,能提高土壤 pH 值,促进重金属生成碳酸盐、氢氧化物沉淀,降低土壤中重金属的有效性,从而抑制作物对重金属的吸收。

杜彩艳等^[35]通过盆栽试验,研究在镉、铅和锌污染土壤上,石灰和猪粪配施对土壤中不同形态镉、铅和锌含量及在蔬菜中累积的影响。研究表明施入石灰后对大白菜吸收 Pb、Cd 和 Zn 均起到较好的抑制作用,通过施用石灰及猪粪控制蔬菜中重金属含量的方法适用于中度、轻度污染的农田土壤。而何飞飞等^[36]进行了石灰和钙镁磷肥等改良剂修复镉污染菜地土壤田间效应的研究,结果表明施用石灰能显著提高土壤 pH 值,降低土壤 DTPA-Cd 和小白菜地上部分的镉含量。因此,在田间条件下石灰是较为理想的土壤改良剂。

需要注意的是,在田间施用石灰时要同时考虑作物种类和土壤性质,不宜连续大量施用石灰,否则可能会引起土壤有机质分解过速、腐殖质不易积累,致使土壤结构变坏,还可能在表土层下形成碳酸钙和氢氧化钙胶结物的沉淀层,反而不利于作物生长。而且,施用石灰的后效还值得进一步研究。

3 展望

当今我国部分农田土壤重金属污染现状较为严重,但我国的土壤修复仍处于起步阶段,还有很多的工作尚待完善。针对农田土壤重金属污染的现状,选择适当的修复技术对污染土壤进行修复也已刻不容缓。农业生态修复技术作为一种相对投资较小,实施较为简便的修复措施,值得受到重视。在采用农业生态修复技术来治理重金属污染土壤时,可与常规农事操作结合起来进行,这样不仅可以降低修复费用,而且实施较方便。当然,农业生态修复措施也存在一些缺点,如修复时间长且大田试验的效果仍待进一步探究,一般用于中、轻度污染土壤的修复。若能在重金属污染土壤的修复中因地制宜,综合利用物理、化学和生物学修复措施并开发组合新的修复技术,可能会取得更好的效果。今后,农田土壤重金属污染修复工作要进行多层面的技术深化和创新,如结合基因工程、现代分子生物学等相关学科,不断提高重金属污染土

壤的修复效率。

参考文献:

- [1] Wang Xin, Jia Youngfeng .Study on absorption and remediation of heavy metals by poplar and larch in contaminated soil[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2010(17):1331-1338.
- [2] McLaughlin M J, Parker D R, Clarke J M. Metals and micronutrients - food safety issues[J]. *Field Crops Res*, 1999, 60: 143-163.
- [3] 郑喜坤, 鲁安怀, 高翔, 等. 土壤中重金属污染现状与防治方法[J]. *土壤与环境*, 2002, 11(1): 79-84.
- [4] Yao Zhitong, Li Jinhui, Xie Henghua, et al. Review on remediation technologies of soil contaminated by heavy metals[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012(16): 722-729.
- [5] 蒋利萍. 国内土壤重金属污染现状及治理修复[J]. *内江师范学院学报*, 2010, 25(增刊2): 471-473.
- [6] 张凤荣. 土地保护学[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 230.
- [7] 范栓喜. 土壤重金属污染与控制[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011: 224.
- [8] 周焱. 加强肥料规范化管理 控制蔬菜重金属污染[J]. *环境污染与防治*, 2003, 25(5): 281-282, 285.
- [9] 楼玉兰, 章永松, 林咸永. 氮肥形态对污泥农用土壤中重金属活性及玉米对其吸收的影响[J]. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2005, 31(4): 392-398.
- [10] 杨云高, 王树林, 刘国, 等. 生物有机肥对烤烟产质量及土壤改良的影响[J]. *中国烟草科学*, 2012, 33(4): 70-74.
- [11] Bulluck L R, Brosius M, Evanylo G K, et al. Organic and synthetic fertility amendments influence soil microbial, physical and chemical properties on organic and conventional farms[J]. *Applied Soil Ecology*, 2002, 19(2): 147-160.
- [12] Naidu R, Harter R D. Effect of different organic ligands on cadmium sorption by and extractability from soils[J]. *Soil Science Soc Am J*, 1998, 62: 644-650.
- [13] 孙越鸿, 吴永胜, 干大木, 等. 施用蚯蚓粪对草莓果实中重金属残留的影响[J]. *现代农业科技*, 2011(11): 23-29.
- [14] 刘秀春, 高艳敏, 范业宏, 等. 生物有机肥对重金属的吸附解吸作用的影响[J]. *土壤通报*, 2008, 39(4): 942-945.
- [15] 郑少玲, 陈琼贤, 马磊, 等. 施用生物有机肥对芥蓝及土壤重金属含量影响的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(增刊): 62-66.
- [16] 江永红, 宇振荣, 马永良. 秸秆还田对农田生态系统及作物生长的影响[J]. *土壤通报*, 2001, 32(5): 209-213.
- [17] Dam R F, Mehdi B B, Burgess M S E, et al. Soil bulk density and crop yield under eleven consecutive years of corn with different tillage and residue practices in a sandy loam soil in central Canada[J]. *Soil & Tillage Research*, 2005, 84: 41-53.
- [18] 吴涌泉, 屈明, 孙芳, 等. 秸秆覆盖对土壤理化性状、微生物及生态环境的影响[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(14): 263-268.
- [19] 华璐, 陈世宝, 白玲玉, 等. 有机肥对镉锌污染土壤的改良效应[J]. *农业环境保护*, 1998, 17(2): 55-59, 62.
- [20] 贾乐, 朱俊艳, 苏德纯. 秸秆还田对镉污染农田土壤中镉生物有

- 效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(10): 1992-1998.
- [21] 甄丽莎, 谷洁, 高华, 等. 秸秆还田与施肥对土壤酶活性和作物产量的影响[J]. 西北植物学报, 2012, 32(9): 1811-1818.
- [22] 陈承利, 廖敏. 重金属污染土壤修复技术研究进展[J]. 广东微量元素科学, 2004, 11(10): 1-8.
- [23] 董霁红, 卞正富, 王贺封, 等. 徐州矿区充填复垦场地作物重金属含量研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(5): 180-182.
- [24] 汪雅各, 卢善玲, 盛沛麟, 等. 蔬菜重金属低富集轮作[J]. 上海农业学报, 1990, 6(3): 41-49.
- [25] Punz W F, Sieghardt H. The response of roots of herbaceous plant species to heavy metals[J]. *Envir Exp Bot*, 1993, 33(1): 85-98.
- [26] 刘志彦, 田耀武, 陈桂珠. 矿区周围稻米重金属积累及健康风险分析[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(1): 35-40.
- [27] 王英, 李正文, 贺紫荆. 不同水稻品种积累镉的差异及其动态变化[J]. 广西农业生物科学, 2007, 26(增刊1): 82-85.
- [28] 叶新新, 周艳丽, 孙波. 适于轻度 Cd、As 污染土壤种植的水稻品种筛选[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(6): 1082-1088.
- [29] 甘露, 朱玉梅, 何麒, 等. 不同甘蓝型油菜幼苗期对 Ag^+ 和 Pb^{2+} 的耐性研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 477-481.
- [30] 李军红, 田胜尼, 孙萌. Cu、Pb、Zn 及复合重金属对油菜种子萌发的抑制性研究[J]. 安徽农学通报, 2007, 13(19): 69-72.
- [31] 吕景泉, 张峰. 一种提高土地蓄水保肥能力的有效措施[J]. 黑龙江水利科技, 2008, 36(5): 67.
- [32] 徐加宽, 严贞, 袁玲花, 等. 稻米重金属污染的农艺治理途径及其研究进展[J]. 江苏农业科学, 2007(5): 220-226.
- [33] Elza Kovacs, William E, Dubbin B, et al. Influence of hydrology on heavy metal speciation and mobility in a Pb-Zn mine tailing[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 141(2): 310-320.
- [34] 胡文友, 祖艳群, 李元. 无公害蔬菜生产中重金属含量的控制技术[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊): 353-357.
- [35] 杜彩艳, 祖艳群, 李元. 石灰施猪粪对 Cd、Pb 和 Zn 污染土壤中重金属形态和植物有效性的影响[J]. 武汉植物学研究, 2008, 26(2): 170-174.
- [36] 何飞飞, 曾建兵, 吴爱平, 等. 改良剂修复利用镉污染菜地土壤的田间效应研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(31): 247-251.

欢迎订阅 2014 年

农业环境科学学报

《农业环境科学学报》是由农业部主管,农业部环境保护科研监测所、中国农业生态环境保护协会主办的全国性学术期刊。本刊被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、中国科学引文数据库核心期刊、中国精品科技期刊、中国权威学术期刊、2012 中国国际影响力优秀学术期刊。被美国《化学文摘》、俄罗斯《文摘杂志》和美国《剑桥科学文摘社网站》等多家国际检索系统收录。本刊主要刊登农业生态环境科学领域具有创新性的研究成果,包括新理论、新技术和新方法。读者对象为从事农业科学、环境科学、林业科学、生态学、医学和资源保护等领域的科技人员和院校师生。

《农业环境科学学报》为月刊,每月 20 日出版,大 16 开,208 页,每本定价 75.00 元,全年定价 900.00 元。国内外公开发行,全国各地邮局征订,邮发代号 6-64。如读者在当地邮局漏订,可通过邮局汇款至本刊编辑部补订。此外,编辑部存有 2010 年以前的各卷合订本,欢迎选购。

编辑部地址:天津市南开区复康路 31 号

电话:(022)23674336

电子信箱:caep@vip.163.com

邮编:300191

传真:(022)23674336

网址:http://www.aes.org.cn