

城市垃圾堆肥对 Cr 污染土壤的修复效应^{*}

黄启飞¹ 高 定¹ 丁德蓉² 陈同斌^{1**}

(¹ 中国科学院地理科学与资源研究所农业生态与环境技术试验站, 北京 100101; ² 西南农业大学资源环境学院, 重庆 400716)

【摘要】 通过模拟土培试验和盆栽试验, 研究垃圾堆肥对 Cr 污染土壤的修复效应. 结果表明, 垃圾堆肥对于土壤中有效 Cr 含量的影响是通过有机质含量、Eh、pH、< 0.01mm 粘粒含量等理化因子的变化来实现的; 有机质含量变化和 Eh 变化分别是旱地土壤和淹水土壤中的主要影响因素, 对有效 Cr 的效应分别占贡献的 73.4%、55.5%; 垃圾堆肥施入土壤后, 土壤渗透性得到改善, 土壤中的 Cr 因被还原、吸附而固定, 迁移量减少; 垃圾堆肥施入可以减少植株对 Cr 的吸收, 旱地土壤中, 施加垃圾肥可使生物产量增加 35.9%, 植株体内 Cr 含量下降 48.9%, 在淹水土壤中, 这种效应更加显著, 生物产量比旱地土壤高 86.3%, Cr 含量低 23.8%; 垃圾堆肥施入后, 植株体内的其他重金属含量未超标, 垃圾肥可以安全用于 Cr 污染土壤的修复.

关键词 垃圾 堆肥 Cr 污染 土壤修复

文章编号 1001-9332(2002)02-0167-04 **中图分类号** X53 **文献标识码** A

Remediation of chromium-polluted soil using municipal solid waste compost. HUANG Qifei¹, GAO Ding¹, DING Derong², CHEN Tongbin¹ (¹ Station for Agroecology and Environmental Technology, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101; ² Southwest Agricultural University, Chongqing 400716). -Chin. J. Appl. Ecol., 2002, 13(2): 167 ~ 170.

A study on the feasibility of remediation of Cr-polluted soil using municipal solid waste (MSW) compost was carried out. The result showed that organic matter (O. M.), Eh, pH and < 0.01mm of clay would influence the bioavailability of chromium in the soil, and O. M. and Eh were the principal influencing factors in the dryfield and inundating soil, up to 73.40% and 55.5% of the contribution rate affecting the bioavailability of chromium, respectively. The osmosis of the soil was improved when compost was applied, but the quantity of movable chromium was reduced because chromium in soil was deoxidized and adsorbed. MSW compost could reduce the absorption of chromium by the tested plant. The yield of the plant grown in the dry soil was increased by 35.9% and the content of Cr in the plant was decreased by 48.9%. The effect was more notable in the inundating soil: 86.3% of the yield increased and 23.8% of the Cr content decreased. However, MSW compost could not increase the risk of other heavy metal pollution.

Key words Municipal solid waste, Compost, Chromium pollution, Soil remediation.

1 引言

对受重金属污染的土壤进行修复, 抑制重金属进入植物体是保证食品安全、优质的前提, 也是当前环境工作者重要的研究课题之一. Cr 污染能够破坏土壤的生产力, 抑制作物生长, 降低产量, 同时积累在植物体内的 Cr 还会通过食物链影响人体健康^[2,5,8]. 根据有机质对 6 价 Cr 的还原作用原理^[1,3,4,6], 利用城市生活垃圾堆肥修复 Cr 污染土壤, 不仅可以恢复受污染土壤的功能, 而且可以为城市垃圾的消纳找到出路. 本文对于垃圾堆肥对 Cr 污染土壤的修复效果进行了初步探讨, 以便为 Cr 污染土壤的改良及合理利用提供科学依据.

2 材料与方法

2.1 供试材料

供试土壤为紫色土, 采自西南农业大学桑园, 质地为重壤. 城市生活垃圾采自重庆市北碚区金刚碑垃圾场, 以好氧法堆制, 除去杂物, 过 3mm 筛 (表 1).

2.2 试验设计及处理

2.2.1 Cr 污染土壤理化性质变化试验 试验共分 5 个处理水平, 其垃圾堆肥用量为每盆 0、0.15、0.50、0.85、1.00 kg, 采用 20cm × 20cm 米氏盆和 25cm × 30cm 瓦氏盆, 分别模拟旱地土壤和淹水土壤. 每盆装土 5kg, 垃圾堆肥与盆土混

^{*} 国家“九五”科技攻关项目 (96-909-01-05) 和北京市自然科学基金重大资助项目 (6990002).

^{**} 通讯联系人.

2001-08-21 收稿, 2001-10-10 接受.

表 1 土壤和垃圾堆肥的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the soil and MSW compost used

处理 Treatment	有机质 O. M. (g · kg ⁻¹)	CEC (cmol · g ⁻¹)	pH ¹⁾	粘粒 ²⁾ Clay (%)	重金属 Heavy metal (mg · kg ⁻¹)						
					Total Cr	Available Cr	Hg	Cu	As	Pb	Zn
土壤 Soil	19.3	21.8	7.74	52.3	57.0	N. D.	0.26	21.7	8.95	32.7	71.6
堆肥 Compost	192.2	34.0	6.38	-	40.5	N. D.	0.61	65.3	13.0	85.6	93.0

1) 水土比为 1:1 The ratio of water and soil was 1:1; 2) <0.01mm.

匀装盆,旱地土壤浇水 1000ml,淹水土壤浇水 4000ml 至淹水状态,7d 时测定土壤有机质含量,并加入 Cr⁶⁺ (K₂Cr₂O₇ 配成水溶液) 250mg · kg⁻¹. 旱地土壤在 14、21、28d 各浇水 1000ml. 各处理重复 3 次. 28d 时取土壤样品,风干、研磨、过 1mm 筛,分析有效 Cr 含量,并进行土壤理化性质分析. 测量旱地土壤渗液量,分析渗滤液中 Cr 浓度.

2.2.2 生物试验 生物试验运用二次通用旋转组合设计(表 2). 采用米氏盆和瓦氏盆,分别模拟旱地状态和淹水状态的土壤. 每盆均装土 5kg,将 Cr⁶⁺ (K₂Cr₂O₇ 配成水溶液) 按试验编码量与垃圾堆肥混入土中,施入底肥,陈化 30d. 5 月 29 日移栽薹菜 (*L. pomoea aquatica* L.), 于 7 月 20 日收获. 测定生物产量并分析植物样品中重金属含量.

表 2 试验设计方案

Table 2 Experimental design

处理 Treatment	变化间距 Variation interval	因素水平 Level of factor				
		-y	-1	0	+1	+y
Cr ⁶⁺ 浓度 Cr ⁶⁺ concentration (mg · kg ⁻¹)	176	0	74	250	426	500
垃圾堆肥用量 MSW compost (kg pot ⁻¹)	0.35	0	0.15	0.50	0.85	1.00

2.3 分析方法 土壤中有效 Cr 含量分析采用夏增禄法^[10]. 用 1mol L⁻¹中性 NH₄Ac 浸提有效态 Cr,土液比 1:5 (2g:10ml⁻¹),振荡 1h,离心过滤,滤液加 KMnO₄ 氧化后,比色测定. 其它分析均为常规分析方法.

3 结果与讨论

3.1 土壤理化性质变化对有效 Cr 含量的影响

土壤是垃圾堆肥的载体,垃圾堆肥的施入,必然会使土壤一些重要的理化性质发生变化,从而对土壤有效 Cr 含量产生影响. 选定土壤理化性质中有机质含量 (x_1)、氧化还原电位 (x_2)、土壤 pH (x_3)、CEC (x_4)、<0.01mm 粘粒 (x_5) 作为影响因子^[7,9].

对试验数据进行通径分析,通径系数矩阵 P ,决定系数矩阵 D 分别为:

旱地土壤:

$$P = \begin{pmatrix} -0.7248 & -0.2481 & -0.0146 \\ 0.6097 & 0.2950 & 0.0100 \\ 0.3737 & 0.1039 & 0.0283 \\ 0.5253 & 0.1798 & 0.0106 \\ 0.1798 & 0.0870 & 0.0029 \\ 0.0106 & 0.0029 & 0.0080 \end{pmatrix}$$

总决定系数 $R^2 = 0.99$

淹水土壤:

$$P = \begin{pmatrix} -0.3285 & -0.5492 & -0.1114 \\ 0.3170 & 0.5789 & 0.0915 \\ 0.2848 & 0.4122 & 0.1285 \\ 0.1079 & 0.1803 & 0.0366 \\ 0.1803 & 0.3351 & 0.0529 \\ 0.0366 & 0.0529 & 0.0165 \end{pmatrix}$$

总决定系数 $R^2 = 0.99$

各自变量对 y (有效 Cr 含量) 的贡献系数矩阵

为:

旱地土壤:

$$\begin{matrix} x_1 \rightarrow y & x_2 \rightarrow y & x_3 \rightarrow y \\ x_1 & 0.7340 & 0.2512 & 0.0148 \\ x_2 & 0.6667 & 0.3226 & 0.0108 \\ x_3 & 0.7413 & 0.2028 & 0.0559 \end{matrix}$$

淹水土壤:

$$\begin{matrix} x_1 \rightarrow y & x_2 \rightarrow y & x_3 \rightarrow y \\ x_1 & 0.3322 & 0.5551 & 0.1127 \\ x_2 & 0.3173 & 0.5897 & 0.0931 \\ x_3 & 0.3453 & 0.4991 & 0.1557 \end{matrix}$$

从贡献系数矩阵可知,旱地土壤中,对有效 Cr 的含量有显著影响的土壤理化因子有 O. M. 含量 (x_1)、Eh (x_2)、pH (x_3). x_1 直接效应占贡献的 73.4%. 因为有机质是还原性物质,必然会引起土壤 Eh 变化,从贡献系数矩阵可知, x_1 通过 x_2 对 y 的决定的相对贡献占总贡献的 25.12%. x_1 通过 x_3 对 y 的决定的相对贡献仅为 1.48%,几可忽略. 因此,垃圾堆肥施入旱地土壤中,主要是通过有机质的直接作用来影响有效 Cr 含量,其次才是通过 Eh 的变化对有效 Cr 含量产生影响.

在淹水土壤中,对有效 Cr 含量变化有显著影响的土壤理化因子是 x_1 、 x_2 、 x_5 . 和旱地土壤不同,有机质的直接效应仅占 33.2%. 而 x_1 通过 x_2 对 y 的决定的相对贡献占据主导地位,为 55.5%. 因此,在淹水土壤中,垃圾堆肥施入土壤将主要通过影响 Eh 的变化来影响有效 Cr 含量,其次才是有机质的直接作用. 从贡献矩阵可知,垃圾堆肥施入引起粘粒

含量变化,而使有效 Cr 含量变化,这一变化为正相关.即施入垃圾堆肥使粘粒含量下降($r = -0.866^*$),导致土壤粘粒吸附有效 Cr 的总量下降.这一作用过程占总贡献的 11.3%.

3.2 垃圾堆肥对土壤中 Cr 迁移的影响

垃圾堆肥的施入,可以使粘粒的粘结力减弱,促进团粒结构的形成,从而使土壤孔隙度,渗透性都有所改善,对土壤中 Cr 迁移产生影响.

对外源 Cr 浓度(X_1)、垃圾堆肥用量(X_2)、渗滤液量、Cr 迁移量的试验数据配置回归方程.

$$Y_{\text{渗滤液量}} = 648.53 + 96.98 X_2 \quad (1)$$

$$(F_2 = 16.69^{**}, F_1 = 5.54)$$

$$Y_{\text{Cr迁移量}} = 95.41 + 57.63 X_1 - 6.83 X_2 - 13.41 X_1^2 - 8.15 X_2^2 - 3.10 X_1 X_2 \quad (2)$$

$$(F_2 = 60.76^{**}, F_1 = 250.30^{**})$$

方程(1)表明,垃圾堆肥的施入与渗滤液量呈直线正相关.因此,垃圾堆肥的施入将使渗滤液量增加.

在进行正交试验结果的统计时, F_1 是对正交试验的失拟项进行检验的参数, F_2 是对回归方程进行检验的参数.当 F_1 检验显著时,说明失拟项是显著的,试验中还存在其它不可忽略的因素需要考虑,因此需要添加变量或改变二次回归模型重新试验.当 F_1 检验不显著时,才可以进一步用统计量 F_2 对二次回归模型进行检验.方程(2)表明,渗滤液中 Cr 含量与垃圾堆肥的关系用二次回归模型进行模拟失拟显著($F_1 > F_{0.01(3,4)} = 16.7$),因此不能用此模型来描述它们之间的关系.这种现象说明,除了垃圾堆肥的作用外,土壤中还存在其它因素对渗滤液中的 Cr 含量产生影响.

从土壤中 Cr 的迁移率来看,在污染水平为 $426\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,每盆施 0.85mg 垃圾堆肥的处理,土壤 Cr 的迁移率为 5.25%,每盆施 0.15kg 垃圾堆肥后,迁移率为 6.89%.污染水平为 $74\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,每盆施 0.85、0.15kg 垃圾堆肥的处理,其土壤中 Cr 的迁移率分别为 1.50%、2.08%,因此,施加垃圾堆肥,可使土壤渗滤液加大,但是却会使土壤中 Cr 的迁移能力减弱.

3.3 垃圾堆肥对 Cr 污染土壤的生物效应

为了验证垃圾堆肥的解毒效果,进行了盆栽试验.结果表明,垃圾堆肥在淹水情况下对 Cr 污染土壤修复作用表现得更显著,旱地土壤的植株大多死亡,死亡率为 70%,淹水土壤的植株大多成活,死亡率 30%.而且相同的污染水平和施肥量,淹水土壤中生物产量更高,植株体内 Cr 含量更低.如污染水

平都是 $74\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,垃圾堆肥用量为每盆 0.85kg 时,淹水土壤生物产量比旱地土壤高 86.3%,Cr 含量低 23.8%.结果表明,淹水条件在 Cr 污染土壤修复中有重要意义.

因为旱地土壤植株死亡太多,不能配置回归方程,只能进行直观比较.在旱地土壤中,当污染水平相同($74\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),每盆施 0.85kg 垃圾堆肥的处理,其生物产量比每盆施 0.15kg 垃圾堆肥处理的生物产量高近 1 倍,植株体内 Cr 含量低 20%.在淹水土壤中,当污染水平相同($250\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),每盆施 1.00kg 的垃圾堆肥比每盆施 0.5kg 的垃圾堆肥具有更明显的修复效果:生物产量增加 35.9%,植株体内 Cr 含量下降 48.9%.结果表明,垃圾堆肥施入可以减少植物对 Cr 的吸收量,提高植物生物产量.

将淹水情况下的植株生物产量(Y),外源 Cr 浓度(X_1),垃圾堆肥用量(X_2)的试验数据拟合为抛物线方程:

$$Y = 131.55 - 118.94 X_1 + 39.02 X_2 + 17.24 X_1^2 - 25.64 X_2^2 - 14.79 X_1 X_2 \quad (3)$$

$$(F_2 = 30.85^{**}, F_1 = 14.60 < F_{0.01(3,4)} = 16.7)$$

从方程(3)可以计算得出,当污染程度为 $250\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,垃圾堆肥用量在 (0, 0.85) 范围时,植物产量随着垃圾堆肥用量增加而逐渐增加.这是因为一方面垃圾堆肥钝化了土壤中的有效 Cr,使植株危害程度减轻,一方面垃圾堆肥可提供大量的植物养分,促进植物生长.植物产量在垃圾用量为每盆 0.85kg 时达到最高(144.9g),垃圾堆肥继续增加,生物产量反而下降.

垃圾堆肥可使土壤的有机质含量显著提高($r = 0.99^{**}$),但是垃圾堆肥过量施用,产生大量还原物质,过多对植物生长也是有害的.这从另一个角度说明,修复 Cr 污染土壤,垃圾堆肥不是越多越好,既不经济也不利于生态修复.

3.4 垃圾堆肥施用的安全性

对植株的重金属含量分析结果表明,植物中重金属除了 Cr 外,其它重金属没有超标.植物中 Hg、Pb、Cu、Zn 含量和对照基本接近,不随垃圾堆肥的施用量增加而增加.当垃圾堆肥的用量超过每盆 0.50kg 后,植株 As 的含量有一定的增加.当垃圾堆肥用量达到 $1.00\text{kg}(450\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$ 时,植株的 As 含量为 $0.044\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,比对照高 150%,说明有一定程度的累积,但是远远低于国家标准($0.5\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).因此,垃圾堆肥施入土壤不会引起植株体内的其它重金属污染.但是,因为 Cr 含量大多超标,所以修复

后土壤在一段时期内不宜种植粮食作物及蔬菜,应首先种植观赏园林类植物,待土壤中 Cr 浓度通过植物修复作用下降到适宜的范围才宜改成农田。

4 结 论

4.1 施用垃圾堆肥可以修复 Cr 污染土壤,而且垃圾堆肥的使用不会导致植株中的其它重金属超标。

4.2 垃圾堆肥主要是通过改变有机质(O. M.)含量、Eh、pH、<0.01m 粘粒含量等土壤理化性质来影响有效 Cr 的含量。O. M. 含量、Eh 分别是旱地土壤和淹水土壤中影响有效 Cr 含量的首要因素。

4.3 垃圾堆肥施入土壤,改善了土壤的结构状况,土壤中的 Cr 被还原吸附后固定在土壤中,迁移能力减弱。

4.4 垃圾堆肥的施用可以减少植物对 Cr 的吸收量。当 Cr 污染水平相同时,多施垃圾堆肥可使生物产量提高,植株体内 Cr 含量减少。当污染水平和施肥量相同时,淹水土壤的生物产量更高,植株体内 Cr 含量更低。

参考文献

- 1 Ahumada I, Mendoza J, Navarrete E, et al. 1999. Sequential extraction of heavy metals in soils irrigated with wastewater. *Commun Soil Sci Plant Anal*, **30**(9/10):1507~1519
- 2 Bishnoi NR, Dua A, Gupta VK, et al. 1993. Effect of chromium on seed germination, seedling growth and yield of peas. *Agric Ecosyst Environ*, **47**(1):47~57
- 3 Chinthamreddy S, Reddy KR. 1999. Oxidation and mobility of trivalent chromium in manganese-enriched clays during electrokinetic remediation. *J Soil Contam*, **8**(2):197~216
- 4 Grove JH, Ellis BG. 1980. Extractable chromium as related to soil pH and applied chromium. *J Soil Sci Soc Am*, **44**(2):238~242
- 5 Han I, Schlautman MA, Batchelor B. 2000. Removal of hexavalent chromium from groundwater by granular activated carbon. *Water Environ Res*, **72**(1):29~39
- 6 Kisku GC, Barman SC, Bhargava SK. 2000. Contamination of soil and plants with potentially toxic elements irrigated with mixed industrial effluent and its impact on the environment. *Water Air Soil Pollut*, **120**(1/2):121~137
- 7 Li H-Y (李惠英), Deng B-E (邓波儿), Liu T-C (刘同仇). 1992. The amending effect of organic-fertilizer on polluted soil by chromium. *Agric Environ Protect* (农业环境保护), **11**(5):236~237 (in Chinese)
- 8 Moslehuddin AZM, Laizoo S, Egashira K. 1999. Trace elements in Bangladesh paddy soils. *Commun Soil Sci Plant Anal*, **30**(13/14):1975~1996
- 9 Wang X-P (王小平), Zhao X-Y (赵学蕴), Jin W-X (金维续). 1986. The detoxification effect of organic-fertilizer on polluted soil by chromium. *Environ Sci* (环境科学), **7**(3):18~21 (in Chinese)
- 10 Xia Z-L (夏增禄). 1988. The Environmental Capacity and Application of Soil. Beijing: Meteorology Press. 141~142 (in Chinese)

作者简介 黄启飞,男,1973年生,博士生,研究方向为城市固体废弃物资源化,发表论文4篇,E-mail:huangqf@igsnrr.ac.cn

《农业生态学》新书介绍

由中国生态学会副理事长、华南农业大学热带亚热带生态研究所所长骆世明教授主编的普通高等教育“九五”国家级重点教材和面向21世纪课程教材《农业生态学》已于2001年3月由中国农业出版社出版。全书55万字,共分十章。第一章概述农业生态学的发展背景和研究内容,第二、三章介绍农业生态系统的结构(基本生物结构和综合结构),第四、五章阐述农业生态系统的基本功能(能流和物流),第六章讲述农业的资源效益,第七章介绍农业生态系统的调节和控制。第八、九章利用农业生态学的基本概念和基本原理剖析农业发展的实际,探讨世界农业发展的道路(可持续发展)和中国农业发展的道路(生态农业)。第十章农业生态工程着重介绍比较实用的农业生态系统评价、分析和设计方法。该教材注重吸收最新的有关农业生态学的研究进展和研究热点,例如全球变化、可持续发展、生物多样性、中国生态农业发展、化感作用、分子生态学、景观生态学、资源经济学、环境经济学等内容。教材的最后还列举了农业生态学一些常用的实验和实习,有关生态农业的一些幻灯片和录像资料以及一些常用的能流、物流参数和计算机程序。该教材可供农学、土化、气象、农经、环保等专业的学生作为教材使用,也可作为教师、科研人员的教学参考书或工具书。出版社、各新华书店等有售。

(华南农业大学热带亚热带生态研究所 510642 蔡昆争)