

水分和有机物料对镉污染土壤的改良效应^①

张大庚, 依艳丽*, 李亮亮, 栗杰

(沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110161)

摘要: 通过室内培养和盆栽试验相结合的方式, 系统研究了3种土壤水分含量条件下, 添加不同有机物料对镉(Cd)污染土壤的改良效应。研究表明: 淹水、田间持水量和65%相对含水量条件下添加有机物料均有利于污染土壤中可交换态Cd含量的降低, 铁锰氧化物及有机结合态Cd含量的增加。随土壤中水分含量的增加, 影响程度增加, 即淹水>田间持水量>65%相对含水量。3种水分条件下, 添加蚯蚓粪处理Cd活性降低明显, 其次为猪粪处理, 草炭处理相对较差。淹水条件下, 油菜体内Cd的含量最低, 田间持水量和65%相对含水量条件下油菜部分发育指标差异不显著。添加不同有机物料各处理促进油菜生长的顺序大致为: 蚯蚓粪>草炭>CK>猪粪。

关键词: 水分; 有机物料; 镉; 改良

中图分类号: X53

镉(Cd)是一种非营养性微量元素, 由于Cd能抑制植物的生长和发育, 在土壤中相对稳定, 可积累且不易消除, 因而土壤Cd污染问题越来越受到农业和环境工作者的重视。国内外对土壤中Cd污染的研究报道也较多, 但很多方面未得出一致性的结论, 还缺乏一些量化的指标^[1-5]。目前我国约有1.3万hm²耕地受到Cd的污染, 涉及11个省市的25个地区^[6]。对Cd污染土壤治理和改良的研究报道较多, 其中利用有机物料原位固定土壤中的污染物是研究的热点问题之一, 然而很多研究者的结论存在一定的分歧^[7-9]。为此, 本论文通过控制淹水、田间持水量和65%相对含水量3种水分条件系统研究草炭、猪粪和蚯蚓粪3种有机物料对Cd污染土壤的改良效应, 研究结果

可为Cd污染土壤的治理提供一定的理论和实践指导。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为棕壤, 采自葫芦岛锌厂附近的前进村北, 其基本性质见表1。土壤全Cd含量为11.54 mg/kg, 为Cd重度污染土壤。

供试有机物料, 包括草炭、猪粪和蚯蚓粪。草炭、猪粪和蚯蚓粪在70℃~80℃下烘干后, 粉碎, 过1 mm筛备用。其基本性质见表2。

1.2 试验方案

将供试棕壤中分别添加10 g/kg草炭、猪粪和蚯

表1 供试土壤的基本性质

Table 1 Basic properties of studied soils

土壤类型	pH	有机质 (g/kg)	<0.001mm黏粒 (g/kg)	全N (g/kg)	全P (g/kg)	全Cd (mg/kg)
棕壤	5.45	11.3	115.3	1.84	0.41	11.54

表2 供试有机物料基本性质

Table 2 Basic properties of studied organic materials

有机物料	全C (g/kg)	全N (g/kg)	全P (g/kg)	全K (g/kg)	全Cd (mg/kg)
草炭	301	4.7	0.9	1.6	0.24
猪粪	212	10.3	12.8	8.7	0.30
蚯蚓粪	157	4.9	1.3	5.0	0.097

①基金项目: 沈阳农业大学校青年基金项目(2005025)资助。

* 通讯作者 (yiyali@126.com)

作者简介: 张大庚(1975—), 女, 辽宁凌海人, 副教授, 主要从事土壤环境保护方面的教学和科研工作。E-mail: cfy111@sohu.com

蚓粪，控制在淹水（土壤表面 1 cm 水层）、田间持水量（含水量 270 g/kg）、65% 相对含水量（含水量 180 g/kg）3 种不同的水分条件下，以不添加有机物料为对照，室温好氧培养 90 天。之后取出土壤风干，研磨，过筛，进行室内盆栽（10 cm × 10 cm）试验。共 12 个处理，3 个平行。供试作物为油菜。生长期为 1 个月。

1.3 测定项目及方法

土壤中 Cd 全量采用硝酸-盐酸-高氯酸消解，植物样中 Cd 全量采用硝酸-高氯酸消解，原子吸收分光光度法测定。

土壤中 Cd 形态分组采用 Tessier 逐级提取法。将土壤 Cd 形态分为可交换态（1 mol/L MgCl₂ 溶液浸提），碳酸盐结合态（pH 5，1 mol/L NaOAc 溶液浸提），铁锰氧化物结合态（0.4 mol/L 盐酸羟胺溶液浸提），有机结合态（0.02 mol/L HNO₃-30% H₂O₂-3.2 mol/L NH₄OAc 混合溶液浸提）。各浸提溶液中的 Cd 含量采用原子吸收分光光度法测定。

2 结果与分析

2.1 水分和有机物料对土壤 Cd 形态及化学性质的影响

在淹水、田间持水量和 65% 相对含水量 3 种水分条件下室温培养 Cd 污染土壤 3 个月，施入有机物料处理均降低了土壤中可交换态 Cd 的含量，但降低幅度不同（表 3）。其中在 3 种不同水分条件下，土壤中全 Cd 的含量大小顺序为：淹水 < 田间持水量 < 65% 相对含水量。施入蚯蚓粪处理土壤在 3 种水分条件下可交换态 Cd 含量降幅最大，仅在淹水条件下施入草炭处理土壤可交换态 Cd 含量降幅大于猪粪。施入有机物料处理增加了土壤碳酸盐结合态 Cd 含量，同 CK 之间差异均达到了极显著水平。其中添加蚯蚓粪处理增加幅度最小。不同水分处理土壤之间的差异未达到极显著水平。有机物料的添加显著增加了土壤中 铁锰氧化物结合态和有机结合态 Cd 的含量，其中淹水条件下铁锰氧化物结合态 Cd 的含量明显高于其他水分条件，而田间持水量和 65% 相对含水量条件下的差异较小。

表 3 盆栽土壤中不同形态 Cd 的含量 (mg/kg)

Table 3 Contents of Cd in different forms in potted soils

水分处理	有机物料处理	可交换态 Cd	碳酸盐结合态 Cd	铁锰氧化物结合态 Cd	有机结合态 Cd
淹水	CK	2.10 D	0.53 FG	0.50 F	0.53 FG
	草炭	1.39 E	0.77 AB	0.81 A	0.63 DE
	猪粪	1.65 E	0.84 A	0.69 B	0.66 CDE
	蚯蚓粪	1.30 E	0.66 CDE	0.68 BC	0.76 B
田间持水量	CK	3.34 A	0.52 FG	0.48 F	0.45 GH
	草炭	2.58 BC	0.74 BC	0.66 BCD	0.90 A
	猪粪	2.47 BC	0.64 DE	0.59 DE	0.57 EF
	蚯蚓粪	2.09 D	0.59 EF	0.68 BC	0.69 BCD
65% 相对含水量	CK	3.53 A	0.48 G	0.46 F	0.39 H
	草炭	2.73 B	0.64 DE	0.60 CDE	0.88 A
	猪粪	2.60 BC	0.73 BCD	0.54 EF	0.66 BCE
	蚯蚓粪	2.31 CD	0.58 EF	0.53 EF	0.73 BC

注：数据经 Tukey 法多重比较分析，不同大写字母表示 p < 0.01 水平显著，下同。

葫芦岛地区原土的 pH 值为 5.45，经不同水分条件培养后 pH 值有增加的趋势，其中淹水培养条件下，土壤 pH 值最高，田间持水量和 65% 相对含水量条件下差异较小。在 3 种水分条件下，添加草炭处理土壤 pH 值低于 CK，添加猪粪和蚯蚓粪处理土壤 pH 值均高于 CK，但不同处理间差异不显著（表 4）。

随土壤培养水分含量的增加，土壤中无定形氧化铁的含量增加，增加的顺序为淹水 > 田间持水量 >

65% 相对含水量。添加 3 种有机物料后土壤中无定形氧化铁的含量均增加，但规律性不明显（表 4）。

2.2 水分和有机物料对 Cd 污染土壤中油菜苗期生长的影响

不同水分条件下添加草炭、猪粪和蚯蚓粪各处理对油菜的出苗和初期生长均未表现明显的影响。但随着油菜的生长发育，不同处理对油菜生长的影响产生了差异，有的处理出现了一些中毒的症状，表现为生长缓慢、

叶片发黄、长势较差。其中,在淹水条件下,Cd污染土壤中油菜的生长均未出现中毒症状(表 5)。叶片的颜色在 1 个月的生长期中均为嫩绿色,叶片数量也较多,同其他处理相比平均株高、叶宽、每株鲜重和每株干重均较高,其中添加蚯蚓粪处理油菜的株高、叶宽、每株鲜重、每株干重的值最大,分别为 9.24 cm、1.72 cm、

0.32 g、0.0260 g。而淹水条件与其他水分条件相比,油菜中Cd含量较低,在 10.03 ~ 24.86 mg/kg之间。从表 3 数据分析可知,在淹水条件下土壤中可交换态Cd含量低于其他水分条件,而其他形态Cd的含量则相反。说明经过淹水处理后,土壤中Cd的活性降低,因此减少了对油菜苗期生长的毒害作用。

表 4 水分和有机物料对土壤化学性质的影响

Table 4 Effects of water and organic materials on chemical properties in Cd polluted soils

有机物料处理	淹水		田间持水量		65% 相对含水量	
	pH	无定形氧化铁 (g/kg)	pH	无定形氧化铁 (g/kg)	pH	无定形氧化铁 (g/kg)
CK	6.15 A	2.67 A	5.85 A	2.50 A	5.78 A	2.47 A
草炭	6.00 A	4.30 B	5.74 A	2.96 A	5.72 A	2.82 A
猪粪	6.17 A	4.49 C	5.82 A	3.23 B	5.84 A	3.05 A
蚯蚓粪	6.23 A	3.75 A	6.04 A	3.05 A	6.01 A	3.07 B

表 5 盆栽油菜结果

Table 5 Results of potted rapeseeds

水分处理	有机物料处理	株高 (cm)	叶宽 (cm)	叶色	每株鲜重 (g)	每株干重 (g)	Cd 含量 (mg/kg)
淹水	CK	8.53 B	1.56 B	绿	0.27 B	0.0185 D	24.86 D
	草炭	8.86 AB	1.71 A	绿	0.31 A	0.0219 C	10.03 F
	猪粪	6.86 D	1.29 DE	绿	0.24 C	0.0179 D	11.49 F
	蚯蚓粪	9.24 A	1.72 A	绿	0.32 A	0.0260 A	10.89 F
田间持水量	CK	6.87 D	1.26 E	绿, 略黄	0.14 G	0.0121 F	28.24 B
	草炭	7.14 CD	1.34 CDE	绿, 偏黄	0.16 EF	0.0125 F	26.27 D
	猪粪	5.98 E	0.92 H	偏黄	0.11 H	0.0093 G	26.45 CD
	蚯蚓粪	7.60 C	1.36 CD	绿	0.21 D	0.0160 E	21.58 E
65% 相对含水量	CK	5.49 E	1.03 G	绿, 偏黄	0.15 FG	0.0070 H	31.81 A
	草炭	6.83 D	1.40 C	绿	0.17 E	0.0230 BC	28.09 BC
	猪粪	6.00 E	1.15 F	黄	0.16 EF	0.0115 F	28.53 B
	蚯蚓粪	7.43 C	1.43 C	绿	0.21 D	0.0239 B	26.24 D

在田间持水量和 65% 相对含水量条件下,大部分处理 Cd 污染土壤中油菜均已开始出现中毒症状,叶片发黄,生长缓慢。其中,在田间持水量下的各处理其油菜平均株高和平均叶宽大于在 65% 相对含水量下,但每株鲜重、每株干重及 Cd 含量后者略高于前者。添加不同有机物料对油菜生长的影响同淹水条件下相似。经统计分析,淹水和田间持水量、65% 相对含水量条件下各处理之间油菜生长指标差异极显著,但田间持水量和 65% 相对含水量条件下各处理之间差异不显著。

在不同的水分条件下添加猪粪培养的土壤均未明显促进油菜的生长,相反各种生长指标均低于对照。在盆栽的条件下,土壤中猪粪的添加量相对于农业的

生产实际偏高,腐熟程度不好,有可能出现烧苗的现象,结果不能完全反映出添加猪粪后对土壤中Cd活性的影响。同时猪粪中的重金属Cu含量相对较高,也可能增加了重金属的毒害作用。因此在利用猪粪改良重金属污染土壤的过程中,要根据猪粪的组成特征慎重地选择。

经相关分析,土壤中可交换态Cd含量同其他形态Cd含量呈负相关关系,除与有机结合态Cd含量未达到显著相关水平外,与其他形态均达到显著相关水平以上(表 6)。油菜每株干重与土壤可交换态Cd含量呈极显著负相关关系;油菜中的Cd含量除与土壤可交换态Cd含量呈正相关关系,同其他形态Cd含量和油菜每株

干重之间均呈负相关关系，而且除与有机结合态Cd含量之间未达到显著水平外，均达到了显著水平以上。说明土壤中可交换态Cd的含量越高，油菜吸收的Cd量越高。随油菜吸收的Cd量增加，油菜的干重减少，

油菜产量降低。因此，正是因为不同水分和有机物料处理影响了土壤中不同形态Cd的分配，特别是对土壤中可交换态Cd含量的影响，从而导致了不同处理土壤种植油菜生长上的差异。

表 6 土壤中不同形态 Cd 与油菜产量和油菜中 Cd 含量的相关关系

Table 6 Correlation coefficients between Cd in different forms and rape weights, Cd contents of rapes

	可交换态 Cd	碳酸盐结合态 Cd	铁锰氧化物结合态 Cd	有机结合态 Cd	油菜干重	油菜中 Cd 含量
可交换态 Cd	1					
碳酸盐结合态 Cd	-0.600*	1				
铁锰氧化物结合态 Cd	-0.784**	0.750**	1			
有机结合态 Cd	-0.383	0.529	0.506	1		
油菜干重	-0.687**	0.289	0.527	0.483	1	
油菜中 Cd 含量	0.906**	-0.620*	-0.823**	-0.212	-0.601*	1

注：* 表示 $p < 0.05$ 水平下相关性显著 ($r > 0.553$)，**表示 $p < 0.01$ 水平下相关性显著 ($r > 0.684$)。

施入草炭、猪粪和蚯蚓粪 3 种有机物料增加了土壤中有有机物质的含量，有机物质中含有各种含量不同的养分元素，也是影响油菜生长的重要因素。从表 7 中数据可知，在淹水培养条件下，土壤速效 N、P、K 和有机质含量相对较高，同上述油菜生长各指标的规律性一致，土壤中速效养分含量的增加有利于油菜的生长发育。但不同的是，在所有的处理中以添加猪粪处理的土壤速效 N、P、K 含量最高，最高含量分别为：56.35、9.61 和 37.81 mg/kg，但油菜却以添加蚯蚓粪处理生长最好。添加草炭处理在 3 种水分

条件下，土壤速效 N、P、K 含量均较低，但有机质含量最高。添加蚯蚓粪各处理土壤中速效 N、P、K 和有机质的含量虽不是最高，但油菜的生长发育各指标均最高。经统计分析可知，油菜每株干重同土壤中速效 N、P、K 和有机质含量之间为正相关关系，但相关系数均未达到显著水平，因此油菜的生长发育状况是土壤中 Cd 活性和不同养分综合作用的结果。在本试验条件下，由于土壤中 Cd 含量相对较高，其对油菜生长的影响大于土壤养分对生长的促进作用。

表 7 盆栽土壤中速效 N、P、K 和有机质含量

Table 7 Available N, P, K contents and OM contents of potted soils

水分处理	有机物料处理	速效 N		速效 P		速效 K		有机质	
		含量 (mg/kg)	增幅 (%)	含量 (mg/kg)	增幅 (%)	含量 (mg/kg)	增幅 (%)	含量 (g/kg)	增幅 (%)
淹水	CK	38.15 DE	-	3.19 DE	-	22.68 E	-	11.02 F	-
	草炭	49.21 B	29.0	3.49 CDE	9.4	24.04 DE	6.0	21.76 AB	97.5
	猪粪	56.35 A	47.7	9.61 A	201.3	37.81 A	66.7	14.43 CDE	30.9
	蚯蚓粪	44.65 C	17.0	3.64 C	14.1	25.98 BCD	14.6	13.61 DE	23.5
田间持水量	CK	25.55 I	-	3.19 DE	-	22.67 E	-	10.20 F	-
	草炭	27.32 HI	6.9	3.28 CDE	2.8	25.58 BCD	12.8	20.77 B	103.6
	猪粪	39.93 D	56.3	8.52 B	167.1	36.81 A	62.4	14.51 CD	42.3
	蚯蚓粪	29.44 GH	15.2	3.31 CDE	3.8	24.61 CDE	8.6	13.35 E	30.9
65% 相对含水量	CK	30.85 FG	-	3.11 E	-	25.97 BCD	-	8.53 G	-
	草炭	31.53 FG	2.2	3.26 CDE	4.8	26.48 BC	2.0	21.96 A	157.4
	猪粪	36.43 E	18.1	9.26 A	197.7	37.21 A	43.3	14.98 C	75.6
	蚯蚓粪	32.24 F	4.5	3.56 CD	14.5	27.09 B	4.3	13.65 DE	60.0

土壤中不同形态 Cd 的含量、油菜中 Cd 的含量及土壤中速效 N、P、K 和有机质的含量与油菜的干物重的直接通径系数表明,对油菜干物重的贡献大小为:可交换态 Cd (142.7424) > 有机结合态 Cd (32.5840) > 碳酸盐结合态 Cd (23.3485) > 铁锰氧化物结合态 Cd (20.1644) > 速效 P (-1.6966) > 速效 K (-1.1180) > 有机质 (-0.9866) > 油菜中的 Cd (-0.6579) > 速效 N (0.2501)。可见,可交换态 Cd 含量对油菜生长的影响最大。其中油菜中 Cd 含量、铁锰氧化物结合态 Cd、碳酸盐结合态 Cd、有机结合态 Cd 及土壤有机质通过可交换态 Cd 作用于油菜的通径链系数较大(129.3909、-111.9194、-85.7143、-54.7323、-49.2623),但自身同油菜干物重的直接通径系数较小,说明它们主要是通过可交换态的间接作用对油菜生长产生影响。

3 小结

(1) 不同水分条件下添加有机物料均有利于污染土壤中可交换态 Cd 含量的降低,但铁锰氧化物及有机结合态 Cd 含量增加。随土壤中水分含量的增加,影响程度增加,即淹水 > 田间持水量 > 65% 相对含水量。

(2) 3 种水分条件下,不同有机物料对 Cd 形态转化的影响程度不同。其中添加蚯蚓粪处理 Cd 活性降低明显,其次为猪粪,草炭相对较差。

(3) 3 种水分条件下,以淹水条件下,油菜体内 Cd 的含量最低,油菜的生长发育最好。田间持水量和 65% 相对含水量条件下油菜部分发育指标差异不显著。

(4) 3 种水分条件下,添加不同有机物料各处理对

油菜生长影响顺序大致为:蚯蚓粪 > 草炭 > CK > 猪粪;添加蚯蚓粪处理在不同的水分条件下,均能有效降低 Cd 的活性,减少油菜对 Cd 的吸收,有效地促进作物的生长发育。

参考文献:

- [1] Trikksson JE. A field study on factors influencing Cd levels in soil and in grain of oats and winter wheat. *Water Air Soil Pollution*, 1990, 53: 69-81
- [2] 熊礼明, 鲁如坤. 几种物质对水稻土吸收镉的影响及机理. *土壤*, 1992, 24(4): 197-200
- [3] 郑文娟, 邓波儿. 镉对作物品质的影响. *土壤*, 1993, 25 (6): 324-326
- [4] 陈守莉, 孙波, 王平祖, 宗良纲. 污染水稻土中重金属的形态分布及其影响因素. *土壤*, 2007, 39(3): 375-380
- [5] 王凯荣. 我国农业重金属污染现状及其治理利用对策. *农业环境保护*, 1997, 16(6): 274-278
- [6] 王庆仁, 刘秀梅, 董艺婷. 典型重工业区与污灌区植物的重金属污染状况及特征. *农业环境保护*, 2002, 21(2): 115-118, 149
- [7] 林淑芬, 李辉信, 胡锋. 蚓粪对黑麦草吸收污染土壤重金属铜的影响. *土壤学报*, 2006, 43(6): 911-916
- [8] Hsieh VF, Hsu KN. An experiment on the organic farming of sweet corn and vegetable soybeans. *Bulletin of Taichung District Agricultural Improvement Station*, 1993, 39: 29-39
- [9] Payne GG, Martens DC, Winarko C, Perera NF. Availability and the form of copper in three soils following eight annual applications of copper enriched swine manure. *J. Environ. Qual.*, 1988, 17: 740-746

Effects Of Water and Organic Materials on Amelioration of Cd-Polluted Soil

ZHANG Da-geng, YI Yan-li, LI Liang-liang, LI Jie

(Land and Environment College, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110161, China)

Abstract: Incubation and pot experiments were conducted to study the effects of organic materials (grass charcoal, pig manure and earthworm manure) on the amelioration of Cd-polluted soil. The experiment was performed under three water conditions, i.e. submerged, field capacity and 65% relative water content. The results showed that the content of soil exchangeable Cd decreased significantly and FeMn-Cd, Ob-Cd contents increased after adding organic materials under different water conditions. The effect increased with the increase of soil moisture, i.e. submerged > field capacity > 65% relative water content. The effects of organic materials on the availability of Cd were different, with an order of earthworm manure > pig manure > grass charcoal. The growth state of rape in soil at submerged state was better than other water conditions. Some differences of growth indexes of rape were not significant between field capacity and 65% relative water content. The effects of organic materials on the growth of rape were also different, with an order of earthworm manure > grass charcoal > CK > pig manure.

Key words: Water, Organic materials, Cd, Amelioration