

文章编号: 0529-6579 (1999) 04-0097-05

施用城市污泥的土壤重金属生物有效性^{*}

温琰茂, 鲁艳兵

(中山大学环境科学系, 广州 510275)

摘 要: 对盆栽试验的植物和土壤样品的分析测定表明, 施用城市污泥对植物生长发育有明显的促进作用, 生长量随污泥施用量增加而增加; 施用污泥的土壤重金属 (Cd、Cr、Ni、Zn) 有效态含量和植物重金属含量也随污泥施用量增加而提高. 施用污泥的土壤加施石灰 (CaO) 将 pH 调节到 6.5 和 7.5 后, 土壤有效态 Ni、Zn 的含量明显减少, 但有效态 Cr 含量升高; 植物对 Ni、Zn、Cd 的吸收大幅度降低, 表现出加施石灰提高土壤 pH 值对随污泥进入土壤的 Ni、Zn、Cd 的生物有效性有明显的抑制作用.

关键词: 城市污泥; 农业施用; 重金属; 有效性控制

中图分类号: X 171 **文献标识码:** A

城市污水处理厂产生的污泥, 除了含有丰富的有机质、N、P 等植物营养成分外, 还含有大量的重金属. 在城市污泥土地处理和农业利用过程中, 在培肥土壤、增加养分、促进植物生长的同时, 也增加了土壤重金属含量和植物对重金属的吸收. 随污泥进入土壤的重金属, 并不是全部都能被植物吸收, 只有一部分能被植物吸收, 通常把这部分含量称为有效态含量. 重金属在土壤中的有效态含量除了与土壤重金属浓度有关外, 还与土壤的物理性质、化学成分和重金属的形态组成有关^[1~3]. 本文在华南有代表性的强酸性赤红壤中施用了污泥, 对其重金属的有效性和植物吸收进行了研究.

1 材料与方法

1.1 盆栽试验

供试土壤: 采自广州市沙河镇鱼沙坦村赤红壤旱作土耕作层, 化学成分见表 1.

供试污泥: 采自广州市大坦沙污水处理厂的脱水污泥, 化学成分见表 1.

供试植物: 牧草狗牙根 (*Cynodon Dactylon* Per.).

盆栽试验设计: 用聚乙烯塑料盆, 每盆装供试土壤 3 kg, 设置 7 个处理: 其中 5 个处理中分别投加污泥干土含量 0、7.5、15、30、60 g/kg (CK 和处理 1~4), 2 个处理为加 CaO (分析纯) 将土壤 pH 值分别调至 6.5、7.5, 并施污泥干土含量 15 g/kg (处理 5 和 6), 每个处理 4 次重复.

^{*} 基金项目: 广东省自然科学基金 (960039) 资助项目

收稿日期: 1998-10-15 作者简介: 温琰茂, 男, 1942 年生, 教授.

表 1 供试土壤和污泥有效态化学成分的质量分数

Tab 1 The chemical composition of soil and sewage sludge

样品	有机质	N	P	Cd	Cr	Ni	Zn
	10^{-2}			10^{-6}			
土壤	1.17	0.168	0.0395	0.01 (2.36) ¹⁾	0.18 (7.48)	0.27 (17.42)	2.18 (131.99)
污泥	44.87	4.612	0.687	0.75 (7.48)	1.59 (357.4)	52.9 (227.3)	884.5 (2668.5)

1) 括号内为全量

盆栽试验在温室进行。1997 年 8 月 2 日播种牧草草籽，播种 6 d 后间苗，每盆留下 10 根幼苗，1 个月后测定株高，50 d 后第 1 次收割地上部分，再过 50 d 分第 2 次收割植物。收割后的植物和土壤样品进行分析测定。

1.2 样品分析测定方法

土壤全 N 用浓硫酸、重铬酸钾消化，蒸馏测定；土壤全 P 用浓硫酸、高氯酸消化，钼锑抗比色分析；污泥全 N 用浓硫酸—水杨酸消煮，蒸馏测定；污泥全 P 用浓硫酸—浓硝酸消煮，钒钼黄比色法测定。土壤污泥重金属全量用浓硝酸、高氯酸、氢氟酸消化，ICP-AES 测定；土壤、污泥重金属有效态含量测定用 0.1 mol/L HCl 提取，ICP-AES 测定。植物样品用浓硝酸—浓硫酸、高氯酸消化，ICP-AES 测定。

2 结果与讨论

2.1 施用污泥对植物生长发育的影响

盆栽植物随着施入的污泥量的增加，因土壤养分的改善，其生长发育状况得到明显的促进。植物的株高、平均分蘖数、植物生长量（鲜重、干重）都随污泥施用量的增加而增加，施用污泥干土含量 7.5、15、30、60 g/kg 的每盆植株干重分别为对照植株干重的 3.17、4.98、6.13、8.68 倍。施加污泥后，植株的含水率也有明显的提高，但不会随污泥施用量的增加而增加（表 2）。

表 2 施用污泥盆栽植物生长状况

Tab 2 Growth state of the plants in pot cultivation

处理	平均株高/cm	平均分蘖数/个	平均鲜重/g	平均干重/g	植株含水率/%
CK	31.1	1.33	5.25	1.50	71.43
1	40.6	2.26	26.7	4.75	80.53
2	37.6	3.68	39.8	7.48	81.22
3	41.1	3.13	48.3	9.2	80.95
4	49.9	4.63	65.8	13.0	80.21

2.2 施用污泥对土壤重金属有效态含量的影响

试验结果(表 3)表明，施用污泥后土壤重金属的有效态含量随污泥施用量的增加而增加，且增长幅度大。施用污泥干土含量 30 和 60 g/kg 两个处理的 Cd、Cr、Ni、Zn 的有效态含量分别是对照含量的 3、13.6、10.2、8.7 倍和 5、18.7、17.1、13.8 倍。经相关分析，污泥施用量与土壤重金属有效态含量呈显著正相关关系，相关系数分别是： $r(\text{Cd})=0.9920$ ， $r(\text{Cr})=0.9735$ ， $r(\text{Ni})=0.9941$ ， $r(\text{Zn})=0.9923$ ， $n=5$ 。值得注意的是，施加污

泥干土含量 60 g/kg 的土壤经过 100 d 盆栽植物后，有效 Cr 的含量比污泥中有效 Cr 的含量还高，原因可能是原来被污泥中藻类吸收的 Cr 经过 100 d 的分解，有较多部分已成为植物可吸收的有效态。

表 3 施用污泥后土壤有效态重金属的质量分数
Tah 3 Available contents of heavy metals of the soils applied with sewage sludge 10^{-6}

处理	Cd	Cr	Ni	Zn
CK	0.01	0.11	0.31	4.90
1	0.01	0.25	0.73	10.54
2	0.02	0.63	1.83	22.41
3	0.03	1.43	3.15	42.66
4	0.05	1.96	5.30	67.50

2.3 施用污泥对植物吸收重金属的影响

施用污泥后，土壤重金属全量和有效态含量的大幅增加，导致植物对重金属的吸收也明显增加，使植物体内重金属含量增加，而且增幅大（表 4）。第二茬植物重金属含量比第一茬高，这可能是植物生长的不同阶段随着根系的发育，导致对重金属吸收的增加，也可能是污泥中被有机质结合的重金属逐渐释放出来被植物所吸收。

表 4 盆栽植物重金属含量的质量分数
Tah 4 Concentrations of heavy metals in pot cultivation plants 10^{-6}

处理	第一茬植物				第二茬植物			
	Cd	Cr	Ni	Zn	Cd	Cr	Ni	Zn
CK	<0.01	0.996	3.211	76.3	<0.01	1.060	4.909	143.4
1	0.062	1.058	5.076	223.1	<0.01	1.083	5.204	194.2
2	0.062	1.247	6.349	278.1	0.124	1.275	9.114	336.8
3	0.125	1.248	8.650	277.9	0.187	1.353	15.54	487.6
4	0.156	1.362	12.14	347.0	0.281	1.491	24.15	633.9

2.4 加施石灰对施用污泥土壤重金属生物有效性的影响

污泥中的重金属进入土壤体系后，由于污泥的性质、化学组成与土壤差异很大，重金属的存在形态也会有改变，这种改变将随时间的推移而加深，直到其与该土壤的性质和成分相适应。相同数量的重金属随污泥施入不同性质的土壤中，重金属的形态分布就可能存在差异，其生物有效性也可能存在差异。本研究在加施污泥干土含量 15 g/kg 的土壤中加入石灰提高土壤的 pH 值，以观测强酸性的赤红壤接受污泥后其重金属生物有效性的变化特征。试验结果（表 5）表明，加入石灰将土壤的 pH 值从 5.3 提高到 6.5 和 7.5 后，植物对 Ni、Zn、Cd 的吸收有大幅度的降低。在第一茬收割的植物中，施入污泥后将 pH 提高到 6.5 和 7.5 的处理的植物中，Ni 含量仅为只施污泥不加石灰的 33.3% 和 28.2%，Zn 的含量只占 36.1% 和 19.4%；在第二茬植物中，土壤 pH 为 6.5 和 7.5 的植物 Ni 的含量为 21.3% 和 21.1%，Zn 的含量只占 24.2% 和 16.6%。植物对 Cd 的吸收也有相同的趋势，但植物对 Cr 的吸收则未表现出此规律。由此可见，接受污泥的酸性土壤，适当加入石灰将 pH 值提

高中性至微碱性，将会抑制 Ni、Zn、Cd 等重金属的生物有效性，减少植物对其吸收。将植物对重金属的吸收状况与相应土壤重金属有效态含量测定结果（表 6）进行比较分析，植物对 Ni 和 Zn 的吸收与土壤 Ni 和 Zn 有效态含量是相适应的，即加施石灰的土壤 Ni 和 Zn 的有效态含量大幅度降低，植物对 Ni、Zn 的吸收也大大减少。因为加入石灰后，土壤 Zn^{2+} 、 Ni^{2+} 离子转变成 $Zn(OH)_2$ 和 $Ni(OH)_2$ ，这两种氢氧化物在土壤中都极难溶解，难于被植物吸收^[4]。但 Cd 和 Cr 并未表现出相同的趋势，这表明用 0.1 mol/L HCl 作为提取剂测定的土壤 Ni、Zn 的有效态含量，并将之作为其生物有效性指标是比较适合的，但对 Cd 和 Cr 就不一定适合。

表 5 加施石灰的盆栽植物重金属的质量分数

Tah 5 Heavy metal concentrations in pot cultivation plants after application of CaO 10^{-6}

处 理	第一茬植物				第二茬植物			
	Cd	Cr	Ni	Zn	Cd	Cr	Ni	Zn
仅施污泥	0.062	1.247	6.349	278.1	0.124	1.275	9.14	336.8
污泥+CaO（pH=6.5）	<0.01	1.197	2.117	100.3	<0.01	1.249	1.95	81.5
污泥+CaO（pH=7.5）	<0.01	1.049	1.790	53.9	<0.01	1.150	1.92	55.8

表 6 加施石灰后土壤有效态重金属的质量分数

Tah 6 Available concentrations of heavy metals of soil after application of CaO 10^{-6}

处 理	Cd	Cr	Ni	Zn
仅施污泥	0.02	0.63	1.83	22.41
污泥+CaO（pH=6.5）	0.02	1.08	0.94	12.37
污泥+CaO（pH=7.5）	0.02	0.91	0.99	12.35

3 结 论

- （1）施用污泥对植物的生长发育有明显的促进作用；土壤中有有效态 Cd、Cr、Ni 和 Zn 的含量和植物重金属含量随污泥施用量的增加而增加。
- （2）加施石灰（CaO）将施用污泥的土壤 pH 调节到 6.5 和 7.5 后，土壤有效态 Ni、Zn 含量明显减少，但有效态 Cr 升高；植物对 Ni、Zn 和 Cd 的吸收大幅度降低，表现出加施石灰提高土壤 pH 至 6.5~7.5 时对随污泥进入土壤的 Ni、Zn 和 Cd 的生物有效性具有明显的抑制作用。
- （3）用 0.1 mol/L HCl 提取测定的 Ni、Zn 有效态含量与植物吸收的关系密切，可作为其生物有效性指标；但用此法测得的 Cd、Cr 有效态含量却未表现出类似的相关性，表明这种方法测得的数值可能不适合作为 Cd、Cr 的生物有效性指标。

参考文献:

- [1] 张学询, 王连平, 宋胜焕. 天津污染区土壤、作物重金属污染状况研究 [A]. 见: 高拯民主编. 土壤—植物系统中污染生态研究 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1986. 285 ~ 294.
- [2] 鲁艳兵, 温琰茂. 施用污泥的土壤重金属元素有效性的影响因素 [J]. 热带亚热带土壤科学, 1998 (1): 68 ~ 71.
- [3] 利珀 C W. 农地中重金属的控制技术 [M]. 胡海梅译. 北京: 科学出版社, 1987. 98 ~ 110.
- [4] 戴树桂. 环境化学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1997. 11 ~ 117.

Study on Availability Control of Heavy Metals in Soil Applied with Municipal Sewage Sludge

WEN Yan-mao^{*}, LU Yan-bin

Abstract: According to the test results of soil and plant samples collected from pot cultivation, the biomass of the plants, the available contents of heavy metals in the soil and the heavy metal concentrations in the plants rise with the increase of application quantity of sewage sludge. After the pH of the soil applied with sewage sludge is adjusted to 6.5 and 7.5 with the application of CaO, the available contents of Ni and Zn in soil decrease obviously while the content of Cr increase, and the contents of Ni, Zn and Cd in the plants decrease in large scale. The results show that raising the soil pH to 6.5 ~ 7.5 can control the availability of Ni, Zn and Cd in the soil applied with sewage sludge and control the absorption of Ni, Zn and Cd of plant.

Keywords: sewage sludge; agricultural application; heavy metals; availability control