

施用污泥堆肥对土壤和青菜(*Brassica chinensis*)重金属积累特性的影响

李国学^① 黄焕忠 黄铭洪
(资源和环境学院) (香港浸会大学生物学系)

摘要 在温室中研究施用污泥堆肥对土壤和青菜(*Brassica chinensis*)中重金属的积累状况的影响。污泥堆肥与土壤比例分别为0,5,10,25和50%(体积比)。研究表明,随着污泥堆肥施用量增加,土壤pH略有上升,EC和土壤水溶态K,Ca,Mg,NH₄⁺和PO₄³⁻含量均显著增加。DTPA提取的Cu和Zn,呈显著增加,而Cd,Pb,Ni含量增加仅在高施用量时较显著。与不施肥对照处理相比,该青菜产量随着污泥堆肥施用量增加呈显著增加趋势,并且在5%~10%施用量时获得最高产量。随着污泥堆肥施用量增加,该青菜中Cu,Cd,Zn,Ni和Pb含量也呈积累趋势。在≥5%添加污泥堆肥处理时,地上部分Cu和Zn浓度分别超过国家规定的允许浓度标准10和20mg·kg⁻¹,Cd在污泥处理比例≥10%时,青菜组织中含量已超过允许标准0.05mg·kg⁻¹。由此说明:在污泥堆肥和利用过程中应进一步严格控制重金属及其在作物体中积累,尤其控制可食部分中重金属的浓度和污泥及污泥堆肥长期施用过程中的重金属在土壤和作物中的积累。

关键词 污泥堆肥; 重金属; 允许标准; 青菜; 发芽率

中图分类号 X705

Heavy Metal Accumulation in Chinese Cabbage (*Brassica chinensis*) Grown in Soil Amended with Sewage Sludge Compost

Li Guoxue J. W. C. Wong M. H. Wong
(College of Resources and Environment) (Dept. of Biology, Hong Kong Baptist University)

Abstract A greenhouse experiment with Chinese cabbage (*Brassica chinensis*) as a study model was conducted to evaluate the bioavailability of heavy metals from an metal enriched sewage sludge compost. A loamy soil was amended with sewage sludge compost at rates of 0, 5, 10, 25 and 50% (V/V) which were equivalent to 0, 5.9, 11.7, 29.2 and 58.5 t·hm⁻¹, respectively. Addition of sludge compost caused a slight increase in soil pH, and a significant increase in electrical conductivity and soluble K, Ca, Mg, NH₄-N, and PO₄³⁻ contents. DTPA extractable Cu and Zn increased significantly with increase in the application rate while a significant increase was only observed in the treatment with the highest compost amended soil for Cd, Pb and Ni. The yield of Chinese cabbage was significantly increased with sludge compost amendment as compared to the control with the highest

收稿日期: 1996-06-11

①李国学,北京海淀区圆明园西路2号中国农业大学(西校区),100094

yield at 5% to 10% application rate. An accumulation of Cu, Cd, Zn, Ni and Pb was observed with an increase in compost amendment. The Cu and Zn concentrations of shoot at the rate of $\geq 5\%$ compost amendment exceeded the toxic limit of 10 and 20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. Among the metals studied, only Cd had a tissue content higher than the maximum permitted concentration of trace elements in vegetables at a compost amendment rate of $\geq 10\%$. This indicates that there should be a tight control for the use of the sludge compost for edible crop production. Besides, the long term effect of the sludge compost on the accumulation of trace metals in edible parts should also be investigated.

Key words sludge compost; heavy metal; allowed concentration; *Brassica chinensis*; seed germination

我国是世界上人口最多的国家, 现有城市 350 多个, 城市人口达 2 亿多, 年产垃圾 1.2 亿多 t, 并且每年还以 10% 的速度在增长。在香港, 由于污水排放量日益增大, 污泥排放量也从目前的每天 360 t 增至 2001 年的 560 t。长期以来, 土地填埋是固体废物处理的主要手段。然而由于可供利用的土地日益减少和土壤填埋费用的增大, 给固体废物处理带来了新的问题。即使采用严格的防范措施来管理土地卫生或安全填埋, 从长远来讲仍存在着隐患, 并且未考虑使废物中营养物质循环利用^[1]。

堆肥由于具有稳定有机质、减少有害气味、杀灭病原菌而成为污泥处理的极为有效方法^[1~3]。堆肥产品可以增加土壤有机质、改善土壤物理性质、提高土壤保水能力以及土壤团粒结构稳定性, 是一种良好土壤结构改良剂^[4]。污泥堆肥中还含有大量植物可利用的氮、磷、钙和其他微量元素如 Zn、Cu 和 Mn^[5]。通常钾在污泥堆肥中含量较低, 因此需要配合施用钾肥。许多资料表明, 污泥堆肥可以促进作物生长和提高作物产量^[1,4,14]。但需要慎重考虑的是在污泥堆肥施用过程中重金属随之在土壤和作物体中积累^[5]。

因此, 污泥堆肥作为替代方法应该作为废物管理的长远战略。本研究主要目的是评价污泥堆肥产品的质量和重金属效应, 为污泥堆肥在农业利用提供科学依据。

1 材料和方法

堆肥用污泥取自香港大浦污水处理厂, 污泥堆肥由香港浸会大学堆肥试验中心经过 150 d 堆制而成。供试土壤取自新界休闲农场。污泥堆肥和土壤经风干, 通过 2 mm 筛后备用, 其基本理化性质见表 1。

污泥堆肥按 0%, 5%, 10%, 25% 和 50% 比例与土壤充分混合装于直径 14 cm 塑料盆中, 重复三次。选 10 粒均匀、饱满的青菜种子, 在盆中播深 0.5 cm。另设施用化学肥料作为对照。塑料盆随机摆放在温室中, 温度控制在 15~35℃, 每天保持水分同田间持水量水平。在苗期(20 d)内每天计数发芽率, 在生长 50 d 时收获。仔细将植物地上部和地下根部从土壤中分离出来, 并分别用清水、去离子水分次清洗直至干净, 然后于 72℃ 烘干 72 h, 分别称量地上部分和根部干重, 计算总干重。地上部组织粉碎后通过 1 mm 筛后装瓶, 贮存于干燥箱中保存。

土壤水溶性 Na, K, Ca, Mg, NH_4^+ , PO_4^{3-} 用重离子水按土水比 1 : 2 提取, 而 Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb 和 Zn 则用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NH}_4\text{HCO}_3$ 和 $0.005 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ DTPA 混合液按土液比 1 : 2(W/V) 提取。pH 和 EC 水浸提液直接测定。水溶性铵采用 Berthot 反应法测定, 水溶磷采用钼蓝比色法^[10]。重金属含量采用原子吸收光谱法。植物组织利用硫酸过氧化氢消化, 堆肥重金属 Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb 和 Zn 总量采用 HNO_3 和 HClO_4 消化, 原子吸收光谱法测定。在重金属消化和测定中同时进行标准样测定, 以控制分析质量。

所有数据分析与处理均在 IBM 计算机中运用 SAS 统计检验, 利用 ANOVA 方法比较各处理之间平均值并进行 F 检验。

2 结果和讨论

pH 随着添加污泥堆肥数量的增加, 而呈轻微增加(表 2), 表明堆肥在酸性土壤中具有—定的缓冲能力。而随着污泥堆肥施用比例增加, 电导率呈显著增加趋势, 但所有处理仍低于作物抑制的限定值 $4 \text{ mv} \cdot \text{cm}^{-1}$ ^[11], 因此不存在盐分毒害问题。而且在田间条件下, 可溶性盐分也会由于混合耕作而被稀释并淋溶到底层。污泥堆肥中含有丰富的营养物质因而可以显著增加土壤的氮、磷营养物质。土壤水溶态提取的 K, Ca, Mg, Na 和 DTPA 提取的 Cu, Zn, Cd, Ni, Mn 和 Pb 随着污泥堆肥施用量增大, 均呈增加趋势。土壤溶液中较高 Mg, K 和 Ca 表明污泥堆肥对土壤重要营养元素的增加具有促进作用。但是, 随着污泥堆肥施用量增大, 土壤钠的增加应引起重视, 因其可加速土壤的碱化。铜和锌的增加则主要来自污泥堆肥, 但二者在污泥施用量达 25% 以上时, 呈极显著增加趋势, 土壤当而且水溶性 Cu 和 Zn 在适当的比例条件下, 二者均以离子形态存在^[8]。在污泥施用量大于 25% 时, 同样 Cd, Ni, Mn 和 Pb 浓度也呈显著增加趋势, 而镉具有较大的毒性, 由于易于移动而进入食物链危害人类。与上述重金属元素变化趋势相反, Fe 的浓度随着污泥堆肥施用量增加呈降低趋势, 这与试验土壤为南方酸性草甸红壤, 含有较多 Fe 有一定关系。

供试青菜在不同污泥堆肥施用的土壤上的发芽率变化(图 1)。表明, 各处理间差异不显著, 表明尽管随着堆肥施用量的增加, 也不会引起盐分和水溶性重金属对发芽的毒害作用。

表 1 供试土壤和污泥堆肥的理化性质

项 目	壤质土	污泥堆肥
pH	4.45 (0.14)*	5.33 (0.02)
EC($\text{mv} \cdot \text{cm}^{-1}$, 25℃)	0.054 (0.001)	1.61 (0.01)
有机碳(%)	1.40 (0.02)	26.3 (1.30)
全氮($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	880 (54)	12946 (4 483)
全磷($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	3 484 (166)	3 3952 (9136)
金属总含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)		
Na	54.1 (15.0)	146 (16.7)
K	191 (10.6)	545 (44.4)
Ca	18.1 (0.38)	1 926 (156)
Mg	347 (14.4)	633 (80.7)
Cd	0.467 (0.01)	50.6 (0.345)
Mn	71.9 (4.30)	88.3 (0.43)
Ni	6.84 (0.89)	12.5 (1.61)
Pb	4.18 (0.72)	54.0 (7.43)
Zn	19.1 (1.010)	218 (6.42)

* 括号内值为 3 次平均值的标准差。

表2 不同污泥堆肥施用量对土壤化学成分的影响

mg·kg⁻¹

堆肥 用量	pH	EC mv·cm ⁻¹	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Na	K	Ca	Mg	Cd	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
0%	4.45c ^①	0.05e	0.79d	0.23d	1.91e	5.71d	7.22bc	1.96c	0.08b	1.06d	18.9c	0.77d	7.17bc	3.74e
	0.00 ^②	0.00	0.11	0.05	0.07	0.04	0.31	0.03	0.01	0.09	0.28	0.02	0.09	0.15
5%	4.57b	0.09d	1.75d	0.78d	3.34d	6.88cd	6.64c	2.41bc	0.08b	4.84cd	20.3c	0.74d	6.71c	5.85d
	0.00	0.01	0.11	0.12	0.11	0.03	0.11	0.11	0.01	0.34	0.45	0.10	0.18	0.42
10%	4.58b	0.18c	3.28c	2.21c	5.90c	9.48c	8.06bc	3.37bc	0.08b	7.78c	20.8bc	0.87c	7.12bc	8.05c
	0.02	0.01	0.34	0.25	0.68	0.31	0.14	0.13	0.00	0.35	1.50	0.03	0.25	0.45
25%	4.57b	0.30b	5.88b	4.10b	7.88b	15.4b	9.01b	5.55b	0.09b	25.1b	22.8b	1.04b	7.74b	14.5b
	0.02	0.04	0.94	0.26	0.14	0.30	0.27	0.29	0.00	0.71	0.83	0.04	0.51	0.42
50%	4.77a	0.76a	22.2a	16.5a	18.8a	39.8a	12.6a	15.1a	0.12a	63.7a	27.7a	1.76a	9.31a	34.5a
	0.02	0.02	1.22	0.87	0.71	2.57	1.34	2.92	0.01	4.79	0.99	0.01	0.54	0.42

① 应用 LSD 法检验处理间差异程度,同一纵行内两处理间无共同字母者表示差异达到 5% 显著水平。

② 该值三个重复平均值的标准差。

图 2 结果为青菜在根、地上部分和总干重产量的变化。从图 2 显示结果可以看出,与不施肥对照处理比较,总干重产量在各个堆肥处理中均呈极显著变化。这主要由于施用污泥堆肥可以明显改善土壤物理性质和创造了良好根系生长环境,可以提供大量的营养物质^[13]。但是,当污泥堆肥施用量 > 25% 时,干重产量确呈明显下降趋势,这可能由于较高的污泥施用量会使土壤具有较高盐度和重金属。此外,污泥中还会含有其他化学物质也可能会对作物生长有抑制作用^[6]。另一方面所有污泥堆肥处理的该青菜总干重产量仍比施用全量化肥的处理的产量为低。如 5% 和 10% 污泥堆肥施用量的该青菜总干重产量仅为施化肥对照处理的一半,这种结果表明,堆肥中营养物质含量仍比较低,要获得较高的产量必需通过增加污泥堆肥施用量或者配合施用化肥来解决养分不足的问题,而前者可能会进一步增加土壤中重金属含量,带来新的问题^[14]。

不同污泥堆肥施用量的土壤上,从青菜地上部植物组织中元素含量状况,可以看出,随着污泥堆肥用量增加,地上部组织中 N, P, K 和 Mg 含量呈明显增加趋势(表 3),但仍比施用化肥处理的对照为低。当污泥施用量为 10% 和 25% 时,组织中氮素含量略低于资料报道的 1.5% 的含量限定水平。而所有堆肥处理的组织中磷、钾含量均高于 0.2% 的含量限定水平^[3],这表明该青菜是 N 素需要量较高的植物。所有处理的组织中 Mg 含量均高于 0.06% 的含量限定水平,表明污泥堆肥可以提供丰富的镁^[3]。

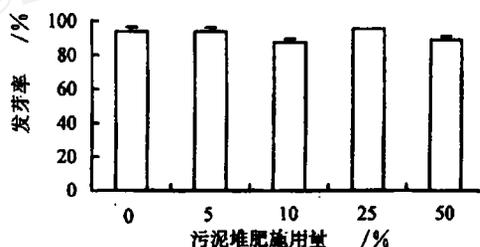


图 1 污泥堆肥不同施用量对青菜种子发芽率的影响

表 3 污泥堆肥不同施用量对青菜地上部分组织中化学成分的影响

堆肥 用量	%						mg·kg ⁻¹					
	W	P	Na	K	Ca	Mg	Cd	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
0%	— ^①	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5%	1.83b ^②	0.27d	7.52a	1.74d	0.96c	0.46b	0.047b	18.6cd	316b	23.8ab	0.62b	396b
	0.11 ^③	0	1.52	0	0.08	0.01	0.003	1.03	10.4	0.07	0.16	65.1
10%	1.03c	0.35c	7.89a	1.93d	1.30b	0.43b	0.054b	20.1c	250c	24.2ab	0.50b	417b
	0.01	0.02	0.18	0.04	0	0	0.007	1.98	15.4	0.57	0.01	39.4
25%	1.18c	0.53b	8.01a	2.48c	1.48a	0.46b	0.063a	29.9b	246c	26.6a	1.72ab	579a
	0.02	0.05	0.05	0.02	0.09	0.01	0.004	3.21	0.36	3.17	1.15	39
50%	4.50a	0.49b	7.43a	4.56a	1.54a	0.58a	0.06a	39.4a	218c	22.6b	2.35a	581a
	0.34	0.01	0.11	0.04	0.01	0.06	0.002	3.08	30.9	0.16	0.41	111
施化 肥土	4.67a	0.66a	3.85b	2.95b	1.02c	0.30c	0.043b	15.3d	699a	21.9b	0.74b	161c
壤	0.08	0.01	0.32	0.27	0.01	0.01	0.01	0.18	39.4	1.37	0.04	36.8

① 没有足够的组织供消化和金属分析用,未做。

② 应用 LSD 法检验处理间差异程度,同一纵行内两处理间无共同字母者表示差异达到 5%显著水平。

③ 该值为三个重复平均值的标准。

与施化肥处理的对照相比,地上部组织中重金属含量随着污泥堆肥施用量增加呈显著的增加趋势。根据我国蔬菜食品卫生标准, $Cu \leq 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $Zn \leq 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $Cd \leq 0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 所有堆肥处理青菜组织中 Cu, Zn 含量均超过允许标准, 组织中 Cd 只有在 $\geq 10\%$ 污泥施用量时高于施用化肥处理的对照, 并且明显高于 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的允许标准。随着堆肥施用量的增加, 组织中 Ni 的含量增加不显著, 这是由于污泥堆肥中含量比较低的原故。因此, 污泥堆肥作为肥料施用于土壤中还需要进一步考虑重金属 Cd, Cu, Pb 和 Zn 在蔬菜作物中的积累问题。

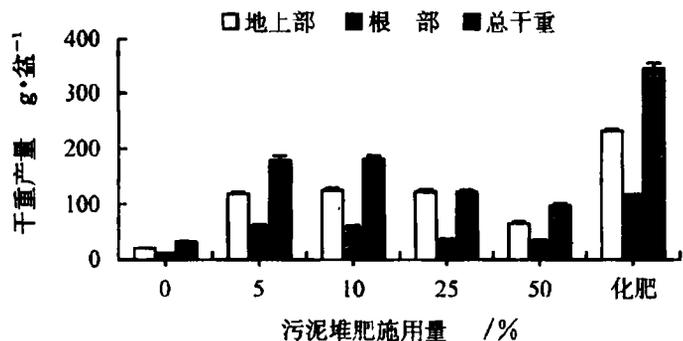


图 2. 污泥堆肥不同施用量和施用化肥对青菜干重产量的影响

3 结论

污泥堆肥施用酸性壤质土壤中, 表明可以增加土壤营养状况, 如 $PO_4\text{-P}$, $NH_4\text{-N}$, K, Cu, 和 Zn 的含量。并且以施入量 5% 到 10% 的产量为最高, 但产量仍低于施用化肥的对照

土壤。从元素分析结果来看,当污泥堆肥施用量 $\geq 5\%$ 时,重金属 Cu 和 Zn 就会在青菜组织严重积累,而 Cd 在污泥施用量为 10%以上时,在青菜组织严重积累。因此可以认为虽然随着污泥施用量增加,适当补充化学肥料会获得较好的产量,但会引起重金属超标。因此对于重金属含量较高的的污泥堆肥应该以施用在非农业用途为目的,进而减低通过食物链对人体的危害。因此,建议将污泥堆肥用于低肥力土壤尤其用于土壤复垦或林木花草土壤上较为合适。

参 考 文 献

- 1 Bevacqua R F, Mellano V J. Crop response to sewage sludge compost: a preliminary report. *California Agric*, 1993, 47(3):22~24
- 2 Burge W D, Colocicco D, Cramer W N. Control of pathogens during sewage sludge composting. In: Rockville M D ed. Proc. Natl. Conf. On Municipal and Industrial Sludge Composting. Information Transfer, Inc., 1979, 105~111
- 3 Chapman H P. Diagnostic criteria for plants and soils. University of California, 1966, 749
- 4 Epstein E, Taylor J M, Chaney R L. Effects of sewage sludge and sludge compost applied to soil on soil physical and chemical properties. *J Environ Qual*, 1976, 5:422~426
- 5 Jacobs L W. Agricultural application of sewage sludge. In: Norchardt J A et al. eds. Sludge and Its Ultimate disposal. Ann Arbor, Mich, Ann Arbor Science Publ, 1981, 109~126
- 6 Jimenez E I, Garcia V P. Evaluation of city refuse maturity: a review. *Biological Wastes*, 1989, 17: 115~142
- 7 Jokela E J, Smith W H, Colbert S R. Growth and elemental content of Slash Pine 16 years after treatment with garbage composted with sewage sludge. *J Environ Qual*, 1989, 19: 146~151
- 8 Lagerwerff J V, Biersdorf G T, Brouwer D L. Retention of metals in sewage sludge: I. Constituent heavy metals. *J Environ Qual*, 1976, 5: 19~13
- 9 McConnell D B, Shiralipour A, Smith W H. Compost application improves soil properties. *BioCycle*, 1993, 34:61~63
- 10 Page A L, Miller R H, Keeney D R. Methods of Soil Analysis, Part 2 Chemical and Microbiological Properties. 2nd Ed., Agronomy, No. 9, ASA, SSSA publ, Madison, WI, USA, 1982, 1159
- 11 Richards L A. Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils. US Salinity Lab. Agricultural Handbook No. 60, 1954, 160
- 12 Riffaldi R, Levi-Minzi R, Pera A, de Bertoldi M. Evaluation of compost maturity by means of chemical and microbial analyses. *Waste Manage Res*, 1986, 4:387~396
- 13 Robbards A W, Jackson S M, Clarkson D T, Sanderson J. The structure of barley roots in relation to the transport of ions into the stele. *Protoplasma*, 1973, 72:291~312
- 14 Smith S R. Sewage sludge and refuse composts as peat alternatives for conditioning impoverished soils: Effects on the growth response and mineral status of *Petunia grandiflora*. *J Hort Sci*, 1992, 67: 703~716
- 15 Tester C F. Tall fescue growth in greenhouse, growth chamber and field plots amended with sludge compost and fertilizer. *Soil Sci*, 1989, 148:452~458