

污泥堆肥合理施用量确定方法*

康军¹ 张增强² 孙西宁² 孟昭福²

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学理学院, 陕西杨凌 712100)

【摘要】 根据重金属不同形态的环境风险引入毒性响应系数, 确定污泥堆肥合理施用量。采用污染指数和地积累指数评价杨陵区污泥堆肥受重金属污染程度。初步确定陕西省杨陵区污泥堆肥合理施用量为 $3.69 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 该方法突出了重金属形态的重要性, 弥补了以往对重金属只进行总量控制的不足。评价结果显示, Cd 是限制该地区污泥堆肥施用量的最主要元素。

关键词: 污泥 堆肥 施用量 重金属 毒性响应系数

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)06-0098-05

Rational Application Rate of Sewage Sludge Compost

Kang Jun¹ Zhang Zengqiang² Sun Xining² Meng Zhaofu²

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. College of Sciences, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract

According to toxic response factor of different forms of heavy metals, rational application rate of sewage sludge compost was determined. Pollution index and geoaccumulation index were used to evaluate contamination degree of sewage sludge compost. Rational application rate of sewage sludge compost in Yangling was $3.69 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$. This method stressed the importance of the forms of heavy metals and made up for the shortage of only controlling the total amount of heavy metals in the past. Results showed Cd was the most important element to restrict application of sewage sludge compost in this area.

Key words Sewage sludge, Compost, Application rate, Heavy metal, Toxic response factor

引言

污泥处理与处置是污水处理的一个重要方面, 长期以来我国存在着重污水处理, 轻污泥处理的倾向。污泥中含有大量有害成分, 若处置不当容易造成二次污染。由于污泥的处理费用昂贵且经济效益不明显, 因而其处理和处置成为困扰市政部门和污水处理厂的主要问题之一^[1-2]。目前, 污泥处理与处置方法主要有填埋、焚烧、堆肥、土地利用等。填埋不仅占用大量土地, 而且脱水污泥大多未经过稳定化处理直接填埋, 其中大量有害成分易进入垃圾渗滤液, 会增加填埋场渗滤液处理负荷, 由于污泥含

水率较高(80%左右), 使得填埋场机械难于操作; 焚烧要求较高的技术和费用, 不适合在我国大规模推广, 只有在部分经济发达地区使用; 污泥经过无害化处理后再施用于土地被认为是一种最有发展前景、经济有效的污泥处置方法之一^[3-4]。

如何确定污泥堆肥施用量和评价污泥堆肥土地利用可能带来的环境风险成为环境科学的研究热点^[5-6]。目前, 污泥堆肥施用量主要参考《农用污泥中污染物控制标准》(GB 4284—84)、《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)、《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995) 和美国 EPA 的污泥农用标准, 对重金属采取总量控制, 忽略了重金属

形态的重要性。随着研究的深入,人们逐渐认识到污泥中重金属对环境的危害取决于其存在形态的分布,重金属的不同形态表现出不同的生物毒性和环境行为^[7-8]。本文对重金属按照不同形态引入毒性响应系数后再与相关标准比较,确定污泥堆肥合理施用量。

1 污泥堆肥制作

1.1 堆肥方案

西北农林科技大学环境生物技术研究室对陕西省杨陵区污水污泥进行了长期监测,结果表明该污泥是优质的有机肥源,可以经过进一步稳定化处理而在农田和林地施用^[9]。为了避免因外加调理剂稀释堆肥中的重金属,本研究尝试用湿污泥和干污泥混合堆肥,结果可为该地区污泥堆肥施用量提供比较统一的参考值。采用自制的强制通风静态堆肥系统^[10]和自然通风静态堆肥系统分别进行一次发酵和二次发酵。干污泥和湿污泥含水率分别为38%和63%,通过物料衡算确定混合比例,使其含水率降为54%,C/N为12.77。一次发酵起始时物料质量为240 kg,每天测定堆体温度,经过35 d后,将堆肥物料转入自然通风静态堆肥系统,二次发酵持续85 d。在整个堆肥期间,每周人工翻堆一次。

经过120 d堆肥后制得污泥堆肥粗产品,将堆肥人工翻堆充分混匀,然后于6个点采样,采样量约为4 kg。样品于40℃低温干燥,粉碎作为干样,测定时充分研磨,过0.16 mm筛,保证样品具有很好的代表性。

1.2 污泥堆肥中重金属和总氮分析方法

Sposito顺序浸提法已经广泛应用于湖泊和海底的沉积物、土壤和污泥中重金属形态的研究^[11],该方法的流程如表1所示。采用Sposito顺序浸提法浸提堆肥样品,用原子吸收分光光度计测定浸提液中Zn、Cu、Ni、Pb、Cd,用分光光度法测定Cr和As,Hg采用冷原子荧光法测定。全氮含量采用半微量凯氏法测定。

表1 Sposito 浸提法分析流程

Tab.1 Sequential extraction procedure of Sposito method

步骤	提取试剂	提取时间	重金属形态
1	0.5 mol/L KNO ₃	16 h	交换态
2	H ₂ O	2 h, 3次	吸附态
3	0.5 mol/L NaOH	16 h	有机结合态
4	0.05 mol/L EDTA	6 h	碳酸盐结合态
5	4 mol/L HNO ₃	16 h, 85℃水浴	硫化物残渣态
6	浓HNO ₃ + 浓HClO ₄ (4:1)		残渣态

2 污泥堆肥合理施用量

2.1 污泥堆肥中重金属含量

污泥堆肥前后重金属质量比如表2和表3所示,堆肥产品中As和Hg未检出。经过堆肥化处理,重金属总质量比有所增加,这主要是由于大量有机质被降解,重金属被“浓缩”;除了Cd以外,其他重金属易活动态(交换态和吸附态)比例均降低。堆肥产品中Zn、Cu、Ni、Pb、Cd和Cr的总量都低于美国USEPA503控制标准,与我国城市污泥土地利用重金属控制(土壤pH值大于等于6.5)标准^[12-13]相比,发现Zn、Cu、Ni、Pb、Cd和Cr的质量比我国标准分别低84.52%、87.89%、80.21%、91.49%、48.18%和83.68%。仅从重金属总量角度考虑,杨陵区污泥堆肥符合国家标准,并且我国污泥农用标准较其他国家严格,污泥堆肥农用是比较安全的。

表2 初始污泥中重金属的形态分布

Tab.2 Different forms of heavy metals in initial

重金属形态	sewage sludge					mg/kg
	Zn	Cu	Ni	Pb	Cd	
交换态	12.88	3.10	4.76	0.27	0.54	4.47
吸附态	5.81	4.10	0.81	1.14	0.09	7.64
有机结合态	56.21	66.02	8.45	27.80	6.03	27.38
碳酸盐结合态	99.56	4.99	2.24	4.08	0.54	18.66
硫化物残渣态	130.88	53.44	4.86	25.15	2.04	47.71
残渣态	10.12	1.52	4.47	1.82	0.39	8.53
重金属总量	315.46	133.08	25.59	60.26	9.63	114.39

表3 污泥堆肥中重金属的形态分布

Tab.3 Different forms of heavy metals in sewage

重金属形态	sludge compost					mg/kg
	Zn	Cu	Ni	Pb	Cd	
交换态	12.85	8.13	1.61	1.43	0.97	1.40
吸附态	8.40	2.15	0.64	0.20	0.20	1.55
有机结合态	142.08	58.40	19.40	49.32	5.41	24.25
碳酸盐结合态	93.25	2.79	3.19	5.95	0.43	12.83
硫化物残渣态	192.20	103.40	12.42	24.38	2.96	102.83
残渣态	15.52	6.79	2.32	3.80	0.40	20.35
重金属总量	464.30	181.66	39.58	85.08	10.37	163.21
污泥农用标准	3 000	1 500	200	1 000	20	1 000

2.2 污泥堆肥施用量确定

土壤中重金属的迁移性和植物毒性主要取决于重金属的形态分布,而不只是其总量,仅从重金属总量控制污泥堆肥施用量存在一定的缺陷。可交换态和吸附态重金属是最易被作物吸收的形态,其含量

虽低但生物有效性较大;碳酸盐结合态对 pH 值的变化较敏感,在酸性条件下易溶解释放,对作物的生物有效性也较大;硫化物及有机结合态主要包括重金属硫化物沉淀及与各种有机质结合的重金属,是相对稳定的形态;残渣态是存在于矿物晶格中的重金属,经过相当长的时间也不易释放到土壤中去,是生物难以利用的形态。因此,按照不同形态重金属的环境风险大小引入毒性响应系数确定污泥堆肥施用量更为合理。对重金属不同形态毒性响应系数的确定研究很少,统计数据有限,根据重金属不同形态的生物有效性大小很难客观赋值,为此,依据多年的研究结论^[14-16]并结合国内外相关的研究结果^[6-8,17],按照不同形态重金属的生物效应,初步确定可交换态和吸附态毒性响应系数为 5,碳酸盐结合态毒性响应系数为 4,有机结合态毒性响应系数为 3,硫化物毒性响应系数为 2,残渣态毒性响应系数为 1。

污泥堆肥土地利用首先应该避开食物链,并且重金属随污泥堆肥施用量的增加产生累积效应,因此,在施用堆肥前必须确定土壤环境容量和背景值。陕西关中地区土壤为弱碱性,污泥堆肥在园林绿化等非耕地施用,可参考土壤环境质量三级标准^[18]和污泥在碱性土壤上施用时污染物控制标准^[12-13];土壤环境背景值从《环境背景值数据手册》^[19]中查知。污泥堆肥施用量

$$m = \frac{M(C_s - C_0)}{Ng \sum C_i W_i} \quad (1)$$

式中 C_i ——重金属第 i 种形态的含量
 W_i ——重金属第 i 种形态对应毒性响应系数
 N ——污泥堆肥施用年限
 C_s ——土壤质量三级标准
 C_0 ——土壤背景值
 M ——每公顷土壤表层 0 ~ 20 cm 土壤总质量(约为 2.30×10^6 kg)
 g ——重金属在土壤中的残留率,取 90%

考虑到连续多年施用污泥堆肥后,任何一种重金属都不能超过环境质量标准,应该选择最小的施用量作为参考值。从表中可以看出,限制杨凌污泥施用量的是 Cd,堆肥施用量为 $3.69 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (以干质量计)。若只考虑控制重金属总量,污泥堆肥施用量为 $10.87 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,是对不同形态重金属引入毒性响应系数后计算施用量的 2.95 倍,这必将增加污泥堆肥施用后的环境风险。堆肥产品中总氮为 $12.80 \text{ g}/\text{kg}$, 3.69 t 污泥堆肥所含氮素相当于 100.49 kg 尿素,完全可以满足植物对氮素的需求,也不会造成氮素过量。可以考虑将化肥和污泥堆肥混合施用,

表 4 污泥堆肥施用量及相关标准

Tab. 4 Application rate of sewage sludge compost and comparisons to related standards

重金属种类	土壤三级质量标准/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	土壤背景值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	污泥农用标准/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	堆肥施用量/ $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$
Zn	500	65.8	3 000	42.50
Cu	400	23.5	1 500	106.59
Ni	200	30.5	200	198.03
Pb	500	16.3	1 000	265.87
Cd	1.0	0.118	20	3.69
Cr	300	65.7	1 000	82.06

注:堆肥施用量均以单一重金属含量为参考,假定连续施用时间为 20 年。

减少单位面积污泥堆肥施用量,延长污泥施用年限。

2.3 污泥堆肥中重金属潜在的环境风险评价

污染指数和地积累指数被广泛用于评价土壤和沉积物中的重金属污染程度,采用这两种方法对杨凌区污泥堆肥重金属污染程度进行分析。

2.3.1 污染指数评价法

单项污染指数

$$P_i = \frac{Q_i}{S_i} \quad (2)$$

式中 P_i ——污泥堆肥中重金属 i 的污染指数

Q_i ——重金属 i 的实际含量

S_i ——重金属 i 的环境质量标准值

考虑到污泥堆肥主要用于园林绿化等,选取《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)三级标准作为评价标准。评价结果可分为 4 个等级: $P_i \leq 1$ 为未被污染, $1 < P_i \leq 2$ 为轻度污染, $2 < P_i \leq 3$ 为中度污染, $P_i > 3$ 为重污染。

按元素污染指数的大小划分污染等级,作为污泥堆肥重金属污染评价的客观依据,即可按各重金属元素污染指数 P_i 的大小顺序排列,区分各污染物的影响和污染程度。Zn、Cu、Ni、Pb、Cd 和 Cr 的污染指数分别为 0.93、0.45、0.20、0.17、10.37 和 0.54。结果表明,污泥堆肥存在严重污染,限制污泥堆肥施用的是 Cd,其次是 Zn,影响最小的是 Pb。

单项污染指数只能反映污泥中某一重金属元素的污染状况,而污泥是一个十分复杂的体系,通过综合污染指数才能较具体地评判和表明其重金属的污染情况,突出高风险重金属元素对环境质量的影响。重金属综合污染评价采用兼顾单元素污染指数均值和最大值的内梅罗综合污染指数(P)法,具体计算公式为

$$P = \sqrt{\frac{P_{\text{ave}}^2 + P_{\text{max}}^2}{2}} \quad (3)$$

式中 P_{ave} ——污泥堆肥中重金属各单项污染指数 (P_i) 的平均值

P_{max} ——污泥中重金属各单项污染指数 (P_i) 的最大值

综合污染指数 $P \leq 0.7$ 为安全, $0.7 < P \leq 1.0$ 为警戒级, $1.0 < P \leq 2.0$ 为轻污染, $2.0 < P \leq 3.0$ 为中度污染, $P > 3.0$ 为重污染。Zn、Cu、Ni、Pb、Cd 和 Cr 的综合污染指数 P 为 7.48, 达到重污染水平, 表明杨凌区污泥堆肥存在严重污染, 但由于土壤环境容量很大, 合理施用不会造成土壤污染。

2.3.2 地积累指数评价法

地积累指数 (I_{geo}) 是德国科学家 Muller^[20] 于 1979 年提出的一种研究水环境沉积物中重金属污染的定量指标, 任福民^[21] 等已将其成功用于城市污水厂污泥中的重金属生态风险评价。地积累指数计算公式为

$$I_{geo} = \lg \left(\frac{Q_i}{1.5B_i} \right) \quad (4)$$

式中 B_i ——土壤元素背景值

表 5 为地积累指数分级, 杨凌区污泥堆肥 Zn、Cu、Ni、Pb、Cd 和 Cr 的地积累指数分别为 2.23、2.37、-0.21、1.80、5.87 和 0.73, 污泥堆肥存在一定的污染, 其中 Cd 存在严重污染, 结果与污染指数评价的结论一致。

3 结论

(1) 根据重金属不同形态引入毒性响应系数,

表 5 地积累污染指数分级

Tab. 5 Grades of the geo-accumulation pollution index

地积累指数	级数	污染程度
<0	0	无污染
0~1	1	轻度污染
1~2	2	偏中度污染
2~3	3	中度污染
3~4	4	偏重污染
4~5	5	重污染
5~6	6	严重污染

弥补了以往只进行总量控制的不足, 突出了重金属不同形态的环境风险, 合理控制污泥堆肥施用量, 初步确定杨凌区污泥堆肥施用量为 $3.69 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 该方法也可为其他地区确定污泥堆肥施用量提供参考。

(2) 可以将污染指数和地积累指数结合起来, 评价污泥堆肥中重金属的污染程度, 分析限制污泥堆肥施用的重金属种类。评价结果显示, 限制杨凌区堆肥施用的是 Cd, 在堆肥施用时应引起足够重视。

(3) 污泥堆肥施用量受到气候条件、植物种类、地形地貌等多种因素的影响, 必须同时进行周密细致地、长期定位监测施用污泥堆肥对环境的影响, 这样也可以为污泥在耕地上施用积累可靠数据基础, 确定更为合理的毒性响应系数。重金属对生物的危害机理和环境影响往往很复杂, 并不是简单的相加或者相减, 需要进一步探讨重金属作用机理, 为综合指数评价提供依据。

参 考 文 献

- 乔显亮, 骆永明, 吴胜春. 污泥的土地利用及其环境影响[J]. 土壤, 2000(2): 79~85.
- 程五良, 方萍, 陈玲, 等. 城市污水厂污泥土地利用可靠性探讨[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(7): 939~942.
Cheng Wuliang, Fang Ping, Chen Ling, et al. Study on soil reuse feasibility of municipal sewage sludge[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32(7): 939~942. (in Chinese)
- 周立祥, 胡霭堂, 戈乃玢, 等. 城市污泥土地利用研究[J]. 生态学报, 1999, 19(2): 185~193.
Zhou Lixiang, Hu Aitang, Ge Naifen, et al. Study on utilization of municipal sewage sludge in farmland and forest land[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(2): 185~193. (in Chinese)
- 郝晓地, 张璐平, 兰荔. 剩余污泥处理/处置方法的全球概览[J]. 中国给水排水, 2007, 23(20): 1~5.
Hao Xiaodi, Zhang Luping, Lan Li. Global overview of excess sludge treatment and disposal methods[J]. China Water & Waste Water, 2007, 23(20): 1~5. (in Chinese)
- Horn A L, During R, Gath S. Comparison of decision support systems for an optimized application of compost and sewage sludge on agricultural land based on heavy metal accumulation in soil[J]. Science of the Total Environment, 2003, 311(1~3): 35~48.
- 陈同斌, 郑国砥, 高定, 等. 关于《农用污泥中污染物控制标准》中锌限量值的讨论[J]. 环境科学学报, 2007, 27(7): 1057~1065.
Chen Tongbin, Zheng Guodi, Gao Ding, et al. Approach to limit of zinc in "China's National Standards of Sewage Sludge Applied to Agricultural Soils" (GB 42842-84)[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(7): 1057~1065. (in Chinese)
- Smith S R. A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge[J]. Environment International, 2009, 35(2): 142~156.

- 8 Torri S I, Lavado R S. Dynamics of Cd, Cu and Pb added to soil through different kinds of sewage sludge[J]. Waste Management, 2008, 28(5): 821 ~ 832.
- 9 孙西宁, 张增强, 张永涛, 等. 陕西杨凌污水处理厂污泥成分月际变化及其土地利用探讨[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2007, 35(9): 215 ~ 220.
Sun Xining, Zhang Zengqiang, Zhang Yongtao, et al. Components change of sewage sludge by month and land application in Shaanxi Yangling sewage treatment plant[J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science, 2007, 35(9): 215 ~ 220. (in Chinese)
- 10 曾现来, 张增强, 张永涛, 等. 城市生活垃圾堆肥试验装置的设计[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(10): 109 ~ 112.
Zeng Xianlai, Zhang Zengqiang, Zhang Yongtao, et al. Design of a composting reactor for municipal solid waste composting [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2006, 7(10): 109 ~ 112. (in Chinese)
- 11 Soumia A, Mohamed H, Georges M, et al. Sequential extraction of heavy metals during composting of sewage sludge[J]. Chemosphere, 2005, 59(6): 801 ~ 810.
- 12 GB 18918—2002. 城镇污水处理厂污染物排放标准[S].
GB 18918—2002. Discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plant[S]. (in Chinese)
- 13 GB 4284—84. 农用污泥中污染物控制标准[S].
GB 4284—84. Control standards for pollutants in sludges from agricultural use[S]. (in Chinese)
- 14 孙西宁, 李艳霞, 张增强, 等. 城市污泥好氧堆肥过程中重金属的形态变化[J]. 环境科学学报, 2009, 29(9): 1 836 ~ 1 841.
Sun Xining, Li Yanxia, Zhang Zengqiang, et al. Extractable forms of heavy metals produced during municipal sludge composting[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(9): 1 836 ~ 1 841. (in Chinese)
- 15 孟昭福, 张增强, 薛澄泽, 等. 替代黑麦幼苗测定土壤中重金属生物有效性的研究[J]. 农业环境保护, 2001, 20(5): 337 ~ 340.
Meng Zhaofu, Zhang Zengqiang, Xue Chengze, et al. Determination of bioavailability of heavy metals in soil by wheat young seedlings in stead of rye[J]. Agro-environmental Protection, 2001, 20(5): 337 ~ 340. (in Chinese)
- 16 殷宪强, 张增强, 孙慧敏, 等. 施用污泥堆肥对土壤中 Cu Zn 形态分布的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(3): 448 ~ 451.
Yin Xianqiang, Zhang Zengqiang, Sun Huimin, et al. Fractional distribution of copper and zinc in a soil amended with composted sludge[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2004, 23(3): 448 ~ 451. (in Chinese)
- 17 陈同斌, 杭世珺, 徐云, 等. 对《城镇污水处理厂污泥处置农用泥质》的思考[J]. 中国给水排水, 2009, 25(9): 101 ~ 108.
Chen Tongbin, Hang Shijun, Xu Yun, et al. Thinking on disposal of sludge from municipal wastewater treatment plant the quality of sludge used in agriculture[J]. China Water & Waste Water, 2009, 25(9): 101 ~ 108. (in Chinese)
- 18 GB 15618—1995. 土壤环境质量标准[S].
GB 15618—1995. Environmental quality standard for soils[S]. (in Chinese)
- 19 李健, 郑春江, 郭希利, 等. 环境背景值数据手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- 20 Muller G. Schwermetalle in den sedimenten des Rheins-Veränderungen seit 1971[J]. Umschau, 1979, 79: 778 ~ 783.
- 21 任福民, 周玉松, 牛牧晨, 等. 污泥中的重金属特性分析和生态风险评价[J]. 北京交通大学学报, 2007, 31(1): 102 ~ 105.
Ren Fumin, Zhou Yusong, Niu Muchen, et al. Characteristics analysis and environmental assessment on heavy metals in the sludge of sewage[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2007, 31(1): 102 ~ 105. (in Chinese)

(上接第 74 页)

- 11 周海燕, 杨学军, 严荷荣, 等. 注入式变比变量施药系统[C] // 中国农业机械学会 2008 年学术年会论文集, 2008: 123 ~ 125.
- 12 Anglund E A, Ayers P D. Field evaluation of response times for a variable rate liquid chemical applicator[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2003, 19(3): 273 ~ 282.
- 13 Prairie Agricultural Machinery Institute. Flexi-coil mode 1562 field sprayer, evaluation report 527 [R]. Saskatoon, Saskatchewan, Canada, 1987.
- 14 刘志壮, 徐汉虹, 洪添胜, 等. 在线混药式变量喷雾系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 93 ~ 96, 129.
Liu Zhizhuang, Xu Hanhong, Hong Tiansheng, et al. Key technology of variable-rate spraying system of online mixing pesticide[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 93 ~ 96, 129. (in Chinese)