

猪粪好氧堆肥对缺锌土壤种植大豆的影响研究

李荣华, 孙西宁, 刁展, 马宜修, 安伟强, 史莉, 张广杰, 张增强*

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:以 Zn 含量较高的猪粪为原料进行了 90 d 好氧堆肥,以采自陕西省永寿县养马庄的典型缺锌土壤为供试土样,通过大豆盆栽试验研究了该有机肥对大豆生长的影响,并以污染指数评价法和地积累指数评价了施用该有机肥对土壤中重金属的累积环境风险。结果表明:经过 90 d 的高温好氧堆制,获得了氮磷钾丰富的堆肥产品,且堆肥中未检测出 Ni、Cd、Cr、Pb、Hg 和 As 等有害重金属,仅含 Cu 256.3 mg·kg⁻¹、Zn 474.4 mg·kg⁻¹。与对照相比,随着有机肥施用量的增加,大豆生物量和产量逐渐增加,并在肥土比 10% 时达到最高,大豆产量比对照提高了 206.7%,大豆根系重量提高了 94.2%,大豆茎叶(含荚壳)提高了 94.0%;大豆籽粒中 Zn 含量则随着有机肥施用量的增加而逐渐增加,并在 40%时籽粒 Zn 含量高达 49.33 mg·kg⁻¹;施用堆肥后,土壤 EC、Zn 和 Cu 全量、Zn 和 Cu 有效量均随着堆肥使用量的增加而增加,而土壤 pH 则随着堆肥比例的增加,从 8.46 逐渐降低到 7.44。污染指数评价法和地积累指数评价法表明,当堆肥施用量不超过 5%时,不会对该缺锌土壤造成重金属污染。研究显示,适量施用该堆肥能显著促进大豆的茎叶和根系生长,同时提高籽粒产量和籽粒中的 Zn 含量。对于供试缺锌土壤,施用该富锌有机肥可以明显补充土壤锌。

关键词:猪粪;好氧堆肥;缺锌土壤;大豆种植

中图分类号:S141.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)07-1343-07

Influence of Swine Compost Application on the Soybean Planting and Its Environmental Risk Assessment

LI Rong-hua, SUN Xi-ning, DIAO Zhan, MA Yi-xiu, AN Wei-qiang, SHI Li, ZHANG Guang-jie, ZHANG Zeng-qiang*

(College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to study the effect of compost application on soybean planting in a typical zinc lack soil which was collected from Yangmazhuang, Yongshou County, Shaanxi Province. High zinc contained swine manure was selected as the raw materials and the corn stalk powder as the amendment, the mixture was composted for 90 days in an aerobic reactor. The effects of different amount of compost on growth and development, yield and quality of soybean through pot cultivating experiment were studied. The results showed that after 90 days composting, the final organic fertilizer contained plenty of N, P, K, as well as Cu 256.3 mg·kg⁻¹ and Zn 474.4 mg·kg⁻¹, respectively, the elements such as Ni, Cd, Cr, Pb, Hg and As were out of determination. The organic fertilizer had significant effect on the soybean seed yield, stem and root growth, as well as seeds Zn content increase. And the seed, stem and root weight reached the maximum amount with the compost ratio increased to 10%, and compared with the control treatment, soybean seed weight, root weight and stem(including pod shell) increased 206.7%, 94.2% and 94.0%, respectively. Zn content in seed increased with the amount of compost added, and was as high as 49.33 mg·kg⁻¹ in 40% compost ratio. Along with the increase of the proportion of compost, soil EC, total Zn and Cu, available Zn and Cu content increased rapidly, while the soil pH gradually declined from 8.46 to 7.44. The further single pollution index and geoaccumulation index evaluation results indicated that it would not cause the typical zinc lack soil environmental risk with the compost rational application rate of 5%. And the compost rational application rate in Yongshou zinc lack soil was 90.28 t·hm⁻²·a⁻¹ which could be used for 20 years. The study implicated that the high zinc content swine manure compost had a potential agricultural application value in the zinc lack soil, and it had a positive effect on the soybean planting with the compost rational application rate of 5%.

Keywords: swine manure; aerobic compost; zinc lack soil; soybean planting

收稿日期:2011-12-09

基金项目:西北农林科技大学 2011 年“大学生创新性实验计划”校重点项目(1201110712045);陕西省攻关项目(2010K01-01)

作者简介:李荣华(1977—),男,陕西洛南人,博士研究生,讲师,主要从事污染环境修复研究。E-mail:rh.lee@nwsuaf.edu.cn

* 通讯作者:张增强

全世界缺锌土壤约占总面积的 1/3,我国土壤缺锌也比较严重^[1],约有 0.49 亿 hm^2 的耕地缺锌,占耕地总面积的 51.1%^[2]。且随着高产品种栽培,种植集约化程度加强,高纯度化肥施用增多,作物缺锌呈增加趋势^[3]。

目前,解决农作物缺锌问题,提高锌营养品质的主要农业措施是施用锌肥微肥^[3]。在中国北方的碱性土壤中,合理施用锌肥能起到使蔬菜、玉米、大豆增产,且改善品质的目的^[4-5]。在生产中一方面要注重增施氮磷肥^[6-8],以促进作物对其他营养元素的吸收;另一方面要考虑土壤的类型和性质^[6,9],合理施肥。例如王朝辉等^[9]在研究中指出,石灰性土壤(pH 和 CaCO_3 含量为限制性因素)对微量元素的固定作用较强,土壤施用微肥越多,固定的数量也越多,应尽量减少微肥的大剂量投入。有机肥中含有大量的有机酸,可提高有机肥中锌的有效性,同时,增施有机肥还有利于增加土壤养分,显著改善土壤结构和性质,促进作物生长,提高食品品质^[10]。因此,有学者指出,增施含锌有机肥可能是一条解决农作物缺锌问题,提高锌营养品质的主要农艺措施^[11-12]。

我国拥有丰富的有机肥源,据估算 2002 年的畜禽粪便资源量约 20.4 亿 t,堆沤肥资源约 20.2 亿 t,秸秆类资源 7 亿 t^[13]。但随着有机肥资源量的不断增长,中国有机肥的施用比例却不断下降,1975 年有机肥与化肥养分比例为 2:1,而到 2005 年则为 1:2^[13]。若能面对我国城市污泥、畜禽粪便中锌含量较高这一现状,制作含锌有机肥,不但可以缓解我国耕地缺锌的现状,还能实现畜禽粪便的资源化利用,促进农业的可持续发展^[14-15]。但由于畜禽粪便中还含有其他重金属,若长期或过量施用则可能会引起土壤重金属超标、农产品污染等一系列环境问题^[2,14],因而在研究缺锌土壤增施含锌有机肥对作物生长影响的同时,还要考虑其对土壤重金属积累的影响,但有关这一问题的研究报道很少。

为此,本研究以 Zn 含量较高的集约化养猪场猪粪为原料,以玉米秸秆为调理剂,进行 90 d 的好氧高温堆肥,并通过大豆盆栽试验,研究了堆肥不同施用比例对大豆生物量和籽粒中 Cu、Zn 的富集情况,探讨了堆肥不同施用比例对土壤中 Cu、Zn 的蓄积状况,并通过引入不同形态重金属的毒性响应系数,对堆肥施用量进行了估算,最后用污染指数法和地累积指数法对该堆肥施入土壤后重金属的污染风险进行了评价,阐明缺锌土壤增施含锌有机肥对土壤的补锌

作用及潜在环境污染风险,以期实现畜禽粪便的无害化处理与资源化利用。

1 材料与方法

1.1 堆肥试验

选取杨凌职业技术学院种猪场的新鲜猪粪(记做 SW)经风干后碾压成粉,将采自杨凌张家岗农田的玉米秸秆(记做 CS)经粉碎后作为调理剂。先按照 SW:CS(W/W,以干重计)1:4 的比例混合,并保证混合物料中颗粒物粒径 $<1.0\text{ cm}$,然后把混合物料及时装入自行设计的翻转式高温好氧堆肥反应器^[13],控制水分为 65%左右,进行强制通风,堆制 90 d(从 2011 年 3 月 2 日到 2011 年 6 月 1 日)。堆肥期间未进行含水率调节。初始堆肥物料 SW 和 CS 的含水率分别为 78.89%、10.07%,有机质 73.01%、94.18%,全磷 15.13、 $1.14\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 29.82、 $1.14\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全钾 8.16、 $28.42\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 8.37、6.75。SW 中 EC $1.33\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$,Zn $2\text{ 173.56 mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Cu $1\text{ 175.22 mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Ni $3.81\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Cd、Cr、Pb、Hg 和 As 均未检测出。

1.2 盆栽试验

盆栽试验于 2011 年 6 月 3 日至 2011 年 10 月 3 日在西北农林科技大学资源环境学院温室中进行。供试土壤为典型的缺锌土壤,采自陕西省永寿县养马庄,其基本性状为:pH 8.43,有机质 1.61%,全氮 $1.18\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $0.026\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $0.141\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全锌 $0.061\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,全铜 $45.02\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效锌 $0.187\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效铜 $0.495\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。于 2011 年 5 月 4 日,用 $38\text{ cm}\times 28\text{ cm}$ 的棕色塑料桶装风干土 4.0 kg ,装前按堆肥和土壤的重量比为 0(对照)、2.5%(约 $57.50\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)、5%(约 $115.00\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)、10%(约 $230.00\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)、20%(约 $460.00\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)和 40%(约 $920.00\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)的比例混匀。装土过程中,不断振动试桶,使土壤松紧合适,并灌水 2.0 L ,在室温静置 1 个月后播种。于 2011 年 6 月 3 日,向每桶均匀播种大豆 8 粒,深度约 1.5 cm 。然后浇水约 1.0 L ,每处理重复 3 次。大豆长出第 4 片叶时,每盆定苗 4 株。采用容量法,根据作物长势和土壤干湿情况及时灌水,培养期间土壤水分保持 60%的田间持水量。试验期间未追施其他肥料。

1.3 指标测定及数据处理方法

按水样比 10:1 振荡 3 h 后离心过滤,取滤液电极法测定堆肥和土壤的 pH 和电导率(EC);堆肥的全氮、全磷、全钾、有机质测定方法参见文献[16]。大豆于 2011 年 10 月 3 日收获,大豆植株分为根、茎叶(含荚

壳)、籽粒。取各器官鲜样在 105 ℃杀青 20 min,55~60 ℃烘箱中烘干至恒重,称干重。堆肥、土壤和大豆样品均经陶瓷碾钵磨细后密封备用。猪粪和堆肥中 Cd、Pb 和 Ni 采用 500 ℃灰化-HClO₄-HNO₃ 消解-KI-MIBK 萃取-石墨炉原子吸收光谱法测定;Cr 采用 HClO₄-HNO₃ 消解-原子吸收光谱法测定;As 采用 HClO₄-HNO₃ 消解-二乙基二硫代氨基甲酸银法测定;Hg 采用 H₂SO₄-HNO₃ 消解-原子荧光法测定。堆肥、土壤和大豆中 Zn、Cu 用 HCl-HNO₃ 消解-原子吸收光谱法测定^[16];土壤有效态 Zn 和 Cu 用 DTPA-CaCl₂-TEA 混合溶液提取-原子吸收光谱法测定(日立 Z-5000 型)^[18]。堆肥产品的重金属形态分析采用在湖泊和海底沉积物、土壤和堆肥中广泛采用的 Sposito 顺序浸提法^[19],具体流程见表 1 所示。所有指标测定均设置 3 次平行。为保证重金属含量的测定结果,实验过程中采用了标准添加回收实验进行分析质量控制。用软件 SPSS19.0 进行数据显著性检验,Origin8.5 软件作图。

2 结果与讨论

2.1 猪粪好氧堆肥基本理化指标的分析

经过 90 d 的高温好氧堆制获得的堆肥产品,含总凯氏氮 6.98 g·kg⁻¹,全磷 3.91 g·kg⁻¹,全钾 24.41 g·kg⁻¹,pH7.73,EC 3.37 mS·cm⁻¹,对其中所含的重金属进行分析表明,含 Cu 256.3 mg·kg⁻¹、Zn 474.4 mg·kg⁻¹,未检测出 Ni、Cd、Cr、Pb、Hg 和 As 等。对照表 2 中国和部分国家有机堆肥重金属最大允许浓度^[18]可见,仅有 Cu 的含量 256.3 mg·kg⁻¹超过了德国、法国、荷兰和日本有机肥的最大允许浓度,Zn 的含量 474.4 mg·kg⁻¹超过了德国、加拿大和日本有机肥的最大允许浓度,但仍符合我国有机堆肥标准的要求。说明该有机堆肥具有潜在的农业利用价值。

由表 3 可见,经过 90 d 的堆肥处理化后,堆肥中 Cu 和 Zn 总浓度有所增加,这是由于大量的有机质被

表 2 中国和部分国家有机堆肥的重金属最大允许浓度
(mg·kg⁻¹)^[18]
Table 2 Permissible maximum concentration of heavy metal of
compost in China and several countries(mg·kg⁻¹)

国家	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	As
美国	1500	2800	300	39.0	300	41
德国	200	400	200	6.0	200	40
英国	280	560	1100	7.0	1200	20
法国	200	600	200	4.0	300	40
荷兰	200	1000	300	10.0	500	60
加拿大	150	330	90	1.6	210	14
日本	—	240	—	5.0	—	50
中国	—	—	100	3.0	300	30

降解,Cu 和 Zn 被“浓缩”^[18-19];Cu 和 Zn 的交换态和吸附态浓度有所下降,是由于在堆腐过程中,产生的腐殖质和重金属离子发生了络合所致^[18-19]。

2.2 堆肥对大豆生物量的影响

不同施用比例堆肥对大豆生物量的影响见图 1。由图 1A、1B、1C 可见,适量施用富锌有机肥能显著提高大豆的生物量及产量。与对照相比,随着有机肥比例的增加,大豆的生物量及产量逐渐增加,并在肥土比例为 10%时达到最高。肥土比例从 2.5%增加到 10%,大豆产量分别比对照提高 50.4%、147.8%和 206.7%,大豆根系重量提高 17.9%、52.3%和 94.2%,大豆茎叶质量(含荚壳)分别提高了 22.6%、58.5%和 94.0%。此后随着有机肥比例的增加,大豆根系、大豆茎叶(含荚壳)和产量迅速减小。由图 1D 可见,随着有机肥比例的增加,土壤 EC 迅速增加,肥土比例为 20%和 40%时分别达到 1.84 mS·cm⁻¹和 3.48 mS·cm⁻¹;而土壤 pH 则随着堆肥比例的增加从最初的 pH8.46 逐渐降低,并在肥土比例 10%以后逐渐稳定在 pH7.44。尚虹等^[20]在研究中也发现,当堆肥施用量超过 10%时,迎春和紫穗槐的株高、冠幅和干重均会出现明显下降。其原因可能是由于堆肥施用量过大,使得土壤中含有较高的盐分和重金属所致;另外,堆肥中含有

表 1 重金属形态分级中 Sposito 浸提法操作条件
Table 1 Experimental conditions of Sposito's procedure used to determine various extractable heavy metal forms

步骤	试剂	提取条件	形态	标记
1	0.5 mol·L ⁻¹ KNO ₃	16 h	交换态	SP1
	H ₂ O	2 h,3 次	吸附态	
2	0.5 mol·L ⁻¹ NaOH	16 h	有机结合态	SP2
3	0.05 mol·L ⁻¹ EDTA	6 h	碳酸盐结合态	SP3
4	4 mol·L ⁻¹ HNO ₃	16 h,85 ℃水浴	硫化物结合态	SP4
5	浓 HNO ₃ +HClO ₄ (4:1)	消解	残渣态	SP5

表 3 猪粪堆肥前后的重金属形态分布($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 3 Different forms of Cu and Zn in piles before and after compost($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

重金属形态	Cu		Zn	
	堆肥前	堆肥后	堆肥前	堆肥后
交换态和吸附态	20.30±0.20a	18.57±0.91a	10.98±0.07g	8.36±3.01g
有机结合态	45.10±1.02b	45.65±1.33b	12.55±0.57h	11.33±3.01h
碳酸盐态	13.78±0.03c	14.46±0.66c	12.85±1.09i	11.35±3.01i
硫化物残渣态	42.41±2.11d	37.33±0.82d	12.08±0.06j	6.29±3.01j
残渣态	116.10±1.61e	140.30±3.60e	403.90±3.56k	437.10±8.23k
重金属总量	237.70±3.01f	256.30±7.05f	452.40±9.03l	474.40±9.70l

注:表中同一字母表示数据之间在 95%置信度下存在显著差异。

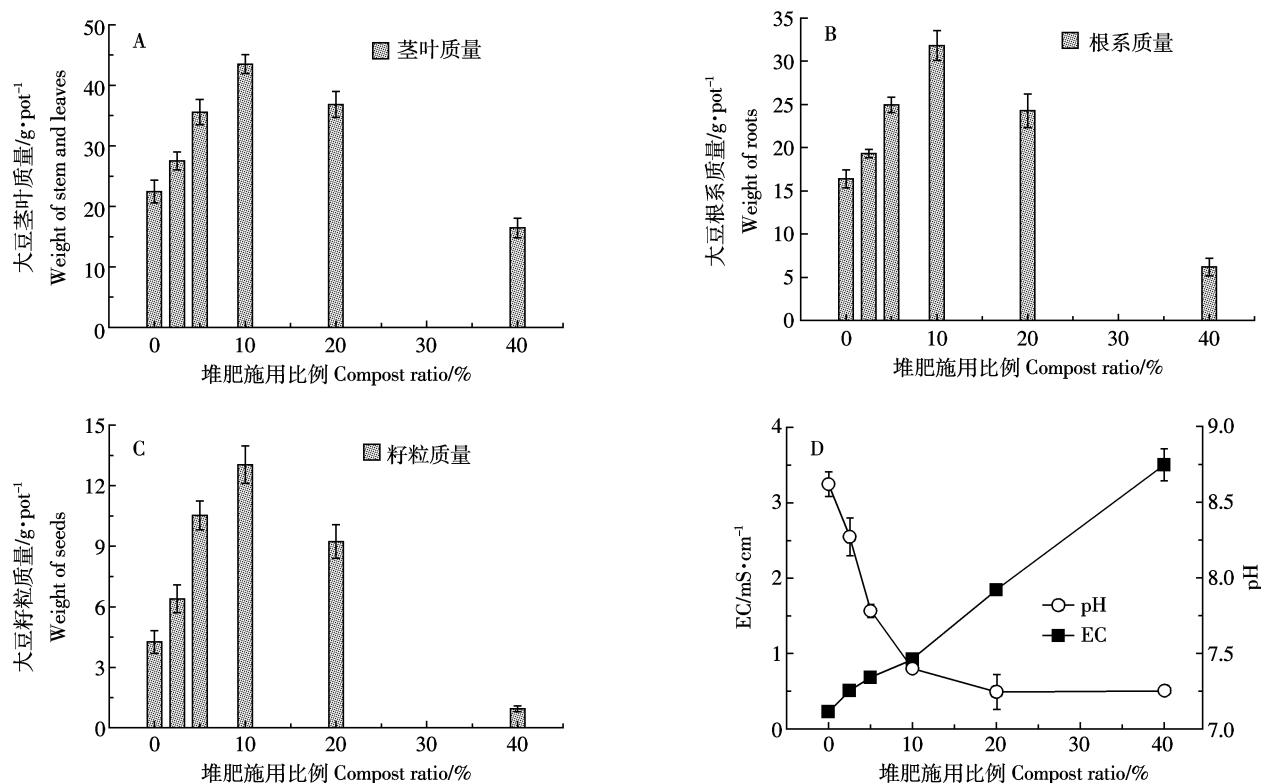


图 1 不同施加比例堆肥对大豆生物量及土壤 EC 和 pH 的影响

Figure 1 Effect of compost on biomass of soybean, pH and EC of soil

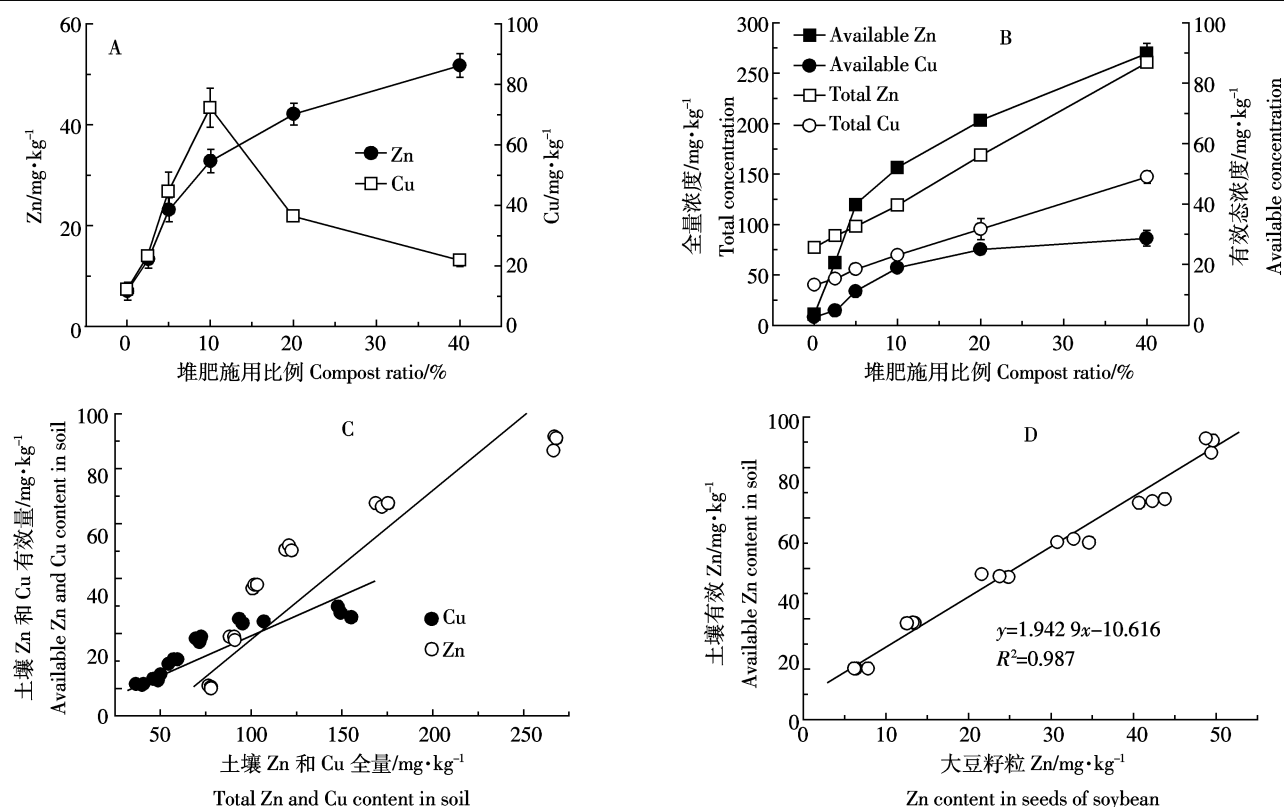
的其他化学物质也会对作物的生长产生抑制作用^[21]。

2.3 堆肥对大豆籽粒和土壤中 Zn 和 Cu 蓄积的影响

堆肥对大豆籽粒和土壤中 Zn 和 Cu 蓄积的影响见图 2。

从图 2A 可见,大豆籽粒对 Zn 和 Cu 的蓄积能力差异较大,适量施用富锌有机肥能显著提高大豆籽粒中 Zn 的含量。与对照相比,随着有机肥比例的增加,大豆籽粒中 Zn 含量逐渐增加,当肥土比例为 40% 时,大豆籽粒中 Zn 含量高达 $49.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。但大豆籽粒中 Cu 的含量则在肥土比例 10% 处达到最高值,此后随着堆肥用量的增加而迅速减小。其原因可能是由于

铜对作物的毒性较锌强(环境评价中规定毒性响应因子 Cu 为 5, Zn 为 1)^[22],因而随着堆肥施用量增加, Cu 对大豆的生物毒性增强,限制了大豆对其吸收所致。根据《食品安全法》和国务院办公厅《食品安全整顿工作方案》要求,卫生部经研究并参考国际食品法典标准,不再将锌、铜、铁作为污染物指标,废止了 GB 13106—1991《食品中锌限量卫生标准》、GB 15199—1994《食品中铜限量卫生标准》、GB 15200—1994《食品中铁限量卫生标准》3 项标准^[23]。因此,当肥土比例为 40% 时,大豆籽粒中 Zn 含量高达 $49.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,仍可安全食用。



A 为大豆籽粒中 Zn 和 Cu 含量, B 为土壤中 Zn 和 Cu 全量及有效量,

C 为土壤中 Zn 和 Cu 全量与有效量之间的关系, D 为土壤有效 Zn 和大豆籽粒 Zn 含量间的关系

A: Zn and Cu contents in bean seeds; B: Zn and Cu total and available concentrations in soil; C: Relation of Zn or Cu content in soil between total and available content; D: Relation between total Zn content in soil and total Zn content in bean seeds

图2 堆肥对大豆籽粒和土壤中 Zn 和 Cu 蓄积的影响

Figure 2 Effect of compost on Zn and Cu accumulation in soybean seeds and soil

由图 2B 所示盆栽试验堆肥比例对土壤中 Zn 和 Cu 蓄积的影响可见, 土壤中 Zn 和 Cu 全量和有效量的浓度随着堆肥比例的增加而增加, 且土壤中 Zn 和 Cu 全量与有效量间具有一定的线性关系, 决定系数 R^2 分别达到 0.94 和 0.87 (见图 2C)。说明堆肥的施加量增加会导致土壤 Zn 和 Cu 量增加, 有可能导致土壤重金属污染。且由图 2D 中大豆籽粒 Zn 含量和土壤有效 Zn 之间的关系, 可知大豆籽粒中的 Zn 含量与土壤有效 Zn 的含量正相关 (决定系数 R^2 达 0.987)。虽然该研究结果也表明要增加作物 Zn 品质, 应该增加土壤中有效 Zn 的含量, 这也是缺锌土壤需要在实际农艺措施中施用锌肥微肥的原因。但由于以污泥、畜禽粪便、生活垃圾为原料制作的有机肥的成分极其复杂, 一般含有多种重金属, 在农田施用时, 不能为追求增加作物 Zn 的含量而盲目增加富锌有机肥的用量, 以免导致作物和土壤中其他重金属元素超标。在实际农耕中, 应考虑在增加作物 Zn 品质的同时, 兼顾作物的生态安全, 必须对有机肥的施用量进

行科学估算和环境安全评价。

2.4 堆肥施用量的估算

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, 而不是其总量。一般认为, 可交换态和吸附态重金属是最易被作物吸收的形态; 碳酸盐结合态对 pH 值的变化较为敏感, 在酸性条件下容易溶解释放, 对作物的生物有效性也较大; 硫化物态和有机结合态相对较为稳定, 残渣态则难以被生物所利用^[9]。因此, 按照不同形态重金属的环境风险大小引入毒性相应系数, 来确定堆肥施用量更为合理^[9]。进行堆肥土地施用量估算时, 按照不同形态重金属的生物效应, 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, 则堆肥施用量为

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

其中: C_i 为重金属第 i 种形态的含量, W_i 为重金属第 i

种形态对应的毒性响应系数, N 为堆肥施用年限, g 为重金属在土壤中的残留率 (取 90%), C_s 为土壤三级质量标准, C_0 为土壤背景值, M 为每公顷土壤表层 0~20 cm 土壤总质量 (约 2.3×10^6 kg)^[19]。

康军等^[19]在不考虑土壤磷和盐分的累积的情况下, 指出当连续多年施用堆肥后, 任何一种重金属都不能超过土壤环境质量标准。为此, 本研究在估算时, 采用康军等^[19]估算推荐的堆肥施用年限 (取 20 a) 进行, 结果见表 4。由表 4 可见, 若堆肥连续施用 20 a, 则堆肥施用量应控制在 $90.28 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。考虑表 4 中的堆肥农用标准和土壤背景值, 当以 $90.28 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的施用量连续施用该堆肥时, 需经 140~150 a 土壤中的重金属浓度才会达到农用标准的限值。

表 4 堆肥施用量的估算

Table 4 Compost application amount estimation				
重金属	土壤三级质量标准 ^[24] /mg·kg ⁻¹	土壤背景实测值/mg·kg ⁻¹	堆肥农用标准 ^[24] /mg·kg ⁻¹	堆肥施用量/ t·hm ⁻² ·a ⁻¹
Zn	500	60.67	3 000	90.28
Cu	400	22.86	1 500	98.35

2.5 堆肥中重金属的潜在环境风险评价

控制城市污泥等有机肥农用的环境污染问题, 最基本的途径就是确定其环境容量, 土壤对城市污泥等有机肥的环境容量通常根据城市污泥等有机肥和土壤中重金属浓度或累积量来确定^[15]。污染指数和地积累指数已被广泛用于土壤、沉积物和堆肥农用的重金属累积生态风险评价^[19]。

在污染指数评价法中, 常用单项污染指数法来进行评价:

$$P_i = Q_i / S_i$$

其中: P_i 为堆肥中重金属 i 的污染指数; Q_i 为重金属 i 的实际含量; S_i 为重金属 i 的环境质量标准。

评价结果分为 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^[19]。可以计算出, 当肥土比例为 5% 时, Zn 和 Cu 的污染指数分别为 0.209 和 0.155; 当肥土比例为 10% 时, Zn 和 Cu 的污染指数分别为 0.245 和 0.189。说明在此施加量下堆肥均未对土壤造成污染。但肥土比例从 5% 增加到 10%, Zn 的污染指数增加了 17.22%, 而 Cu 的污染指数增加了 21.94%。因此, 限制该堆肥施用的限制因子是 Cu。虽然土壤的环境容量很大, 但考虑到耕地的可持续利用性和作物的增产作用, 结合通过引入不同形态重金属的毒性响应系数进行堆肥施

用量的估算结果, 可以认为控制堆肥施用量在 5% 是较合适的, 可以安全使用。

地积累指数 (I_{geo}) 评价法的计算公式为

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left(\frac{D_i}{1.5B_i} \right)$$

其中: D_i 为重金属 i 的实际含量; B_i 为土壤元素背景值。

污染指数分级如下: <0 为未污染, $0 \sim 1$ 为轻度污染, $1 \sim 2$ 为偏中度污染, $2 \sim 3$ 为中度污染, $3 \sim 4$ 为偏重度污染, $4 \sim 5$ 为重度污染, $5 \sim 6$ 为严重污染^[20]。经计算可知, 肥土比例 5% 时, Zn 和 Cu 的地积累指数分别为 0.203 和 0.851, 10% 堆肥施用量 Zn 和 Cu 的地积累指数分别为 0.427 和 1.14。堆肥施加比例从 5% 增加到 10%, Cu 的污染指数由轻度污染变为偏中度污染, 而 Zn 的污染指数仍为轻度污染, 说明限制该堆肥施用的限制因子是 Cu。因此, 堆肥施加量应控制在 5% 左右。虽然在此比例下, 堆肥存在一定的 Cu 污染, 但由于土壤环境容量很高, 只要控制好施用量, 是不会造成土壤污染, 可以安全使用, 结果与污染指数评价的结论一致。

3 结论

将猪粪和玉米秸秆粉按适当的比例混合, 经过 90 d 的高温好氧堆制, 获得氮磷钾丰富的堆肥产品, 且堆肥中未检测出 Ni、Cd、Cr、Pb、Hg 和 As 等有害重金属, 仅含 Cu $256.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Zn $474.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

在缺锌土壤中适量施用该猪粪堆肥能显著促进大豆的茎叶和根系生长, 提高籽粒产量和籽粒中 Zn 的含量; 在肥土比为 10% 时, 大豆的生物量及产量达到最高。

施用该堆肥后土壤重金属污染风险评估结果表明, 限制该堆肥施用量的是 Cu, 但当堆肥施用量不超过肥土比例 5% 时, 连续多年施用不会造成土壤重金属污染。

将猪粪与玉米秸秆混合堆肥后所得含锌有机肥, 可以作为缺锌土壤补锌有机肥料。

参考文献:

- [1] 刘 铮. 我国土壤中锌含量的分布规律[J]. 中国农业科学, 1994, 27 (1): 30-37.
- LIU Zheng. Regularities of content and distribution of zinc in soils of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1994, 27(1): 30-37.
- [2] 郭广慧. 我国城市污泥中养分和重金属含量及农用潜力分析[D]. 西南大学硕士学位论文, 2007.
- GUO Guang-hui. Heavy metals and nutrients in sewage sludge from dif-

- ferent areas in China and its potential argucultural landuse[D]. South-west University Master Degree Dissertation, 2007.
- [3] Kkar P N, Walker C. The distribution and correction of zinc deficiency [M]//Robson A D(eds.). Zinc in soils and plants. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993:59-77.
- [4] 汪洪, 刘新保, 褚天铎. 锌肥对作物产量、子粒锌及土壤有效锌含量的后效[J]. 土壤肥料, 2003(1):3-6, 9.
WANG Hong, LIU Xin-bao, CHU Tian-duo, et al. Residual effect of zinc application on crop yield, zinc concentration in crop grain and soil available zinc[J]. *Soils and Fertilizers*, 2003(1):3-6, 9.
- [5] 曹玉贤, 田霄鸿, 杨习文, 等. 土施和喷施锌肥对冬小麦子粒锌含量及生物有效性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6):1394-1401.
CAO Yu-xian, TIAN Xiao-hong, YANG Xi-wen, et al. Effects of soil and foliar applications of Zn on winter wheat grain Zn concentration and bioavailability[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(6):1394-1401.
- [6] 刘合满, 张兴昌, 苏少华. 黄土高原主要土壤锌有效性及其影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3):898-902.
LIU He-man, ZHANG Xing-chang, SU Shao-hua. Available zinc content and related properties of main soil in the Loess Plateau[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3):898-902.
- [7] Rengel Z, Graham R D. Wheat genotypes differ in Zn efficiency when grown in chelate-buffered nutrient solution Nutrient uptake[J]. *Plant and Soil*, 1995, 176:317-324.
- [8] 陆欣春, 田霄鸿, 杨习文, 等. 氮锌配施对不同冬小麦品种产量及锌营养的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(5):923-928.
LU Xin-chun, TIAN Xiao-hong, YANG Xi-wen, et al. Effect of combination use of Zn and N fertilizers on yield and Zn content in winter wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(5):923-928.
- [9] 咎亚玲, 王朝辉, Graham Lyons. 不同轮作体系土壤残留硒对小麦产量与营养品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(2):235-238.
ZAN Ya-ling, WANG Zhao-hui, Graham Lyons. Effects of soil residual Se and Zn on yield and nutritional quality of wheat in different rotation systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(2):235-238.
- [10] 邹晓霞, 陕红, 陈磊, 等. 秸秆和猪粪施用对樱桃萝卜的效果比较及对土壤性状的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(5):165-172.
ZOU Xiao-xia, SHAN Hong, CHEN Lei, et al. Effects of pig manure and wheat straw application on plant growth and nutrient uptake of cherry Radish (*Raphanus sativus*) and characteristics of soil fertility[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(5):165-172.
- [11] Ceotto E. The issues of energy and carbon cycle: New perspectives for assessing the environmental impact of animal waste utilization [J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96:191-196.
- [12] 郭郦兰, 张青喜, 田若涛, 等. 城市污泥和污泥垃圾堆肥作为肥源对农作物的影响[J]. 中国公共卫生, 1994, 10(3):117-118.
GUO Mei-lan, ZHANG Qing-xi, TIAN Ruo-tao, et al. The effect of sludge compost and rubbish compost on the heavy metals accumulated in crop[J]. *China Public Health*, 1994, 10(3):117-118.
- [13] 黄鸿翔, 李书田, 李向林, 等. 我国有机肥的现状与发展前景分析[J]. 土壤肥料, 2006(1):3-8.
HUANG Hong-xiang, LI Shu-tian, LI Xiang-lin, et al. Analysis on the status of organic fertilizer and its development strategies in China[J]. *Soil Fertilizer*, 2006(1):3-8.
- [14] 李本银, 黄绍敏, 张玉亭, 等. 长期施用有机肥对土壤和糙米铜、锌、铁、锰和镉积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1):129-135.
LI Ben-yin, HUANG Shao-min, ZHANG Yu-ting, et al. Effect of long-term application of organic fertilizer on Cu, Zn, Fe, Mn and Cd in soil and brown rice [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(1):129-135.
- [15] 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 Tong-bin, ZHENG Guo-di, GAO Ding, et al. Approach to limit of zinc in "China's National Standards of Sewage Sludge Applied to Agricultural Soils" (GB 42842-1984)[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(7):1057-1065.
- [16] Kang Jun, Zhang Zengqiang, Wang Jim J. Influence of humic substances on bioavailability of Cu and Zn during sewage sludge composting[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102:8022-8026.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [18] 杨国义, 李芳柏, 万洪富, 等. 猪粪混合堆肥过程中重金属含量的变化[J]. 生态环境, 2003, 12(4):412-414.
YANG Guo-yi, LI Fang-bai, WAN Hong-fu, et al. Changes in the contents of heavy metals in pig manure composting[J]. *Ecological Environment*, 2003, 12(4):412-414.
- [19] 康军, 张增强, 孙西宁, 等. 污泥堆肥合理施用量确定方法 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(6):98-102.
KANG Jun, ZHANG Zeng-qiang, SUN Xi-ning, et al. Rational application rate of sewage sludge compost[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(6):98-102.
- [20] 尚虹, 谭国栋, 张灿, 等. 污泥堆肥对迎春和紫穗槐生长的影响及其使用量的确定[J]. 水土保持通报, 2011, 31(4):215-217, 222.
SHANG Hong, TAN Guo-dong, ZHANG Can, et al. Effect of sewage sludge compost on growth of *Jasminum nudiflorum* and *Amorpha fruticosa* and determination of application rate[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(4):215-217, 222.
- [21] 赵华, 龚萍, 马玲, 等. 施用污泥堆肥黑麦草生长及重金属含量的影响[J]. 广东微量元素科学, 2009, 16(10):35-38.
ZHAO Hua, GONG Ping, MA Ling, et al. Effect of application of sewage sludge on growth and heavy metal accumulation of *Lolium perenne* L.[J]. *Guangdong Weiliang Yuansu Kexue*, 2009, 16(10):35-38.
- [22] 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估[J]. 北京交通大学学报, 2007, 31(1):102-105.
REN Fu-min, ZHOU Yu-song, NIU Mu-chen, 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.
- [23] <http://www.moh.gov.cn/publicfiles/business/htmlfiles/mohwsjdj/s10602/201005/47221.htm>.
- [24] 国家环境保护总局, GB 15618—1995 土壤环境质量标准[S]. State Environmental Protection Administration. GB 15618—1995 Environmental quality standard for soils[S].