

施入城市生活垃圾堆肥对玉米植株重金属分布及土壤养分的影响

邵华伟, 葛春辉*, 马彦茹, 杨新华, 孙九胜, 王新勇

(新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所, 新疆 乌鲁木齐 830091)

摘 要:以玉米为供试作物,研究施入生活垃圾堆肥对土壤和玉米各器官重金属分布规律及对土壤养分的影响。结果表明:连续3年施肥,土壤速效养分的含量明显增加;土壤重金属呈现累积,但含量远远低于二级土壤标准(GB 15618—1995);植株中重金属含量表现为根部>茎秆>叶片>籽粒,Cd在植株根部富集,但未大量向其他部位转移,玉米植株地上部分重金属含量明显低于饲料卫生标准(GB 13078—2001)。由此推断,在短期内(3年),年施入60 000 kg·hm⁻²的垃圾堆肥能提高土壤肥力,且暂时不会引起土壤重金属污染,也不影响玉米植株的饲用;使用多年后应及时监测,以保证安全性。

关键词:城市生活垃圾堆肥;玉米植株;重金属植株分布;土壤养分

中图分类号:X503.231

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2013)06-0058-06

Effect of Municipal Solid Waste(MSW) Compost Application on Heavy Metal Distribution in Maize Plant and Soil Nutrients

SHAO Hua-wei, GE Chun-hui*, MA Yan-ru, YANG Xin-hua, SUN Jiu-sheng, WANG Xin-yong

(Institute of Soil and Fertilizer, Xinjiang Academy of Agricultural Science, Urumchi 830091, China)

Abstract: Municipal solid waste(MSW) compost is increasingly used in agriculture for improving soil nutrients and reducing waste disposal cost. However, the risks and benefits of MSW remains unsolved. In the present study, a field experiment was conducted to investigate the influence of MSW compost on heavy metal contents and nutrients in soil and of maize plant. The results showed that nutrients and heavy metals in soil were obviously increased, but heavy metal contents did not exceed the soil environmental quality standard of China (GB 15618—1995). Contents of heavy metal in plant showed the order of root> stem> leaf> seed. Heavy metals in aerial part were significantly lower than the feed hygiene standards of China (GB 13078—2001). The results indicated that, as a consequence of annual 60 000 kg·hm⁻² MSW application, soil fertility was obviously increased without presence of significant heavy metal pollution in a short term (three year), the aerial part of maize plant was not polluted either and could be used as feed; but continuous application must be timely monitored to keep safety.

Keywords: municipal solid waste(MSW) compost; maize plant; heavy metal distribution; soil nutrients

据统计,全国668个城市1年产生的生活垃圾达1.5亿t,人均产生垃圾450~500kg,同时以每年8%~9%的速度不断增长^[1],城市生活垃圾污染环境已成

为突出的社会问题。而通过垃圾的堆肥化是减少垃圾污染一个重要途径,垃圾堆肥用于农业生产较为普遍^[2-3]。垃圾堆肥含有丰富的养分,用于农田可补充土壤各种营养元素,维持土壤肥力,使农作物高产、稳产^[4-6]。但由于垃圾堆肥中含有数量不等的重金属及病原菌等污染物,直接农用会造成污染环境,并通过食物链危害人畜健康^[7-9]。因而,城市生活垃圾堆肥在农业应用上受到一定的限制。

Zheljazzkov等^[10]研究认为城市生活垃圾堆肥对甜菜生长发育、产量和品质有一定促进作用,并能明显

收稿日期:2013-09-10

基金项目:新疆维吾尔自治区青年科技基金(2010211B30);自治区高技术研究与发展计划项目(200715114);乌鲁木齐科学技术计划项目(G07132002)

作者简介:邵华伟,男,工程师,研究方向为垃圾资源化及农用。

E-mail:shaohua166@163.com

*通信作者:葛春辉 E-mail:gch-1998@163.com

改善土壤理化性状;多立安等^[11]研究表明以垃圾堆肥作为草坪基质将会为草坪植物生长创造良好的基质环境,能大幅度提高草坪的生长量。本研究利用生活垃圾堆肥按照不同施肥量与化学肥料配合在玉米上进行试验,通过测定玉米不同器官的重金属含量分布及土壤养分指标,初步探讨短期(3 年)内施用垃圾堆肥对玉米植株各部分重金属含量分布及对土壤养分的影响。本研究结果可为生活垃圾堆肥无害化后进行农用提供数据依据,同时为在玉米上应用的安全性评价提供必要的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2010 年在国家新疆灰漠土监测基地试验田进行。土壤类型为灰漠土,生活垃圾堆肥来自于乌鲁木齐垃圾处理厂,堆肥腐熟过程中不添加任何辅料。腐熟垃圾重金属含量符合农用垃圾堆肥污染物控制标准(GB 8172—1987),可进行农田土地利用。供试化肥为尿素(N 46%)、磷酸二铵(P₂O₅ 44%,N13%)、硫酸钾(K₂O 50%)。供试土壤及生活垃圾堆肥的养分和重金属含量情况见表 1。

1.2 试验设计

根据施肥种类和量的不同共设 4 个处理,对照仅施用化肥, L1、L2、L3 在对照基础上添加不同量的生活垃圾堆肥,每处理 3 次重复,试验小区面积 4 m×5 m=20 m²,种植玉米品种为“石玉 905”,品种成熟期 90 d,采用滴灌系统进行灌溉和追肥。磷钾肥料和垃圾堆肥为基肥一次施入,其中磷钾肥用量为磷酸二铵 150 kg·hm⁻² 和硫酸钾 90 kg·hm⁻²,尿素按基肥、追肥比例 1:2 分 2 次进行施用,底肥于玉米播种前撒施后耕翻,追肥于玉米拔节期滴灌随水入土,连续 3 年采用相同的施肥处理,在玉米成熟期测定土壤和玉米植株重金属分布含量。各处理如表 2 所示。

1.3 样品检测

1.3.1 土壤重金属检测

依据《土壤重金属污染国家标准》,采用 GB/T 17141—1997 中硝酸-盐酸-高氯酸-氢氟酸消解-石

表 2 试验处理设置

处理	施肥量/kg·hm ⁻²
对照(CK)	P ₂ O ₅ (150)+K ₂ O(90)+N(225)
L1	L(15 000)+ P ₂ O ₅ (150)+K ₂ O(90)+N(225)
L2	L(30 000)+ P ₂ O ₅ (150)+K ₂ O(90)+N(225)
L3	L(60 000)+ P ₂ O ₅ (150)+K ₂ O(90)+N(225)

注:表中括号内表示施肥量。

墨炉原子吸收光谱法测土壤 Cd、Cr、Pb,采用 GB/T 22105—2008(土壤质量总汞、总砷、总铅的测定-原子荧光法)中重铬酸钾浸提-原子荧光光谱法和 1:1 王水浸提-原子荧光光谱法测土壤 Hg、As。

1.3.2 玉米植株各器官重金属检测

依据《食品安全国家标准》,采用 GB/T 5009.123—2003、GB/T 5009.15—2003 和 GB/T 5009.12—2003 中硝酸-高氯酸消解-石墨炉原子吸收光谱法测植株 Cd、Cr、Pb,采用 GB/T 5009.17—2003 和 GB/T 5009.11—2003 中硝酸-高氯酸消解-原子荧光光谱法测植株 Hg、As。

1.3.3 土壤有机质、速效氮、速效钾、速效磷检测

按常规方法测定。

1.4 数据分析

试验结果应用 Excel 和 SPSS 统计软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 各施肥处理对土壤养分的影响

通过 3 年的试验,土壤有机质、碱解氮、速效磷、速效钾 4 项主要的养分指标明显提高(表 3),相对于对照分别提高 4.68~10.69 g·kg⁻¹、16.4~41.1 mg·kg⁻¹、4.16~8.62 mg·kg⁻¹、16~40 mg·kg⁻¹,增加幅度分别为 39.63%~90.52%、42.38%~106.20%、37.24%~77.17%、

表 3 2012 年土壤养分指标

处理	有机质/g·kg ⁻¹	速效氮/mg·kg ⁻¹	速效磷/mg·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹
对照(CK)	11.81±0.23c	38.7±2.48d	11.17±0.67c	190±5c
L1	16.49±1.22b	55.1±6.12c	15.33±0.49b	206±9b
L2	17.99±0.89b	67.2±3.67b	18.68±1.22a	217±8b
L3	22.50±1.52a	79.8±8.33a	19.79±1.83a	230±5a

注:同列不同小写字母表示各水平之间有差异显著性(P<0.05)。

表 1 供试土壤和生活垃圾堆肥性质

材料	有机质/g·kg ⁻¹	pH 值	速效氮/mg·kg ⁻¹	速效磷/mg·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹	重金属/mg·kg ⁻¹				
						Cd	Cr	Hg	Pb	As
堆肥	371.0	7.8	37.5	78.25	1 507	2.52	67.08	3.82	60.64	15.63
土壤	11.70	8.3	46.4	10.7	166	0.18	23.5	0.026	21.3	8.94

8.42%~21.05%; 以上结果说明施用富含养分的垃圾堆肥能使土壤养分呈现明显累积($P<0.05$)。

2.2 不同处理对土壤、植株铬(Cr)分布的影响

随着施肥量的增加,土壤 Cr 表现为增加(图 1),施肥处理较 CK 达到显著性差异($P<0.05$);植株根部的 Cr 含量也随之增加,各施肥处理间达到显著性差异($P<0.05$);植株各部分 Cr 表现为根>茎秆>叶片>籽粒,分布系数分别为 0.600~0.717、0.098~0.188、0.028~0.049、0.012~0.023;这与苏春田等^[12]的研究结果基本一致;籽粒中 Cr 含量表现为随施肥量的增加而增加,而茎秆、叶片中表现为不规律分布;茎秆、叶片、籽粒中的 Cr 远远低于饲料安全标准($<10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),这说明茎秆、叶片、籽粒可以用作畜禽的饲料。经过 3 年的施入生活垃圾堆肥,土壤中 Cr 也远低于土壤 2 级标准($<250\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$);这说明 Cr 的累积与施肥量有一定的关联,但仅 3 年的施肥,垃圾堆肥中的 Cr 还不足以污染土壤(图 1)。

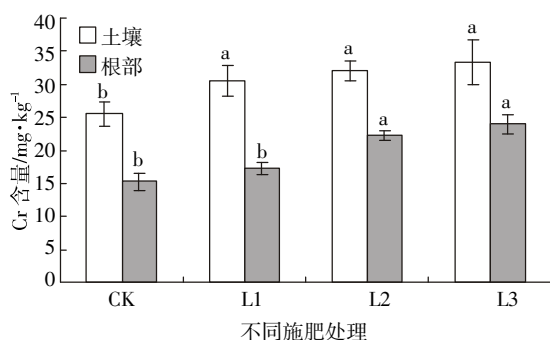
2.3 不同处理对土壤、植株镉(Cd)分布的影响

随着施肥量的增加,土壤 Cd 表现为增加(图 2),L3 处理较 CK 达到明显差异($P<0.05$),而较其他处理间未达到显著性差异($P<0.05$);根部的 Cd 含量呈现不规则变化,但根部 Cd 含量远高于土壤 Cd 含量,这

说明 Cd 易于向根部富集;植株根部 Cd 表现为 $L1>L3>L2>CK$, L1 处理较 CK 达到极显著差异($P<0.01$),这可能与土壤中有有机质含量不同有关,有机质含量不同所形成的 Cd 与有机质复合体强度不同,从而影响 Cd 的生物有效性;植株各部分 Cd 表现为根>茎秆>叶片>籽粒,分布系数分别为 3.221~7.036、1.005~6.949、0.024~0.195、0.014~0.063;植株根部的 Cd 含量远高于籽粒、茎秆、叶片, Cd 的生物有效性表现为仅在根部富集,仅有极少部分向茎秆、叶片、籽粒转移;茎秆、叶片、籽粒中的 Cd 低于饲料安全标准($<0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。经过 3 年的施肥, L3 施肥处理的土壤中 Cd 含量为 $0.416\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 低于土壤 2 级标准($<0.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)(图 2)。

2.4 不同处理对土壤、植株砷(As)分布的影响

随着施肥量的增加,土壤 As 含量为 $8.57\sim 8.78\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 但处理间无明显差异($P>0.05$);根部的 As 含量表现为 $L2>L1>L3>CK$, 含量为 $1.60\sim 2.27\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, L2 处理与 CK 之间具有极显著差异($P<0.01$);植株各部分 As 表现为根>茎秆>叶片, 籽粒中未检验出 As, 根、茎、叶的 As 含量分布系数分别为 0.189~0.223、0.037~0.056、0.006~0.011; 植株根部的 As 含量远高于茎秆、叶片, As 的生物有效性表现为仅在根部富集,而茎秆中 As 含量表现为随施肥量的增加而增加,



不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同

图 1 不同处理土壤、植株中 Cr 含量的变化

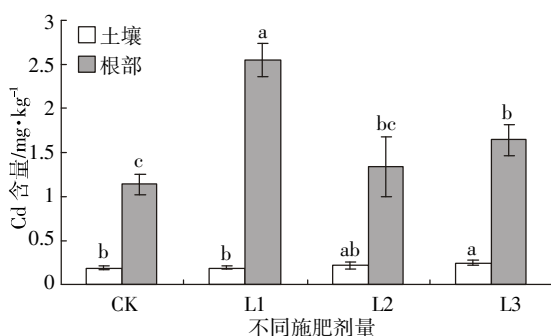
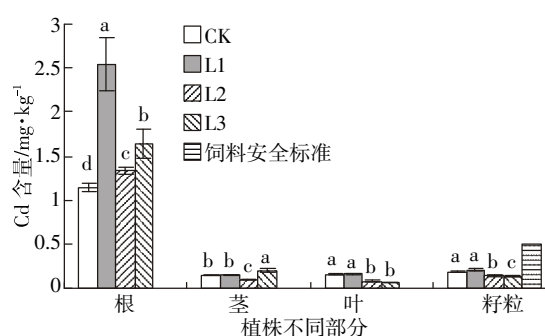
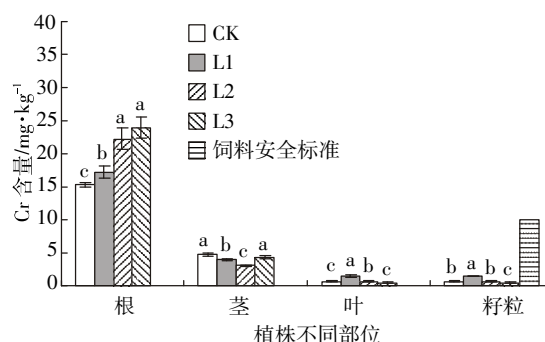


图 2 不同处理土壤、植株 Cd 含量的变化



叶片中 As 含量变化趋势恰恰相反,这与根部含量变化趋势存在矛盾,这需要进一步的研究;茎秆、叶片中的 As 低于饲料安全标准($<2.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。L3 的施肥处理的土壤中 As 含量为 $8.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,低于土壤 2 级标准($<25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)(图 3)。

2.5 不同处理对土壤、植株铅(Pb)分布的影响

随着施肥量的增加,土壤 Pb 表现为增加,L2 处理、L1 处理与 CK 比较未达到显著性差异($P>0.05$),L3 处理与 CK 比较有显著性差异($P<0.05$);根部的 Pb 含量呈现不规则变化,但根部 Pb 含量远低于土壤 Pb 含量,这与陈燕等^[13]研究结果玉米植株不同器官中的 Pb、Cu、Zn 含量没有明显的规律性基本一致;植株各部分 Pb 表现为根>茎秆>叶片,籽粒未检出 Pb,根、茎、叶分布系数分别为 $0.098 \sim 0.118$ 、 $0.049 \sim 0.090$ 、 $0.003 \sim 0.011$;植株根部 Pb 向茎秆转移,部分向叶片转移,但未向籽粒转移;根部、茎秆、叶片、籽粒中的 Pb 均低于饲料安全标准($<8.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。L3 施肥处理的土壤中 Pb 含量为 $21.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,远低于土壤 2 级标准($<350 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)(图 4)。

2.6 不同处理对土壤、植株汞(Hg)分布的影响

随着施肥量的增加,土壤 Hg 含量增加,各施肥处理较 CK 均有明显差异($P<0.05$);植株各部分 Hg 表现为根>茎秆>叶片>籽粒,Hg 含量分布系数分别为

$0.468 \sim 0.987$ 、 $0.267 \sim 0.423$ 、 $0.061 \sim 0.189$ 、 $0.036 \sim 0.127$,随着施肥量的增加,分配系数呈现下降的趋势;茎秆 Hg 含量表现为随施肥量的增加而增加,L3 的施肥处理,茎秆 Hg 含量为 $25.7 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,未超过饲料 Hg 安全标准($<100 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$);各处理叶片、籽粒中 Hg 含量变化不大,含量分别为 $5.1 \sim 5.3 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $3.8 \sim 4.4 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。经过 3 年的试验,L3 施肥处理的土壤中 Hg 含量为 $0.096 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,远低于土壤 2 级标准($<1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)(图 5)。

3 讨论

生活垃圾堆肥富含有机质、氮、磷、钾等养分^[14],可作为农业、城市园林、荒山绿化等潜在肥料资源。但生活垃圾堆肥的应用导致土壤污染成为关注的焦点,这也制约了生活垃圾堆肥在农业方面的应用。研究表明,施用垃圾堆肥后,土壤中重金属含量均有不同程度的提高,但在短期内(1~3 年),土壤重金属含量均能符合国家土壤环境质量 2 级标准。

一般认为在污染土壤中施入有机物质会增强土壤吸附或络合固定了土壤中的重金属,从而降低了土壤中重金属的毒性和生物有效性^[15-16],植物体吸收积累的重金属会减少^[17-18]。各种有机物施用后,土壤的物理、化学、生物学性质会发生改变,土壤重金属的生物

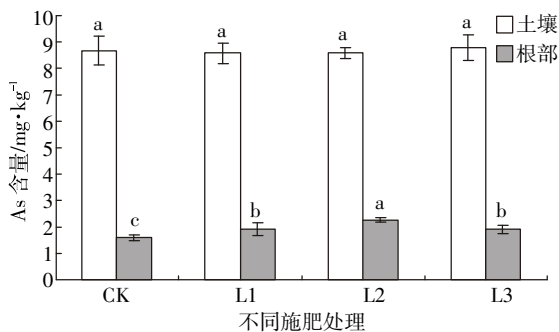


图 3 不同处理土壤、植株中 As 含量的变化

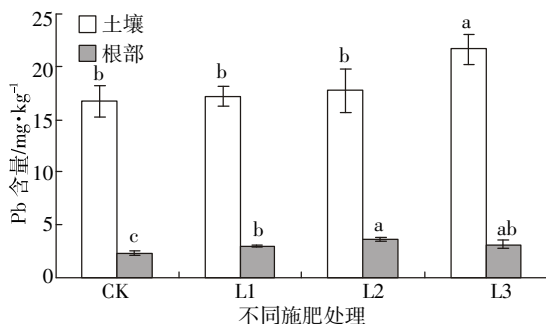
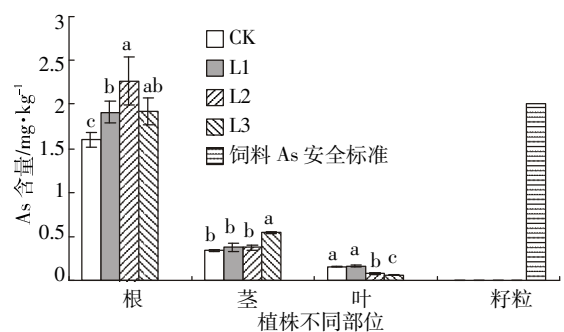
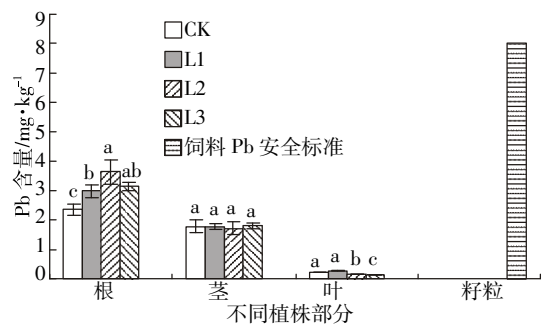


图 4 不同处理土壤、植株 Pb 含量的变化



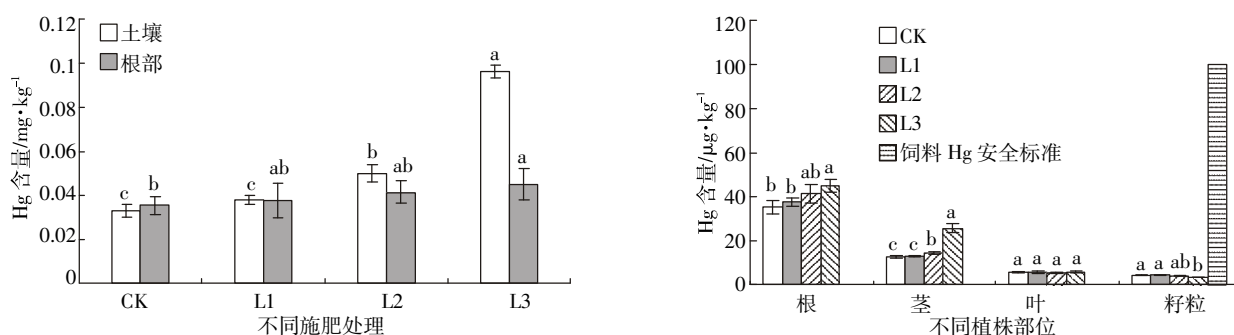


图 5 不同处理土壤、植株中 Hg 含量的变化

有效性通常会降低,植物吸收积累量减小,对于贫瘠的土壤还能增加养分供给,提高作物的产量,但是有机物质不改变重金属的总量,当新的有机物的输入,随着有机物的分解,固定作用减弱,重金属生物有效性将会提高^[19]。Zheljazkov 等^[20]发现随着城市垃圾堆肥的施肥量增加,植株内重金属的分布并不是成比例,施用垃圾堆肥重金属的生物有效性相对于对照明显下降,在一定的使用范围,土壤与植株无重金属污染的风险,可能是堆肥中重金属的生物有效性与堆肥腐熟程度有一定的相关性,堆肥中的腐殖质在高温腐熟过程中与重金属结合,降低重金属的生物有效性^[21-22]。本研究连续 3 年施用垃圾堆肥,不同处理的植株根上部分重金属含量均在安全标准范围内,若长期施用垃圾堆肥,将会出现植物重金属污染风险。

大量研究认为 Cd 相比其他元素更易被植物从土壤中吸收^[23-24],Cd 大部分留在根中,只有少部分被转运到地上部,Cd 到达可食部位特别是种子和果实中要经过许多细胞壁及细胞膜障碍,无法大量运转到种子和果实^[25]。而李静等^[26]研究的 Cd 在玉米植株中不同部位浓度为:叶片>根>茎秆>籽粒,叶片是 Cd 的主要富集区,而本试验中植株各部分 Cd 表现为根>茎秆>叶片>籽粒,植株根部的 Cd 含量远高于植株其他部位,这可能因为不同玉米品种及土壤对 Cd 迁移有一定选择性,会在植株不同部位呈现不同浓度富集。

4 结论

通过 3 年连续施用生活垃圾堆肥,土壤养分呈现明显增加,土壤重金属含量呈现累积,但高施肥量(60 000 kg·hm⁻²)土壤 Cr、Cd、Hg、Pb、As 5 种重金属含量仍远低于土壤 2 级标准(GB 15618—1995)。

玉米的不同部位对重金属的吸收和分配有所不同。大部分重金属滞留在根部,植株各器官重金属分

布呈现为根>茎秆>叶片>籽粒,籽粒中 Pb 和 As 均未检出;除 Cd 外,植株各器官重金属分布系数均小于 1,Cd 表现为在植株根部明显富集,分布系数达 3.221~7.036,Cr、Cd、Hg、Pb 等重金属在植株各器官分布均随着施肥量的增加而增加,而 As 在植株叶片中分布则相反;通过连续 3 年的施肥,几种重金属在各器官中的分布均未超过饲料安全标准(GB 13078—2001)。

参考文献:

- [1] 宾晓蓓,李倩.国内外城市生活垃圾处理现状与处理技术[J].北方环境,2011,23(10):42-44.
- [2] Abdel E Ghaly, Alkoaik F N. Effect of municipal solid waste compost on the growth and production of vegetable crops[J]. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 2010,5(3):274-281.
- [3] Jones D L, Chesworth S, Khalid M, et al. Assessing the addition of mineral processing waste to green waste-derived compost: An agronomic, environmental and economic appraisal[J]. *Biore-source Technology*, 2009(100):770-777.
- [4] 康少杰,刘善江,邹国元,等.污泥肥和生活垃圾肥对小麦-玉米重金属累积及产量的影响[J].土壤通报,2011,42(3):752-757.
- [5] 范海荣,华璐,王学江.城市垃圾堆肥及其复混肥对草坪草生长及土壤环境的影响[J].农业环境科学学报,2007,26(1):188-192.
- [6] Madrid F, Lo'pez R, Cabrera F. Metal accumulation in soil after application of municipal solid wastecompost under intensive farming conditions[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2007, 119:249-256.
- [7] Walker D J, Clemente R, Bernal M P, et al. Contrasting effects of manure and compost on soil pH, heavy metal availability and growth of *Chenopodium album* L. in a soil contaminated by pyritic mine waste[J]. *Chemosphere*, 2004,57:215-224.
- [8] Topcuoğlu B. Effects of repeated applications of sewage sludge and MSW compost on the bioavailability of heavy metals in greenhouse soil

- polish[J]. *Journal of Environmental Studies*, 2005,14(2):217-222.
- [9] 付学琴,陈霞,龙中儿.城市垃圾堆肥对高羊茅生长及土壤性质的影响[J]. *植物资源与环境学报*,2012,21(2):96-101.
- [10] Zheljzkov V D, Warman P R. Source-separated municipal solid waste compost application to Swiss chard and basil[J]. *J Environ Qual*, 2004, 33:542-552.
- [11] 多立安,廉菲,赵树兰,等.生活垃圾堆肥基质草坪建植体系接种草坪土壤线虫多样性特征[J]. *生态学报*,2009,29(4):1725-1730.
- [12] 苏春田,唐健生,潘晓东,等.重金属元素在玉米植株中分布研究[J]. *中国农学通报*,2011,27(8):323-327.
- [13] 陈燕,刘晚苟,郑小林,等.玉米植株对重金属的富集与分布[J]. *玉米科学*,2006,14(6):93-95.
- [14] 邵华伟,徐万里,孔江江,等.乌鲁木齐市生活垃圾调查及评价[J]. *环境卫生工程*,2009(5):102-105.
- [15] Dong F, Lu Y, Zhang J G, et al. Soil arsenic concentration in paddy fields and its transfer to rice grain in Pearl River Delta [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009,18(6):2137-2140.
- [16] 黄益宗,郝晓伟,雷鸣,等.重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. *农业环境科学学报*,2013,32(3):409-417.
- [17] Park J H, Lamb D, Paneerselvam P, et al. Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal (loid) contaminated soils [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 185:549-574.
- [18] Zaniewicz-Bajkowska A, Rosa R, Franczuk J, et al. Direct and secondary effect of liming and organic fertilization on cadmium content in soil and in vegetables[J]. *Plant Soil and Environment*, 2007, 53(11): 473-481.
- [19] Park J H, Lamb D, Paneerselvam P, et al. Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal contaminated soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 185: 549-574.
- [20] Zheljzkov V D, Warman P R. Phyto-availability and fractionation of copper, manganese, and zinc in soil following application of two composts to four crops[J]. *Environ Pollut*, 2004, 131:187-195.
- [21] Pare T, Dinel H, Schnitzer M, et al. Extractability of trace metals during co-composting of biosolids and municipal solid wastes[J]. *Biol Fertil Soils*, 1999, 29:31-37.
- [22] Liviana Leita, Maria De Nobili. Water-soluble fractions of heavy metals during composting of municipal solid waste[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1991, 20(1):73-78.
- [23] Zhu Y, Yu H, Wang J L, et al. Heavy metal accumulations of 24 asparagus bean cultivars grown in soil contaminated with Cd alone and with multiple metals (Cd, Pb and Zn) [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55:1045-1052.
- [24] 王兆炜,南忠仁,赵转军,等.干旱区绿洲土壤 Cd、Pb 单一与复合污染下芹菜重金属累积特征研究[J]. *土壤通报*, 2011, 42(5): 1256-1262.
- [25] Hasan S A, Fariduddin Q, Ali B, et al. Cadmium: Toxicity and tolerance in plants[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2009, 30(2): 165-174.
- [26] 李静,依艳丽,李亮亮,等.几种重金属(Cd、Pb、Cu、Zn)在玉米植株不同器官中的分布特征[J]. *中国农学通报*, 2006, 22(4): 244-247.