

连续施用有机肥对菜田土壤 Cu 和 Zn 积累及辣椒产量品质的影响

关天霞^{1,2}, 李彩霞¹, 马国泰^{1,2}, 景根茂¹, 费彩亮¹, 段玉仁¹, 刘芝妨¹

(1.河西学院生命科学与工程学院, 甘肃 张掖 734000; 2.甘肃省河西走廊特色资源利用重点实验室, 甘肃 张掖 734000)

摘要: 采用田间随机区组试验,研究了不同用量鸡粪和猪粪有机肥(0,15,30,45 和 60 t/hm²)施用后,重金属 Cu 和 Zn 在土壤剖面迁移积累特征,及辣椒产量、品质和各器官(根、茎、叶和果实)Cu 和 Zn 含量的变化。结果表明,鸡粪和猪粪施用显著增加了耕层(0—20 cm)土壤 Cu 和 Zn 含量,与对照相比,Cu 含量增幅分别达到 22.60%~66.59%和 36.13%~95.00%,Zn 含量增幅分别达到 10.49%~39.27%和 11.18%~51.94%,猪粪施用后耕层(0—20 cm)土壤 Cu 和 Zn 含量增幅大于鸡粪;鸡粪和猪粪带入的 Cu 和 Zn 主要积累在耕层(0—20 cm)土壤,Cu 和 Zn 含量最高分别为 36.95,137.24 mg/kg,尚未超出国家安全标准。高用量(60 t/hm²)鸡粪和猪粪中的 Cu 和 Zn 存在明显向土壤深层迁移现象,与猪粪处理相比,鸡粪中带入的 Cu 和 Zn 向下迁移的幅度小。鸡粪和猪粪施用显著提高了辣椒果实单果重及产量,在施用量为 30 t/hm² 时达到最大,产量比对照分别增加 24.98%和 29.04%,高用量(60 t/hm²)鸡粪和猪粪显著提高了辣椒 Vc 含量、蛋白质含量和可溶性糖含量,降低了硝酸盐含量,改善了辣椒品质。15 t/hm² 鸡粪和 60 t/hm² 猪粪显著提高了辣椒果实 Cu 含量,但均未超过 20 mg/kg,可以安全食用。鸡粪和猪粪的施用对果实 Zn 含量(16.35~20.87 mg/kg)影响不显著。可以认为,合理施用鸡粪和猪粪有机肥在短期内能够改善土壤性质,提高作物产量和品质,虽然会造成 Cu 和 Zn 在耕层(0—20 cm)土壤的积累,但尚未引起土壤 Cu 和 Zn 污染,也不影响辣椒果实的安全食用,但如果长期施用则有必要进行进一步监测。

关键词: 鸡粪; 猪粪; Cu; Zn; 土壤剖面; 迁移; 产量; 品质

中图分类号: S147.35; X502

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)03-0219-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.03.033

Effects of Continuous Application of Organic Fertilizer on Cu and Zn Accumulation in Soil and the Yield and Quality of Pepper (*Capsicum Annuum* L.)

GUAN Tianxia^{1,2}, LI Caixia¹, MA Guotai^{1,2}, JING Genmao¹,

FEI Cailiang¹, DUAN Yuren¹, LIU Zhifang¹

(1.School of Life Sciences and Engineering, Hexi University, Zhangye, Gansu 734000;

2.Gansu Key Laboratory of Hexi Corridor Resources Utilization, Zhangye, Gansu 734000)

Abstract: Based on the randomized block test with different amount of chicken manure and pig manure application (0, 15, 30, 45 and 60 t/hm²), the characteristics of accumulation and migration of Cu and Zn in soil profile, the changes in yield, quality, and the content of Cu and Zn in different organs of pepper (roots, stems, leaves, and fruits) were studied. The results showed that the content of Cu and Zn was significantly increased in the tillage layer (0—20 cm) after chicken and pig manure application. Compared to CK, the increase of Cu content reached 22.60%~66.59% and 36.13%~95.00% respectively, and the increase of Zn content reached 10.49%~39.27% and 11.18%~51.94% respectively. The increase of soil Cu and Zn content in the tillage layer (0—20 cm) after application of pig manure was greater than that of chicken manure. The content of Cu and Zn in chicken and pig manure were mainly accumulated in the soil tillage layer (0—20 cm). The highest content of Cu and Zn was 36.95 mg/kg and 137.24 mg/kg, which did not exceed the national safety level. The migration of Cu and Zn to deeper soil was significantly after 60 t/hm² chicken and pig manure application. The downward migration of Cu and Zn in chicken manure was smaller than pig manure treatment. The single fruit weight and yield of pepper significantly increased after chicken and pig manure ap-

收稿日期:2019-11-06

资助项目:国家自然科学基金项目(41461075)

第一作者:关天霞(1984—),女,博士,副教授,主要从事土壤环境质量与农产品安全研究。E-mail:guantianxia0405@126.com

plication, and reached the highest at the 30 t/hm² application, the yield increased 24.98% and 29.04% compared to CK. The Vc content, the soluble sugar content, and the soluble protein content significantly increased, but the nitrate content significantly decreased after high amount of chicken and pig manure (60 t/hm²) application. Application of 15 t/hm² chicken manure and 60 t/hm² pig manure significantly increased Cu content in pepper fruits, but the Cu content did not exceed 20 mg/kg, which was a safe level for eating. The application of chicken and pig manure had no significant effect on the content of Zn in the fruits (from 16.35 to 20.87 mg/kg). It can be concluded that rational application of chicken and pig manure can improve soil properties, increase crop yield and quality in a short term. Although chicken and pig manure application can cause the accumulation of Cu and Zn in the tillage layer (0–20 cm), it has not caused soil pollution of Cu and Zn, and affect the safety of pepper fruits, while further monitoring is necessary if long-term application.

Keywords: chicken manure; pig manure; Cu; Zn; soil profile; migration; yield; quality

集约化养殖场的快速发展导致了畜禽粪便的大量产生,2016 年我国畜禽粪便排放量达到 6.5 亿 t^[1],将富含大量有机质和氮、磷等营养元素的畜禽粪便经堆肥处理后施用于农田土壤中,能够改善土壤结构,提高土壤肥力,增加作物产量和改良作物品质^[2-4]。但在畜禽养殖业中,一些微量元素如 Cu、Zn 等被广泛应用于饲料添加剂中,用来促进畜禽生长和提高禽蛋产量,由于其生物利用率低,畜禽饲料中的重金属元素大部分被排出体外,使得畜禽粪便中大量积累。Wang 等^[4]对江苏省 80 个猪饲料和 65 个鸡饲料样品,以及 80 个猪粪和 65 个鸡粪样品做了调查,结果发现,猪饲料和鸡饲料样品中,Cu 含量分别为 0~392.1,3.8~198.7 mg/kg,Zn 含量分别为 15.9~2041.8,5.6~296.3 mg/kg;猪粪和鸡粪样品中,Cu 含量分别达到 8.4~1 711.7,17.9~1 726.3 mg/kg,Zn 含量分别为 39.5~11 378.9,73.0~1 827.3 mg/kg;赵睿等^[5]对已发表的 30 篇文献中 8 种重金属的数据(超过 2 000 个猪粪样品和 1 700 个土壤样品)分析发现,猪粪中 Cu 浓度多分布在 300~750 mg/kg,超标最严重,超标率达到 100%,Zn 次之,超标率为 84%,且多集中在较低的超标浓度;农田土壤中 Cu 和 Zn 的超标率分别为 10.26%和2.94%,累积不多,但是多来自猪粪。有研究^[6-8]发现,长期施用鸡粪和猪粪会导致土壤的重金属含量有不同程度的积累,Xu 等^[9]对沈阳生态试验站 2002—2011 年间施用猪粪后,土壤表层 Cu 和 Zn 积累进行了研究,Cu 和 Zn 含量分别从 118.67,183.42 mg/kg 增加到 558.08,742.33 mg/kg。菜地中重金属含量以 Zn 最高,其次为 Cu^[10]。长期施用畜禽粪便有机肥后,Cu、Zn、Hg 和 As 等重金属主要聚集在土壤表层^[11],但也有研究^[12]发现,施用有机肥后设施菜地和露天菜地土壤 Zn 含量分别在 40—60,60—80 cm 土层出现峰值。何梦媛等^[13]的研究则发现,施用 60 t/hm²猪粪和鸡粪会使 Cu 和 Zn 向深层土壤迁移。

我国蔬菜中重金属超标与有机肥料盲目施用有

很大关系,畜禽粪便中重金属可以在表层土壤积累,并且一部分可以通过植物根系,进入植物体内,造成植物体内重金属的积累,最终通过食物链传递,给动物和人体带来健康风险。许浩等^[14]研究表明,施用猪粪和鸡粪有机肥显著增加了土壤有效态 Cu 和 Zn 含量,这有可能造成 Cu 和 Zn 从土壤向植物体内的转移量增加;刘全东^[8]研究表明,施用有机肥会显著增加芹菜食用部分 Cu 和 Zn 的含量;殷山红等^[15]研究发现,连续施用猪粪有机肥后,Cu 在土壤、青菜和空心菜中均有明显积累趋势。

辣椒(*Capsicum annuum* L.)是一种重要的蔬菜和调味品,在甘肃省广泛种植,目前甘肃省蔬菜种植面积约 59.6 万 hm²,其中辣椒种植面积为 2.67~3.33 万 hm²,陇椒系列种植面积约 2 万 hm²,且主要种植地在张掖^[16]。本研究以田间小区试验为基础,研究了施用不同用量鸡粪和猪粪有机肥对辣椒产量和品质及土壤和辣椒各器官重金属 Cu 和 Zn 的积累,以期为指导辣椒菜田土壤合理施肥,保障农产品质量和控制土壤重金属污染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

辣椒,品种为“陇椒 3 号”;供试土壤试验地设于张掖市甘州区三闸镇三闸村,位于黑河附近(38°60′02″N,100°24′36″E),海拔 1 454 m,土壤由黑河沉积物受地下水运动和耕作活动影响而形成,为盐碱潮土土壤,pH 为 8.78,有机质含量为 14.88 g/kg,碱解氮含量为 14.19 mg/kg,速效磷含量为 18.20 mg/kg,速效钾含量为 30.51 mg/kg,全 Cu 含量为 19.04 mg/kg,全 Zn 含量为 95.68 mg/kg。供试鸡粪购买自当地养殖场,经二次翻堆通风发酵后,其理化性质为:pH 为 7.45,有机质含量为 128.20 g/kg,全 N 含量为 8.04 g/kg,全 P 含量为 18.58 g/kg,全 K 含量为 11.09 g/kg,全 Cu 含量为 164.17 mg/kg,全 Zn 含量为 320.26 mg/kg;供试猪粪购买自当地养殖场,经二次翻堆通风发酵

后,其理化性质为:pH 为 7.32,有机质含量为 145.16 g/kg,全 N 含量为 12.52 g/kg,全 P 含量为 9.55 g/kg,全 K 含量 22.23 g/kg,全 Cu 含量为 190.52 mg/kg,全 Zn 含量为 472.66 mg/kg。

1.2 试验设计

试验采用田间随机区组试验设计,包括鸡粪和猪粪 2 种有机肥,每种有机肥设 5 个施用量,分别为 0 (作为对照),15,30,45,60 t/hm²。每个处理重复 4 次,小区面积为 4.56 m² (1.2 m×3.8 m),小区用田埂隔开。每个小区化肥常规施肥量为 N 150 kg/hm²,P₂O₅ 90 kg/hm²,K₂O 75 kg/hm²。辣椒播种密度为 40 cm×45 cm,小区播种 24 株,辣椒生长期根据土壤墒情适时灌水、锄草等管理。本试验从 2015 年开始,每年均按照相同方案进行施肥处理。

1.3 样品采集

在辣椒盛果期(2018 年 8 月 2 日)用“S”形采样法采集耕层(0—20 cm)和 20—40 cm 土层土样,风干,过 1 mm 筛后保存待测定土壤 pH,过 0.25 mm 筛后保存待测定土壤有机质含量和重金属 Cu 和 Zn 含量。采集辣椒根、茎、叶和果实,用自来水冲洗附着的土壤,去离子水冲洗 3 遍,烘箱中 105 ℃ 杀青 2 h,然后在 70 ℃ 下烘干至恒重,称重 2 g(精确到 0.000 1 g),研磨过 0.25 mm 筛,装入无色聚乙烯样品袋备用,并做好标签,贮存在干燥器中用于重金属 Cu 和 Zn 含量的测定。同时保留部分果实鲜样用于产量和品质指标的测定。

1.4 测定项目及方法

土壤 pH 用酸度计法测定(水土比 2.5 : 1);有

机质含量采用重铬酸钾法;土壤重金属 Cu 和 Zn 含量的测定采用 HCl—HNO₃—HF—HClO₄ 消解^[17-18],每批样品均加入相应土壤标样(NST-2)做质量控制。辣椒各器官 Cu 和 Zn 含量的测定采用干灰化法,火焰原子吸收分光光度计法^[19-20];蛋白质含量采用考马斯亮蓝 G-250 法测定^[21];可溶性糖含量采用苯酚法测定^[21];维生素 C 含量采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法测定^[21];硝酸盐含量采用紫外吸收法测定^[22]。

1.5 数据处理

所有试验数据均采用 Microsoft Excel 2016 进行计算,所得结果为 4 个重复的平均值和标准差。不同处理间参数的差异显著性通过 SPSS 21.0,采用 SSR 法(Duncan 检验)进行统计分析,在 $P<0.05$ 条件下认为存在显著性差异,用 Origin 8.0 软件进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 有机肥施用对土壤 pH 和有机质含量的影响

图 1 为施用鸡粪和猪粪有机肥后土壤剖面 pH 的变化,可以看出,中高用量(30,45,60 t/hm²)鸡粪和猪粪施用显著降低了耕层(0—20 cm)土壤 pH($P<0.05$),与对照相比,鸡粪各处理耕层(0—20 cm)土壤 pH 分别降低 0.44,0.51,0.54 个单位,而猪粪各处理则分别降低 0.23,0.52,0.75 个单位。猪粪的施用对耕层(0—20 cm)土壤 pH 降低幅度相比鸡粪更加明显。中高用量(30,45,60 t/hm²)鸡粪施用可以显著降低 20—40 cm 土层土壤 pH($P<0.05$),而猪粪施用对 20—40 cm 土层土壤 pH 影响不明显。

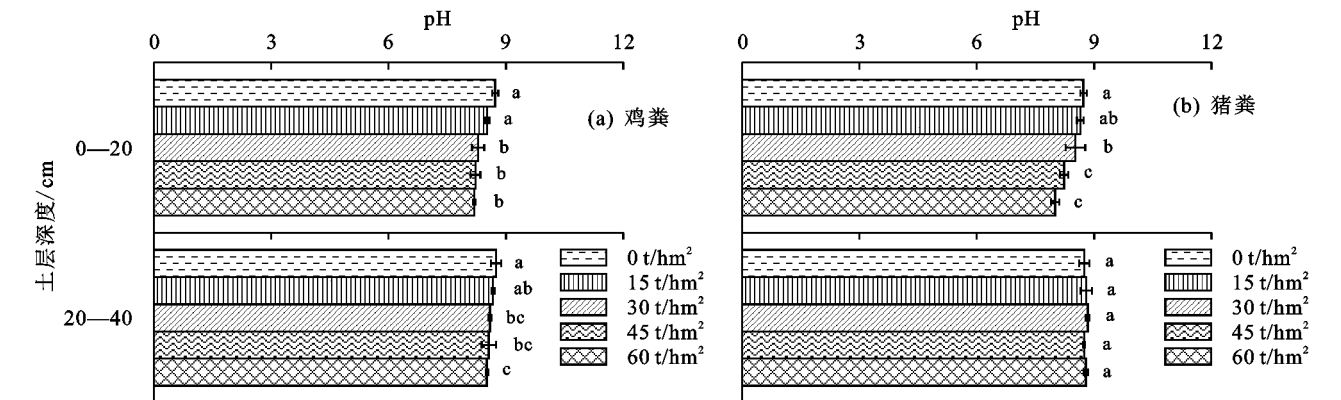


图 1 有机肥施用后土壤剖面 pH 的变化

图 2 为施用鸡粪和猪粪有机肥后土壤剖面有机质含量的变化,可以看出,施用鸡粪和猪粪显著增加了耕层(0—20 cm)土壤有机质含量($P<0.05$),与对照相比,施用鸡粪后各处理耕层(0—20 cm)土壤有机质含量分别增加 9.89%,31.98%,50.82%,57.95%,而猪粪施用的处理增加幅度达到 20.40%~65.57%。猪粪的施用对耕层(0—20 cm)土壤有机质含量增加幅

度相比鸡粪更加明显。鸡粪和猪粪的施用对 20—40 cm 土层有机质含量影响不明显。

2.2 有机肥施用对土壤剖面 Cu 和 Zn 含量的影响

土壤中重金属的总量可以提供其富集程度的信息。图 3 为施用鸡粪和猪粪有机肥后土壤剖面 Cu 含量的变化情况。从图 3(a)和图 3(b)可以看出,施用鸡粪和猪粪后,耕层(0—20 cm)土壤 Cu 含量均显

著增加($P<0.05$),低用量(15 t/hm^2)鸡粪和猪粪处理可以显著提高耕层($0\text{--}20\text{ cm}$)土壤 Cu 含量($P<0.05$),与对照相比,鸡粪施用后耕层($0\text{--}20\text{ cm}$)土壤 Cu 含量增幅为 $22.60\%\sim66.59\%$,而施用猪粪后耕层($0\text{--}20\text{ cm}$)土壤 Cu 含量的增幅达到 $36.13\%\sim95.00\%$;中高用量($30,45,60\text{ t/hm}^2$)鸡粪施用后耕层($0\text{--}20\text{ cm}$)土壤 Cu 含量差异不显著,而猪粪施用的处理差异显著($P<0.05$);在相同施用量条件下,猪粪施用后的耕层($0\text{--}20\text{ cm}$)土壤 Cu 含量高于鸡粪的处理。鸡粪和猪粪施用

均可以在一定程度上提高 $20\text{--}40\text{ cm}$ 土层 Cu 含量,鸡粪施用后, $20\text{--}40\text{ cm}$ 土层 Cu 含量增幅为 $13.80\%\sim23.69\%$,在施用量为 45 t/hm^2 时达到最大,而猪粪施用后的 Cu 含量增幅达到 $18.03\%\sim26.99\%$,在施用量为 30 t/hm^2 时达到最大。无论施用鸡粪还是施用猪粪,无论施用量的高低,耕层($0\text{--}20\text{ cm}$)土壤 Cu 含量明显高于 $20\text{--}40\text{ cm}$ 土层,说明鸡粪和猪粪中的 Cu 主要积累在土壤耕层($0\text{--}20\text{ cm}$),但也会迁移到 $20\text{--}40\text{ cm}$ 土层,鸡粪中 Cu 迁移的幅度相对较小。

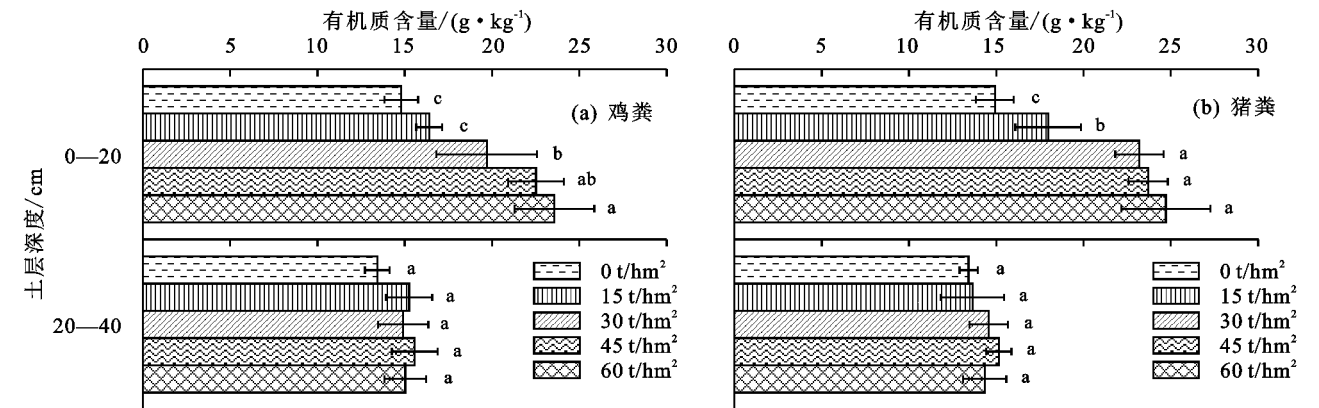


图 2 有机肥施用后土壤剖面有机质含量的变化

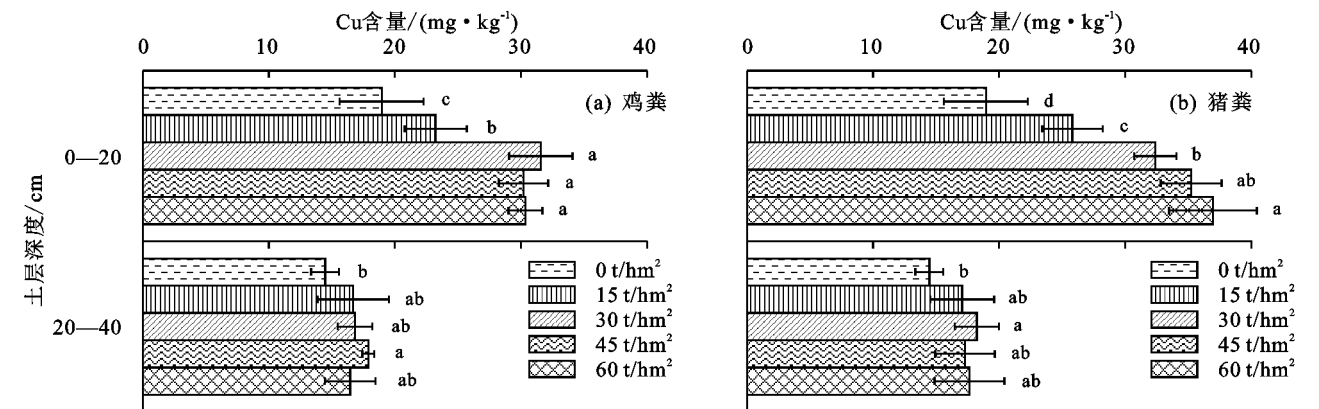


图 3 有机肥施用后土壤剖面 Cu 含量的变化

图 4 为施用鸡粪和猪粪有机肥后土壤剖面 Zn 含量的变化情况。从图 4(a)和图 4(b)可以看出,施用鸡粪和猪粪后耕层($0\text{--}20\text{ cm}$)土壤 Zn 含量均显著增加($P<0.05$),而且随着施用量的增加而呈现逐渐增加趋势($P<0.05$),与对照相比,鸡粪施用后耕层($0\text{--}20\text{ cm}$)土壤 Zn 含量增幅为 $10.49\%\sim39.27\%$,而施用猪粪后耕层($0\text{--}20\text{ cm}$)土壤 Zn 含量增幅达到 $11.18\%\sim51.94\%$;中高用量($30,45,60\text{ t/hm}^2$)鸡粪和猪粪施用后耕层($0\text{--}20\text{ cm}$)土壤 Zn 含量差异均显著($P<0.05$);在相同施用量条件下,猪粪施用后耕层($0\text{--}20\text{ cm}$)土壤 Zn 含量高于鸡粪的处理。高用量(60 t/hm^2)鸡粪和猪粪施用显著提高 $20\sim40\text{ cm}$ 土层 Zn 含量($P<0.05$),比对照分别增加 6.97% 和 9.05% 。无论施用鸡粪还是施用猪粪,无论施用量的高低,耕层($0\text{--}20\text{ cm}$)土壤 Zn 含量明显高于 $20\text{--}40\text{ cm}$ 土层,

说明鸡粪和猪粪中的 Zn 主要积累在耕层($0\text{--}20\text{ cm}$)土壤,但也会迁移到 $20\text{--}40\text{ cm}$ 土层,鸡粪中 Zn 迁移的幅度相对较小。

2.3 有机肥施用对辣椒产量及品质的影响

由表 1 可以看出,鸡粪和猪粪的施用在一定程度上增加了辣椒单果重和辣椒产量,辣椒单果重随着鸡粪和猪粪施用量的增加呈现先增加后降低的趋势,在施肥量为 30 t/hm^2 时达到最大($P<0.05$),鸡粪和猪粪施用后辣椒单果重分别达 $15.44,16.03\text{ g}$,分别比对照(13.06 g)增加 18.22% 和 22.68% 。中高用量($30,45,60\text{ t/hm}^2$)鸡粪和猪粪施用显著提高了辣椒产量($P<0.05$),与对照(9.26 t/hm^2)相比,增幅分别为 $23.94\%\sim24.98\%$ 和 $27.51\%\sim29.04\%$,各有机肥处理之间差异不显著。将相同施用量的鸡粪和猪粪相比较,猪粪对辣椒单果重和产量的提高作用更加显著。

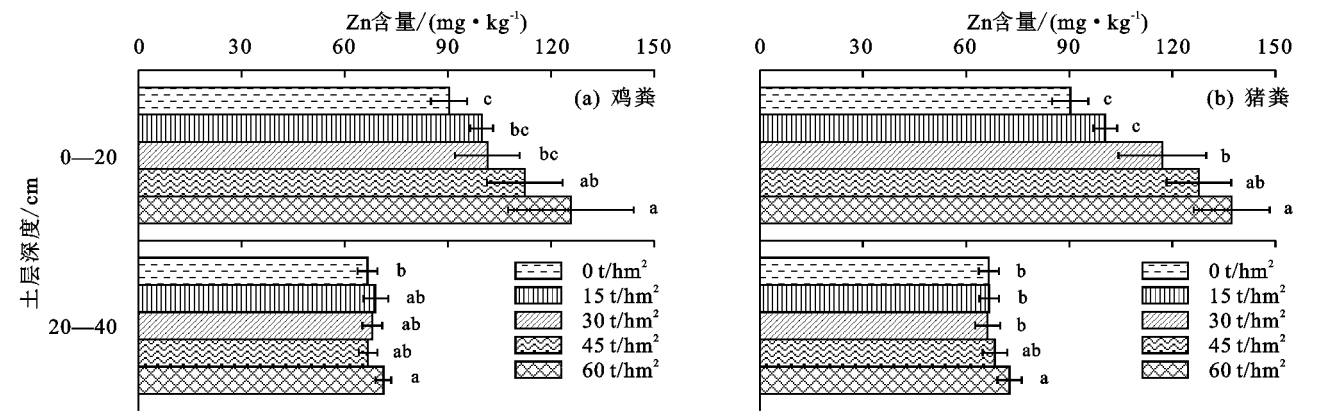


图 4 有机肥施用后土壤剖面 Zn 含量的变化

表 1 有机肥施用后辣椒产量及品质的变化

有机肥 类型	施用量/ (t·hm ⁻²)	单果重/ g	产量/ (t·hm ⁻²)	Vc 含量/ (mg·100g ⁻¹)	蛋白质含量/ (mg·g ⁻¹)	可溶性糖 含量/%	硝酸盐含量/ (mg·kg ⁻¹)
鸡粪	0(对照)	13.06±0.71b	9.26±0.58b	95.67±3.99b	44.30±2.32b	2.58±0.30b	196.3±7.23a
	15	14.63±1.15ab	10.29±1.09ab	102.7±8.08ab	47.46±2.24ab	2.85±0.13ab	186.7±15.2a
	30	15.44±1.80a	11.58±1.13a	106.8±8.73ab	49.21±2.53a	3.21±0.20a	173.7±29.0ab
	45	15.01±0.99a	11.48±0.61a	106.4±12.4ab	51.62±3.44a	2.93±0.47ab	152.1±11.1bc
	60	15.31±0.79a	11.52±0.80a	110.6±4.15a	51.14±2.67a	2.69±0.44ab	138.0±6.51c
猪粪	0(对照)	13.06±0.71b	9.26±0.58b	95.67±3.99b	44.30±2.32b	2.58±0.30b	196.3±7.23a
	15	15.13±2.11ab	11.10±1.23ab	104.7±4.65ab	50.99±6.35ab	3.19±0.45ab	189.3±19.0ab
	30	16.03±1.74a	11.81±1.48a	108.7±6.83a	50.35±2.54ab	3.99±0.45a	186.2±22.8ab
	45	15.95±1.98ab	11.95±1.52a	111.0±10.3a	52.29±4.79a	3.70±0.55a	169.6±24.1ab
	60	15.75±1.96ab	11.87±1.33a	108.8±4.79a	54.22±5.99a	3.11±0.85ab	158.9±17.1b

注:表中数据为平均值±标准差;同一类型有机肥同列数据后小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

中高用量(30,45,60 t/hm²)鸡粪和猪粪可以显著增加辣椒 Vc 含量和蛋白质含量($P<0.05$)。与对照相比,鸡粪和猪粪对 Vc 含量的增幅为 7.39%~16.05%,2 种有机肥处理相差不大。鸡粪处理与对照相比,蛋白质含量增加 7.14%~16.53%,而猪粪处理增幅达到 13.67%~22.48%,增加幅度更加明显。辣椒可溶性糖含量随着鸡粪和猪粪施用量的增加均呈现先增加后降低的趋势,在施肥量为 30 t/hm²时达到最大($P<0.05$),鸡粪和猪粪施用的处理分别比对照增加 24.42%和 54.75%,在相同施用量条件下,猪粪施用的处理蛋白质含量高于鸡粪。60 t/hm²鸡粪和猪粪施用显著降低了辣椒硝酸盐含量($P<0.05$),分别比对照降低 29.68%和 19.07%,在相同施肥量条件下,鸡粪比猪粪处理更能降低硝酸盐含量。

2.4 有机肥施用对辣椒各器官(根、茎、叶和果实)Cu 和 Zn 含量的影响

图 5 为施用鸡粪和猪粪有机肥后辣椒各器官(根、茎、叶和果实)Cu 和 Zn 含量的变化。鸡粪和猪粪施用对根、茎和叶中 Cu 和 Zn 含量无显著影响。15 t/hm²鸡粪用量可以显著提高辣椒果实 Cu 含量,比对照提高 9.34%。当猪粪用量达到 60 t/hm²时,辣椒果实 Cu 含量比对照增加 23.55%,其余用量无显著影响。当施肥量

为 45,60 t/hm²时,猪粪施用后辣椒果实 Cu 含量显著高于鸡粪施用。鸡粪和猪粪施用对辣椒果实 Zn 含量影响不显著,果实 Zn 含量变化范围为 16.35~20.87 mg/kg。将辣椒各器官中 Cu 和 Zn 含量的大小进行比较,Cu 在各器官中的分布顺序为:茎、叶>根>果实,而 Zn 在各器官中的分布顺序为:根>叶>茎>果实。

3 讨论

本研究中,鸡粪和猪粪施用显著增加了耕层(0—20 cm)土壤 Cu 和 Zn 的含量,与对照相比,Cu 含量增幅分别达到 22.60%~66.59%和 36.13%~95.00%,Zn 含量增幅分别达到 10.49%~39.27%和 11.18%~51.94%,猪粪施用后耕层(0—20 cm)土壤 Cu 和 Zn 含量增幅均大于鸡粪,这主要与本试验中猪粪中 Cu 和 Zn 含量均高于鸡粪有关。土壤 Cu 含量的增幅也明显高于 Zn 含量,这可能因为鸡粪和猪粪中的 Cu 含量高出土壤 7.62~9.01 倍,而 Zn 含量仅高出土壤 2.35~3.94 倍。鸡粪和猪粪带入土壤中的 Cu 和 Zn 主要积累在耕层(0—20 cm)土壤,Cu 和 Zn 含量最高分别达 36.95,137.24 mg/kg,尚未超出国家安全标准《土壤环境质量标准农用地土壤污染风险管控标准》(GB15618—2018),土壤 pH>7.5 时,Cu≤100 mg/kg,Zn≤300 mg/kg^[17],高用量(60 t/hm²)鸡粪

和猪粪施用后,土壤中 Cu 和 Zn 可以向下迁移,已有研究^[12-13]表明,有机肥中的 Cu 和 Zn 有从土壤表层向土壤深层迁移的能力,这可能与本研究中鸡粪和猪粪施用后土壤 pH 的降低和有机质含量的增加有关。当土壤 pH 较低时,土壤胶体所带负电荷减少, H^+ 的竞争作用增强,重金属吸附作用较弱,从而增强了重金属的迁移能力^[23]。有机质含量的增加可以增加 Cu 和 Zn 的结合位点,使土壤中 Cu 和 Zn 形态从较易溶解的形态转化为更为稳定的形态^[24],但

是高量有机肥中大量的可溶性有机配合体与 Cu 和 Zn 离子结合后其迁移能力增强^[25]。与猪粪处理相比,鸡粪中带入的 Cu 和 Zn 向下迁移的幅度小,这可能与猪粪对耕层(0—20 cm)土壤 pH 的降低幅度和有机质含量的增加幅度比鸡粪更加明显有关,也可能与本试验中猪粪本身 Cu 和 Zn 含量明显高于鸡粪有关。鸡粪和猪粪中 Zn 迁移的幅度明显高于 Cu,这可能是由于鸡粪和猪粪中的 Zn 含量远高于 Cu 含量。

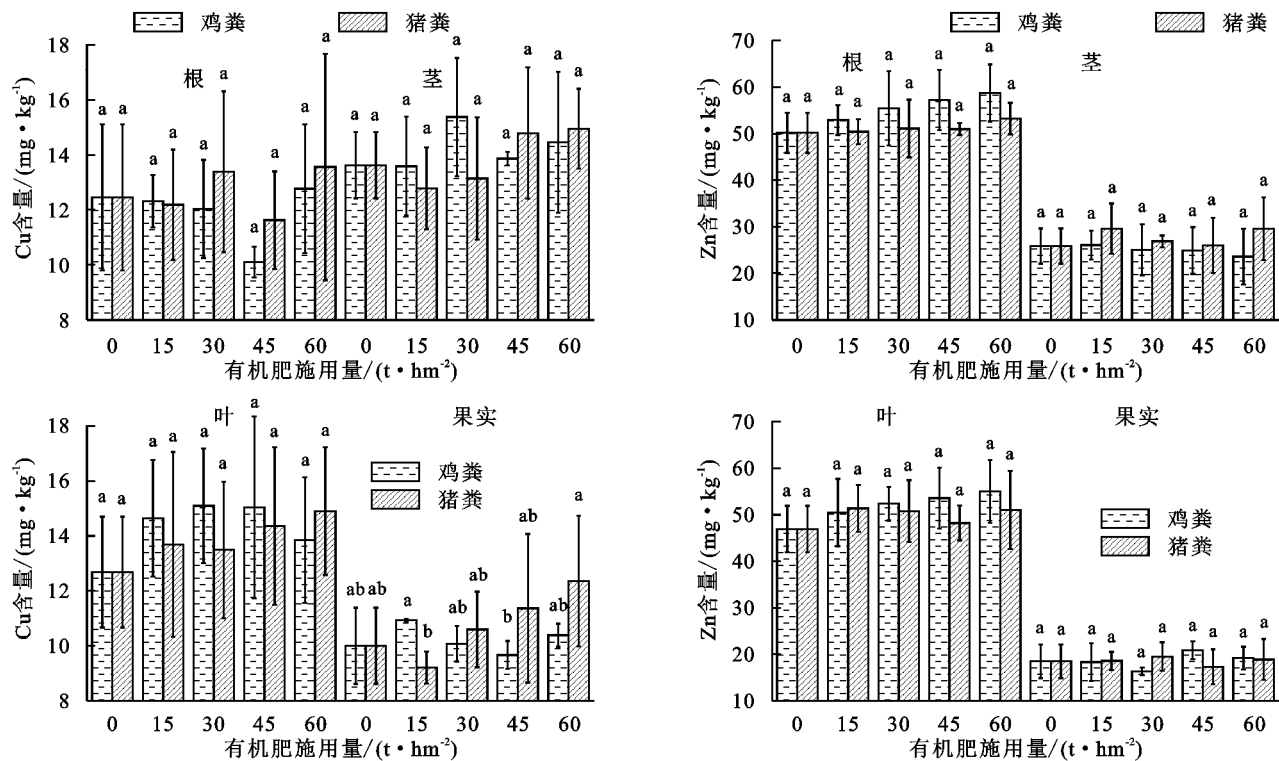


图 5 有机肥施用后辣椒各器官 Cu 和 Zn 含量的变化

本研究发现,施用鸡粪和猪粪有机肥后辣椒果实产量有所提高,施用量为 30 t/hm²时辣椒产量比对照分别增加 24.98%(鸡粪)和 29.04%(猪粪),猪粪对辣椒果实产量的增加幅度更为明显,这可能是因为相同鸡粪和猪粪施用量条件下,猪粪中含有较高的氮和钾。高用量(60 t/hm²)鸡粪和猪粪显著提高了辣椒 Vc 含量、蛋白质含量和可溶性糖含量,降低了硝酸盐含量,改善了辣椒的品质,这与前人^[26]研究结果相似。15 t/hm²鸡粪和 60 t/hm²猪粪显著提高了辣椒果实 Cu 含量,当可食部分 Cu 含量超过 20 mg/kg 时,会影响农产品品质,对人体健康带来潜在风险^[25]。本研究中,鸡粪和猪粪施用后,辣椒果实 Cu 含量均未超过 20 mg/kg,果实 Zn 含量变化为 16.35~20.87 mg/kg,均未超过 100 mg/kg,可以安全食用^[27]。辣椒各器官中果实 Cu 和 Zn 积累最少,说明根部对 Cu 和 Zn 具有一定的截留作用,当 Cu 和 Zn 上升至木质部时,可以与木质部汁液中的有机化合物结合形成较为稳定的络合物,从而减少 Cu 和 Zn 向

果实的转移^[25],因此,Cu 和 Zn 在果实中的积累量很低。可以认为,虽然鸡粪和猪粪的施用导致了耕层(0—20 cm)土壤 Cu 和 Zn 的积累,但对辣椒各器官影响较小,这可能是因为有机肥的施用增加了辣椒整株生物量,从而辣椒 Cu 和 Zn 含量并没有明显增加。

4 结论

(1)本试验条件下,鸡粪和猪粪施用均能显著降低耕层(0—20 cm)土壤 pH,提高耕层(0—20 cm)土壤有机质含量;中高用量(30,45,60 t/hm²)鸡粪施用可以显著降低 20—40 cm 土层土壤 pH,猪粪施用却无明显影响,鸡粪和猪粪施用对 20—40 cm 土层有机质含量无显著影响。

(2)鸡粪和猪粪施用均能显著增加耕层(0—20 cm)土壤 Cu 和 Zn 含量,且猪粪施用后耕层(0—20 cm)土壤 Cu 和 Zn 含量增幅均大于鸡粪;鸡粪和猪粪带入土壤中的 Cu 和 Zn 主要积累在耕层(0—20 cm)土壤,高用量(60 t/hm²)鸡粪和猪粪中的 Cu 和 Zn

也会向下迁移,与猪粪处理相比,鸡粪中带入的 Cu 和 Zn 向下迁移的幅度小。

(3)施用鸡粪和猪粪显著提高了辣椒果实单果重及其产量,高用量(60 t/hm²)鸡粪和猪粪显著提高了辣椒 Vc 含量、蛋白质含量和可溶性糖含量,降低了硝酸盐含量,改善了作物品质。

(4)15 t/hm²鸡粪和 60 t/hm²猪粪显著提高了辣椒果实 Cu 含量,但均未超过 20 mg/kg,可以安全食用。辣椒果实 Zn 含量变化为 16.35~20.87 mg/kg,鸡粪和猪粪的施用对果实 Zn 含量影响不显著。

参考文献:

[1] 冯小亮,刘秀秀,吕动博.农业发展中的有机肥利用现状及问题[J].农业与技术,2017,37(22):2-3,11.

[2] 何浩,张宇彤,危常州,等.不同有机替代减肥方式对玉米生长及土壤肥力的影响[J].水土保持学报,2019,33(5):281-287.

[3] Baiyeri P K, Otitoju G T, Abu N E, et al. Poultry manure influenced growth, yield and nutritional quality of containerized aromatic pepper (*Capsicum annuum* L., var *Nsukka Yellow*)[J].African Journal of Agricultural Research,2016,11(23):2013-2023.

[4] Wang H, Dong Y H, Yang Y Y, et al. Changes in heavy metal contents in animal feeds and manures in an intensive animal production region of China[J].Journal of Environmental Sciences,2013,25(12):2435-2442.

[5] 赵睿,吴智书,罗阳,等.猪粪与农田土壤中重金属累积污染的相关分析[J].土壤,2017,49(4):753-759.

[6] Achiba W B, Lakhdar A, Gabteni N, et al. Accumulation and fractionation of trace metals in a Tunisian calcareous soil amended with farmyard manure and municipal solid waste compost[J].Journal of Hazardous Materials,2010,176:99-108.

[7] Xu F L, Zhu J, Zhang B S, et al. Sorption and immobilization of Cu and Pb in a red soil (Ultisol) after different long-term fertilizations [J].Environmental Science and Pollution Research,2019,26:1716-1722.

[8] 刘全东.有机肥源重金属 Cu、Zn 元素在土壤—蔬菜体系中累积转移的研究[D].桂林:广西大学,2014.

[9] Xu Y, Yu W, Ma Q, et al. Accumulation of copper and zinc in soil and plant within ten-year application of different pig manure rates [J]. Plant Soil Environment, 2013,59(11):492-499.

[10] 茹淑华,徐万强,杨军芳,等.河北省典型蔬菜产区土壤养分和重金属积累特征及相关性研究[J].食品安全质量检测学报,2017,25(8):1407-1411.

[11] 叶必雄,刘圆,虞江萍,等.施用不同禽畜粪便土壤剖面

中重金属分布特征[J].地理科学进展,2012,31(12):1708-1714.

[12] 潘霞,陈励科,卜元卿,等.禽畜有机肥对典型蔬果地土壤剖面重金属与抗生素分布的影响[J].生态与农村环境学报,2012,28(5):518-525.

[13] 何梦媛,董同喜,茹淑华,等.禽畜粪便有机肥中重金属在土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异[J].环境科学,2017,38(4):1576-1586.

[14] 许浩,韩丽媛,茹淑华,等.不同有机肥中 Cu、Zn 在农田土壤中的有效性与形态归趋[J].植物营养与肥料学报,2016,22(4):998-1009.

[15] 殷山红,姚春霞,张菊,等.不同有机肥处理对铜元素在土壤—蔬菜系统的累积及土壤形态分配的影响[J].土壤通报,2019,50(1):183-190.

[16] 王兰兰.甘肃省辣椒生产与科研现状及发展对策[J].辣椒杂志,2015,13(4):1-3.

[17] 生态环境部国家市场监督管理总局.GB 15168—2018 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准[S],北京:中国标准出版社,2018:1-4.

[18] 国家环境保护局.GB/T 17138—1997 土壤质量铜、锌的测定 火焰原子吸收分光光度法[S],北京:中国标准出版社,1998:1-4.

[19] 国家食品药品监督管理总局.GB 5009.13—2017 食品中铜的测定[S],北京:中国标准出版社,2017:3-5.

[20] 国家食品药品监督管理总局.GB 5009.14—2017 食品中锌的测定[S],北京:中国标准出版社,2017:1-3.

[21] 李小芳,张志良.植物生理学实验指导[M].5 版.北京:高等教育出版社,2016:92,114,246.

[22] 赵杰.紫外可见分光光度法测定白菜中硝酸盐含量[J].安徽农业科学,2014,42(27):9553-9554.

[23] Schwab A P, Zhu D S, Banks M K. Influence of organic acids on the transport of heavy metals in soil[J].Chemosphere,2008,72(6):986-994.

[24] Businelli D, Massaccesi L, Said-Pullicino D, et al. Long-term distribution, mobility and plant availability of compost-derived heavy metals in a landfill covering soil[J].Science of the Total Environment,2009,407:1426-1435.

[25] Guan T X, He H B, Zhang X D, et al. Cu fractions, mobility and bioavailability in soil-wheat system after Cu-enriched livestock manure applications[J].Chemosphere,2011,82:215-222.

[26] 要晓玮,梁银丽,曾睿,等.不同有机肥对辣椒品质和产量的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2011,39(10):157-162.

[27] Lipoth S L, Schoenau J J. Copper, zinc, and cadmium accumulation in two prairie soils and crops as influenced by repeated applications of manure[J].Journal of Plant Nutrition and Soil Science,2007,170:378-386.