

唐明灯, 王艳红, 余丹妮, 等. 同源猪场废弃物对土壤-生菜系统铜锌迁移的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(9): 2111–2120.

TANG Ming-deng, WANG Yan-hong, YU Dan-ni, et al. Effects of different castoffs from the same pig farm on the Cu-Zn transport in the lettuce-soil system [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(9): 2111–2120.

同源猪场废弃物对土壤-生菜系统铜锌迁移的影响

唐明灯, 王艳红, 余丹妮, 李盟军, 李义纯, 李林峰, 艾绍英*

(广东省农业科学院农业资源与环境研究所, 广东省养分资源循环利用与耕地保育重点实验室, 农业部南方植物营养与肥料重点实验室, 广东省农业面源污染监测评估与防控工程技术研究中心, 广州 510640)

摘要: 猪场废弃物 Cu、Zn 含量高, 为了比较同源猪场废弃物(沼液、猪粪、沼渣)对土壤-生菜系统 Cu、Zn 迁移的影响, 从广东省博罗县某规模化养猪场同时采集了猪粪、沼液与沼渣 3 种猪场废弃物, 在 Cu 风险土壤中添加不同用量猪场废弃物(按每千克土壤 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 g 总氮水平计算), 通过连续 2 茬生菜的盆栽试验来研究同源猪场废弃物对生菜可食部分 Cu、Zn 含量和土壤有效态 Cu、Zn 含量的影响。结果表明: 生菜生物量受猪场废弃物种类及其处理水平 2 种因素的显著影响。生菜可食部分 Cu、Zn 含量范围分别为 0.46~2.08、0.70~14.4 mg·kg⁻¹。生菜可食部分 Cu、Zn 含量受猪场废弃物种类及其处理水平的显著影响, 影响大小顺序为废弃物种类>废弃物处理水平; 猪场废弃物提高第 1 茬生菜可食部分 Cu 含量, 但降低第 2 茬生菜可食部分 Cu 含量和第 1、2 茬生菜可食部分 Zn 含量。废弃物种类对 Cu 影响大小顺序为猪粪>沼渣>沼液, 对 Zn 影响大小顺序为猪粪>沼液>沼渣。猪场废弃物种类及其处理水平(两者中前者的影响大于后者)显著影响 DTPA-Cu 或 DTPA-Zn 含量, 废弃物种类的影响大小顺序为沼渣>猪粪>沼液。本文供试土壤具有一定的消纳富 Cu 猪场废弃物的能力, 富 Cu 猪场废弃物也适合施用到缺 Cu 土壤上。

关键词: 土壤; 铜; 锌; 生菜; 猪粪; 沼渣; 沼液

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)09-2111-10 doi:10.11654/jaes.2018-1206

Effects of different castoffs from the same pig farm on the Cu-Zn transport in the lettuce-soil system

TANG Ming-deng, WANG Yan-hong, YU Dan-ni, LI Meng-jun, LI Yi-chun, LI Lin-feng, AI Shao-ying*

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangdong Key Laboratory of Nutrient Cycling and Farmland Conservation, Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer in South Region, Ministry of Agriculture, Guangdong Engineering Research Center for Monitoring and Prevention of Agricultural Non-point Source Pollution, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A pot experiment with two successive crops was conducted to investigate the effects of 3 kinds of castoffs (pig manure, biogas slurry, and biogas residue) from a large scale pig farm in Boluo county, Guangdong Province, south China, on the copper and zinc transport in the lettuce-soil system considering the high copper and zinc concentration in pig farm castoffs. According to application total nitrogen rates of 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, and 0.6 g·kg⁻¹ soil, 4 kg soil in a plastic pot was treated with 20, 40, 60, 80, 100, and 120 g of air-dried pig manure; 12, 24, 36, 48, 60, and 72 g of air-dried biogas residue; or 740, 1480, 2220, 2960, 3700, and 4440 mL of biogas slurry, respectively. All of the pig manure and biogas residue, and 40% of the biogas slurry were used as basal fertilizer, whereas 60% of the biogas slurry was top dressed. The results showed that the kinds and dosages of castoffs significantly affected the shoot biomass of lettuce with the shoot

收稿日期: 2018-09-21 录用日期: 2019-04-23

作者简介: 唐明灯(1968—), 男, 湖南武冈人, 副研究员, 主要从事土壤重金属污染及其调控研究。E-mail: njautmd@163.com

*通信作者: 艾绍英 E-mail: shaoyingai@21cn.com

基金项目: 广州市科技计划项目(2014Y2-00521); 广东省省属科研机构改革创新领域项目(2016B070701009); 广东省应用型科技研发专项资金项目(2016B020240009); 广东省农业技术研发项目(2018LM2157); 世界银行贷款、全球环境基金赠款广东农业面源污染治理项目(GDA-PC-CS1404)

Project supported: The Science and Technology Program of Guangzhou City (2014Y2-0052); The Reformation and Innovation Program to Provincial Research Institutions of Guangdong Province (2016B070701009); Special-funds Project for Applied Science and Technology of Guangdong Province (2016020240009); The Research and Development Program for Agricultural Technology of Guangdong Province (2018LM2157); The Guangdong Agricultural Pollution Control Project Financing from the World Bank Loan and Global Environment Fund Contribution (GDAPC-CS1404)

biomass of the 1st lettuce crop significantly greater than that of the 2nd lettuce crop. Cu and Zn concentrations in lettuce shoots ranged from 0.46~2.08 mg·kg⁻¹ and 0.70~14.4 mg·kg⁻¹, respectively. The kinds and dosages of castoffs affected significantly the Cu or Zn concentration in lettuce shoots where impact order was: kinds of castoffs > dosages of castoffs. Cu concentration in the 1st crop lettuce shoots was significantly higher than that in the 2nd crop lettuce shoots, whereas Zn concentration in the 1st crop was significantly lower than that in the 2nd crop. Castoffs increased the Cu concentration in the 1st crop lettuce shoots, but decreased the Cu concentrations in the 2nd crop lettuce shoots among which the impact order was pig manure > biogas residue > biogas slurry, and castoffs decreased Zn concentrations in the 1st or 2nd crop lettuce shoots among which the impact order was pig manure > biogas slurry > biogas residue. The kinds or dosages of castoffs significantly affected the DTPA extractive Cu or Zn concentration in soil between which the impact order was kinds of castoffs > dosages, while lettuce crops did not significantly. The contribution order among 3 castoffs to soil DTPA-Cu or -Zn was biogas residue > pig manure > biogas slurry. Soil DTPA-Cu concentration was significantly and positively correlated with dosages of pig manure or biogas residues, and soil DTPA-Zn concentration was significantly and positively correlated with dosages of biogas slurry, pig manure or biogas residue. The tested Cu-risk soil in the present paper had some capacity of Cu-enriched castoffs because of low Cu or Zn concentration in lettuce. In order to protect the ecological environment, it is necessary that Cu-enriched castoffs from large scale pig farms be applied to soil with a limited amount or low frequency, which may be a more suitable method for application of Cu-enriched castoffs to Cu-deficient soil.

Keywords: soil; Cu; Zn; lettuce; pig manure; biogas residue; biogas slurry

传统的猪场废弃物是农田土壤有机质、氮、磷、钾等的重要来源。但随着规模化养殖的发展,尤其是高铜、锌饲料添加剂的施用,导致猪场废弃物 Cu、Zn 含量较高^[1-3]。据调查,猪粪 Cu 含量为 10.7~1591 mg·kg⁻¹, Zn 含量为 71.3~8710 mg·kg⁻¹^[4];沼液 Cu 含量为 1.3~11.2 mg·L⁻¹, Zn 含量为 10.2~33.3 mg·L⁻¹;沼渣 Cu 含量为 1103~3315 mg·kg⁻¹, Zn 为 3552~14 222 mg·kg⁻¹^[5]。因此,畜禽粪便有机肥的施用是造成我国农田土壤重金属污染的重要原因^[6-8]。农业农村部《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》要求 60% 的畜禽粪便养分还田,规模化养猪已占养猪行业 70% 的份额,实现规模化猪场废弃物的安全还田对完成该任务具有重要意义。

沼液对不同土壤、不同作物的 Cu、Zn 含量的影响不同^[9-12];沼渣或降低东南景天 Cu、Zn 含量,或提高黄瓜 Cu、Zn 含量^[13-14];猪粪或降低水稻 Cu、Zn 含量,或增加了空心菜、小白菜地上部 Cu 和 Zn 含量^[15-16]。上述猪场废弃物(沼液、沼渣和猪粪)均来自不同猪场,场地来源可能是上述猪场废弃物提高或降低土壤和作物 Cu、Zn 含量的重要因素,因为不同猪场的废弃物组成有很大差异^[17]。那么来自同一猪场的沼液、沼渣和猪粪对土壤和作物 Cu、Zn 含量的影响如何? 目前报道很少。为此,本文同时采集同一规模化猪场的猪粪、沼液和沼渣,施用到菜地土壤,比较猪粪、沼液和沼渣对土壤-生菜系统中土壤有效态 Cu、Zn 含量和生菜 Cu、Zn 含量的影响,为富含 Cu、Zn 猪场废弃物的施用提供基础数据,进而指导猪场废弃物的分类管理及其应用。

1 材料和方法

1.1 供试土壤

供试土壤采自广州市番禺区钟村镇,系由坡积物发育而来的普通肥熟旱耕人为土(Typic Fimi-orthic Anthrosols)。取 0~20 cm,风干,过 1 cm 筛,备用。土壤的部分性状如下:pH 6.34,有机质 19.3 g·kg⁻¹,全氮 1.50 g·kg⁻¹,碱解氮 484 mg·kg⁻¹,有效磷 114 mg·kg⁻¹,速效钾 418 mg·kg⁻¹,Cu 全量 60.9 mg·kg⁻¹,Zn 全量 125 mg·kg⁻¹,DTPA-Cu 4.84 mg·kg⁻¹,DTPA-Zn 43.2 mg·kg⁻¹。可见该土壤 Cu 全量超过农用地土壤污染风险筛选值 50 mg·kg⁻¹,Zn 全量低于农用地土壤污染风险筛选值(200 mg·kg⁻¹)^[18],该土壤为 Cu 风险土壤。

1.2 供试猪场废弃物

供试猪场废弃物(猪粪、沼渣、沼液),于 2013 年 1 月 22 日采自广东省惠州市博罗县某规模化养猪场,风干猪粪和沼渣、粉碎过 2 mm 尼龙筛,待用。猪粪、沼渣的 pH 值分别为 7.23、8.02,全 N 含量分别为 19.4、33.3 g·kg⁻¹,全 P 含量分别为 4.63、19.3 g·kg⁻¹,全 K 含量分别为 19.4、33.3 g·kg⁻¹,全 Cu 含量分别为 46.2、114 mg·kg⁻¹,全 Zn 含量分别为 1.05、2.57 g·kg⁻¹;沼液的 pH 值为 7.51,沼液的全 N、全 P、全 K 含量分别为 0.54、0.084、0.24 g·L⁻¹,全 Cu、全 Zn 含量分别为 2.64、12.7 mg·L⁻¹。猪场废弃物 Cu、Zn 含量达到我国现行的农业行业有机肥料标准^[19]。

1.3 供试生菜

供试生菜品种为半卷叶型的意大利耐抽苔生菜(*Lactuca sativa* Linn. var. *ramosa* Hort.),全年可以在广

州地区生长。本试验连续种植2茬。

1.4 试验设计

盆栽试验设置:不施肥对照(CK),化肥对照(代号F。其中N $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, P_2O_5 $0.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, K_2O $0.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别以尿素、 CaH_2PO_4 、 K_2SO_4 施入),不同种类和用量的猪场废弃物处理[均不施化肥,分别按N总用量0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土壤计算3种猪场废弃物用量,其中6个沼液处理水平(740、1480、2220、2960、3700、4440 $\text{mL} \cdot \text{盆}^{-1}$,处理号分别为:S1、S2、S3、S4、S5、S6),6个猪粪处理水平(20、40、60、80、100、120 $\text{g} \cdot \text{盆}^{-1}$,处理号为:M1、M2、M3、M4、M5、M6),6个沼渣处理水平(12、24、36、48、60、72 $\text{g} \cdot \text{盆}^{-1}$,处理号为:R1、R2、R3、R4、R5、R6),计18个处理];共计20个处理,每处理4次重复,共80盆。每盆土壤4 kg。猪粪和沼渣进行基施;分别称取每盆所需土壤和猪粪或沼渣,合并一起混合均匀后装入塑料盆(底径15 cm、口径22 cm、高17 cm)。沼液进行基施+追施;基施沼液量为总量的40%;基施或追施沼液时,处理S6直接用沼液浇灌,S1~S5处理的沼液用自来水稀释到S6体积后浇灌;追施沼液时以称重法确定处理S6的沼液体积;对沼液处理而言,追施完所有沼液后才浇水。称重法浇水,土壤含水量保持在60%左右的田间持水量。2013年4月2日,每盆种植10颗饱满一致、10% H_2O_2 消毒的生菜种子,2013年4月12日间苗至4株生菜幼苗,2013年5月15日收获第1茬;第2茬所有处理不再施化肥或猪场废弃物,2013年5月18日在每盆再播种10颗饱满一致、消毒的生菜种子,间苗及浇水方式与第1茬相同,2013年7月4日收获第2茬。

1.5 样品采集和处理

收获生菜可食部分,自来水将生菜冲洗干净,去离子水泡洗2次,擦干表面水分,记录鲜质量后用塑料打浆机匀浆制成鲜样,称取10.00 g鲜样于三角瓶中(同时称取0.5 g蔬菜标准样品进行质量监控)、加入10.0 mL混酸(体积比 HNO_3 : HClO_4 =9:1,优质纯试剂)消煮、定容到25 mL,日本产火焰原子吸收分光光度计(Hitachi ZA3000)测定消解液中Cu、Zn浓度。收获生菜时同步采集土壤,自然风干,过1 mm尼龙筛,称取10 g土壤,加入50 mL的DTPA溶液[$0.005 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 二乙基三胺五乙酸(DTPA)+ $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 + $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 三乙醇胺(TEA)],摇床上浸提1 h、过滤,火焰原子吸收分光光度计(Hitachi ZA3000)测定滤液中Cu、Zn浓度。

1.6 数据处理和统计

数据采用Excel 2003处理,SPSS 10.0进行多重比较(LSD法)、相关性、双因素方差分析、 t 检验等统计(差异显著水平为 $P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 生菜可食部分生物量

猪场废弃物处理对生菜可食部分生物量有显著影响(图1)。经双因素方差分析,猪场废弃物种类及其处理水平都显著影响生菜可食部分生物量,二者有交互作用,但猪场废弃物处理水平对生菜可食部分生物量的影响大于废弃物种类。经 t 检验,第2茬生菜可食部分生物量显著低于第1茬。

2.2 生菜可食部分Cu含量

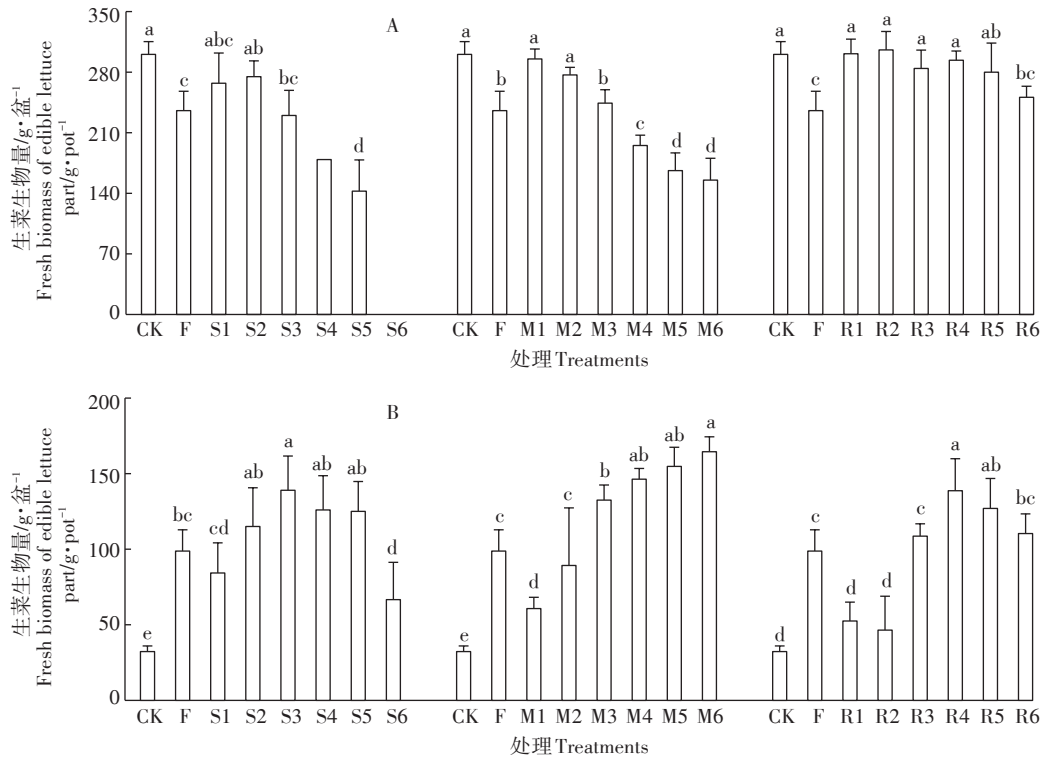
第1茬生菜可食部分Cu含量范围0.54~1.97 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,第2茬为0.46~2.08 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。图2可见,随猪场废弃物种类或处理水平、生菜茬别不同,生菜Cu含量不同。与F处理(或CK)相比,猪场废弃物提高第1茬生菜Cu含量(图2A),降低第2茬生菜Cu含量(图2B);双因素方差分析表明,猪场废弃物种类对生菜Cu含量的影响大于其处理水平。另外,仅沼渣处理第1茬生菜Cu含量与其处理水平呈显著正相关(相关系数为0.557, $n=24$, $P<0.01$)。 t 检验表明,第1茬生菜Cu含量显著高于第2茬($P<0.05$)。

2.3 生菜可食部分Zn含量

第1茬生菜可食部分Zn含量范围0.70~2.28 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,第2茬为5.26~14.4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。与生菜Cu含量类似,生菜Zn含量也随废弃物种类、处理水平或生菜茬别不同而不同(图3)。与化肥对照F处理相比,猪场废弃物显著降低第1、2茬生菜Zn含量(图3);双因素方差分析表明,猪场废弃物种类对生菜Zn含量的影响大于其处理水平。另外,第1茬生菜Zn含量分别与沼液、猪粪或沼渣的处理水平显著正相关(相关系数分别为0.842、0.796、0.929, $n=24$, $P<0.01$),第2茬生菜Zn含量与猪粪处理水平显著负相关(相关系数为-0.433, $n=24$, $P<0.05$)、与沼液或沼渣处理水平没有显著相关性。经 t 检验,第2茬生菜Zn含量显著高于第1茬($P<0.01$)。

2.4 土壤DTPA-Cu含量

猪粪和沼渣处理土壤的DTPA-Cu含量分别随其处理水平增大而显著提高;在相同的N总量处理水平下,沼渣处理土壤的DTPA-Cu含量大于猪粪处理,猪粪处理大于沼液处理(图4)。沼液、猪粪或沼渣处理



图中不同小写字母表示通过LSD法在0.05水平处理间差异显著(A为第1茬,B为第2茬)。下同
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments through LSD test at 0.05 level
(A for the 1st crop, B for the 2nd crop). The same below

图1 生菜可食部分鲜质量

Figure 1 Fresh biomass of the edible lettuce part

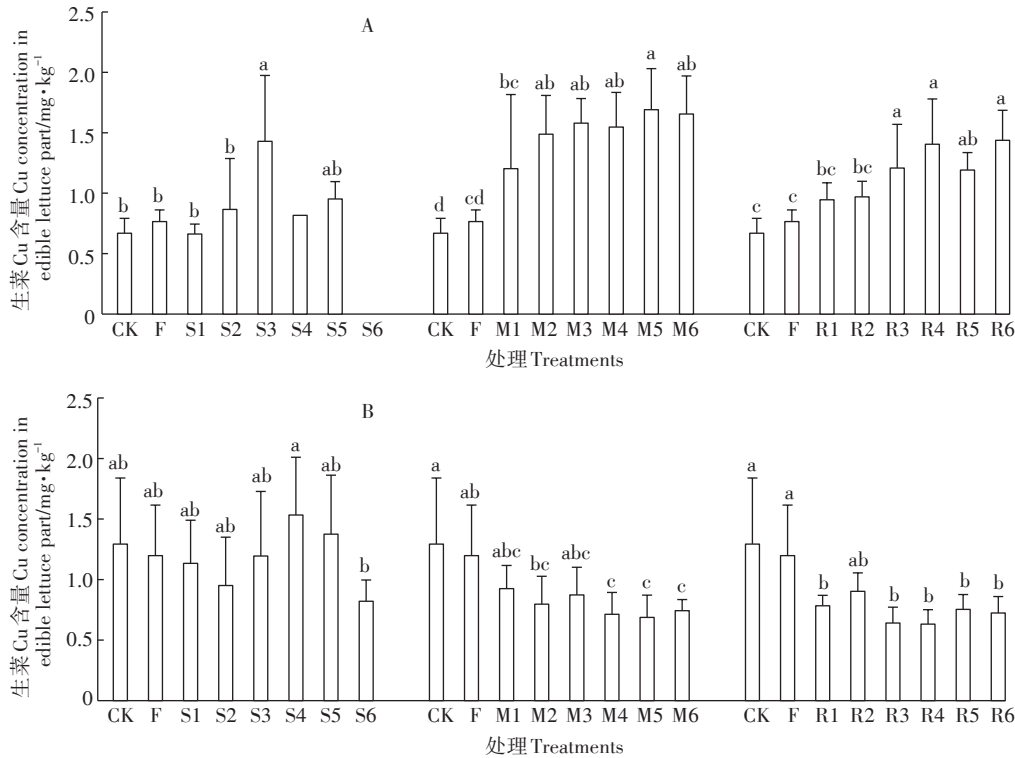


图2 生菜可食部分Cu含量

Figure 2 Cu concentration in the edible lettuce part

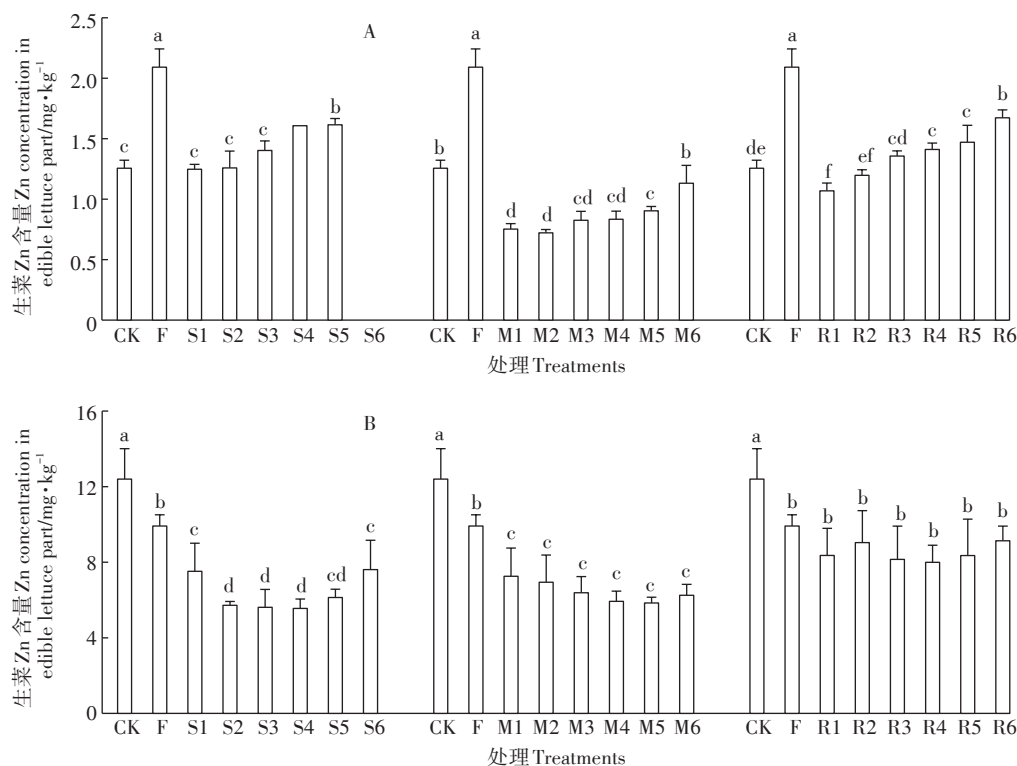


图3 生菜可食部分 Zn 含量

Figure 3 Zn concentration in the edible lettuce part

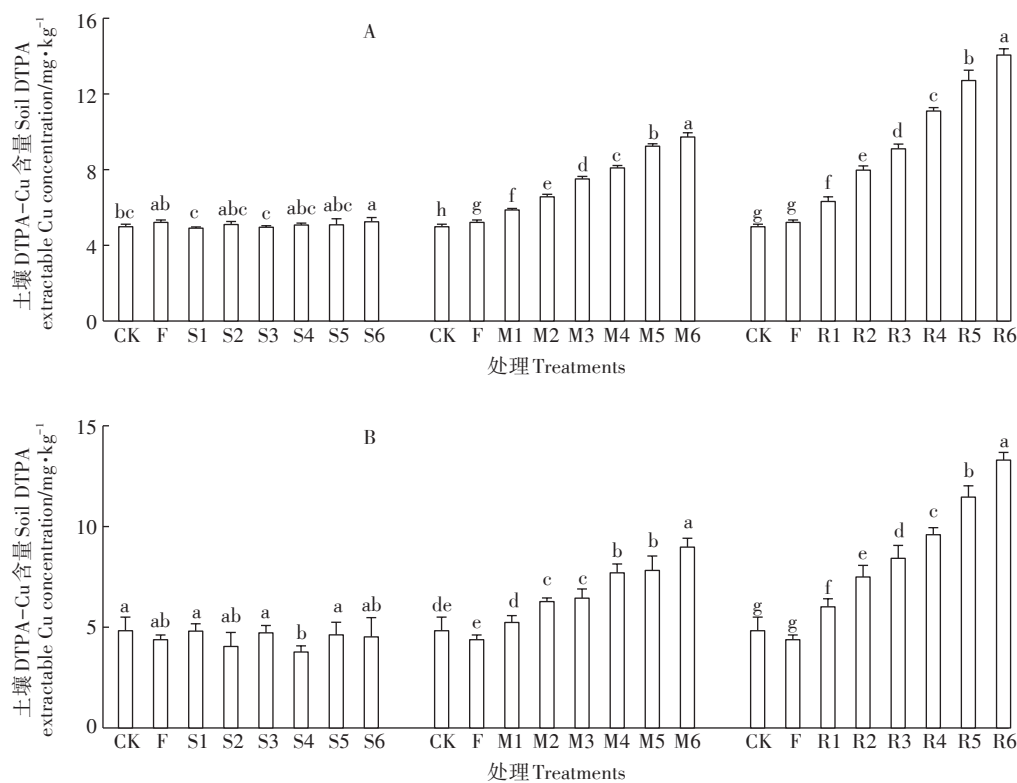


图4 土壤 DTPA-Cu 含量

Figure 4 Soil DTPA extractable Cu concentration

第1茬土壤DTPA-Cu含量分别与其处理水平存在显著的正相关关系[相关系数分别为0.450($n=24$, $P<0.05$)、0.992($n=24$, $P<0.01$)、0.993($n=24$, $P<0.01$)];猪粪和沼液处理第2茬土壤的DTPA-Cu含量仍分别与其处理水平显著正相关(相关系数分别为0.933、0.976, $n=24$, $P<0.01$)。第1茬土壤的DTPA-Cu含量与第2茬的也显著正相关(相关系数为0.971, $n=80$, $P<0.01$),但 t 检验二者没有显著差异。

2.5 土壤DTPA-Zn含量

猪粪和沼渣处理土壤的DTPA-Zn含量分别随其处理水平增大而显著增加;在相同的N总量处理水平下,沼渣处理土壤的DTPA-Zn含量大于猪粪处理,猪粪处理大于沼液处理(图5)。沼液、猪粪和沼渣处理第1、2茬土壤DTPA-Zn含量分别与其处理水平存在显著的正相关关系[第1茬相关系数分别为0.937($n=24$, $P<0.01$)、0.942($n=24$, $P<0.01$)、0.976($n=24$, $P<0.01$);第2茬相关系数分别为0.419($n=24$, $P<0.05$)、0.967($n=24$, $P<0.01$)、0.975($n=24$, $P<0.01$)]。第1茬土壤的DTPA-Zn含量与第2茬的也显著正相关(相关系数为0.970, $n=80$, $P<0.01$), t 检验二者没有显著差异。

3 讨论

3.1 饲料添加剂是农田Cu、Zn风险的重要来源

猪饲料中添加较多微量营养元素Cu、Zn后,能提高生猪的日增重和料重比,减少猪腹泻^[20-23]。猪消化系统对饲料Cu、Zn未能全部吸收甚至有一定的“浓缩效应”,导致猪粪Cu、Zn含量比猪饲料更高,此外,因饲料添加剂含一定量的Cd而导致猪粪Cd含量较高^[20, 23-26],更加增大了猪粪农田应用的环境风险。英国猪粪Cu、Zn含量最迟在1998年开始大幅度提高,与之相比,我国猪粪Cu、Zn含量大幅度提高的时间稍晚^[20, 23],以江苏为例,猪粪Cu、Zn含量大幅度提高的时间是2002年,2008年猪粪Cu、Zn含量分别比1990年提高771%、410%^[23]。猪粪Cu、Zn、As、Cr、Cd、Pb、Ni、Hg中,Cu、Zn含量超标最为严重^[3]。Cu、Zn含量较高的猪粪施用到农田土壤,引起土壤Cu、Zn全量增加^[3, 27-30],连续施用3年猪粪堆肥,土壤Cu、Zn含量分别比试验前提高了31.2%、27.3%^[31]。本文施用猪场废弃物后,土壤DTPA-Cu、DTPA-Zn含量提高,该规律与很多文献一致^[28-30, 32]。本文施用了不同水平的猪场废弃物,土壤DTPA-Cu、DTPA-Zn含量的增加与猪

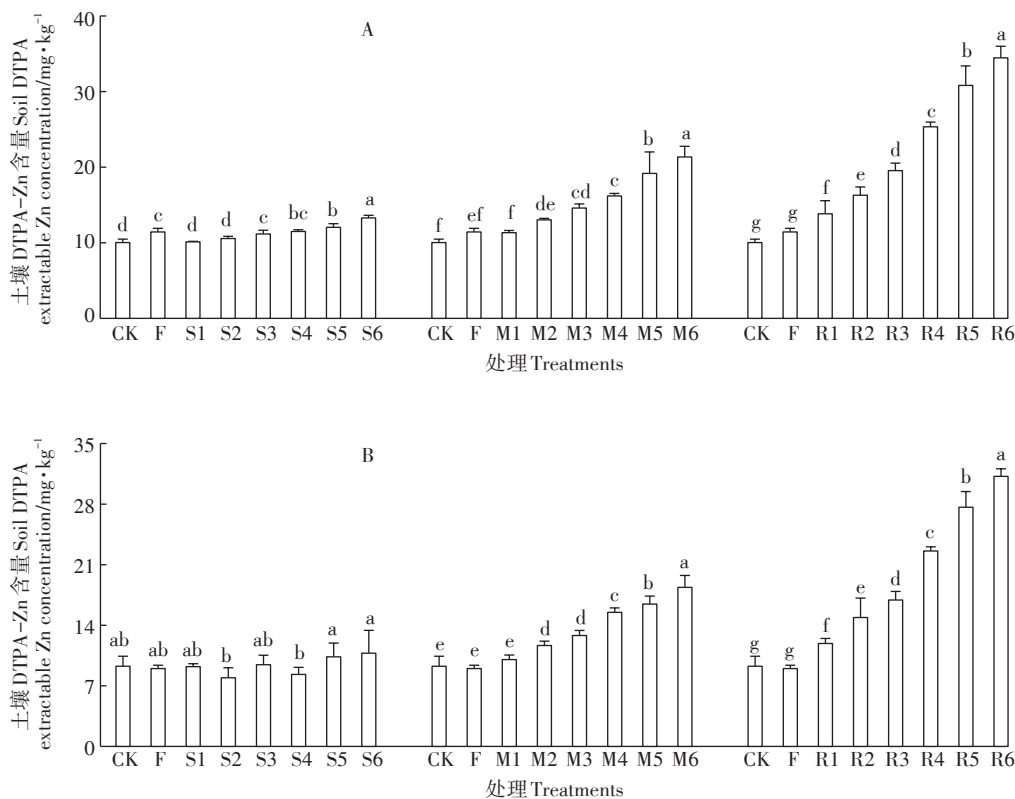


图5 土壤DTPA-Zn含量

Figure 5 Soil DTPA extractable Zn concentration

场废弃物用量显著正相关(沼液的相关性低一些,见图4、图5),与李延等^[33]和杨军芳等^[34]的报道类似。1981年开始施用猪粪的江西红壤长期试验表明,1981—2002年土壤Cu、Zn全量缓慢增加,2002—2010年土壤Cu、Zn全量大幅度提高,因为2002年以后开始施用高Cu、Zn含量的猪粪^[30]。由上可知,农田土壤Cu、Zn含量的增加来自猪日粮添加剂;另一方面,堆腐不能降低猪场废弃物中重金属Cu、Zn含量^[35],甚至显著提高猪粪Cu、Zn含量^[36]。因此,要调控农用土壤Cu、Zn全量,首先应从规范猪日粮添加剂中Cu、Zn用量着手或采取没有环境危害的其他替代措施。

3.2 生菜Cu、Zn含量特征及其影响因素

虽然Cu和Zn是生物所必需的微量营养元素,但含量过高又会危害生物。重金属离子中 Cu^{2+} 的生物毒性最高,且 Cu^{2+} 的毒性远高于 Zn^{2+} 毒性^[37];土壤外加Cu为 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,紫云英根尖扭曲腐烂^[38];在Cu、Zn二者对生态环境的影响上,更应关注Cu的影响。本文生菜可食部分Cu含量范围 $0.50 \sim 1.97 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Zn含量范围 $0.7 \sim 12.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,较文献报道的植株Cu含量($3 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和Zn含量($15 \sim 300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[39]的最小值低,因此,本文生菜中的Cu、Zn含量不会对植株造成伤害。与不施肥对照相比,本试验猪场废弃物对第1茬生菜可食部分Cu含量的影响范围为 $-0.01 \sim 1.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,对第2茬生菜可食部分Cu含量的影响范围为 $-0.095 \sim -0.658 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,前后2茬均与王美和李书田^[40]统计数据($-0.94 \sim 2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)一致。与不施肥对照相比,本试验猪场废弃物对第1茬生菜可食部分Zn含量的影响范围为 $-0.54 \sim 0.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,对第2茬生菜Zn含量的影响范围为 $-3.26 \sim -6.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,第1茬与王美等^[40]统计的数据($-0.54 \sim 15.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)一致;但第2茬偏低。第2茬生菜可食部分Cu、Zn含量较不施肥对照低,其原因可能是外加猪场废弃物中可溶性有机质在第2茬时因微生物的矿化而远低于第1茬,其活化Cu、Zn的效应极大降低,另外,第2茬时猪场废弃物中大分子有机物对Cu、Zn的吸附、络合、沉淀等作用有所增强。第2茬生菜可食部分Cu、Zn含量随猪粪、沼渣的用量增加而降低,与文献报道猪粪、沼渣降低生菜可食部分Cd含量的趋势一致^[24]。本试验第1茬生菜可食部分Cu、Zn含量与猪粪或沼渣用量显著正相关、与土壤DTPA-Cu、DTPA-Zn含量显著正相关,文献报道与之一致^[33-34];第2茬生菜可食部分Cu、Zn含量与土壤DTPA-Cu、DTPA-Zn含量没有显

著相关性,也得到文献支持^[41]。

另外,由于植物对Zn的吸收,受土壤类型、pH、有机质、湿度、N含量、P含量、Cu含量、Mn含量、作物种类等多种因素的影响,本试验化肥处理的第1茬生菜可食部分Zn含量远高于其他处理,可能主要与该处理土壤pH值最低有关(土壤pH值未列出)。本文第1、2茬生菜Cu或Zn含量差异大,其实质的影响因素包括:前后2茬土壤的营养供给水平,影响前后2茬生菜Cu、Zn吸收的阴阳离子消长,影响土壤水活度及重金属活度的温差等,限于本文试验设计,这些影响因素还不能揭示,需要后续试验来探索。

3.3 猪场废弃物的安全施用

虽然沼液中Cu、Zn含量较沼渣和猪粪低,对土壤Cu、Zn含量的贡献量小,但从第1茬S6处理生菜生物量来看,沼液不宜直接施用到蔬菜(沼液应兑水,分次施)。根据供试生菜生长状况,本试验土壤上沼液的最佳施用量是 $370 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$,猪粪的最佳施用量是 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,沼渣的最佳施用量是 $6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (每公顷土壤以4500 t计,即沼液、猪粪、沼渣的公顷用量分别为 1665 m^3 、45 t、27 t,猪粪和沼渣基施)。每年以本试验最佳用量 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 施入猪粪,相当于每年土壤外加Cu含量为 $0.462 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤外加Cu总量达 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 约需要100年,可见土壤Cu含量增加很缓慢,但如果每年以 $50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (每公顷225 t猪粪)施入猪粪,土壤外加Cu $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 只需要20年,Qian等^[42]通过4年田间试验也得出土壤Cu超标的年限为15年。由此可知,通过控制富含Cu、Zn的猪场废弃物施用到农田土壤的总量或频率来降低其对生态环境的危害。虽然本试验供试土壤Cu含量已经超过了农用地土壤污染风险筛选值($50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),但施用猪场废弃物后生菜Cu含量仍然较低,因此,供试土壤还具有一定的猪场废弃物的消纳能力。不过,Cu、Zn含量较高的猪场废弃物,施用到缺Cu土壤可能更合适^[43-44],广东、四川、陕西和黑龙江4省是我国缺Cu土壤的主要集中区^[45],可以消纳大量的富含Cu、Zn的猪场废弃物。

4 结论

猪场废弃物种类及其处理水平均显著影响生菜生物量;同时也均显著影响生菜Cu、Zn含量(影响大小为猪场废弃物种类>其处理水平)。猪场废弃物提高第1茬生菜Cu含量,但降低第2茬Cu含量,影响大小为猪粪>沼渣>沼液;猪场废弃物降低了2茬生菜Zn含量,影响大小为猪粪>沼液>沼渣。

废弃物种类对土壤 DTPA-Cu 或 DTPA-Zn 含量影响较处理水平大;相同 N 总量处理下,土壤 DTPA-Cu 或 DTPA-Zn 含量呈现沼渣处理>猪粪处理>沼液处理;沼渣与猪粪处理的土壤 DTPA-Cu 或 DTPA-Zn 含量均有显著的剂量效应。

供试土壤还能消纳少量猪场废弃物,缺 Cu 土壤也能消纳富含 Cu、Zn 的猪场废弃物。

参考文献:

- [1] 赵明,陈雪辉,赵征宇,等.鸡粪等有机肥料的养分释放及对土壤有效铜、锌、铁、锰含量的影响[J].中国生态农业学报,2007,15(2):47-50.
ZHAO Ming, CHEN Xue-hui, ZHAO Zheng-yu, et al. Releasing of N, P and K of organic fertilizers and their effects on the contents of available Cu, Zn, Fe and Mn in soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(2):47-50.
- [2] 姜萍,金盛杨,郝秀珍,等.重金属在猪饲料-粪便-土壤-蔬菜中的分布特征研究[J].农业环境科学学报,2010,29(5):942-947.
JIANG Ping, JIN Sheng-yang, HAO Xiu-zhen, et al. Distribution characteristics of heavy metals in feeds, pig manures, soils and vegetables [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5):942-947.
- [3] 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,2017,40(4):753-759.
ZHAO Rui, WU Zhi-shu, LUO Yang, et al. Correlation analysis of heavy metals accumulation pollution in pig manure and farmland soil [J]. *Soils*, 2017, 40(4):753-759.
- [4] 张树清,张夫道,刘秀梅,等.规模化养殖畜禽粪主要有害成分测定分析研究[J].植物营养与肥料学报,2005,11(6):822-829.
ZHANG Shu-qing, ZHANG Fu-dao, LIU Xiu-mei, et al. Determination and analysis on main harmful composition in excrement of scale livestock and poultry feedlots[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(6):822-829.
- [5] 陆若辉,孔海民.铜锌含量对沼液沼渣资源化利用的制约作用[J].浙江农业科学,2017,58(9):1638-1639.
LU Ruo-hui, KONG Hai-min. Restriction of copper and zinc in biogas-slurry/-residue against its resource utilization[J]. *Zhejiang Agricultural Sciences*, 2017, 58(9):1638-1639.
- [6] 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驱[J].植物营养与肥料学报,2016,22(4):998-1009.
XU Hao, HAN Li-yuan, RU Shu-hua, et al. Bioavailability and form tendency of Cu and Zn in farmland soils after application of different organic fertilizers[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(4):998-1009.
- [7] Guo T, Lou C L, Zhai W W, et al. Increased occurrence of heavy metals, antibiotics and resistance genes in surface soil after long-term application of manure[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 635:995-1003.
- [8] Wang M L, Liu R H, Lu X Y, et al. Heavy metal contamination and ecological risk assessment of swine manure irrigated vegetable soils in Jiangxi Province, China[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2018, 100(5):634-640.
- [9] 黄界颖,伍震威,高连芬,等.沼液对土壤质量及小白菜产量品质的影响[J].安徽农业大学学报,2013,40(5):849-854.
HUANG Jie-ying, WU Zhen-wei, GAO Lian-fen, et al. Effects of biogas slurry on soil quality and yield quality of Chinese cabbage[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2013, 40(5):849-854.
- [10] 陈正杰,张馨蔚,陈玉成.沼液灌溉对紫色土-水稻系统的影响研究[J].中国沼气,2013,31(5):32-35.
CHEN Zheng-jie, ZHANG Xin-wei, CHEN Yu-cheng. Effect of biogas slurry irrigation on purple soil system for rice planting[J]. *China Biogas*, 2013, 31(5):32-35.
- [11] 杨军芳,冯伟,贾良良,等.追施沼液对白菜及土壤重金属含量的影响[J].河北农业科学,2015,19(5):68-73.
YANG Jun-fang, FENG Wei, JIA Liang-liang, et al. Effects of top-dressing biogas slurry on the content of heavy metals in Chinese cabbage and soil[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2015, 19(5):68-73.
- [12] 侯时季,李涛,蔺阁,等.施用沼液和接种丛枝菌根真菌对甘草生长及重金属累积的影响[J].农业环境科学学报,2016,35(8):1465-1472.
HOU Shi-ji, LI Tao, LIN Ge, et al. Effects of biogas slurry and AM fungi on growth and heavy metal accumulation of licorice plants[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(8):1465-1472.
- [13] 姚桂华,徐海舟,朱林刚,等.不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率的影响[J].环境科学,2015,36(11):4268-4276.
YAO Gui-hua, XU Hai-zhou, ZHU Lin-gang, et al. Effects of different kinds of organic materials on soil heavy metal phytoremediation efficiency by *Sedum alfredii* Hance[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(11):4268-4276.
- [14] 杨军芳,史建硕,黄少辉,等.施用沼渣对设施黄瓜及土壤重金属含量的影响[J].河北农业科学,2017,21(4):82-86.
YANG Jun-fang, SHI Jian-shuo, HUANG Shao-hui, et al. Effects of application of biogas residue on greenhouse cucumber and heavy metal contents in soil[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2017, 21(4):82-86.
- [15] 王琼瑶,李森,周玲,等.猪粪-秸秆还田对土壤、作物重金属铜锌积累及环境容量影响研究[J].农业环境科学学报,2016,35(9):1764-1772.
WANG Qiong-yao, LI Sen, ZHOU Ling, et al. Accumulation and environmental capacity of Cu and Zn in soil-crop with swine manure applying and straw returning[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(9):1764-1772.
- [16] 颜蒙蒙,贾武霞,苏世鸣,等.猪粪中铜、锌与等量水溶性盐对两种叶类蔬菜的植物有效性比较[J].农业环境科学学报,2018,37(2):223-231.
YAN Meng-meng, JIA Wu-xia, SU Shi-ming, et al. Phytoavailability comparison of Cu and Zn in two types of leaf vegetables after application with manure and the equivalent water-soluble salts[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(2):223-231.

- [17] 张家才, 胡荣桂, 雷明刚, 等. 畜禽粪便无害化处理技术研究进展[J]. 家畜生态学报, 2017, 38(1):85-90.
ZHANG Jia-cai, HU Rong-gui, LEI Ming-gang, et al. Research progress on innocuous treatment technique of livestock and poultry manure[J]. *Acta Ecologiae Animalis Domastici*, 2017, 38(1):85-90.
- [18] 生态环境部和国家市场监督管理总局. GB 15618—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.
Ministry of Ecology and Environment of PRC and State Administration for Market Regulation. GB 15618—2018 Soil environmental quality—Risk control standard for soil contamination of agricultural land[S]. Beijing: China Standards Press, 2018.
- [19] 中华人民共和国农业部. NY525—2012 有机肥料[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
Ministry of Agriculture of PRC. NY525—2012 Organic fertilizer[S]. Beijing: China Standards Press, 2012.
- [20] Nicholson F A, Chambers B J, Williams J R, et al. Heavy metal contents of livestock feeds and animal manures in England and Wales[J]. *Bioresource Technology*, 1999, 70(1):23-31.
- [21] 许梓荣, 吴新民. 不同化学形式的铜对仔猪生长、消化和胴体组成的影响[J]. 动物营养学报, 1999, 11(3):29-35.
XU Zi-rong, WU Xin-min. The effects of inorganic or organic copper on growth performance, digestion and carcass composition of weanling piglets[J]. *Acta Zoo Nutrimenta Sinica*, 1999, 11(3):29-35.
- [22] 许梓荣, 王敏奇. 高剂量锌促进猪生长的机理探讨[J]. 畜牧兽医学报, 2001, 32(1):11-17.
XU Zi-rong, WANG Min-qi. Approach of the mechanism of growth-promoting effect of pharmacological level of zinc in pigs[J]. *Acta Veterinariae Zootechnica Sinica*, 2001, 32(1):11-17.
- [23] Wang H, Dong Y H, Yang YY, 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.
- [24] 唐明灯, 李盟军, 王艳红, 等. 猪场废弃物对Cd超标土壤生菜生长及Cd含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3):558-564.
TANG Ming-deng, LI Meng-jun, WANG Yan-hong, et al. Effects of pig farm wastes on growth and Cd concentrations of lettuce grown in a cadmium polluted soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(3):558-564.
- [25] 刘荣乐, 李书田, 王秀斌, 等. 我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量状况与分析[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2):392-397.
LIU Rong-le, LI Shu-tian, WANG Xiu-bin, et al. Contents of heavy metal in commercial organic fertilizers and organic waste[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2005, 24(2):392-397.
- [26] 谭长银, 吴龙华, 骆永明, 等. 长期施肥条件下黑土镉的积累及其趋势分析[J]. 应用生态学报, 2008, 19(12):2738-2744.
TAN Chang-yin, WU Long-hua, LUO Yong-ming, et al. Cadmium accumulation and its development tendency in black soil under long-term fertilization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(12):2738-2744.
- [27] Moral R, Perez-Murcia MD, Perez-Espinosa A, et al. Salinity, organic content, micronutrients and heavy metals in pig slurries from south-eastern Spain[J]. *Waste Management*, 2008, 28(2):367-371.
- [28] 李本银, 汪 鹏, 吴晓晨, 等. 长期肥料试验对土壤和水稻微量元素及重金属含量的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(2):281-288.
LI Ben-yin, WANG Peng, WU Xiao-chen, et al. Effect of long-term fertilization experiment on concentration of micronutrients and heavy metals in soil and brown rice[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(2):281-288.
- [29] 李本银, 黄绍敏, 张玉婷, 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.
- [30] 李大明, 柳开楼, 黄庆海, 等. 长期施用猪粪红壤稻田土壤Cu、Zn累积规律[J]. 生态学报, 2015, 35(3):709-716.
LI Da-ming, LIU Kai-lou, HUANG Qing-hai, et al. Accumulation dynamic of soil Cu and Zn under long-term application of pig manure in red paddy field[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(3):709-716.
- [31] 黄新灿, 章明奎. 长期施用猪粪源有机肥对蔬菜-土壤系统重金属累积的影响[J]. 农学学报, 2016, 6(4):30-35.
HUANG Xin-can, ZHANG Ming-kui. Long-term application of pig manure compost affecting heavy metal accumulation in vegetable-soil system[J]. *Journal of Agriculture*, 2016, 6(4):30-35.
- [32] Xu Q T, Zhang M K. Source identification and exchangeability of heavy metals accumulated in vegetable soils in the coastal plain of eastern Zhejiang Province[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 142:410-416.
- [33] 李 延, 彭来真, 刘琳琳, 等. 施用猪粪对土壤Cu形态和菜心Cu含量的影响[J]. 热带作物学报, 2010, 31(4):535-540.
LI Yan, PENG Lai-zhen, LIU Lin-lin, et al. Influence of applying swine manure on Cu content of the soil and *Brassica campestris*[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2010, 31(4):535-540.
- [34] 杨军芳, 贾良良, 冯 伟, 等. 施用沼渣对白菜及土壤重金属含量状况的影响[J]. 华北农学报, 2014, 29(增刊):322-327.
YANG Jun-fang, JIA Liang-liang, FENG Wei, et al. Effect of contents of heavy metals by application of biogas residue in Chinese cabbage and soil[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2014, 29(Suppl):322-327.
- [35] 赵 秋, 孙 毅, 吴 迪, 等. 猪粪堆制过程中铅、镉、铜、锌的变化[J]. 黑龙江农业科学, 2007, 5:50-52.
ZHAO Qiu, SUN Yi, WU Di, et al. Change of Pb, Cd, Cu and Zn during the pig manure composting[J]. *Heilongjiang Agricultural Science*, 2007, 5:50-52.
- [36] 尹晓明, 王荣江, 徐潇潇, 等. 猪粪堆肥过程中养分和重金属含量的动态变化[J]. 植物营养学报, 2019, DOI:10.11674/zwylf.18044.
YIN Xiao-ming, WANG Rong-jiang, XU Xiao-xiao, et al. Change of nutrient and heavy metal concentrations during swine composting[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2019, DOI:10.11674/zwylf.

- 18044.
- [37] 李 波, 马义兵, 史 奕. 植物毒性评价终点的生物配体模型比较研究[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(10):20-25.
- LI Bo, MA Yi-bing, SHI Yi. The comparisons of biotic ligand model based on different heavy metals and plant toxicity endpoints[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39(10):20-25.
- [38] 倪才英, 陈英旭, 骆永明. 土壤-植物系统铜污染与修复的研究进展[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2003, 29(3):237-243.
- NI Cai-ying, CHEN Ying-xu, LUO Yong-ming. Recent advances in research on copper pollution and remediation of soil-plant system[J]. *Journal of Zhejiang University(Agric. & Life Sci.)*, 2003, 29(3):237-243.
- [39] 唐明灯, 胡 锋, 吴龙华, 等. 香薷属植物在重金属修复中的应用进展[J]. 土壤, 2008, 40(5):698-705.
- TANG Ming-deng, HU Feng, WU Long-hua, et al. Progresses on phytoremediation of heavy metal contaminated soils using *Elsholtzia* plants [J]. *Soils*, 2008, 40(5):698-705.
- [40] 王 美, 李书田. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J]. 植物营养学报, 2014, 20(2):466-480.
- WANG Mei, LI Shu-tian. Heavy metals in fertilizers and effect of the fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(2):466-480.
- [41] 黄穗虹, 田 甜, 邹晓锦, 等. 大宝山矿周边污染土壤重金属生物有效性评估[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2009, 48(4):125-129, 136.
- HUANG Sui-hong, TIAN Tian, ZOU Xiao-jin, et al. Bioavailability assessment of heavy metals in the vicinity of Dabaoshan mine[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2009, 48(4):125-129, 136.
- [42] Qian X Y, Wang Z, Shen G X, et al. Heavy metals accumulation in soil after 4 years of continuous land application of swine manure: A field-scale monitoring and modeling estimation[J]. *Chemosphere*, 2018, 210:1029-1034.
- [43] 唐明灯, 吴龙华, 李 宁, 等. 修复植物香薷堆肥对缺铜土壤上冬小麦生长和铜吸收的初步研究[J]. 土壤, 2006, 38(5):614-618.
- TANG Ming-deng, WU Long-hua, LI Ning, et al. Preliminary study on effect of *Elsholtzia splendens* compost on plant growth and Cu uptake by winter wheat in a Cu-deficient upland soil[J]. *Soils*, 2006, 38(5):614-618.
- [44] Tang M D, Hu F, Wu L H, et al. Effects of copper-enriched composts applied to copper-deficient soil on the yield and copper and zinc uptake of wheat[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2009, 11:81-93.
- [45] 刘 铮, 朱其清, 唐丽华, 等. 我国缺乏微量元素的土壤及其区域分布[J]. 土壤学报, 1982, 19(2):209-221.
- LIU Zheng, ZHU Qi-qing, TANG Li-hua, et al. Geographical distribution of trace elements-deficient soils in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1982, 19(2):209-221.