

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.

猪场废弃物对 Cd 超标土壤生菜生长及 Cd 含量的影响

唐明灯, 李盟军, 王艳红, 艾绍英*, 余丹妮

(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, 广州 510640)

摘要: 为了比较同一猪场废弃物对 Cd 超标土壤生菜生长及其 Cd 含量的影响, 从广东省博罗县某规模化养猪场同时采集猪粪、沼液与沼渣, 通过在 Cd 超标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 氮用量计算)的盆栽试验(连续 2 茬生菜), 研究生菜生物量与 Cd 吸收对这 3 种废弃物的响应关系。结果表明: 猪场废弃物种类或用量均显著影响生菜地上部的生物量, 其贡献大小为废弃物用量>废弃物种类; 第 1 茬生菜生物量随猪场废弃物用量的增加而降低, 第 2 茬生菜生物量与沼液或沼渣用量之间呈“Λ”形关系, 但随猪粪用量增加而显著提高。猪场废弃物种类和用量均显著影响生菜地上部 Cd 含量, 其贡献大小为废弃物种类>废弃物用量。猪粪与沼渣降低生菜 Cd 含量, 沼液提高生菜 Cd 含量; 生菜 Cd 含量随猪粪用量增加而显著降低, 随沼液用量增加而显著提高。生菜 Cd 含量的变化主要受生物量稀释效应的影响(猪粪处理第 1 茬例外), 每千克该土壤的沼液、猪粪、沼渣用量分别≤370 mL、10 g、15 g 时, 生菜正常生长。

关键词: 土壤; 镉; 生菜; 猪粪; 沼渣; 沼液

中图分类号: X713 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2016)03-0558-07 **doi:**10.11654/jaes.2016.03.020

Effects of pig farm wastes on growth and Cd concentrations of lettuce grown in a cadmium polluted soil

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

(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, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A pot experiment with two successive cropping was conducted to investigate the effects of 3 wastes (pig manure, biogas slurry, and biogas residue) from a large-scale pig farm in Boluo county, Guangdong Province, South China, on the growth and cadmium (Cd) concentrations of *Lactuca sativa* grown in a Cd polluted soil. Based on total nitrogen rates of 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, and 0.6 g·kg⁻¹ soil, 5, 10, 15, 20, 25, and 30 g of air-dried pig manure, 3, 6, 9, 12, 15, and 18 g of air-dried biogas residue, or 185, 370, 555, 740, 925, and 1110 mL of biogas slurry were respectively applied to 1 kg soil in a plastic pot. All pig manure and air dried biogas residue and 40% of the biogas slurry were used as basal fertilizers, and the rest 60% of the biogas slurry were applied as top dress. Results showed that both type and rate of wastes significantly affected shoot biomass of lettuce, with the rate having greater influence on the biomass than type. The lettuce biomass for the 1st cropping decreased with increasing waste amount. For the 2nd cropping, the shoot biomass showed a “Λ” relationship with the rates of biogas slurry or biogas residue, but a dose-effect relationship with pig manure. Likewise, both type and rate of wastes significantly affected shoot Cd concentrations. However, waste types had greater effects on shoot Cd concentrations than waste rates. Compared with the control, both pig manure and biogas residue significantly decreased plant shoot Cd concentrations in a dose-effect manner, but biogas slurry applications significantly increased shoot Cd concentrations. The changes of shoot Cd concentrations were mainly attributed to the biomass dilution effect. Lettuce grew normally at no more than 370 mL of biogas slurry, 10 g pig manure, or 15 g biogas residue per 1 kg of the tested soil.

Keywords: soil; Cd; lettuce; pig manure; biogas residue; biogas slurry

收稿日期: 2015-09-22

基金项目: 广东省科学技术厅项目(2011B020309003); 广东省科学技术厅重点项目(2012A030700010); 广州市科技计划项目(2014Y2-00521); 广东省科学技术厅农业领域重点专项(2012A020100003)

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

中国菜地土壤重金属Cd超标最严重^[1],导致叶菜Cd含量超标^[2-3],从而增大人体致畸、致癌等健康风险^[4-6]。重金属污染土壤的治理调控技术有物理工程措施、生物修复措施、农艺措施,其中费用低、易操作且能应用到大面积中轻度污染农田土壤的是农艺措施,尤其是施肥措施^[7]。

畜禽粪尿是传统的农家肥,有研究表明,猪粪降低了Cd污染土壤上玉米地上部、小麦籽粒、水稻糙米、小白菜地上部的Cd含量^[8-13]。我国畜牧业已趋规模化和集约化,规模化养猪场常建有沼液发酵罐,沼液一般就近农用^[14]。沼液可提高玉米籽粒、稻米、小白菜的Cd含量^[15-17];沼渣也提高芹菜根茎叶的Cd含量^[18]。上述报道的猪粪、沼渣、沼液都来自不同的养猪场。为探索同一规模化养猪场的猪粪、沼液、沼渣对Cd超标农田土壤上农作物Cd含量影响情况是否与以上猪场废弃物一致,本文同时采集同一规模化养猪场的猪粪、沼液和沼渣,施用于Cd超标菜地土壤,比较三者对叶菜生长和Cd含量的影响,为合理利用规模化猪场废弃物提供部分参考依据。

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,系坡积物发育而来的普通肥熟旱耕人为土。采集0~20 cm土样,风干过1 cm筛,备用。土壤基本性状如下:pH6.34,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、全量Cd 0.450 mg·kg⁻¹、全量Cu 60.9 mg·kg⁻¹、全量Pb 32.7 mg·kg⁻¹、全量Zn 125 mg·kg⁻¹、DTPA-Cd 0.24 mg·kg⁻¹、DTPA-Pb 5.77 mg·kg⁻¹、DTPA-Cu 4.84 mg·kg⁻¹、DTPA-Zn 43.2 mg·kg⁻¹。

1.2 供试猪场废弃物

供试猪场废弃物(猪粪、沼渣、沼液)同时采自广东省惠州市博罗县某规模化养猪场,晾干猪粪和沼渣、粉碎过2 mm尼龙筛待用。猪场废弃物的理化性质见表1,重金属Cd、Cu、Pb、Zn含量没有超过我国有机-无机复混肥料国家标准^[19]的限量,也没有超过农业行业有机肥料标准^[20]的限量。

1.3 供试叶菜

供试叶菜品种为意大利耐抽苔生菜(*Lactuca sativa* Linn. var. *ramosa* Hort.),全年可以在广州地区生长,地上部Cd浓度较高^[21-22],连续种植2茬。

表1 猪场废弃物的理化性质

Table 1 Selected properties of pig farm wastes

废弃物	pH	N	P	K	Cd	Pb	Cu	Zn
		g·kg ⁻¹ (沼液为g·L ⁻¹)			mg·kg ⁻¹ (沼液为mg·L ⁻¹)			
猪粪	7.23	19.4	4.63	3.5	0.17	0.50	46.2	1050
沼渣	8.02	33.3	19.3	8.33	0.37	0.37	114	2570
沼液	7.51	0.54	0.084	0.24	0.002	0.003	2.64	12.7

1.4 试验设计

试验设不施肥对照CK,化肥处理F(其中N 0.2 g·kg⁻¹, P₂O₅ 0.08 g·kg⁻¹, K₂O 0.16 g·kg⁻¹,分别以尿素、磷酸二氢钙、硫酸钾施入)、猪场废弃物处理(不施化肥,分别按N总用量0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 g·kg⁻¹土壤计算猪场废弃物用量:6个沼液处理水平为185、370、555、740、925、1110 mL·kg⁻¹,记为S1、S2、S3、S4、S5、S6,6个猪粪处理水平为5、10、15、20、25、30 g·kg⁻¹,记为M1、M2、M3、M4、M5、M6,6个沼渣处理水平为3、6、9、12、15、18 g·kg⁻¹,记为R1、R2、R3、R4、R5、R6)。共计20个处理,每个处理4次重复,共80盆,每盆土壤4 kg。猪粪和沼渣全部基施,沼液基施40%、追施60%(S6处理沼液量远超土壤持水量,该处理根据土壤水分情况分次追施,S1、S2、S3、S4、S5的沼液与S6处理同一比例追施,用自来水稀释到S6处理的沼液量)。称取土壤后,猪粪与沼渣处理分别与土壤混合均匀,沼液浇入土壤。播种露白生菜种子,4叶期每盆定株4棵。称重法浇水,土壤含水量维持在田间持水量的70%左右。收获第1茬后,不施用猪场废弃物和化肥,再播种露白生菜种子,浇水方式与第1茬相同。盆栽试验自2012年5月4日至2012年8月2日,在广东省农业科学院农业资源与环境研究所网室进行。

1.5 样品采集和处理

收获生菜地上部,用自来水冲洗干净,去离子水泡洗2次,擦干表面水分,记录鲜重后用塑料打浆机匀浆制成鲜样,称取10.00 g鲜样(同时称取蔬菜标准样品进行质量监控)于三角瓶中,加入10.0 mL混酸(体积比HNO₃:HClO₄=9:1,优质纯试剂)消煮并定容到25 mL,石墨炉原子吸收分光光度计(PerkinElmer AAnalyst 600,下同)测定消解液中Cd浓度。同时采集土壤样本,自然风干,过1 mm尼龙筛,称取10.00 g加入50 mL DTPA溶液(0.005 mol·L⁻¹ DTPA+0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂+0.1 mol·L⁻¹ TEA),在摇床(180 r·min⁻¹)上浸提1 h后过滤,石墨炉原子吸收分光光度计测定滤液中Cd浓度。称10.00 g土壤,电位法测定土壤pH

(土水质量比为 1:2.5)。

1.6 数据处理和统计

数据采用 Excel 2003 处理, SPSS 10.0 统计(差异显著水平为 $P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 生菜生物量

由表 2 可见, 猪粪、沼液与沼渣的不同施用量均显著影响生菜地上部生物量; 双因素分析表明, 猪场废弃物种类、猪场废弃物用量均显著影响生菜生物量, 且二者有显著的交互作用。对生菜地上部生物量的贡献大小顺序为猪场废弃物用量>猪场废弃物种类。t 检验表明, 第 1 茬生菜生物量显著大于第 2 茬, 可能与第 2 茬生菜生长期间的零施肥、高温、日夜温差小、废弃物腐解缓慢释放养分等因素有关。

3 种猪场废弃物对第 1 茬菜的生长均呈抑制效应, 即第 1 茬生菜的地上部生物量均随着施用量的

增加而降低。其中沼液对生菜生长的抑制效应最大, S6 处理的生菜全部死亡。沼渣对生菜生长的抑制效应最弱, 与沼液和猪粪相比, 第 1 茬生菜沼渣处理的平均生物量最高。与对照相比, 第 1 茬生菜正常生长, 该土壤沼液用量 $\leq 370 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土, 猪粪用量 $\leq 10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土, 沼渣用量 $\leq 15 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土。

低量沼液或沼渣处理显著降低了第 2 茬生菜地上部生物量, 高量处理也显著抑制生菜的生长, 二者的施用量与生菜生物量呈“Λ”形关系。但随猪粪用量的增加, 第 2 茬生菜生物量显著提高。

2.2 生菜地上部 Cd 含量

从表 2 中生菜 Cd 含量可以看出, 3 种猪场废弃物显著影响生菜地上部 Cd 含量。双因素分析表明, 猪场废弃物种类、猪场废弃物用量均显著影响生菜地上部的 Cd 含量, 且二者有显著的交互作用; 对生菜地上部 Cd 含量的贡献大小顺序为猪场废弃物种类>猪场废弃物用量。第 1 茬生菜地上部 Cd 含量都低于

表 2 生菜地上部生物量、Cd 含量及土壤 DTPA-Cd 含量

Table 2 Shoot biomass and Cd concentrations of lettuce and DTPA-Cd concentrations in soil

处理	生物量/g·盆 ⁻¹ FW		Cd 含量/mg·kg ⁻¹ FW		DTPA-Cd/mg·kg ⁻¹	
	第 1 茬	第 2 茬	第 1 茬	第 2 茬	第 1 茬	第 2 茬
CK	301±15a	32.3±2.8e	0.105±0.005d	0.210±0.034a	0.189±0.002d	0.171±0.015a
F	236±22c	98.8±14.1bc	0.143±0.017bc	0.166±0.008b	0.206±0.005a	0.167±0.010a
S1	267±35abc	84.3±20.0cd	0.122±0.019d	0.133±0.024c	0.193±0.003cd	0.169±0.009a
S2	275±18ab	115±26ab	0.125±0.014cd	0.099±0.014d	0.193±0.005cd	0.151±0.015a
S3	230±29bc	139±23a	0.150±0.003b	0.122±0.005cd	0.196±0.008bc	0.170±0.022a
S4	179	126±23ab	0.159	0.125±0.013cd	0.200±0.007abc	0.152±0.012a
S5	143±36d	125±20ab	0.185±0.000a	0.133±0.011c	0.201±0.008ab	0.171±0.021a
S6	—	66.7±24.7d	—	0.166±0.025b	0.206±0.003a	0.169±0.037a
CK	301±15a	32.3±2.8e	0.105±0.005b	0.210±0.034a	0.189±0.002b	0.171±0.015a
F	236±22b	98.8±14.1c	0.143±0.017a	0.166±0.008b	0.206±0.005a	0.167±0.010ab
M1	295±12a	60.8±7.4d	0.056±0.001cd	0.123±0.020c	0.167±0.003c	0.160±0.008abc
M2	277±9a	89.3±38.1c	0.061±0.005c	0.106±0.014cd	0.163±0.006c	0.160±0.008abc
M3	244±15b	133±10b	0.066±0.009c	0.099±0.007d	0.152±0.005d	0.150±0.004c
M4	195±12c	146±7ab	0.044±0.017de	0.099±0.004d	0.166±0.016c	0.149±0.007c
M5	166±20d	155±13ab	0.034±0.013ef	0.104±0.003cd	0.172±0.005c	0.157±0.008bc
M6	155±25d	165±10a	0.029±0.004f	0.088±0.011d	0.171±0.003c	0.170±0.009ab
CK	301±15a	32.3±2.8d	0.105±0.005b	0.210±0.034a	0.189±0.002b	0.171±0.015a
F	236±22c	98.8±14.1c	0.143±0.017a	0.166±0.008b	0.206±0.005a	0.167±0.010a
R1	301±17a	52.5±12.5d	0.071±0.013c	0.106±0.016c	0.187±0.005bc	0.173±0.006a
R2	306±21a	46.5±22.4d	0.066±0.007c	0.086±0.019cd	0.181±0.004d	0.172±0.010a
R3	284±21a	109±8bc	0.070±0.014c	0.078±0.014cd	0.184±0.002bcd	0.157±0.011a
R4	294±11a	139±21a	0.072±0.011c	0.070±0.009d	0.182±0.002cd	0.162±0.009a
R5	280±34ab	127±20ab	0.067±0.007c	0.072±0.023d	0.182±0.001d	0.167±0.009a
R6	251±13bc	110±13bc	0.076±0.012c	0.076±0.009d	0.181±0.005d	0.160±0.013a

注: 同列每种废弃物中不同小写字母表示各处理水平之间差异显著($P<0.05$)。

食品安全国家标准^[23]的限值($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),经 t 检验,第2茬生菜地上部Cd含量平均值($0.113 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)显著高于第1茬($0.083 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

3种猪场废弃物对第1茬生菜Cd含量的影响规律各不相同:施用沼液的生菜Cd含量随沼液用量的增加而显著提高;不同沼渣用量的生菜Cd含量没有显著差异;施用猪粪的生菜Cd含量随猪粪用量的增加而显著减少。3种猪场废弃物第1茬生菜Cd含量的平均值大小顺序为沼液>沼渣>猪粪(差异显著),表明施用猪粪具有显著降低第1茬生菜Cd含量的效果。

沼液和猪粪对第2茬生菜Cd含量的影响规律与第1茬相同:施用沼液的生菜Cd含量随沼液用量的增加而显著提高;施用猪粪的生菜Cd含量随猪粪用量的增加而显著减少。与第1茬不同,施用沼渣的生菜Cd含量随猪粪用量的增加而显著减少。3种猪场废弃物第2茬生菜Cd含量的平均值大小顺序为沼液>猪粪>沼渣(差异显著),可见施用猪粪降低生菜Cd含量的时效性比较短暂。

2.3 土壤 pH

3种猪场废弃物及各自不同施用量均显著影响第1茬和第2茬土壤pH值(图1)。双因素分析表明,猪场废弃物种类、猪场废弃物用量均显著影响土壤

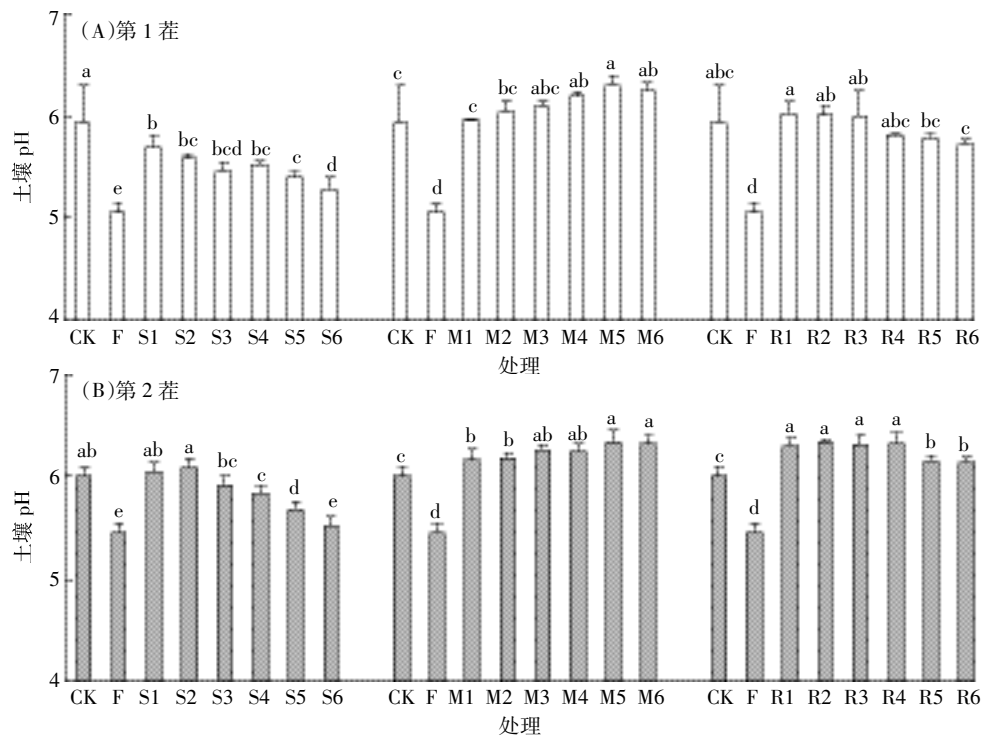
pH值,且二者有显著的交互作用;对土壤pH的贡献大小顺序为猪场废弃物种类>猪场废弃物用量。 t 检验表明,第2茬土壤pH平均值(6.08)显著高于第1茬(5.80)。

第1茬土壤pH平均值的高低顺序是猪粪>沼渣>沼液(显著差异);第2茬土壤pH平均值的高低顺序是沼渣>猪粪>沼液(后者与前二者差异显著)。第1、2茬土壤pH值均随猪粪用量增加而显著提高,随沼液或沼渣用量增加而显著降低。

土壤施用沼液,第1、2茬pH值均与生菜地上部Cd含量显著负相关;但土壤施用猪粪,仅第1茬pH值与生菜地上部Cd含量显著负相关;施用沼渣,第1、2茬pH值均与生菜地上部Cd含量无相关性。

2.4 土壤 DTPA-Cd 含量

不同用量的猪场废弃物显著影响第1茬土壤DTPA-Cd含量,但第2茬土壤DTPA-Cd含量仅在施用猪粪处理组有显著差异(表2)。双因素分析表明,猪场废弃物种类、猪场废弃物用量均显著影响第1茬土壤的DTPA-Cd含量,二者有显著的交互作用;对第1茬土壤的DTPA-Cd含量的贡献大小顺序为猪场废弃物种类>猪场废弃物用量;但二者没有显著影响第2茬土壤的DTPA-Cd含量。 t 检验发现,第1茬土壤DTPA-Cd含量平均值($0.184 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)显著高于第2



每种废弃物中不同小写字母表示各处理水平之间差异显著($P < 0.05$)

图1 土壤 pH 值
Figure 1 Soil pH

茬($0.163 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

第1茬土壤 DTPA-Cd 含量随沼液用量的增加而显著提高,随沼渣用量的增加而显著降低,但与猪粪用量没有显著相关性。第2茬土壤 DTPA-Cd 含量与沼液、猪粪或沼渣均没有显著相关性。

对沼液处理而言,第1、2茬生菜 Cd 含量与土壤 DTPA-Cd 含量均没有显著相关性;对猪粪处理而言,第1茬生菜 Cd 含量随土壤 DTPA-Cd 含量增加而显著减少,第2茬则没有显著相关性;对沼渣处理而言,第2茬生菜 Cd 含量与土壤 DTPA-Cd 含量显著正相关,但第1茬没有相关性。因此,土壤 DTPA-Cd 含量难以表征猪场废弃物对生菜 Cd 含量的影响机制。

3 讨论

当菜地土壤碱解氮 $>300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有效磷 $>90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $>240 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,菜地土壤肥力过高^[24],表明这类土壤不施肥就能满足蔬菜生长所需营养,施肥反而可能抑制蔬菜生长。本文供试土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量均超过以上限值,所以 CK 处理第1茬生菜生物量显著高于大部分处理的生物量。另一方面,由于第1茬生菜生长消耗了土壤中的养分,且第2茬没有施肥,导致 CK 处理第2茬生菜鲜重平均值最低。

唐明灯等^[21]报道,猪粪用量为0.5%、1%、2%、4%时,3茬生菜的生物量都与猪粪用量显著正相关。本文猪粪施用量为0.5%、1%、1.5%、2%、2.5%、3%,第1茬生菜生物量与猪粪用量显著负相关,第2茬生菜生物量与猪粪用量显著正相关。二者不一致的原因可能是:前者对生菜追施尿素 $1.00 \text{ g} \cdot \text{茬}^{-1} \cdot \text{盆}^{-1}$,供试猪粪取自猪粪堆垛,其 NPK 营养较高,含有第1茬生菜能直接吸收的养分,腐解后又能为第2、3茬生菜提供部分养分;而本试验没有追施化肥,且供试猪粪为规模化猪场水泡粪,NPK 营养较低(表1),第1茬生菜能直接吸收的养分有限,甚至还可能通过吸附作用与第1茬生菜根系竞争土壤中碱解氮等植物易于吸收的养分,但水泡粪腐解能为第2茬生菜提供养分。

沼渣是规模化养猪场沼气发酵池池底的半流质物,其持续降解能力较弱,但其 NPK 养分等含量较高(表1)。Odlare 等^[25]报道,增加沼渣用量,土壤氮矿化作用增强,作物产量降低。与之类似的是,本文第1茬生菜生物量随着沼渣的增加而降低。沼渣处理第2茬生菜生物量低于猪粪处理的原因,一方面可能是沼渣持续降解能力较弱,另一方面可能是该处理土壤氮矿

化作用较强。

规模化猪场的猪粪 Cu、Zn 含量较高^[25-26],本文供试猪粪的组成与之类似(表1)。猪粪施入重金属污染土壤,其效果各异:或在高量处理下才显著降低糙米 Cd 含量^[9-10],或降低小麦籽粒 Cd 含量^[11],或低 Cd 猪粪能显著降低小白菜 Cd 含量^[13];或有降低生菜 Cd 含量的趋势^[21-22];或能缓解重金属对水稻的危害,但没有显著降低水稻糙米 Cd 含量^[26-27];或外加 Cd 猪粪提高小白菜 Cd 含量,且小白菜 Cd 含量与猪粪用量显著正相关^[13];或显著提高土壤 Cd 活性(土壤 Cd $6.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、提高小麦 Cd 含量^[28]。本文供试猪粪 Cd 含量低,对生菜 Cd 含量影响与孙华等^[13]的低 Cd 猪粪的效果类似(表2)。因此,一般而言,施用猪粪可降低作物 Cd 含量,但其效果随土壤 Cd 含量、猪粪 Cd 含量等试验条件的不同而有所差异。

规模化猪场的沼液和沼渣重金属含量也较高^[16-17,25],本文供试沼液、沼渣与之类似(表1)。此类沼液施用到农田土壤(Cd 超标或不超标),提高了小白菜、稻米、玉米籽粒的 Cd 含量,甚至其施用量与玉米籽粒 Cd 含量显著正相关^[15-17],本文生菜 Cd 含量对供试沼液的响应与玉米籽粒具有同样的规律(表2)。另外,张进等^[29]报道,沼液没有显著提高稻米 Cd 含量。沼渣可提高芹菜根茎叶的 Cd 含量^[18],而本文供试沼渣降低了生菜 Cd 含量(表2)。

对沼渣或沼液处理而言,第1、2茬生菜 Cd 含量随其生物量增大而显著降低;对猪粪处理而言,第2茬生菜也呈现以上规律,但第1茬生菜 Cd 含量随其生物量减少而显著降低。可见,生物量的稀释效应能揭示沼液、沼渣、猪粪(第2茬)影响生菜地上部 Cd 含量的主要原因,但猪粪处理对第1茬生菜 Cd 含量的效应机制尚待研究。

另外,猪粪能降低作物中 Cd 含量,一方面由于猪粪通过吸附^[30]或提高土壤 pH 等方式显著降低 Cd 污染土壤中 Cd 的生物有效性^[31-33];另一方面由于猪粪腐解产生胡敏酸、胡敏素等高分子有机物,与重金属离子形成不易溶的络合物,也显著降低 Cd 的生物有效性^[34-37]。沼液能提高生菜 Cd 含量,与其中含有较多的提高 Cd 生物活性的有机小分子物质有一定关系^[38]。

规模化猪场废弃物含多种重金属,虽然4年田间试验表明猪粪和沼渣没有显著影响土壤及其微生物特性^[25],但长期田间试验表明,施用猪粪后土壤重金属含量会累积,甚至使糙米 Cd 含量超标^[39]。规模化猪

场的猪粪和沼渣虽然具有一定的降低Cd超标农田中农作物Cd含量的作用,但其风险也不容忽视。因此,在规模化猪场废弃物施用到Cd超标农田前,应对其进行重金属风险评价。

4 结论

规模化猪场的废弃物种类及其用量均显著影响Cd超标土壤上生菜地上部生物量,猪场废弃物用量的影响大于猪场废弃物种类。第1茬生菜的生物量均随3种猪场废弃物用量的增加而降低;第2茬生菜的生物量与沼液或沼渣的用量呈“Λ”形关系,但随猪粪用量的增加而显著提高。从第1茬生菜正常生长来看,该土壤的沼液用量 $\leq 370 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$,猪粪用量 $\leq 10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,沼渣用量 $\leq 15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

猪场废弃物种类及其用量均显著影响生菜地上部Cd含量,且猪场废弃物种类的贡献大于猪场废弃物用量的贡献。3种猪场废弃物处理的第1、2茬生菜Cd含量的平均值大小顺序分别为:沼液>沼渣>猪粪,沼液>猪粪>沼渣。猪粪和沼渣可降低生菜Cd含量;沼液可显著提高生菜Cd累积风险。土壤pH和DTPA-Cd含量不能表征3种猪场废弃物影响生菜Cd吸收的机制,生菜Cd含量的变化主要受生物量稀释效应的影响。

参考文献:

- [1] 曾希柏,李莲芳,梅旭荣.中国蔬菜土壤重金属含量及来源分析[J].中国农业科学,2007,40(11):2507-2517.
- [2] ZENG Xi-bai, LI Lian-fang, MEI Xu-rong. Heavy metal content in soils of vegetable-growing lands in China and source analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(11):2507-2517.
- [3] Huang B, Shi X Z, Yu D S, et al. Environmental assessment of small-scale vegetable farming systems in peri-urban areas of the Yangtze River Delta Region, China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 112:391-402.
- [4] Peris M, Micó C, Recatalá L, et al. Heavy metal contents in horticultural crops of a representative area of the European Mediterranean region[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 378:42-48.
- [5] Türkdogan M K, Kilicel F, Kara K, et al. Heavy metals in soil, vegetables and fruits in the endemic upper gastrointestinal cancer region of Turkey[J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2002, 13:175-179.
- [6] Ike A, Sriprang R, Ono H, et al. Bioremediation of cadmium contaminated soil using symbiosis between leguminous plant and recombinant rhizobia with the *MTL4* and the *PCS* genes[J]. *Chemosphere*, 2007, 66:1670-1676.
- [7] Lu A X, Zhang S Z, Shan X Q. Time effect on the fractionation of heavy metals in soils[J]. *Geoderma*, 2005, 125:225-234.
- [8] 徐明岗,刘平,宋正国,等.施肥对污染土壤中重金属行为影响的研究进展[J].农业环境科学学报,2006,25(增刊):328-333.
- [9] XU Ming-gang, LIU Ping, SONG Zheng-guo, et al. Progress in fertilization on behavior of heavy metals in contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(Suppl):328-333.
- [10] 华璐,陈世宝,白玲玉,等.有机肥对镉锌污染土壤的改良效应[J].农业环境保护,1998,17(2):55-59,62.
- [11] HUA Luo, CHEN Shi-bao, BAI Ling-yu, et al. Amelioration of soils polluted by cadmium and zinc by organic matter[J]. *Agro-environmental Protection*, 1998, 17(2):55-59,62.
- [12] 李瑞美,王果,方玲.钙镁磷肥与有机肥配施对作物镉铅吸收的控制效果[J].土壤与环境,2002,11(4):348-351.
- [13] LI Rui-mei, WANF Guo, FANG Ling. Effects of complexation of calcium, magnesium, phosphate with organic manure on Cd, Pb uptake by crop[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(4):348-351.
- [14] 李瑞美,王果,方玲.石灰与有机物料配施对作物镉铅吸收的控制效果研究[J].农业环境科学学报,2003,22(3):293-296.
- [15] LI Rui-mei, WANF Guo, FANG Ling. Effects of lime complexation or organic manure on uptake of Cd, Pb by crops[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(3):293-296.
- [16] 詹绍军,喻华,冯文强,等.不同有机物料与石灰对小麦吸收镉的影响[J].水土保持学报,2011,25(2):214-217,231.
- [17] ZHAN Shao-jun, YU Hua, FENG Wen-qiang, et al. Effects of different organic material and lime on wheat grow and cadmium uptake[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(2):214-217,231.
- [18] 刘昭兵,纪雄辉,谢运河,等.有机废弃物与化肥配施对污染稻田水稻产量及糙米镉铅含量的影响[J].湖南农业科学,2013,5:38-41,44.
- [19] LIU Zhao-bing, JI Xiong-hui, XIE Yun-he, et al. Effects of combined application of organic wastes and fertilizer on rice yield and contents of Cd and Pb in brown rice in contaminated paddy field[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2013, 5:38-41,44.
- [20] 孙华,李俊华,褚贵新,等.添加外源镉有机肥对小白菜产量和品质的影响[J].新疆农业科学,2013,50(2):286-293.
- [21] SUN Hua, LI Jun-hua, CHU Gui-xin, et al. Effect of adding exogenous cadmium organic fertilizer on the yield and quality of Chinese cabbage[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2013, 50(2):286-293.
- [22] 杨静.规模化养猪场沼液的农用现状与对策[J].天津农业科学,2010,16(6):99-101.
- [23] YANG Jing. Status and countermeasures of biogas slurry of scale pig-gery[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2010, 16(6):99-101.
- [24] 赵麒麟,伍钧,陈璧瑕,等.施用沼液对土壤和玉米重金属累积的影响[J].水土保持学报,2012,26(2):251-255.
- [25] ZHAO Qi-lin, WU Jun, CHEN Bi-xia, et al. Effect of biogas slurry on heavy metal accumulation of soil and maize[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(2):251-255.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 马智宏,李吉进,潘立刚,等.不同有机肥处理对土壤及芹菜中重金

- 属残留的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(21): 9181-9183.
- MA Zhi-hong, LI Ji-jin, PAN Li-gang, et al. The influence of different organic fertilizer on the heavy metal residual in the soil and celery[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(21): 9181-9183.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 18877—2009 有机无机复混肥料[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC, Standardization Administration of the PRC. GB 18877—2009 Organic-inorganic compound fertilizer[S]. Beijing: China Standards Press, 2009.
- [20] 中华人民共和国农业部. NY 525—2012 有机肥料[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- The Ministry of Agriculture of the PRC. NY 525—2012 Organic fertilizer[S]. Beijing: China Standards Press, 2012.
- [21] 唐明灯, 艾绍英, 李盟军, 等. 有机肥对生菜生长及其 Cd 含量的影响[J]. 广东农业科学, 2011, 38(24): 42-45.
- TANG Ming-deng, AI Shao-ying, LI Meng-jun, et al. Effect of organic manure on the growth and Cd concentration of *Lactuca sativa*[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2011, 38(24): 42-45.
- [22] 唐明灯, 艾绍英, 罗英健, 等. 有机无机配施对生菜生长及其 Cd、Pb 含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(6): 1104-1110.
- TANG Ming-deng, AI Shao-ying, LUO Ying-jian, et al. Effects of organic manures on the growth, Cd and Pb concentrations of lettuce plant based on the same nitrogen level[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(6): 1104-1110.
- [23] 中华人民共和国卫生部. GB 2762—2012 食品中污染物限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- Ministry of Health of the PRC. GB 2762—2012 Maximum levels of contaminants in foods[S]. Beijing: China Standards Press, 2012.
- [24] 章永松, 倪吾钟, 林咸永, 等. 杭州市郊菜园土壤的有效养分状况与施肥对策[M]//谢建昌, 陈际型, 等. 菜园土壤肥力与蔬菜合理施肥. 南京: 河海大学出版社, 1997: 43-46.
- ZHANG Yong-song, NI Wu-zhong, LIN Xian-yong, et al. Available nutrient status and fertilization countermeasures in vegetable garden soils of suburbs of Hangzhou city[M]//XIE Jian-chang, CHEN Ji-xing. Fertility of vegetable garden soils and suitable fertilization on vegetables. Nanjing: Hehai University Press, 1997: 43-46.
- [25] Odlare M, Pell M, Svensson K. Changes in soil chemical and microbiological properties during 4 years of application of various organic residues[J]. *Waste Management*, 2008, 28: 1246-1253.
- [26] 周利强, 吴龙华, 骆永明, 等. 有机物料对污染土壤上水稻生长和重金属吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(2): 383-388.
- ZHOU Li-qiang, WU Long-hua, LUO Yong-ming, et al. Effect of organic amendments on the growth and heavy metal uptake of rice on a contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(2): 383-388.
- [27] 周利强, 尹斌, 吴龙华, 等. 有机物料对污染土壤上水稻重金属吸收的调控效应[J]. 土壤, 2013, 45(2): 227-232.
- ZHOU Li-qiang, YIN Bin, WU Long-hua, et al. Effects of different organic amendments on uptake of heavy metals in rice from contaminated soil[J]. *Soils*, 2013, 45(2): 227-232.
- [28] 潘逸, 周立祥. 施用有机物料对土壤中 Cu、Cd 形态及小麦吸收的影响: 田间微区试验[J]. 南京农业大学学报, 2007, 30(2): 142-146.
- PAN Yi, ZHOU Li-xiang. Influence of applying organic manures on the chemical form of Cu and Cd in the contaminated soil and on wheat uptake field micro-plot trials[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2007, 30(2): 142-146.
- [29] 张进, 张妙仙, 单胜道, 等. 沼液对水稻生长产量及其重金属含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(10): 2005-2009.
- ZHANG Jin, ZHANG Miao-xian, SHAN Sheng-dao, et al. Growth status, grain yield and heavy metals content of rice (*Oryza sativa* L.) as affected by biogas slurry application[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(10): 2005-2009.
- [30] 曹生宪, 魏世强, 陈洪敏, 等. 典型有机肥——猪粪对重金属镉的吸持累积特性[J]. 南方农业, 2008, 2(2): 11-13.
- CAO Sheng-xian, WEI Shi-qiang, CHEN Hong-min, et al. Characteristics of heavy metals absorption by typical manure: pig shit[J]. *South China Agriculture*, 2008, 2(2): 11-13.
- [31] 张亚丽, 沈其荣, 谢学俭, 等. 猪粪和稻草对镉污染黄泥土生物活性的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1997-2000.
- ZHANG Ya-li, SHEN Qi-rong, XIE Xue-jian, et al. Effect of pig manure and rice straw on biological activity of Cd contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 1997-2000.
- [32] 陕红, 刘荣乐, 李书田. 施用有机物料对土壤镉形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 136-144.
- SHAN Hong, LIU Rong-le, LI Shu-tian. Cadmium fraction in soils as influenced by application of organic materials[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(1): 136-144.
- [33] 李平, 王兴祥, 郎漫, 等. 改良剂对 Cu、Cd 污染土壤重金属形态转化的影响[J]. 中国环境科学, 2012, 32(7): 1241-1249.
- LI Ping, WANG Xing-xiang, LANG Man, et al. Effects of amendments on the fraction transform of heavy metals in soil contaminated by copper and cadmium[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(7): 1241-1249.
- [34] Chang C, Ent Z T. Nitrate leaching losses under repeated cattle feedlot manure applications in Southern Alberta[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1996, 25: 145-153.
- [35] Chen Y. Organic matter reactions involving micronutrients in soils and their effect on plants[M]//Piccolo A. Humic substances in terrestrial ecosystems. Amsterdam: Elsevier, 1996: 507-530.
- [36] 华璐, 白玲玉, 韦东普, 等. 有机肥-镉-锌交互作用对土壤镉锌形态和小麦生长的影响[J]. 中国环境科学, 2002, 22(4): 346-350.
- HUA Luo, BAI Ling-yu, WEI Dong-pu, et al. Effects of interaction by organic manure-Cd-Zn formation in soil and wheat growth[J]. *China Environmental Science*, 2002, 22(4): 346-350.
- [37] Walker D J, Clemente R, Roig A, et al. The effects of soil amendments on heavy metal bioavailability in two contaminated Mediterranean soils[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 122: 303-312.
- [38] 孙小峰, 吴龙华, 骆永明. 有机修复剂在重金属污染土壤修复中的应用[J]. 应用生态学报, 2006, 17(6): 1123-1128.
- SUN Xiao-feng, WU Long-hua, LUO Yong-ming. Application of organic agents in remediation of heavy metals contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(6): 1123-1128.
- [39] 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.