

doi:10.7668/hbxb.2014.S1.060

施用沼渣对白菜及土壤重金属含量状况的影响

杨军芳,贾良良,冯伟,韩宝文,刘孟朝,邢素丽

(河北省农林科学院 农业资源环境研究所,河北 石家庄 050051)

摘要:以规模化养猪场猪粪为原料发酵的沼渣作为供试材料,研究施用沼渣对白菜及土壤重金属含量状况影响。结果表明:在施用化肥基础上,传统沼渣用量条件下白菜生物产量显著高于不施肥和单施化肥处理,低于传统施用猪粪处理;与不施肥和单施化肥处理相比,在施用化肥基础上施用不同用量沼渣能显著增加白菜镉、铜、锌及降低铬、砷的含量水平,且重金属镉、铜、锌含量随沼渣用量增加呈直线上升关系,当季施用沼渣不会对白菜造成重金属污染风险,但不排除长期施用沼渣因土壤重金属积累而对白菜重金属造成潜在污染风险;从土壤重金属积累状况来看,与不施肥和单施化肥处理相比,施用不同用量沼渣能增加土壤全铬、全铜、全锌的含量水平,其含量水平随沼渣用量呈直线上升趋势,长期大量施用沼渣对土壤重金属存在污染风险。在同等用量条件下,沼渣作有机肥其安全风险性大于猪粪作有机肥。

关键词:沼渣;白菜;土壤;重金属

中图分类号:S147.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-7091(2014)增刊-0322-06

Effect of Contents of Heavy Metals by Application of Biogas Residue in Chinses Cabbage and Soil

YANG Jun-fang, JIA Liang-liang, FENG Wei, HAN Bao-wen, LIU Meng-chao, XING Su-li

(Institute of Agro-resource and Enviroment, Hebei Academy of Agriculture and
Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: The main content of this article was to study the effects of heavy metals contents by application of biogas residue in Chinese cabbage and soil. It used Large-scale pig farm manure as raw materials and fermentation biogas residue as tested material. The results showed that: the biomass yield of the Chinese cabbage in condition of the traditional use level of biogas residue, which was on the basis of the application of chemical fertilizer, was significantly higher than non-fertilizer and only chemical fertilizer treatment, but it was lower than traditional the pig manure treatment. Comparing with non-fertilizer and only chemical fertilizer treatments, the application of biogas residue on the basis of chemical fertilizer could significantly increase the contents of Cd, Cu, Zn in chinese cabbage, reduce the contents of Cr, As in it; also, the contents of heavy metals (Cd, Cu, Zn) increased with the increasing use level of biogas residue, their relationship was rising straight-linearly, the application of biogas residue in season would't cause the risk of heavy metal pollution in Chinese cabbage, but we couldn't ruler out the potential risk of heavy metals pollution in Chinese cabbage with long-term application of accumulation of heavy metals in the soil; From the accumulation of heavy metals in soil, comparing with non-fertilizer and only chemical fertilizer treatments, application of biogas residue on the basis of chemical fertilizer could increase the content of total Cr, total Cu, total Zn in soil, the relationship with the increasing use of biogas residue was also straight-linearly, a large number of long-term use of biogas residue could lead to soil heavy metal pollution risk. Under the same dosage conditions, biogas residue as organic fertilizer security risk was greater than the pig manure.

Key words: Biogas residue; Chinese cabbage; Soil; Heavy mental

收稿日期:2014-10-12

基金项目:河北省农林科学院青年基金项目(A2012130102)

作者简介:杨军芳(1975-),河北灵寿人,副研究员,主要从事植物营养与畜禽废弃物资源化利用研究。

通讯作者:贾良良(1975-),河北武强人,研究员,博士,主要从事农田养分资源管理与精准农业研究。

沼渣是畜禽废弃物、人畜粪便、有机生活垃圾和作物秸秆等按一定比例混合接种特定微生物经厌氧发酵后所产生的沼气利用后的剩余残渣。它除了含有大量有机质及氮、磷、钾等营养元素外,还含有丰富的微量元素、多种氨基酸、维生素等生物活性物质^[1],其在农田施用不仅能改良土壤、培肥地力^[2-4],而且还有利于提高作物产量、改善产品品质,增强作物的抗冻、抗旱和抗病能力^[5-6]。

然而,目前我国的沼气发酵原料以畜禽粪便为主,由于在畜禽养殖过程中,铜、锌、砷、铬等微量元素作为饲料添加剂在畜禽养殖中的应用越来越广泛,畜禽对微量元素添加剂的利用率很低,95%随粪便排出^[7],从而导致畜禽粪便和以畜禽粪便为主的商品有机肥肥料重金属含量增加。张树清等^[8]对我国北京、山东、浙江、江苏、吉林、宁夏等地典型规模化养殖场畜禽粪便重金属含量状况进行了研究,结果发现,55个猪、鸡粪样中,猪粪中铜、锌、铬、砷的平均含量分别为466,1 013,50,20 mg/kg;鸡粪中铜、锌、铬、砷的平均含量分别为123,308,61,6 mg/kg,对照国家《农用污泥中污染物控制标准》,部分畜禽粪便重金属含量超标;单英杰等^[9]对浙江省155个畜禽粪样重金属含量进行了分析,结果表明,铜、锌和砷含量平均值分别为525.38,897.14,10.01 mg/kg,与我国农用污泥污染物控制的国家标准相比,铜、锌和砷的超标率分别为53.55%,43.87%,0.65%;黄玉溢等^[10]对广西规模化养殖场猪粪样品测试结果表明,猪粪中的铜、锌、铬和镉含量分别为760.7,1 042.6,18.9,1.3 mg/kg,按照德国腐熟堆肥中重金

属限量标准,猪粪中铜、锌含量严重超标。畜禽粪便中的重金属元素因沼气发酵过程中有机物料的生物分解而浓缩在沼渣中,从而增加了沼渣农田施用的安全风险。

前人在沼渣、沼液营养成分对作物产量、品质及其施用技术等方面做了大量研究。然而,随着人们对农产品质量的日益关注,沼渣、沼液中的重金属尤其是毒性重金属在土壤及农产品中的积累状况也越来越引起人们的重视,虽然沼渣中重金属含量状况及其农用对土壤质量的影响已经引起部分学者关注,但沼渣施用对土壤及作物重金属含量状况影响研究仍然很少。本研究以大型养猪场产生沼渣为供试肥料,以白菜为供试作物,研究施用沼渣对土壤及白菜镉、铬、砷、铜和锌含量状况影响,以期对沼渣的安全合理施用提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料

盆栽试验于2012年8-11月在河北省农林科学院农业资源环境研究所网室内进行,供试作物为白菜,品种为早心白(河北冀蔬科技有限公司提供)。供试土壤为石灰性壤质褐土,采自河北省农林科学院农业资源环境研究所网室0~20 cm表层土,主要种植模式为小麦/玉米轮作。供试的猪粪、沼渣均取自规模化养猪场“河北省兆江牧业”。供试土壤、猪粪、沼渣基本理化性状见表1,2。试验所用氮肥为尿素(含N 46%)、磷肥为重过磷酸钙(含P₂O₅ 43%)、钾肥为硫酸钾(含K₂O 50%)。

表1 供试土壤主要理化性状

Tab.1 Principal chemical properties of tested soil, biogas residue and pig manure

名称 Item	pH 值 pH value	有机质/(g/kg) Organic matter	全氮/(g/kg) Total N	速效磷/(mg/kg) Available P	速效钾/(mg/kg) Available K	全磷/(g/kg) Total P	全钾/(g/kg) Total K
土壤 Soil	7.82	12.74	0.45	8.49	88.6	—	—
沼渣 Biogas residue	7.71	337.62	14.80	—	—	6.5	9.5
猪粪 Pig manure	7.65	462.58	31.24	—	—	13.9	8.7

表2 供试土壤、沼渣、猪粪重金属含量状况

Tab.2 Heavy metal contents of tested soil, biogas residue and pig manure

名称 Item						mg/kg				
	全镉 Total Cd	全铬 Total Cr	全铜 Total Cu	全锌 Total Zn	全砷 Total As	有效镉 Available Cd	有效铬 Available Cr	有效铜 Available Cu	有效锌 Available Zn	有效砷 Available As
土壤 Soil	0.286	66.47	27.80	157.94	12.70	0.057	0.11	1.51	9.85	0.0107
沼渣 Biogas residue	0.891	17.43	387.49	545.60	15.64	—	—	—	—	—
猪粪 Pig manure	0.617	12.71	228.06	361.25	10.57	—	—	—	—	—

1.2 试验设计与方法

试验为土培盆栽试验,采用32 cm×30 cm 塑料

盆,每盆装土15 kg。每盆肥料用量依据大田用量折算后与过3 mm 筛土壤混合均匀后装盆。供试猪粪、

沼(猪)渣风干后过筛,猪粪作底肥传统施用量为 $9 \times 10^4 \text{ kg/hm}^2$,沼(猪)渣作底肥分别设低(L, $4.5 \times 10^4 \text{ kg/hm}^2$)、中(M, $9 \times 10^4 \text{ kg/hm}^2$)、中高(MH, $1.35 \times 10^5 \text{ kg/hm}^2$)、高(H, $1.8 \times 10^5 \text{ kg/hm}^2$)4个用量水平,化肥用量分别为纯 N 540 kg/hm^2 、 P_2O_5 240 kg/hm^2 、 K_2O 300 kg/hm^2 。

试验共设7个处理,每个处理设4次重复,各处理设计见表3,试验猪粪、沼渣、磷钾肥一次性底施,氮肥40%底施,剩余60%平均分3次施用。

表3 盆栽试验设计

Tab.3 Design of pot experiment

编码	处理	底肥	追肥
Code	Treatment	Base fertilizer	Dressing
I	CK	不施肥	不施肥
II	HF	氮磷钾	氮肥
III	ZF	猪粪+氮磷钾	氮肥
IV	ZZ1	沼渣(低量,L)+氮磷钾	氮肥
V	ZZ2	沼渣(中量,M)+氮磷钾	氮肥
VI	ZZ3	沼渣(中高量,MH)+氮磷钾	氮肥
VII	ZZ4	沼渣(高量,H)+氮磷钾	氮肥

试验于2012年8月12日播种,在白菜苗期、中期和收获期分别取白菜样品测定其产量,11月6日收获,收获后取不同处理白菜和土壤样品进行重金属含量状况测试与分析。

土壤、供试的猪粪和沼渣(猪)自然风干、碾碎,土壤分别过2,0.149 mm孔径筛,供试猪粪和沼渣过0.149 mm孔径筛。白菜样品以去离子水冲洗3次后,置于烘箱中 105°C 杀青30 min, $65 \sim 70^\circ\text{C}$ 烘24 h,碾碎,过0.149 mm孔径筛。土壤和植株样品分别检测重金属含量,测定项目为镉、铬、铜、锌、砷5种元素,土壤全镉、全铬、全铜、全锌、全砷分别参照 GB/T17138-1997、GB/T22105. 2-2008、GB/T17141-1997、HJ491-2009 进行样品预处理,用 ICP-MS 进行测定;土壤有效镉、有效铜、有效锌分别参照 GB/T23739-2009、NY/T890-2004 进行样品预处理和测定,有效铬采用连续顺序提取法,提取顺序为高纯水 $1 \text{ mol/L NH}_4\text{Ac}$,土液比均为1:10,振荡2 h,平衡2 h^[11],采用石墨炉和原子吸收光谱法测定,有效砷采用 0.05 mol/L 的 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 溶液,室温下放入振荡机中振荡16 h,在3 000 r/min的转速下离心15 min,用孔径为 $0.45 \mu\text{m}$ 的滤膜抽滤到10 mL离心管^[12],采用石墨炉和原子吸收光谱法测定;供试有机肥和植株全镉、全铬、全铜、全锌、全砷分别参照 GB/T5009. 15-2003, GB/T5009. 123-2003, GB/T5009. 13-2003, GB/T5009. 14-2003, GB/T5009. 11-2003 进行样品预处理和测定。

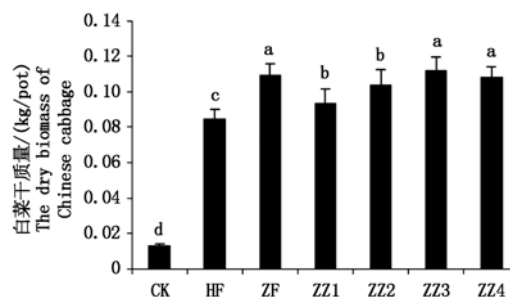
1.3 数据处理

试验数据用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 17.0 处理。

2 结果与分析

2.1 施用沼渣对白菜生物产量影响

由图1可知,在底施化肥基础上施用猪粪及不同用量沼渣处理,白菜生物产量均显著高于不施肥和单施化肥处理。与传统底施猪粪相比,在同等用量情况下,底施沼渣有机肥处理的白菜生物产量显著低于底施猪粪处理,当底施沼渣用量达到中高及以上用量时,白菜生物产量才达到或高于传统施用猪粪处理。这说明,沼渣作为有机肥底施时,其肥效低于传统施用有机肥猪粪,这与猪粪中氮、磷养分含量较高有直接关系。



不同小写字母表示各处理间差异显著 ($P < 0.05$)。图2~11同。

Different lowercase letters indicated signification

difference of all treatments ($P < 0.05$). The same as Fig. 2 - 11.

图1 施用沼渣对白菜生物产量影响

Fig.1 Effect of application of biogas residue on Chinese cabbage biomass yield

2.2 施用沼渣对白菜及土壤重金属含量状况影响

2.2.1 施用沼渣对白菜及土壤镉含量状况影响

由图2可知,单施化肥与不施肥相比,白菜重金属镉含量差异不显著,单施化肥不会增加白菜镉含量。底施有机肥能显著增加白菜对镉吸收,增加白菜镉含量水平。与传统施用猪粪有机肥相比,除低量施用沼渣外,其他沼渣用量处理均能显著增加白菜对镉的吸收积累,且白菜镉含量随沼渣用量增加呈线性上升趋势。从土壤镉测试结果来看(图3),不同施肥处理之间土壤重金属全镉含量没有显著差异,但不同用量沼渣处理,土壤全镉含量随沼渣用量有增加趋势;土壤有效态镉易于迁移,在土壤中有较强活性,与其他重金属相比,更易被作物吸收^[13],因此,与不施和单施化肥相比,在化肥基础上增施沼渣作有机肥,随着白菜体内镉含量水平及生物产量增加,白菜从土壤携出更多的有效态镉,从而显著降低了土壤有效态镉含量。

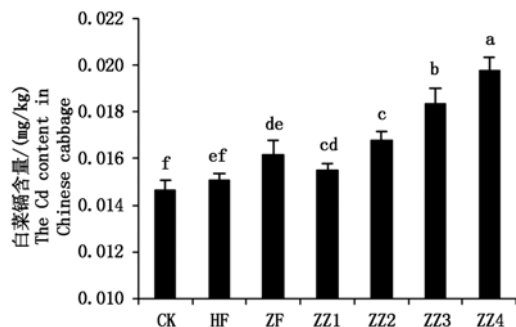


图2 施用沼渣对白菜镉含量状况影响

Fig.2 Effect of application of biogas residue on the Cd content of Chinese cabbage

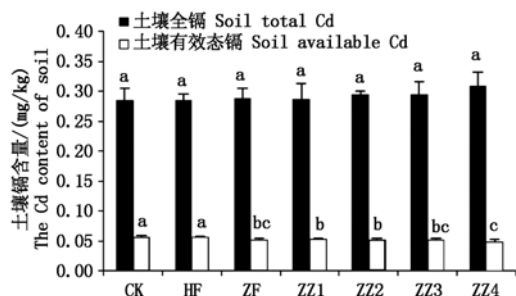


图3 施用沼渣对土壤镉含量状况影响

Fig.3 Effect of application of biogas residue on the Cd content of soil

2.2.2 施用沼渣对白菜及土壤铬含量状况影响

由图4可知,与不施肥相比,施用化肥尤其在化肥基础上施用有机肥能显著降低白菜重金属铬的含量,在化肥基础上施用传统猪粪与施用不同用量沼渣白菜重金属铬含量没有显著差异;从土壤铬测试结果来看(图5),在施用化肥基础上高量(H)施用沼渣与不施肥和单施化肥相比能显著增加土壤全铬含量水平,不同沼渣用量水平与传统施用猪粪相比,土壤全铬含量水平没有显著差异,但沼渣处理土壤全铬含量水平随沼渣用量水平增加而升高;从土壤有效铬来看,不同处理间土壤有效态铬含量没有显著差异。由此可知,施用沼渣可提高土壤全铬含量水平,但对土壤有效态铬含量水平没有影响。

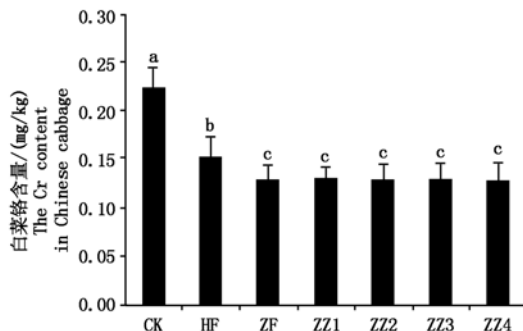


图4 施用沼渣对白菜铬含量状况的影响

Fig.4 Effect of application of biogas residue on the Cr content of Chinese cabbage

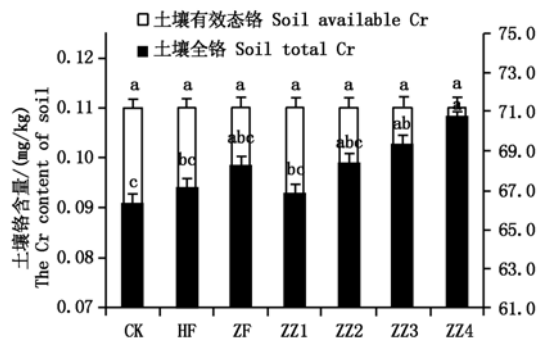


图5 施用沼渣对土壤铬含量状况影响

Fig.5 Effect of application of biogas residue on the Cr content of soil

2.2.3 施用沼渣对白菜及土壤铜含量状况影响

由图6可知,单施化肥与不施肥相比,白菜重金属铜含量没有显著差异。在施用化肥基础上施用有机肥白菜重金属铜含量均显著高于不施肥和单施化肥处理,这与有机肥中铜含量较高有关;在施用化肥基础上施用不同用量沼渣,白菜重金属铜含量均显著高于施用传统猪粪处理,且白菜重金属铜含量随沼渣用量增加而显著增加;从土壤铜测试结果来看(图7),在化肥基础上施用有机肥与不施肥和单施化肥相比,能显著提高土壤全铜含量,在施用化肥基础上低量施用沼渣与传统猪粪有机肥施用相比,土壤全铜含量差异不显著,但中及以上用量施用沼渣与猪

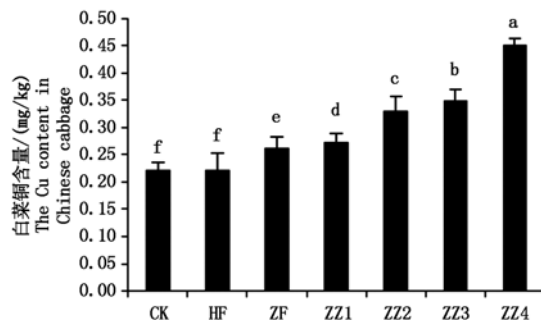


图6 施用沼渣对白菜铜含量状况影响

Fig.6 Effect of application of biogas residue on the Cu content of Chinese cabbage

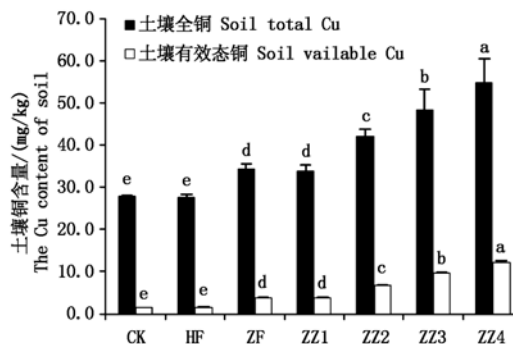


图7 施用沼渣对土壤铜含量状况影响

Fig.7 Effect of application of biogas residue on the Cu content of soil

粪有机肥相比,差异显著,且土壤全铜含量随沼渣用量呈显著增加。土壤有效态铜与土壤全铜含量水平变化趋势基本一致。

2.2.4 施用沼渣对白菜及土壤锌含量状况影响

由图 8 可知,单施化肥与不施肥相比对白菜重金属锌没有显著影响,在化肥基础上施用有机肥能不同程度增加白菜锌的含量水平。与传统施用猪粪相比,除低量施用沼渣外,其他沼渣用量处理白菜锌含量均显著高于施用猪粪处理,且白菜重金属锌含量随沼渣用量增加而显著增加。从土壤锌测试结果来看(图 9),与不施肥和单施化肥相比,施用有机肥能显著增加土壤全锌含量水平。与在化肥基础上施用猪粪有机肥相比,除低量施用沼渣外,中及以上沼渣用量处理土壤全锌含量均显著高于施用猪粪有机肥。土壤有效态锌与土壤全锌含量水平变化趋势基本一致。

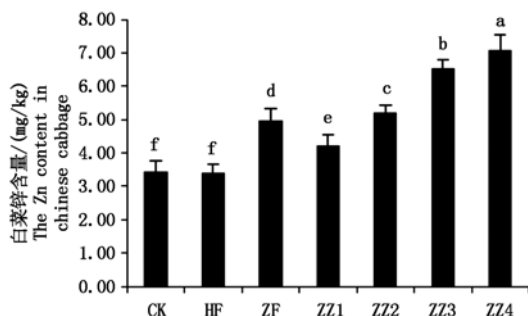


图 8 施用沼渣对白菜锌含量状况影响

Fig. 8 Effect of application of biogas residue on the Zn content of Chinese cabbage

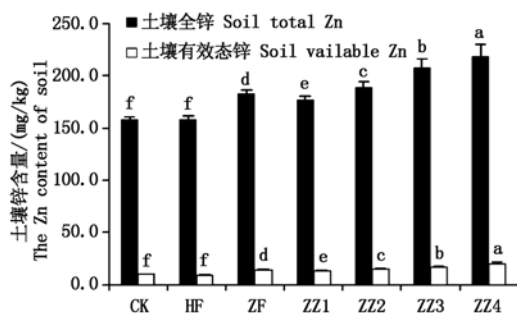


图 9 施用沼渣对土壤锌含量状况影响

Fig. 9 Effect of application of biogas residue on the Zn content of soil

2.2.5 施用沼渣对白菜及土壤砷含量状况影响

由图 10 可知,不同施肥处理与不施肥相比,均能显著降低白菜重金属砷的含量水平。单施化肥处理、在化肥基础上施用猪粪及不同用量沼渣处理间,白菜重金属砷含量均没有显著差异,因此施肥无论是单施化肥还是施用有机肥均能有效降低白菜对重金属砷的含量水平。从土壤砷测试结果来看(图 11),除高量施用沼渣外,各处理间土壤全砷含量没有显

著差异,高量施用沼渣能增加土壤全砷含量。从土壤有效砷来看,与不施肥和单施化肥相比,在化肥基础上施用有机肥能显著提高土壤有效态砷含量水平。与在化肥基础上施用猪粪有机肥相比,低、中、中高量施用沼渣土壤有效态砷含量显著低于前者,而高量施用沼渣土壤有效态砷含量则显著高于前者。

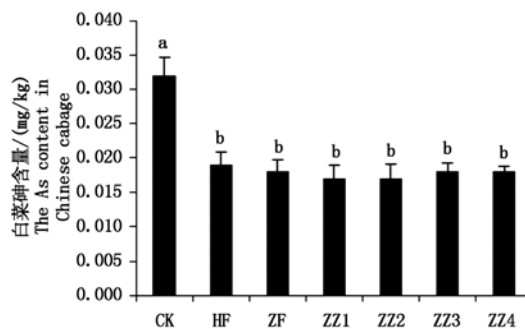


图 10 施用沼渣对白菜砷含量状况影响

Fig. 10 Effect of application of biogas residue on the As content of Chinese cabbage

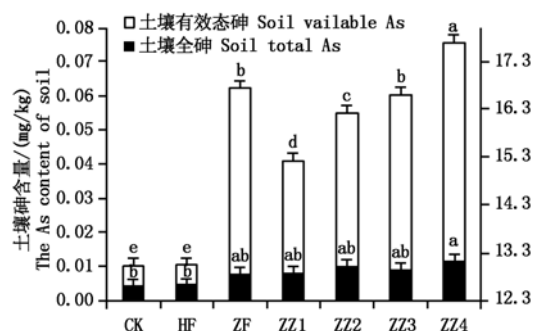


图 11 施用沼渣对土壤砷含量状况影响

Fig. 11 Effect of application of biogas residue on the As content of soil

3 讨论与结论

沼气发酵过程中,由于铵态氮的挥发损失及养分以离子态形式溶解在沼液里,降低了沼渣中氮、磷养分的含量水平,因此,同等用量水平下,沼渣肥效低于猪粪肥效,因此,增加沼渣用量才能达到传统有机肥的肥效水平。

沼渣对白菜重金属含量状况影响,与重金属元素特性、沼渣用量直接相关。铬是具有可变氧化数的重金属元素,主要以三价铬和六价铬 2 种形态存在于土壤环境中,三价铬在土壤中常以难溶氢氧化物的形式存在,溶液中的三价铬浓度很小,所以毒性也很小,六价铬溶解度大,毒性强,然而土壤水溶性六价铬含量本来很少,且当土壤有机质含量大于 2% 时,六价铬几乎全部被还原为三价铬^[14-15],土壤中的砷大多为无机砷,主要以三价砷和五价砷形式存在土壤环境中,New ton 等^[16-18]发现苹果园污染土壤中的砷吸附在土壤颗粒上,并主要以五价砷为

主,三价砷所占比例不到8%,且土壤对砷有强烈的固定作用,其在土壤中的移动性较差,通常集中在表土层10 cm左右。由于铬和砷在土壤中的化学和物理特性,因此,施用沼渣后,虽然土壤中全铬、有效态砷含量有所增加,但白菜生物量产量也相应增加,在一定程度上稀释了白菜体内铬、砷的浓度,因此,白菜铬、砷含量水平总体呈下降趋势。镉是易被作物吸收的重金属元素,只要土壤中镉的含量稍有所增加,就会使作物体内镉含量相应增加^[19],铜、锌既是重金属元素,也是作物生长发育所必需的营养元素,施肥对土壤及作物铜、锌的影响依次为铜>锌^[20-24],因此随着沼渣用量增加,白菜重金属镉、铜、锌含量水平呈显著增加趋势,但白菜镉、铜、锌含量均低于国家食品卫生标准^[25]规定的范围($Cd \leq 0.05 \text{ mg/kg}$, $Cu \leq 10 \text{ mg/kg}$, $Zn \leq 20 \text{ mg/kg}$),当季施用沼渣不会对白菜造成重金属污染风险,但不排除长期施用沼渣因土壤重金属积累而对白菜重金属造成潜在污染风险。

施用沼渣能增加土壤全铬、铜、锌及有效态铜、锌、砷的含量水平,其含量水平随沼渣用量呈直线上升趋势,长期大量施用沼渣作有机肥可能导致土壤铬、铜、锌重金属元素的累积,从而加大土壤污染的安全风险。与不施肥(CK)相比,沼渣传统用量条件下,土壤全Cr、全Cu和全Zn的增量分别为2.0, 14.2, 31.0 mg/kg,若以此作为土壤重金属的年增长量,以100年土壤重金属污染物不超标为标准,则在本试验土壤条件下,供试土壤全Cr、全Cu和全Zn分别在92, 13, 5年达到土壤无机污染物的环境质量二级标准值控制上限,对土壤存在重金属污染风险。因此,沼渣用作底肥施用,既要考虑供试土壤重金属含量背景值,也要考虑长期施用沼渣对土壤重金属积累影响,以达到沼渣资源化利用和土壤环境污染控制的双重作用。

参考文献:

- [1] 杨合法,范聚芳,牛新胜,等.沼肥与生物有机无机复合肥在保护地蔬菜上应用效果研究[J].华北农学报,2006,21(增刊):63-67.
- [2] 黄勤楼,翁伯奇,唐祖华,等.水稻应用沼肥效果研究[J].中国生态农业学报,2004,12(2):108-110.
- [3] 樊文华,刘晋峰,王志伟,等.施用沼肥对温室土壤养分和重金属的影响[J].山西农业大学学报:自然科学版,2011,31(1):1-4.
- [4] 张玉凤,董亮,李彦,等.沼肥对大豆产量、品质、养分和土壤化学性质的影响[J].水土保持学报,2011,25(4):135-138,143.
- [5] 赵凤莲.不同来源沼肥对蔬菜产量和品质的影响及环境效应研究[D].泰安山东农业大学,2011.
- [6] 雄飞.沼肥对蔬菜产量、品质及其环境效应的研究[D].南宁广西大学,2012.
- [7] 闫秋良,刘福柱.通过营养调控缓解畜禽生产对环境的污染[J].家畜生态,2002,23(3):68-70.
- [8] 张树清,张夫道,刘秀梅,等.规模化养殖畜禽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.
- [9] 单英杰,章明奎.不同来源畜禽粪的养分和污染物组成[J].中国生态农业学报,2012,20(1):80-86.
- [10] 黄玉溢,刘斌,陈桂芬,等.规模化养殖场猪配合饲料和粪便中重金属含量研究[J].广西农业科学,2007,38(5):544-546.
- [11] 刘云惠,魏显有,王秀敏,等.土壤中铬的吸附与形态提取研究[J].河北农业大学学报,2000,23(1):16-20.
- [12] Song J, Zhao F J, McGrath S P, et al. Influence of soil properties and aging on arsenic phytotoxicity. Environmental Toxicology and Chemistry [J], 2006, 25(6): 1663-1670.
- [13] 不同积累镉能力的白菜吸收积累镉特征研究[J].华北农学报,2011,26(增刊):170-175.
- [14] 王美,李书田,马义兵,等.长期不同施肥措施对土壤和作物重金属累积的影响[J].农业环境科学学报,2014,33(1):63-74.
- [15] 周加祥,刘铮.铬污染土壤修复技术研究进展[J].环境污染治理技术与设备,2000,1(4):52-56.
- [16] 孙歆,韦朝阳,王五一.土壤中砷的形态分析和生物有效性研究进展[J].地球科学进展,2006,21(6):625-632.
- [17] New ton K, Am aras iriv ardena D, Xing B. Distribution of soil arsenic species, lead and arsenic bound to humic acid molar mass fractions in a contaminated apple orchard [J]. Environmental Pollution, 2006, 143: 197-205.
- [18] 林志灵,张杨珠,曾希柏,等.土壤中砷的植物有效性研究进展[J].湖南农业科学,2011(3):52-56.
- [19] 孙铁珩,周启星,李培军.污染生态学[M].北京:科学出版社,2000:284-285.
- [20] 于锐.不同施肥对黑土团聚体、有机碳及微量元素含量影响研究[D].长春中国科学院东北地理与农业生态研究所,2013.
- [21] 李其林.重庆市土壤-作物系统重金属特征研究[D].西南大学,2008.
- [22] 茹淑华,张国印,孙世友,等.重金属Cu、Zn、Pb和Cd在土壤-萝卜系统中的迁移积累规律[J].华北农学报2013,28(增刊):361-365.
- [23] 王丽英,陈丽莉,张彦才,等.河北省设施蔬菜土壤微量金属元素状况评价及来源分析[J].华北农学报,2009,24(增刊):268-272.
- [24] 白彦真,谢英荷,张小红.重金属污染土壤植物修复技术研究进展[J].山西农业科学,2012,40(6):695-697.
- [25] 祖旭宇,李元.蔬菜及土壤的铅、镉、铜和锌污染及评价方法初探[J].云南农业大学学报,2004,19(4):457-461.