

翟振, 熊波, 张莉, 等. 动物尸体无害化处理物对油菜生长及重金属富集特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(5): 985–991.

ZHAI Zhen, XIONG Bo, ZHANG Li, et al. Effects of organic manure from animal carcasses on *Brassicacamestris* L. growth and soil heavy metal accumulation [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(5): 985–991.

动物尸体无害化处理物对油菜生长及重金属富集特征的影响

翟振¹, 熊波², 张莉², 蒋彬², 李传友², 逢焕成¹, 李玉义^{1*}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 北京市农业机械试验鉴定推广站, 北京 100079)

摘要: 采用室内盆栽试验, 以畜禽养殖场动物尸体无害化处理物为有机肥, 研究了单施化肥(NPK)、化肥+单倍有机肥(NPK+M)、化肥+倍量有机肥(NPK+2M)三种施肥方式对油菜生长、叶片生理特性及植株和土壤中重金属积累的影响, 探讨施用动物尸体无害化处理物在蔬菜种植方面的安全性。结果表明: 与 NPK 处理相比, NPK+M 和 NPK+2M 处理可显著提高油菜地上部干重 50.53%~221.05% ($P<0.05$); 同时, NPK+2M 处理还可使油菜中叶绿素含量 (SPAD) 及净光合速率 (P_n) 显著提高 22.85% 和 21.98% ($P<0.05$); NPK+2M 处理条件下三种主要抗氧化酶超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT) 和过氧化物酶 (POD) 的活性均达到最高, 同时膜脂过氧化产物丙二醛 (MDA) 含量较 NPK 处理显著降低 ($P<0.05$)。与 NPK 相比, NPK+M 和 NPK+2M 处理土壤中 Cr、Cu、Cd、Pb 的浓度均出现不同程度的增加, 其中 NPK+2M 处理条件下 Cr、Cd 元素含量与 NPK 处理相比有了显著提高 ($P<0.05$), 而 Cu、Pb 元素含量与 NPK 处理相比无显著差异 ($P<0.05$), NPK+2M 处理土壤中 Cr、Cu、Cd、Pb 含量远低于《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995) 中 II 类土壤污染物限量标准。NPK+2M 处理的油菜植株地上部、地下部重金属含量与 NPK 处理相比均无显著增加 ($P>0.05$), 其地上部 Cr、Cd 和 Pb 含量远低于《食品安全国家标准》(GB 2762—2012) 对新鲜蔬菜中重金属污染物含量的限制。

关键词: 动物尸体无害化处理物; 土壤施肥; 白菜型油菜; 重金属; 富集特征

中图分类号: X713 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2016)05-0985-07 doi:10.11654/jaes.2016.05.024

Effects of organic manure from animal carcasses on *Brassicacamestris* L. growth and soil heavy metal accumulation

ZHAI Zhen¹, XIONG Bo², ZHANG Li², JIANG Bin², LI Chuan-you², PANG Huan-cheng¹, LI Yu-yi^{1*}

(1. Institute of Natural Resources and Regional Planning Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Beijing Agricultural Machinery Testing Extension Station, Beijing 100079, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to explore the feasibility of applying harmlessly-treated animal carcass manure from livestock and poultry farms to vegetable cultivation. The growth of *Brassicacamestris* L. and soil heavy metal content were measured under three different treatments, including chemical fertilizer (NPK) only, combined chemical fertilizer plus manure (NPK+M), and combined chemical fertilizer plus double manure (NPK+2M). Results showed that both NPK+M and NPK+2M significantly increased shoot dry weight by 50.53%~221.05%, compared with NPK ($P<0.05$). In NPK+2M treatment, relative chlorophyll content (SPAD) in fresh leaves and leaf net photosynthetic rate significantly increased by 22.85% and 21.98%, respectively, as compared with NPK treatment ($P<0.05$). Activities of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), and peroxidase (POD) were found to be the highest, meanwhile malonaldehyde (MDA) was lowest in NPK+2M treatment. Compared with NPK, both NPK+M and NPK+2M increased soil Cr, Cu, Cd and Pb concentrations, but Cu and

收稿日期: 2015-11-17

基金项目: 北京市农委项目“北京市动物尸体无害化处理机械技术试验示范”(PXM2013_036231_000041)

作者简介: 翟振 (1988—), 男, 山东菏泽人, 博士研究生, 从事合理耕层构建及温室气体减排研究。E-mail: zhaizhentab@163.com

* 通信作者: 李玉义 E-mail: liyuyi@caas.cn

Pb content was not different between NPK+2M and NPK treatment ($P < 0.05$). However, the content of heavy metals in NPK+2M was far lower than the class II limits of the soil environment quality standards. In addition, the heavy metal content in *Brassica campestris* L. aboveground and belowground parts in NPK+2M showed no significant increases, compared to NPK treatment ($P > 0.05$), and the Cr, Cd and Pb content in the aboveground part was much lower than the National Food Standards for vegetables. These results would shed light on the safe use of harmlessly-treated animal carcasses.

Keywords: harmlessly treated animal carcass manure; soil fertilization; *Brassica campestris* L.; heavy metal; accumulation

近年来我国畜牧养殖业得到了快速发展,病死动物尸体随之增多,大量携带病原体病死动物及动物产品,未经无害化处理或任意处置,会造成严重的环境污染问题,甚至引起重大动物疫情^[1]。目前,动物尸体的常见处理方法如掩埋处理法、焚化处理法、化尸窖法、化制法等,会造成土壤和地下水污染、病原菌扩散、产生有害烟气等问题,形成二次污染。基于以上处理方法的优缺点,越来越多的动物尸体无害化处理厂开始着手研发基于高温生物分解法的无害化处理技术,将动物尸体经过高温处理后消除所有病原菌,并且处理过程中所产生的水蒸汽经消毒处理后被直接排放,无烟、臭、血水排放问题,处理后形成的再生物质作为有机肥再次有效利用。

由于微量重金属作为饲料添加剂广泛用于畜禽养殖业,导致畜禽残体及粪便中普遍有重金属残留^[2-4],而对畜禽残体及粪便的不当施用,易造成土壤及水体的重金属积累,再经农作物进入食物链,危及食品及环境安全^[5]。吴清清等^[6]研究发现,当施用土壤重量 10% 的鸡粪时,土壤中 Cu、Cr、Cd、Pb 含量显著增加,出现明显积累趋势,而当施用量为土壤重量的 5% 时,各重金属元素均没有出现明显积累。潘霞等^[7]亦发现长期大量施用畜禽有机肥,会使重金属在土壤剖面呈现表聚现象。目前,施用动物尸体无害化处理物对土壤及作物重金属积累的影响及其安全性问题鲜见报道,本研究以动物尸体无害化处理物作为有机肥,研究其不同施用量对蔬菜生长的影响及重金属元素在蔬菜及土壤中的富集特征,以期对动物尸体无害化处理物的安全利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本试验在中国农业科学院日光温室进行,采用盆栽试验方法。供试土壤采集于北京郊区耕层土壤,属褐潮土,其基础理化性状如表 1 所示。花盆规格为直径 30 cm×高度 50 cm,每盆 3 kg 风干土。试验所用动

表 1 供试土壤及有机肥养分及重金属含量

Table 1 Nutrient and heavy metal content in soil and manure

项目	全氮/ %	有机质/ %	pH	Cd/ mg·kg ⁻¹	Cr/ mg·kg ⁻¹	Pb/ mg·kg ⁻¹	Cu/ mg·kg ⁻¹
土壤	0.06	1.00	8.28	0.04	27.65	10.42	9.66
有机肥	4.12	71.75	5.55	1.90	43.20	28.50	12.90

物尸体无害化物来自通州区某规模化养猪场,该养猪场收集病死猪尸体,按照 1 t 病死猪加入 280~300 kg 垫料(锯末、稻壳粉等)、1 kg 动物尸体无害化处理专用益生菌,经过分切、绞碎、发酵、高温杀菌、干燥 5 个环节,40 h 左右的无害化处理^[1],可产出含水率 30% 以下的粉末状有机肥。产出物由北京市新型肥料质量监督检验站进行检测,其养分含量及主要重金属含量指标如表 1 所示。

试验共设 3 个处理,包括:单施化肥(NPK)、化肥+单倍有机肥(NPK+M)、化肥+倍量有机肥(NPK+2M),每处理 4 次重复。按施肥量 N:K₂O:P₂O₅=1:1:0.5 计算^[8,9],即各处理土壤均施入等量尿素、K₂SO₄ 和 Ca(H₂PO₄)₂,施入量分别为 N 0.2 g·kg⁻¹、K₂O 0.2 g·kg⁻¹、P₂O₅ 0.1 g·kg⁻¹,同时参考常规有机肥施用量(每年 15 000 kg·hm⁻²),NPK+M 及 NPK+2M 处理动物尸体有机肥施用量分别相当于 1 年和 2 年有机肥常规施用量,折算每盆分别施入风干土壤重量的 0.67% 和 1.33% 动物尸体有机肥,即分别施入 6.67 g·kg⁻¹ 和 13.33 g·kg⁻¹(按照耕层 18 cm,耕层容重 1.25 g·cm⁻³)。土壤经风干、过筛、并与动物尸体有机肥充分拌匀,然后装盆,一边装土一边压实,氮磷钾化肥混合一次施入表土下 15 cm 处。加水至田间持水量 70%,平衡一周后点播法播种。供试蔬菜作物为白菜型油菜(*Brassica campestris* L.,华绿四号),于 2014 年 9 月 16 日播种,每盆均匀留株 3 棵,12 月 4 日采收。

1.2 测定方法

1.2.1 植株形态及生理指标测定

在油菜生长期每隔 1 周测定一次油菜株高(生

长期 48 d),收获期测量不同施肥处理植株相对叶绿素含量(SPAD),采用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400 便携式光合仪测量不同处理叶片净光合速率。测量完毕收获小油菜植株样品用自来水清洗后,再用去离子水淋洗,将小油菜分成地上部和根,分别称鲜重,然后在 105 °C 下杀青 30 min 后,于 75 °C 烘干至恒重,称重。

1.1.2 叶片主要酶活性及代谢产物含量测定

在油菜收获期分别采取不同处理新鲜叶片样品,利用液氮罐储存带回实验室,测定超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)及过氧化氢酶(CAT)活性,同时测定丙二醛(MDA)含量。SOD 活性采用硝基四氮唑蓝(NBT)还原法^[10],POD 活性采用愈创木酚法^[11-12],CAT 活性采用紫外分光光度法^[13],MDA 含量采用硫代巴比妥酸(TBA)加热比色法^[11]。

1.1.3 植株及土壤中重金属含量测定

用自来水和去离子水冲洗,滤纸吸干油菜植株表面的水分后,置于烘箱中 105 °C 杀青 30 min,65 °C 烘至恒重,在此过程中计算油菜样品的含水量。烘干后用玛瑙研钵研磨过 40 目尼龙筛。土壤样品经自然风干后,玛瑙研钵研磨过 100 目尼龙筛。油菜样品经 HNO₃-HClO₄ 消煮、土壤经 HF-HNO₃-HClO₄ 消煮,ICP-MS 测定其重金属含量^[14]。植株样品中重金属含量以干重计。

1.3 数据处理方法

采用 Excel 2007 整理数据,SPSS 19.0 统计软件进行数据分析,方差齐性的显著性检验采用 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对植株叶片数、干物质积累、SPAD 及净光合速率的影响

表 2 所示为不同施肥处理对植株叶片数、干物质积累、SPAD 及净光合速率的影响。增施动物尸体无害化处理物能够显著提高油菜单株叶片数($P<0.05$),NPK+M 及 NPK+2M 处理单株叶片数分别较 NPK 处

理高 12.50%和 25.00%($P<0.05$)。受增施有机肥的影响,油菜植株干物质重也发生显著变化(表 2),NPK+M 处理和 NPK+2M 处理地上部干物质重分别为 1.43、3.05 g,较 NPK 处理提高了 50.53%和 221.05%($P<0.05$);而三个处理地下部单株干物质重无显著差异。叶绿素是光合作用中将光能转变为化学能并用于物质合成的关键物质,植物叶绿素含量及组成与光合速率有密切联系^[15-17],SPAD 与叶片叶绿素含量呈正相关关系,能较好反应植物叶片叶绿素变化,直接影响叶片光合能力,其值越高越有利于植物捕获更多光能用于光合作用^[18-20]。表 2 中不同施肥条件下相对叶绿素含量存在一定差异,其中 NPK+2M 处理叶绿素含量最高,显著高于 NPK 处理 22.85%($P<0.05$),但 NPK+M 与 NPK 两处理间无显著差异,说明增施倍量该有机肥能够显著提高叶片叶绿素含量。光合速率是度量作物同化物形成和输出能力最直观的一个指标。表 2 显示不同处理条件下,油菜的平均净光合速率在 16.31~19.89 $\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间,与 NPK 处理相比,NPK+M 处理和 NPK+2M 处理净光合速率分别提高了 3.43%和 21.98%,其中 NPK+2M 处理达到了显著水平($P<0.05$),说明增施倍量该有机肥可显著提高油菜光合速率。

2.2 不同施肥处理对油菜抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响

植物体在正常的新陈代谢过程中,会产生自由基,自由基产生与清除之间的平衡对植株正常生长发育起着重要作用,这一平衡的紊乱会导致生物体的衰老甚至死亡。许多研究表明,植物细胞通过多种途径产生各种自由基和活性氧,使细胞的正常代谢不能顺利进行^[21],同时植物细胞也可以通过多种途径清除这些自由基,其中 SOD、CAT 和 POD 等是活性氧清除系统的重要保护酶,它们能有效阻止高浓度氧的积累,防止膜脂的过氧化作用,延缓植物的衰老,使植物维持正常的生长和发育^[22-23]。

表 2 不同施肥方式对油菜叶片数、干重、SPAD 及净光合速率的影响

Table 2 Leaf number, dry weight, SPAD and net photosynthetic rate of *Brassicacampstris* L. in different treatments

处理 Treatment	叶片数 Leaf number	地上部干重 Shoot dry weight/g	地下部干重 Root dry weight/g	SPAD Relative chlorophyll content	净光合速率(P_n) Net photosynthetic rate/ $\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
NPK	7.75±0.25b	0.95±0.15c	0.11±0.01a	42.06±0.96b	16.31±0.59b
NPK+M	9.00±0.41a	1.43±0.39b	0.06±0.02a	44.14±0.97ab	16.87±0.93b
NPK+2M	10.00±0.41a	3.05±0.84a	0.16±0.05a	51.67±3.57a	19.89±0.47a

注:表中数值均为平均值±标准误差;同列中不同字母表示处理之间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Data are mean±SE. Different letters within a column indicate significant difference between treatments ($P<0.05$). The same below.

表3为不同施肥处理对叶片CAT、SOD、POD活性和MDA含量的影响。本试验中NPK+M和NPK处理油菜植株内三种酶活性均无显著差异,其中NPK+M处理CAT及SOD酶活性略高于NPK处理,而POD酶活性略低于NPK处理;三种主要抗氧化酶活性均在NPK+2M处理条件下达到最高,其平均活性分别为891.15、1025.00、521.00 U·g⁻¹ FW,较NPK处理分别提高了9.31%、18.22%和1.56%,其中CAT及SOD酶活性的提高程度达显著水平($P<0.05$),而POD酶活性变化不显著。因此,增施倍量该有机肥能够显著促进植株体内CAT、SOD等保护酶的活性,延缓植株的衰老。MDA作为植物体内的一种过氧化产物,能够与细胞内多种成分发生强烈的反应,使酶和膜系统遭受严重损伤,其含量是表征细胞膜脂过氧化程度的重要指标。在本研究中(表3),NPK处理油菜MDA积累量最大,分别是NPK+M和NPK+2M处理的1.38倍和2.17倍($P<0.05$)。而施用动物尸体有机肥能够显著降低油菜MDA积累量,且施用量越大MDA含量越低。这表明增施该有机肥能够减缓植株细胞膜脂过氧化程度,增强植株的抗逆性。

2.3 不同施肥处理对土壤主要重金属残留及植株重金属富集的影响

表4所示为不同施肥处理对土壤重金属含量的影响。本试验中,NPK处理基础上增施动物尸体无害化处理物,会使土壤中主要重金属Cr、Cu、Cd、Pb出现不同程度的增加,分别增加了1.08%~2.53%、1.25%~1.74%、22.76%~57.72%及2.37%~2.94%,其中以Cd的增加幅度最大。除Cd元素外,NPK+M处理Cr、Cu、Pb元素含量与NPK处理均无显著差异,未出现明显积累现象。在增施倍量有机肥条件下,重金属Cr和Cd在土壤中的含量较NPK处理显著增加,而Cu和Pb与NPK处理无显著差异,未出现积累现象。

图1、图2所示分别为不同施肥处理对植株地上部(干重)及地下部(干重)重金属含量的影响。虽然动物尸体无害化处理物中重金属元素的输入导致土壤中重金属含量出现不同程度增加,但油菜地上部Cr、

表4 不同施肥处理对土壤重金属含量的影响

Table 4 Effect of manure applications on heavy metal content in soil

处理 Treatment	Cr/mg·kg ⁻¹	Cu/mg·kg ⁻¹	Cd/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹
NPK	27.65±0.20b	9.66±0.20a	0.04±0.002c	10.42±0.14a
NPK+M	27.95±0.09ab	9.78±0.05a	0.05±0.001b	10.73±0.06a
NPK+2M	28.35±0.06a	9.83±0.15a	0.06±0.001a	10.67±0.09a

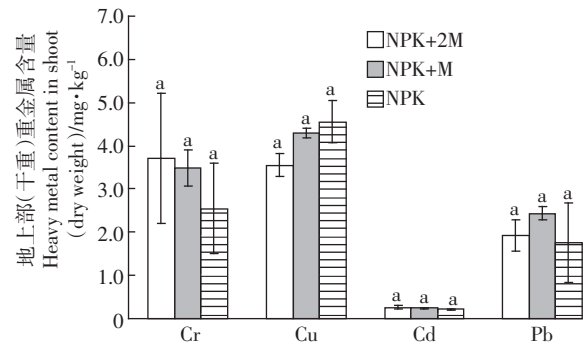


图1 不同施肥处理对植株地上部(干重)重金属含量的影响

Figure 1 Effect of manure applications on heavy metal content in shoot(dry weight)

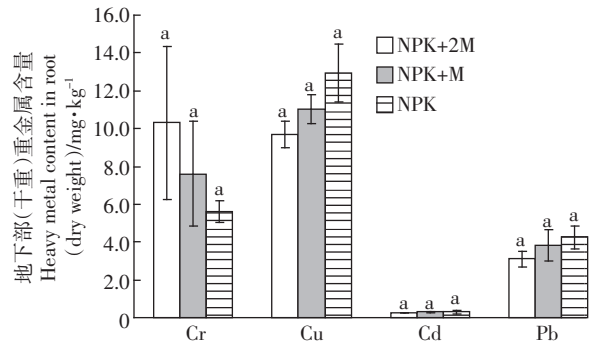


图2 不同施肥处理对植株地下部(干重)重金属含量的影响

Figure 2 Effect of manure applications on heavy metal content in root(dry weight)

Cu、Cd和Pb含量分别为2.55~3.72、3.55~4.55、0.21~0.26、1.76~2.44 mg·kg⁻¹,各处理之间均无显著差异;同时油菜地下部Cr、Cu、Cd和Pb含量分别为5.61~10.30、9.69~12.93、0.24~0.30、3.10~4.24 mg·kg⁻¹,比地

表3 不同施肥处理对油菜叶片CAT、SOD、POD活性和MDA含量的影响

Table 3 Effects of manure applications on activities of CAT, SOD, POD and MDA content

处理 Treatment	CAT活性 CAT activity/U·g ⁻¹ FW	SOD活性 SOD activity/U·g ⁻¹ FW	POD活性 POD activity/U·g ⁻¹ FW	MDA含量 MDA content/μmol·g ⁻¹
NPK	815.26±0.58b	867±28.87b	513±1.73a	0.027±1.5×10 ⁻⁴ a
NPK+M	826.73±6.35b	976±34.64ab	486±11.55a	0.020±2.3×10 ⁻⁴ b
NPK+2M	891.15±0.58a	1025±5.77a	521±15.01a	0.013±1.2×10 ⁻⁴ c

上部略高,但不同处理之间重金属含量亦无显著差异。因此,NPK+M和NPK+2M处理不会显著增加植株地上部、地下部(干重)重金属含量。

3 讨论

植株干物质的积累是作物产量形成的基础,而土壤肥力状况是影响干物质积累最主要的因素。本研究供试动物尸体无害化处理物有机质含量达71.75%,总养分是普通有机肥的3倍^[1],能够持续均衡地提供各种营养元素,促进植物的生长发育,增施该有机肥较单施化肥油菜地上部干物质重提高50.53%~221.05%($P < 0.05$),显著提高了油菜地上部干物质积累。这与前人的研究结果一致。王立刚等^[24]在7年生物有机肥定位试验中发现,无论是施用生物有机肥、EM鸡粪还是传统鸡粪堆肥的处理,其干物质积累都大于施用化肥;张美良等^[25]在棉花上也发现,施用猪粪沼肥能够增加棉株和各器官干物质质量、促进不同生育时期棉株各器官干物质质量合理分配,最终提高棉花的产量。

本研究表明,施用倍量动物尸体无害化处理物不仅能持续均衡地供给养分,还可显著提高油菜叶片抗氧化酶系统CAT、SOD酶活性,同时显著降低叶片中MDA累积量,提高叶片叶绿素含量,有利于作物的生长,延缓衰老。这是由于植物细胞在有氧代谢过程中,会产生大量活性物质如 H_2O_2 ,引发自由基膜脂过氧化一系列反应,造成膜质的分离,破坏细胞膜的正常生理功能,造成脂质过氧化损伤产物MDA含量的积累^[26],MDA的产生和积累反过来又会危害生物膜。施用有机肥则可增强CAT、SOD等活性氧清除酶活性,有效阻止高浓度氧的积累,减少活性氧的伤害,从而维持植物叶绿素含量,提高光合速率,有利于干物质的积累^[27]。

饲料添加剂的使用导致该动物尸体无害化处理物含有一定量的重金属元素,因此倍量施用供试动物尸体无害化处理物在一定程度上提高了Cr、Cu、Cd、Pb等重金属在土壤中的含量。如NPK+2M处理土壤中Cr、Cu、Cd、Pb含量较NPK处理分别提高了2.53%、1.74%、57.72%和2.37%,但远低于《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)^[28]中Ⅱ类土壤污染物限量标准中的规定值:Cr≤250 mg·kg⁻¹;Cu≤100 mg·kg⁻¹;Cd≤0.6 mg·kg⁻¹;Pb≤350 mg·kg⁻¹。

在目前施肥措施和作物种植体系下,假设土壤重金属年增加量一定,按照供试动物尸体无害化处理物中重金属含量估算土壤中重金属平均年增加量,参照

《土壤环境质量标准》中Ⅱ类土壤污染物限量标准估算出土壤对重金属的最高承载年限^[29]:

$$Y_i = \frac{(S_i - O_i)M}{K_i \times A}$$

式中: Y_i 表示土壤对重金属*i*最高承载年限; S_i 表示国标《土壤环境质量标准》中Ⅱ类土壤污染物限量标准中对土壤重金属*i*的限量,mg·kg⁻¹; O_i 表示目前土壤NPK处理重金属*i*含量,mg·kg⁻¹; K_i 表示动物尸体无害化处理物中重金属*i*的含量,mg·kg⁻¹; A 表示年施肥量15 000 kg·hm⁻²; M 表示耕层土壤量,kg(按照耕层18 cm,耕层容重1.25 g·cm⁻³)。

在现有施肥措施和种植体系下,京郊潮土对Cd、Cr、Pb及Cu的最高承载年限分别为44、772、1787年和1050年(图3),远高于王美等^[29]采用厩肥及粪肥作有机肥,黑土及红壤对Cd、Cu承载量估算。这说明从土壤承载年限角度,动物尸体无害化处理物相对于传统有机肥是有一定优势的。

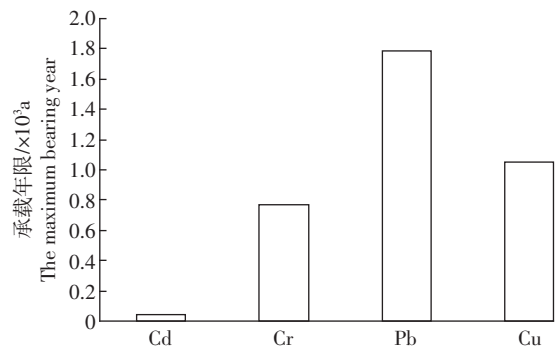


图3 施用动物尸体无害化处理物土壤对重金属Cd、Cr、Pb和Cu的最高承载年限

Figure 3 Soil maximum bearing year for Cd, Cr, Pb, and Cu under applications of harmlessly-treated animal carcass manure

另外,施用倍量动物尸体无害化处理物,油菜地上部主要重金属含量并没有显著增加,供试植株水分含量占总鲜重90%左右,地上部Cr、Cd和Pb鲜重含量分别为0.255~0.372、0.021~0.026、0.176~0.244 mg·kg⁻¹,远低于《食品安全国家标准》(GB 2762—2012)^[30]对新鲜蔬菜中污染物含量的限制:Cr≤0.5 mg·kg⁻¹;Cd≤0.2 mg·kg⁻¹;Pb≤0.3 mg·kg⁻¹。这可能是因为该动物尸体无害化处理物是经过堆积高温发酵而制成的有机肥料,虽然有机肥中重金属总量不变,但通过高温堆置可在一定程度上降低重金属的生物有效性^[5,31-32]。不同形态的重金属对植物的有效性不同,而动物尸体无害化处理物中有效态重金属含量可能较

低,决定了植物所能吸收利用的重金属量也较低^[33-34],所以植物体内重金属含量无明显增加。

4 结论

(1)增施倍量动物尸体无害化处理物可显著增加油菜叶绿素含量,增强光合效率,增加油菜地上部干物质累积;显著增强植株体内抗氧化酶CAT、SOD酶活性,同时显著降低MDA累积量,阻止代谢过程中高浓度氧的积累,减少了活性氧的伤害,有利于植株生长。

(2)增施倍量动物尸体无害化处理物,导致土壤中Cr、Cu、Pb等重金属元素含量有一定增加,但各重金属含量远低于《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)中Ⅱ类土壤污染物限量;油菜地上部主要重金属含量并没有明显增加,Cr、Cd和Pb鲜重含量远低于《食品安全国家标准》(GB 2762—2012)对新鲜蔬菜中重金属污染物含量的限制。因此,增施倍量动物尸体无害化处理物对土壤及油菜均是安全的。

参考文献:

- [1] 李传友,何润兵,熊波. 养殖业畜禽病死尸体处理现状及解决措施:以北京市为例[J]. 中国畜牧杂志, 2014, 50(10):77-81.
LI Chuan-you, HE Run-bing, XIONG Bo. Present situation and countermeasures on aquaculture animal mortality treatment: Taking Beijing as an example[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2014, 50(10): 77-81.
- [2] 王瑞,魏源送. 畜禽粪便中残留四环素类抗生素和重金属的污染特征及其控制[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(9):1705-1719.
WANG Rui, WEI Yuan-song. Pollution and control of tetracyclines and heavy metals residues in animal manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(9):1705-1719.
- [3] 王飞,赵立欣,沈玉君,等. 华北地区畜禽粪便有机肥中重金属含量及溯源分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19):202-208.
WANG Fei, ZHAO Li-xin, SHEN Yu-jun, et al. Analysis of heavy metal contents and source tracing in organic fertilizer from livestock manure in North China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(19):202-208.
- [4] Cang L, Wang Y J, Zhou D M, et al. Heavy metals pollution in poultry and livestock feeds and manures under intensive farming in Jiangsu Province, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2003, 16(3): 371-374.
- [5] 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]. 植物营养与肥料学报, 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.
- [6] 吴清清,马军伟,姜丽娜,等. 鸡粪和垃圾有机肥对苋菜生长及土壤重金属积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(7):1302-1309.
WU Qing-qing, MA Jun-wei, JIANG Li-na, et al. Effect of poultry and household garbage manure on the growth of *Amaranth tricolor* L. and heavy metal accumulation in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(7):1302-1309.
- [7] 潘霞,陈励科,卜元卿,等. 畜禽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.
PAN Xia, CHEN Li-ke, BU Yuan-qing, et al. Effects of livestock manure on distribution of heavy metals and antibiotics in soil profiles of typical vegetable fields and orchards[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, 28(5):518-525.
- [8] 陈皎,吴良欢. 两种野生绿肥对小白菜生长和营养品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(3):625-630.
CHEN Jiao, WU Liang-huan. Influence of application of two wild green manures on growth and nutritional quality of pakchoi[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(3):625-630.
- [9] 柯庆明,林文雄,黄珍发,等. 小白菜平衡施肥数学模型模拟研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(1):125-127.
KE Qing-ming, LIN Wen-xiong, HUANG Zhen-fa, et al. Simulation on the mathematical model of balanced fertilization in Pak-chio vegetable crop[J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2005, 13(1):125-127.
- [10] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社, 2006:211.
GAO Jun-feng. Plant physiology experimental guidance[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006:211.
- [11] 熊庆娥. 植物生理学实验教程[M]. 成都:四川科学技术出版社, 2003:72-73, 85-86, 126-127.
XIONG Qing-e. The experimental tutorial of plant physiology [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2003:72-73, 85-86, 126-127.
- [12] 李合生,孙群,赵世杰. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2000:164-165.
LI He-sheng, SUN Qun, ZHAO Shi-jie. Experimental principles and techniques of plant physiology and biochemistry [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000:164-165.
- [13] 赵世杰,刘华山,董新纯. 植物生理学实验指导[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2002:214-219.
ZHAO Shi-jie, LIU Hua-shan, DONG Xin-chun. The guidance of plant physiology [M]. Beijing: The Agricultural Science and Technology Press of China, 2002:214-219.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000.
LU Ru-kun. Analysis method of soil and agro-chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press, 2000.
- [15] 尤鑫,龚吉蕊. 叶绿素荧光动力学参数的意义及实例辨析[J]. 西部林业科学, 2012, 41(5):90-94.
YOU Xin, GONG Ji-rui. Significance and application of chlorophyll fluorescence dynamics process parameters [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 41(5):90-94.
- [16] 朱新开,盛海君,顾晶,等. 应用SPAD值预测小麦叶片叶绿素和氮含量的初步研究[J]. 麦类作物学报, 2005, 25(2):46-50.

- ZHU Xin-kai, SHENG Hai-jun, GU Jing, et al. Primary study on application of SPAD value to estimate chlorophyll and nitrogen content in wheat leaves[J]. *Acta Tritical Crops*, 2005, 25(2):46-50.
- [17] 李旭华, 扈强, 潘义宏, 等. 不同成熟度烟叶叶绿素含量及其与SPAD值的相关分析[J]. *河南农业科学*, 2014, 43(3):47-52.
- LI Xu-hua, HU Qiang, PAN Yi-hong, et al. Correlation analysis of chlorophyll content and SPAD values in flue-cured tobacco of different maturity[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2014, 43(3):47-52.
- [18] 孙常青, 郭志利, 屈非, 等. 不同施肥条件对杂交谷叶叶绿素含量的影响[J]. *作物杂志*, 2014(3):72-76.
- SUN Chang-qing, GUO Zhi-li, QU Fei, et al. The influence of different fertilization conditions on chlorophyll content of hybrid millet[J]. *Crops*, 2014(3):72-76.
- [19] 俞世雄, 李芬, 李绍林, 等. 水分胁迫对小麦新品系叶绿素含量的影响[J]. *云南农业大学学报:自然科学*, 2014, 29(3):353-358.
- YU Shi-xiong, LI Fen, LI Shao-lin, et al. Effects of water stress on chlorophyll contents of new wheat lines[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University(Natural Science)*, 2014, 29(3):353-358.
- [20] 李彩虹, 冯美臣, 王超, 等. 不同播期冬小麦叶绿素含量的冠层光谱响应研究[J]. *核农学报*, 2014, 28(2):309-317.
- LI Cai-hong, FENG Mei-chen, WANG Chao, et al. Response of canopy spectral on chlorophyll content of winter wheat under different sowing date[J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2014, 28(2):309-317.
- [21] 李合生. 现代植物生理学[M]. 北京:高等教育出版社, 2002:415-419.
- LI He-sheng. *Modern plant physiology*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002:415-419.
- [22] 王静, 孙广宇, 姬俏俏, 等. 活性氧在果蔬采后衰老过程中的作用及其控制[J]. *包装与食品机械*, 2015, 33(5):51-54.
- WANG Jing, SUN Guang-yu, JI Qiao-qiao, et al. The role of active oxygen in harvested fruits and vegetables during senescence and its control[J]. *Packaging and Food Machinery*, 2015, 33(5):51-54.
- [23] 杨淑慎, 高俊凤. 活性氧、自由基与植物的衰老[J]. *西北植物学报*, 2001, 21(2):215.
- YANG Shu-shen, GAO Jun-feng. Influence of active oxygen and free radical on plant senescence[J]. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica*, 2001, 21(2):215.
- [24] 王立刚, 李维炯, 邱建军, 等. 生物有机肥对作物生长、土壤肥力及产量的效应研究[J]. *土壤肥料*, 2004(5):12-16.
- WANG Li-gang, LI Wei-jiong, QIU Jian-jun, et al. Effect of biological organic fertilizer on crops growth, soil fertility and yield[J]. *Soils and Fertilizers*, 2004(5):12-16.
- [25] 张美良, 刘桂华, 唐建军, 等. 有机无机氮肥配施对棉花产量形成和干物质生产特性的影响研究[J]. *江西棉花*, 2003, 25(3):10-14.
- ZHANG Mei-liang, LIU Gui-hua, TANG Jian-jun, et al. Effect of combining application of organ inorganil nitrogen fertilizer on cotton's yeild formation and on dry matter production characteristics[J]. *Jiangxi Cottons*, 2003, 25(3):10-14.
- [26] 叶静, 安藤丰, 符建荣, 等. 几种新型有机肥对菜用毛豆产量、品质及化肥氮利用率的影响[J]. *浙江大学学报:农业与生命科学版*, 2008, 34(3):289-295.
- YE Jing, Ho Ando, FU Jian-rong, et al. Effects of some new organic manures on yield, quality and N use efficiency of green soybean[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2008, 34(3):289-295.
- [27] 马琨, 王兆骞, 杜茜, 等. 城市生活垃圾堆肥对春小麦生长和土壤的影响[J]. *农业环境保护*, 2000, 19(5):312-314.
- MA Kun, WANG Zhao-qian, DU Qian, et al. Effect of municipal refuse compost to the growth of spring-wheat and the soil[J]. *Agro-environmental Protection*, 2000, 19(5):312-314.
- [28] 中华人民共和国国家环境保护总局. GB 15618—1995 土壤环境质量标准[S]. 1996.
- National Environmental Protection Bureau of the People's Republic of China. GB 15618—1995 Soil environmental quality standard for soils [S]. 1996.
- [29] 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.
- WANG Mei, LI Shu-tian, MA Yi-bing, et al. Effect of long-term fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(1):63-74.
- [30] 中华人民共和国卫生部. GB 2762—2012 食品安全国家标准[S]. 2013.
- The Ministry of Health of the People's Republic of China. GB 2762—2012 National food safety standard[S]. 2013.
- [31] 黄国锋, 张振钿, 钟流举, 等. 重金属在猪粪堆肥过程中的化学变化[J]. *中国环境科学*, 2004, 24(1):94-99.
- HUANG Guo-feng, ZHANG Zhen-tian, ZHONG Liu-ju, et al. Chemical changes of heavy metals in the process of pig manure composting[J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(1):94-99.
- [32] 王爱云, 钟国锋, 徐刚标, 等. 铬胁迫对芥菜型油菜生理特性和铬富集的影响[J]. *环境科学*, 2011, 32(6):1717-1725.
- WANG Ai-yun, ZHONG Guo-feng, XU Gang-biao, et al. Effects of Cr(VI) stress on physiological characteristics of *Brassica juncea* and its Cr uptake[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(6):1717-1725.
- [33] 姚丽贤, 李国良, 何兆桓, 等. 施用禽畜粪对两种土壤As、Cu和Zn有效性的影响[J]. *土壤学报*, 2009, 46(1):127-135.
- YAO Li-xian, LI Guo-liang, HE Zhao-huan, et al. Bioavailability of As, Cu and Zn in two soils as affected by application of two types of animal manure[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(1):127-135.
- [34] 何增明, 刘强, 谢桂先, 等. 好氧高温猪粪堆肥中重金属砷、铜、锌的形态变化及钝化剂的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(10):2659-2665.
- HE Zeng-ming, LIU Qiang, XIE Gui-xian, et al. Changes of heavy metals form during aerobic high temperature composting of pig manure and the effects of passivators[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(10):2659-2665.