

我国商品有机肥和有机废弃物中重金属、养分和盐分状况

黄绍文, 唐继伟*, 李春花*

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业部植物营养与肥料重点实验室, 北京 100081)

摘要:【目的】分析我国主要菜区商品有机肥和有机废弃物的重金属、养分和盐分状况, 为蔬菜高效安全施肥和菜田土壤质量改善提供一定的理论依据。【方法】针对全国主要菜区包括北方 6 省(市)和南方 12 省(市)典型商品有机肥和有机废弃物展开调查, 取样时间是 2014 年 1 月上旬, 共采取商品有机肥样品 126 个和有机废弃物样品 255 个, 对 3 类商品有机肥和 5 类有机废弃物中重金属、养分和盐分状况进行了研究。【结果】1) 按照我国现有的 NY525–2012 有机肥料中重金属限量标准, 商品鸡粪中 Cd、Pb 和 Cr 超标率分别为 10.3%、17.2% 和 17.2%, 商品猪粪中 Cd 和 As 超标率分别为 20.0% 和 6.7%, 其它商品有机肥中 Cr、Cd、As 和 Hg 超标率分别为 13.4%、2.4%、2.4% 和 2.4%; 鸡粪中 Cd、As 和 Hg 超标率分别为 2.4%、7.1% 和 2.4%, 猪粪中 Cd、Pb、As 和 Hg 超标率分别为 1.5%、3.1%、15.4% 和 1.5%, 牛粪中 Cd 和 Hg 超标率分别为 1.7% 和 1.7%, 羊粪中 Cd 超标率为 12.5%, 其它有机废弃物中 Cr 和 As 超标率分别为 4.5% 和 13.6%。现在的畜禽粪便与传统有机肥已经大不相同, 尤其是鸡粪和猪粪中 Cu、Zn 含量远高于上个世纪 90 年代初, 分别增加 1.5~16.2 倍和 1.3~4.7 倍。2) 商品有机肥中全氮含量、全钾含量和氮磷钾总含量较有机废弃物平均分别高出 51.2%、32.0% 和 15.0%, 有机废弃物中全磷含量、有机质含量、C/N 比值和 C/P 比值较商品有机肥平均分别高出 23.7%、41.5%、22.7% 和 15.2%。商品有机肥中, 商品猪粪的全磷含量、有机质含量和 C/N 比值均相对较高, 其它商品有机肥的全氮含量、全钾含量、氮磷钾总含量和 C/P 比值均相对较高; 有机废弃物中, 鸡粪和猪粪的全氮含量、全磷含量和氮磷钾总含量均相对较高, 鸡粪、羊粪和其它有机废弃物的全钾含量相对较高, 猪粪、牛粪和羊粪的有机质含量相对较高, 牛粪的 C/N 比值相对较高, 牛粪和羊粪的 C/P 比值相对较高。3) 商品有机肥的 EC 值(平均 23.5 mS/cm, $n = 126$)较有机废弃物(平均 7.7 mS/cm, $n = 255$)高出 2.1 倍。商品有机肥中其它商品有机肥的 EC 值很高, 其次是商品猪粪, 商品鸡粪的 EC 值相对较低; 有机废弃物中鸡粪和其它有机废弃物的 EC 值相对较高, 其次是羊粪, 猪粪和牛粪的 EC 值相对较低。【结论】商品鸡粪以 Cd、Pb 和 Cr 超标为主, 商品猪粪以 Cd 和 As 超标为主, 其它商品有机肥以 Cr 超标为主; 猪粪、鸡粪和其它有机废弃物以 As 超标为主, 羊粪以 Cd 超标为主。商品有机肥中全氮含量、全钾含量和氮磷钾总含量均高于有机废弃物, 有机废弃物中全磷含量、有机质含量、C/N 比值和 C/P 比值均高于商品有机肥。商品有机肥的 EC 值远高于有机废弃物。

关键词: 商品有机肥; 有机废弃物; 重金属; 养分; 盐分

Status of heavy metals, nutrients, and total salts in commercial organic fertilizers and organic wastes in China

HUANG Shao-wen, TANG Ji-wei*, LI Chun-hua*

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

Abstract: 【Objectives】Heavy metals, nutrients, and EC (electrical conductivity) in commercial organic fertilizers and organic wastes in main vegetable production regions of China were evaluated to provide a scientific

收稿日期: 2016-05-11 接受日期: 2016-09-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0201000); 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-25-C-11); 中国农业科学院科技创新工程协同创新任务(CAAS-XTX2016003); 公益性行业(农业)科研专项(201203095)资助。

作者简介: 黄绍文(1964—), 男, 湖南桃源人, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事蔬菜营养与高效安全施肥研究。

* 通信作者 Tel: 010-82108662, E-mail: tang-jiwei@163.com; Tel: 010-82108653, E-mail: lichunhua@caas.cn

basis for high-efficiency and safe vegetable fertilizer recommendation, and soil quality improvement.

【 **Methods** 】 About 126 representative samples of commercial organic fertilizers and 255 samples of organic wastes were collected from the main vegetable production regions, including 6 provinces (municipalities) of northern China and 12 provinces (municipalities) of southern China. The sampling periods were in early January of 2014, and status of heavy metals, nutrients, and EC in three types of commercial organic fertilizers and five types of organic wastes were investigated in this study. 【 **Results** 】 1) According to the China NY525–2012 maximum limits for heavy metals in commercial organic fertilizers, the percentage of the samples exceeding the limitation was respectively 10.3% for Cd, 17.2% for Pb and 17.2% for Cr in commercial chicken fertilizers, 20.0% for Cd and 6.7% for As in commercial pig fertilizers, 13.4% for Cr, 2.4% for Cd, 2.4% for As and 2.4% for Hg in other commercial organic fertilizers, 2.4% for Cd, 7.1% for As and 2.4% for Hg in chicken manures, 1.5% for Cd, 3.1% for Pb, 15.4% for As and 1.5% for Hg in pig manures, 1.7% for Cd and 1.7% for Hg in cattle manures, 12.5% for Cd in sheep manures, and 4.5% for Cr and 13.6% for As in other organic manures. Present livestock and poultry dungs were greatly different with traditional organic fertilizers, and compared with the results investigated in 1990s especially, the contents of total Cu and total Zn in chicken and pig manures increased by 1.5–16.2 and 1.3–4.7 times, respectively. 2) The contents of N, K_2O , and total nutrients ($N+P_2O_5+K_2O$) in commercial organic fertilizers were 51.2%, 32.0% and 15.0% higher than those in organic wastes, respectively, whereas the contents of P_2O_5 and OM (organic matter), and ratios of C/N and C/P in organic wastes were 23.7%, 41.5%, 22.7% and 15.2% higher than those in commercial organic fertilizers. For commercial organic fertilizers, relatively higher values were found for the contents of P_2O_5 and OM, and ratios of C/N in commercial pig fertilizers, and for the contents N, K_2O and total nutrients, and ratios of C/P in other commercial organic fertilizers. For organic wastes, relatively higher values were observed for the contents of N, P_2O_5 and total nutrients in chicken and pig manures, for the contents of K_2O in chicken and sheep manures, and other organic manures, for the contents of OM in pig, cattle and sheep manures, for ratios of C/N in cattle manures, and for ratios of C/P in cattle and sheep manures. 3) EC values in commercial organic fertilizers (averaged 23.5 mS/cm, $n = 126$) were 3.1 times as high as that in organic wastes (averaged 7.7 mS/cm, $n = 255$). For commercial organic fertilizers, EC values were relatively higher in other commercial organic fertilizers, medium in commercial pig fertilizers, whereas relatively lower in commercial chicken fertilizers. For organic wastes, EC values were relatively higher in chicken manures and other organic manures, medium in sheep manures, whereas relatively lower in pig and cattle manures. 【 **Conclusion** 】 The main heavy metals in the contents beyond the limitation were Cd, Pb and Cr in commercial chicken fertilizers, Cd and As in commercial pig fertilizers, Cr in other commercial organic fertilizers, As in pig manures, chicken manures and other organic manures, and Cd in sheep manures. The contents of N, K_2O , and total nutrients were respectively higher for commercial organic fertilizers compared with organic wastes, whereas the contents of P_2O_5 and OM, and ratios of C/N and C/P were respectively higher for organic wastes compared with commercial organic fertilizers. EC values in commercial organic fertilizers were much higher than those in organic wastes.

Key words: commercial organic fertilizers; organic wastes; heavy metals; nutrients; salinity

有机肥富含有机质、作物生长必需的养分、有机酸、糖类等物质, 在农产品生产中占有极其重要的地位, 是无公害农业和绿色食品生产中的主要肥料。施用有机肥是维持农业生态系统物质与能量平衡的重要措施, 能提高农业生产效率及生态系统对于扰动的抵抗力和恢复力^[1]。我国每年产生畜禽粪便资源量约 20 亿吨, 约占全国有机肥料资源量的

40%^[2], 其中畜禽粪便的 80% 左右来自规模化养殖场。畜禽粪便等有机废弃物的农用最直接、最有效的措施, 其中肥料化利用是有机废弃物资源化的一项重要手段。利用好畜禽粪便及以畜禽粪便为主要原料生产的商品有机肥, 能够提高土壤肥力, 实现养分的再循环, 对于减少化学肥料的施用、保护生态环境、推动农业可持续发展具有十分重要的意义。

但是,随着 Cu、Zn、As 等微量元素作为饲料添加剂在规模化畜禽养殖中的广泛使用,加之畜禽对微量重金属元素吸收利用率低,这些重金属元素大部分积累在畜禽粪便中^[3-5]。据统计,我国每年使用的微量元素添加剂约为 15~18 万吨,大约有 10 万吨未被动物利用而随着畜禽粪便进入环境^[6-7]。商品有机肥的原料来源广泛,主要来源于规模化畜禽场的畜禽粪便,工农业有机废弃物(如秸秆、蘑菇渣、酒渣等),以及草(泥)炭、风化煤等,不可避免地含有重金属等有害物质。畜禽粪便和以畜禽粪便为主要原料生产的商品有机肥中重金属,存在着被作物吸收而进入食物链和在农业环境中积累而污染农产品和环境的风险。

我国畜禽粪便有机肥的 2/3 左右用于菜田,而菜田面积仅约占耕地面积的 1/8^[8]。目前蔬菜生产中畜禽粪便有机肥的施用存在诸多问题,与化肥配合施用较少考虑其中的养分,缺乏合理的用量和配比,往往是多多益善,如农民在设施蔬菜生产中大量使用鸡粪、猪粪等畜禽粪便有机肥,年用量高的在 153.9~240.0 t/hm² 之间^[9]。研究表明,过量施用粪肥尤其是猪粪仍然会导致养分流失和淋失,引起地表水、地下水污染^[10]。

弄清畜禽粪便有机肥中的重金属、养分等含量状况,是确定畜禽粪便有机肥合理用量及其与化肥配合施用比例的基础。20 世纪 90 年代初,农业部全国农业技术推广中心对全国范围内的畜禽粪便资源的重金属和养分含量状况进行了调查和分析^[11],对指导其合理施用起到了重要作用。但随着现代集约化养殖方式的发展,其在饲料来源、饲料种类、垫圈材料、收集方式等方面明显有别于传统的养殖方式^[12-13],畜禽粪便及以畜禽粪便为主要原料生产的商品有机肥中重金属、养分等含量发生了较大变化。本世纪 10 年代中国农业科学院李书田、刘荣乐等^[13-14]对我国主要商品有机肥和畜禽粪便中重金属和养分含量状况进行了评价,近 5 年来一些科研工作者对特定地区商品有机肥或畜禽粪便中重金属或养分含量状况进行了调查^[15-19],而目前有关我国主要菜区商品有机肥和有机废弃物中重金属、养分等含量状况方面较为系统的研究鲜见报道。为此,2014 年国家大宗蔬菜产业技术体系开展了全国主要菜区商品有机肥和有机废弃物中重金属、养分等状况的普查工作,对于充分了解和评价当前畜禽粪便有机肥的安全现状,规范有机肥料生产、使用等都是十分必要的。

1 材料与方法

1.1 商品有机肥和有机废弃物样品的采集

2014 年 1 月上旬,在全国主要菜区包括山东、河南、河北、天津、吉林、黑龙江等北方 6 省(市)和湖北、湖南、江苏、上海、安徽、江西、广东、海南、云南、贵州、四川、重庆等南方 12 省(市)采取代表性商品有机肥样品 126 个和有机废弃物样品 255 个。按照生产商品有机肥的主要原料来源,将采集的商品有机肥样品分为商品鸡粪、商品猪粪、其它商品有机肥等 3 类,商品鸡粪的原料是纯鸡粪或主要原料是鸡粪,有些商品鸡粪还含有化肥、牛粪、草炭、黑藻土、木薯、花生麸、牛骨粉等中的一种或几种原料;商品猪粪的原料是纯猪粪或主要原料是猪粪,有些商品猪粪还含有化肥、鸡粪、牛粪、鸭粪、泥炭、锯末、稻壳粉、麦饭石、皮毛豆粕等中的一种或几种原料;其它商品有机肥主要原料不够明确,有些其它商品有机肥中还含有化肥、微肥、菌肥、腐殖酸、生化黄腐酸钾、粗蛋白、氨基酸、糖蜜、甜菜抽出物、淀粉糖浆、玉米胚芽、草木灰、花生麸、骨粉、油葵饼、豆粕、蹄角、烟渣、糟渣、酒糟、阿维菌素药渣、菌棒、污泥等中的一种或几种原料。将有机废弃物样品分为鸡粪、猪粪、牛粪、羊粪、其它有机废弃物等 5 类,其中其它有机废弃物样品包括鸽粪、马粪、鹿粪、兔粪、堆肥、厩肥、沼气肥、菇渣等样品。按商品有机肥和有机废弃物种类分别进行统计,商品鸡粪、商品猪粪和其它商品有机肥样品数分别为 29、15 和 82 个,鸡粪、猪粪、牛粪、羊粪和其它有机废弃物样品数分别为 85、65、59、24 和 22 个。样品风干粉碎后,过 1 mm 筛储存备用。

1.2 样品中重金属、养分和盐分的测定方法

1.2.1 样品中 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd 总量测定 样品经王水-高氯酸法消煮^[20]后,Cu、Zn、Pb、Cr 在原子吸收分光光度计上采用火焰原子光谱法测定,Cd 用 ICP-MS 法测定。

样品 As 和 Hg 总量测定 样品经 1+1 王水(王水:水=1:1)法消煮^[21]后,As 和 Hg 均在双道原子荧光光度计上测定。

分析过程中加入国家标准样品(GBW08301 和 GBW08302)和空白对照进行质量控制,所用水为超纯水,试剂采用优级纯。

1.2.2 样品中养分和盐分的测定方法 样品氮测定采

用硫酸-水杨酸-催化剂消化^[22], 蒸馏法测定。样品磷测定采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消化^[23], 磷采用钒钼黄比色法, 钾采用火焰原子光谱法测定; pH 用 2.5 : 1 水样比, 酸度计测定; 有机质用重铬酸钾-浓硫酸氧化(外加热法)^[23], 硫酸亚铁溶液滴定法测定; 盐分采用 5 : 1 水样比, 电导仪测定(直接用样品浸出液的电导率来表示样品水溶性盐总量)。

1.3 商品有机肥和有机废弃物中重金属状况评价标准

样品中重金属状况评价采用 NY525-2012 有机肥料中重金属的限量指标^[23] (mg/kg, 干基): 总 Cd $\leq$ 3, 总 Pb $\leq$ 50, 总 Cr $\leq$ 150, 总 As $\leq$ 15, 总 Hg $\leq$ 2。样品中重金属超标率指所取样本中重金属含量超过中国 NY525-2012 有机肥料中重金属的限量指标值的样本的百分数。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 统计软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 商品有机肥和有机废弃物中重金属状况

2.1.1 商品有机肥中生物毒性显著的重金属含量 环境污染方面所指的生物毒性显著的重金属主要包括 Cd、Pb、Cr、As 和 Hg。表 1 表明, 由于商品有机肥的原料来源较为复杂, 不同种类的商品有机肥中重金属含量差异较大, 从痕量到千分之几, 商品鸡粪中 Cd、Pb 和 Cr 含量相对较高, Hg 相对较低; 商品猪粪中 Cd 和 As 含量相对较高, Pb 和 Cr 含量相对较低; 其它商品有机肥中 Hg 含量相对较高, Cd、Pb 和 As 含量相对较低。商品鸡粪和商品猪粪中 Cd 含量较其它商品有机肥平均均高 36.4%; 商品鸡粪中 Pb 含量较商品猪粪和其它商品有机肥平均均高出 2.4 倍; 商品鸡粪中 Cr 含量较商品猪粪和其它商品有机肥平均分别高出 12.9 和 1.7 倍, 其它商品有机肥中 Cr 含量较商品猪粪平均高出 4.1 倍; 商品鸡粪和商品猪粪中 As 含量较其它商品有机肥平均分别高 13.2% 和 24.5%; 其它商品有机肥中 Hg 含量较商品鸡粪和商品猪粪平均分别高 29.4% 和 15.8%。

按照我国现有的 NY525-2012 有机肥料中重金属限量标准, 在采取的 29 个商品鸡粪中, 有 3 个样品 Cd 超标, 5 个样品 Pb 超标, 5 个样品 Cr 超标, As 和 Hg 在所测定的样品中均不超标, 商品鸡粪中 Cd、Pb 和 Cr 超标率分别为 10.3%、17.2% 和 17.2%; 在

采取的 15 个商品猪粪中, 有 3 个样品 Cd 超标, 1 个样品 As 超标, Pb、Cr 和 Hg 在所测定的样品中均不超标, 商品猪粪中 Cd 和 As 超标率分别为 20.0% 和 6.7%; 在采取的 82 个其它商品有机肥中, 有 2 个样品 Cd 超标, 11 个样品 Cr 超标, 2 个样品 As 超标, 2 个样品 Hg 超标, Pb 在所测定的样品中不超标, 其它商品有机肥中 Cr、Cd、As 和 Hg 超标率分别为 13.4%、2.4%、2.4% 和 2.4%。

2.1.2 有机废弃物中生物毒性显著的重金属含量 从表 2 可以看出, 不同种类的有机废弃物中重金属含量差异较大, 鸡粪和羊粪中 Cd 含量均值相对较高, 较猪粪、牛粪和其它有机废弃物平均高出 40.0%~128.6%; 牛粪中 Hg 含量均值相对较高, 较鸡粪、猪粪、羊粪和其它有机废弃物平均高出 66.7%~172.7%; 其它有机废弃物中 Cr 和 As 含量均值相对较高, Cr 含量较鸡粪、猪粪、牛粪、羊粪平均高出 98.5%~149.5%, As 含量较鸡粪、猪粪、牛粪、羊粪平均高出 43.4%~419.0%。

参考我国现有的 NY525-2012 有机肥料中重金属限量标准, 对有机废弃物中重金属含量进行分析比较, 在采取的 85 个鸡粪中, 有 2 个样品 Cd 超标, 6 个样品 As 超标, 2 个样品 Hg 超标, Pb 和 Cr 在所测定的样品中均不超标, 鸡粪中 Cd、As 和 Hg 超标率分别为 2.4%、7.1% 和 2.4%; 在采取的 65 个猪粪中, 有 1 个样品 Cd 超标, 2 个样品 Pb 超标, 10 个样品 As 超标, 1 个样品 Hg 超标, Cr 在所测定的样品中不超标, 猪粪中 Cd、Pb、As 和 Hg 超标率分别为 1.5%、3.1%、15.4% 和 1.5%; 在采取的 59 个牛粪中, 有 1 个样品 Cd 超标, 1 个样品 Hg 超标, Pb、Cr 和 As 在所测定的样品中均不超标, 牛粪中 Cd 和 Hg 超标率分别为 1.7% 和 1.7%; 在采取的 24 个羊粪中, 有 3 个样品 Cd 超标, Pb、Cr、As 和 Hg 在所测定的样品中均不超标, 羊粪中 Cd 超标率为 12.5%; 在采取的 22 个其它有机废弃物中, 有 1 个样品 Cr 超标, 3 个样品 As 超标, Cd、Pb 和 Hg 在所测定的样品中均不超标, 其它有机废弃物中 Cr 和 As 超标率分别为 4.5% 和 13.6%。

2.1.3 商品有机肥和有机废弃物中具有毒性的重金属 Cu 和 Zn 的含量 不同种类的商品有机肥中 Cu 和 Zn 含量差异较大(表 1), Cu 和 Zn 含量以商品猪粪较高, 商品鸡粪次之, 其它商品有机肥较低, 商品猪粪中 Cu 含量较商品鸡粪和其它商品有机肥平均分别高 75.8% 和 175.9%, 商品猪粪中 Zn 含量较商品鸡粪和其它商品有机肥平均分别高 14.9% 和 78.4%。

表 1 商品有机肥中重金属的含量 (mg/kg, 干基)
Table 1 Heavy metal contents in commercial organic fertilizers

重金属 Heavy metal	项目 Item	商品有机肥种类 Type of commercial organic fertilizers			合计 Sum (n = 126)
		商品鸡粪 Commercial chicken fertilizer (n = 29)	商品猪粪 Commercial pig fertilizer (n = 15)	其它商品有机肥 Other commercial organic fertilizer (n = 82)	
Cd	范围 Range	0.29~5.3	0.42~4.0	0.07~5.0	0.07~5.3
	平均值 Mean	1.5 ± 1.1	1.5 ± 1.2	1.1 ± 0.86	1.2 ± 0.97
	中位数 Median	1.2	1.1	1.0	1.0
	超标率 PSBML (%)	10.3	20.0	2.4	6.3
Pb	范围 Range	8.9~1265.3	8.2~36.1	3.5~48.1	3.5~1265.3
	平均值 Mean	75.5 ± 231.0	22.4 ± 8.1	22.0 ± 10.7	34.3 ± 112.0
	中位数 Median	23.5	23.6	21.6	22.3
	超标率 PSBML (%)	17.2	0.0	0.0	4.0
Cr	范围 Range	5.2~4260.9	4.6~119.8	3.4~2412.0	3.4~4260.9
	平均值 Mean	346.7 ± 1013.0	25.0 ± 28.9	126.7 ± 391.2	165.2 ± 583.2
	中位数 Median	23.0	16.3	16.2	16.4
	超标率 PSBML (%)	17.2	0.0	13.4	12.7
As	范围 Range	0.65~14.5	1.6~16.6	0.00~23.3	0.00~23.3
	平均值 Mean	6.0 ± 3.6	6.6 ± 4.0	5.3 ± 4.2	5.6 ± 4.0
	中位数 Median	6.0	5.9	4.9	5.2
	超标率 PSBML (%)	0.0	6.7	2.4	2.4
Hg	范围 Range	0.04~1.1	0.07~1.2	0.01~2.8	0.01~2.8
	平均值 Mean	0.34 ± 0.31	0.38 ± 0.32	0.44 ± 0.48	0.41 ± 0.43
	中位数 Median	0.19	0.25	0.29	0.25
	超标率 PSBML (%)	0.0	0.0	2.4	1.6
Cu	范围 Range	33.7~961.9	13.6~1187.9	2.1~664.6	2.1~1187.9
	平均值 Mean	143.1 ± 163.9	251.6 ± 334.8	91.2 ± 100.1	122.2 ± 166.8
	中位数 Median	106.7	121.2	66.9	81.0
Zn	范围 Range	103.4~1261.4	57.6~1769.2	10.9~1026.5	10.9~1769.2
	平均值 Mean	331.5 ± 243.5	381.0 ± 455.2	213.6 ± 226.3	260.6 ± 272.1
	中位数 Median	283.4	221.3	127.1	165.2

注 (Note) : PSBML—Percentage of samples with heavy metal contents beyond the maximum limits of China NY525-2012 for heavy metals in commercial organic fertilizers.

不同种类的有机废弃物中 Cu 和 Zn 含量差异很大 (表 2), Cu 和 Zn 含量以猪粪较高, 鸡粪次之, 牛粪、羊粪和其它有机废弃物较低, 猪粪中 Cu 含量较鸡粪、牛粪、羊粪和其它有机废弃物平均分别高出 3.9、8.0、9.4 和 5.9 倍, 猪粪中 Zn 含量较鸡粪、牛粪、羊粪和其它有机废弃物平均分别高出 1.1、4.2、4.7 和 3.0 倍。

2.1.4 商品有机肥和有机废弃物中重金属含量差异
商品有机肥中 Pb 含量大幅高于有机废弃物, Cr 含量远高于有机废弃物, Pb 和 Cr 含量平均分别为 34.3 和 165.2 mg/kg ($n = 126$), 较有机废弃物平均分别高出 97.1% 和 10.4 倍; 有机废弃物中 Cu 和 Zn 含量均大幅高于商品有机肥, Cu 和 Zn 含量平均分别为 239.3 和 387.6 mg/kg ($n = 255$), 较商品有机肥平均分

表 2 有机废弃物中重金属的含量 (mg/kg, 干基)
Table 2 Heavy metal contents in organic wastes

重金属 Heavy metal	项目 Item	有机肥废弃物种类 Type of organic wastes					合计 Sum (n = 255)
		鸡粪 Chicken manure (n = 85)	猪粪 Pig manure (n = 65)	牛粪 Cattle manure (n = 59)	羊粪 Sheep manure (n = 24)	其它 Other (n = 22)	
Cd	范围 Range	0.15~45.8	0.07~3.8	0.10~3.3	0.07~4.0	0.22~1.4	0.07~45.8
	平均值 Mean	1.6 ± 4.9	1.0 ± 0.6	0.8 ± 0.6	1.4 ± 1.0	0.7 ± 0.3	1.2 ± 2.9
	中位数 Median	1.0	1.0	0.7	1.1	0.8	0.9
	超标率 PSBML (%)	2.4	1.5	1.7	12.5	0.0	2.7
Pb	范围 Range	7.8~41.1	3.2~135.6	4.3~37.2	4.6~32.5	7.4~47.2	3.2~135.6
	平均值 Mean	18.4 ± 6.7	17.1 ± 18.1	14.9 ± 7.9	19.8 ± 7.8	18.7 ± 9.4	17.4 ± 11.3
	中位数 Median	16.7	12.9	12.8	20.7	16.7	15.5
	超标率 PSBML (%)	0.0	3.1	0.0	0.0	0.0	0.8
Cr	范围 Range	4.8~72.3	1.5~149.6	3.7~105.8	4.8~46.6	3.8~269.2	1.5~269.2
	平均值 Mean	13.7 ± 12.1	13.4 ± 19.9	13.6 ± 17.0	10.9 ± 8.4	27.2 ± 55.4	14.5 ± 22.1
	中位数 Median	9.2	7.7	7.4	10.2	12.1	8.5
	超标率 PSBML (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	0.4
As	范围 Range	0.15~28.0	0.17~56.4	0.22~8.1	0.14~9.5	0.22~110.6	0.14~110.6
	平均值 Mean	4.8 ± 6.0	7.6 ± 13.9	2.1 ± 2.0	2.6 ± 2.2	10.9 ± 22.9	5.2 ± 10.6
	中位数 Median	2.6	1.8	1.1	2.1	5.1	1.9
	超标率 PSBML (%)	7.1	15.4	0.0	0.0	13.6	7.5
Hg	范围 Range	0.01~2.23	0.02~3.97	0.02~21.0	0.05~1.71	0.01~0.99	0.01~21.0
	平均值 Mean	0.33 ± 0.39	0.31 ± 0.51	0.60 ± 2.71	0.36 ± 0.37	0.22 ± 0.27	0.38 ± 1.4
	中位数 Median	0.21	0.14	0.10	0.20	0.11	0.16
	超标率 PSBML (%)	2.4	1.5	1.7	0.0	0.0	1.6
Cu	范围 Range	8.5~1098.2	26.3~2300.9	4.2~203.6	6.9~149.7	22.7~498.8	4.2~2300.9
	平均值 Mean	132.8 ± 131.7	645.2 ± 554.4	72.0 ± 38.4	62.2 ± 33.9	93.8 ± 98.0	239.3 ± 376.4
	中位数 Median	108.6	571.0	66.1	64.0	80.3	99.8
Zn	范围 Range	70.9~1940.4	43.1~2635.0	36.4~573.6	25.3~518.3	32.2~771.0	25.3~2635
	平均值 Mean	366.7 ± 252.0	785.2 ± 522.0	152.4 ± 102.1	136.7 ± 114.1	198.7 ± 182.3	387.6 ± 398.1
	中位数 Median	339.0	648.7	115.9	92.5	143.9	270.0

注 (Note): PSBML—Percentage of samples with heavy metal contents beyond the maximum limits of China NY525-2012 for heavy metals in commercial organic fertilizers.

别高出 95.8% 和 48.7%; 商品有机肥和有机废弃物中 Cd、As 和 Hg 含量均值差异均较小。

按照我国现有的 NY525-2012 有机肥料中重金属限量标准, 在采取的 126 个商品有机肥中, 有 8 个样品 Cd 超标, 5 个样品 Pb 超标, 16 个样品 Cr 超标, 3 个样品 As 超标, 2 个样品 Hg 超标, Cd、Pb、Cr、As 和 Hg 超标率分别为 6.3%、4.0%、12.7%、

2.4% 和 1.6%; 在采取的 255 个有机废弃物中, 有 7 个样品 Cd 超标, 2 个样品 Pb 超标, 1 个样品 Cr 超标, 19 个样品 As 超标, 4 个样品 Hg 超标, Cd、Pb、Cr、As 和 Hg 超标率分别为 2.7%、0.8%、0.4%、7.5% 和 1.6%。

2.2 商品有机肥和有机废弃物中养分状况

2.2.1 商品有机肥中养分和有机质含量 由表 3 可以

看出，不同种类的商品有机肥中氮磷钾和有机质含量差异较大。商品猪粪中全磷 (P_2O_5) 含量、有机质含量和 C/N 比值均相对较高，全磷 (P_2O_5) 含量 (平均 32.6 g/kg) 较商品鸡粪和其它商品有机肥平均分别高出 39.9% 和 35.3%，有机质含量 (平均 41.0%) 较商品鸡粪和其它商品有机肥平均分别高出 20.9% 和 19.9%，C/N 比值 (平均 16.0) 较商品鸡粪和其它商品有机肥平均分别高出 15.9% 和 15.1%；其它商品有机肥中全氮 (N) 含量、全钾 (K_2O) 含量、养分 (N + P_2O_5 + K_2O) 总含量和 C/P 比值均相对较高，全氮含量 (平均 36.7 g/kg) 较商品鸡粪和商品猪粪平均分别高出 1.0 倍和 52.9%，全钾含量 (平均 26.0 g/kg) 较商品鸡粪和商品猪粪平均分别高出 22.6% 和 46.1%，养分总含量 (平均 86.7 g/kg) 较商品鸡粪和商品猪粪平均分别高出 38.3% 和 16.5%，C/P 比值 (平均 36.2) 较商品鸡粪和商品猪粪平均分别高出 42.5% 和 23.5%。

表 3 商品有机肥中养分、有机质、pH 和电导率统计特征值 (干基)
Table 3 Statistics of nutrients, organic matter, pH and EC in commercial organic fertilizers (Dry matter)

养分 Nutrient	项目 Item	商品有机肥种类 Source of commercial organic fertilizers			合计 Sum (n = 126)
		商品鸡粪 Commercial chicken fertilizer (n = 29)	商品猪粪 Commercial pig fertilizer (n = 15)	其它商品有机肥 Other commercial organic fertilize (n = 82)	
N (g/kg)	范围 Range	5.0~60.0	6.2~85.1	2.0~199.7	2.0~199.7
	平均值 Mean	18.3 ± 13.0	24.0 ± 20.7	36.7 ± 42.5	31.0 ± 36.4
	中位数 Median	13.6	17.8	18.7	17.3
P_2O_5 (g/kg)	范围 Range	4.9~52.2	6.8~77.8	2.2~89.2	2.2~89.2
	平均值 Mean	23.3 ± 13.0	32.6 ± 24.9	24.1 ± 19.7	24.9 ± 19.2
	中位数 Median	21.7	21.5	21.1	21.6
K_2O (g/kg)	范围 Range	6.5~49.2	3.4~39.4	1.9~109.1	1.9~109.1
	平均值 Mean	21.2 ± 10.0	17.8 ± 10.0	26.0 ± 22.2	23.9 ± 19.0
	中位数 Median	21.0	16.1	18.1	18.6
氮磷钾总含量 Total N, P_2O_5 and K_2O content (g/kg)	范围 Range	18.9~131.3	29.7~182.9	13.4~310.1	13.4~310.1
	平均值 Mean	62.7 ± 25.1	74.4 ± 37.9	86.7 ± 61.4	79.8 ± 53.3
	中位数 Median	61.2	75.8	67.8	64.9
有机质 Organic matter (%)	范围 Range	12.4~70.2	21.3~59.8	1.9~78.9	1.9~78.9
	平均值 Mean	33.9 ± 13.5	41.0 ± 12.3	34.2 ± 14.1	34.9 ± 13.9
	中位数 Median	33.3	40.5	32.9	34.0
C/N	范围 Range	2.1~33.9	1.5~41.8	0.6~70.9	0.6~70.9
	平均值 Mean	13.8 ± 7.2	16.0 ± 10.7	13.9 ± 14.4	14.1 ± 12.7
	中位数 Median	12.6	12.7	9.9	11.3
C/P	范围 Range	5.9~69.0	4.6~70.0	2.0~269.6	2.0~269.6
	平均值 Mean	25.4 ± 15.3	29.3 ± 21.0	36.2 ± 37.7	32.9 ± 32.3
	中位数 Median	20.6	21.9	23.2	22.2
pH	范围 Range	5.5~9.1	5.1~7.9	3.1~9.1	3.1~9.1
	平均值 Mean	7.4 ± 0.8	6.7 ± 0.9	6.6 ± 1.2	6.8 ± 1.2
	中位数 Median	7.5	6.8	6.9	7.1
电导率 EC (mS/cm)	范围 Range	2.6~77.0	3.1~86.9	0.8~168.7	0.8~168.7
	平均值 Mean	12.2 ± 14.0	17.8 ± 23.9	28.6 ± 37.0	23.5 ± 32.3
	中位数 Median	8.4	8.9	13.2	10.0

2.2.2 有机废弃物中养分和有机质含量 由表 4 可以看出, 不同种类的有机废弃物中氮磷钾和有机质含量存在较大差异。鸡粪和猪粪中全氮含量、全磷含量和养分总含量均相对较高, 全氮含量 (平均 21.6~25.0 g/kg) 较牛粪、羊粪和其它有机废弃物平均分别高出 47.9%~71.2%、25.6%~45.3% 和 13.7%~31.6%, 全磷含量 (平均 35.7~47.4 g/kg) 较牛粪、羊粪和其它有机废弃物平均分别高出 1.2~1.9 倍、1.7~2.6 倍和 77.7%~1.3 倍, 养分总含量 (平均 82.7~84.5 g/kg) 较牛粪、羊粪和其它有机废弃物平均分别高出 85.0%~89.0%、62.8%~66.3% 和 38.5%~41.5%; 鸡粪、羊粪和其它有机废弃物中全钾含量相对较高, 平均含量在 20.6~21.7 g/kg 之间, 较猪粪和牛粪平均分别高出 33.8%~40.9% 和 48.2%~56.1%; 猪粪、牛粪和羊粪中有机质含量相对较高, 在 54.4%~57.4% 之间, 较鸡粪和其它有机废弃物平

表 4 有机废弃物中养分、有机质、pH 和盐分的统计特征值 (干基)
Table 4 Statistics of nutrients, organic matter, pH and electrical conductivity in organic wastes (Dry matter)

养分 Nutrient	项目 Item	有机废弃物种类 Type of organic wastes					合计 Sum (n = 255)
		鸡粪 Chicken manure (n = 85)	猪粪 Pig manure (n = 65)	牛粪 Cattle manure (n = 59)	羊粪 Sheep manure (n = 24)	其它 Other (n = 22)	
N (g/kg)	范围 Range	7.4~73.1	7.1~38.5	4.7~22.5	6.7~25.5	0.8~141.1	0.8~141.1
	平均值 Mean	25.0 ± 13.9	21.6 ± 6.6	14.6 ± 4.2	17.2 ± 5.2	19.0 ± 28.2	20.5 ± 12.8
	中位数 Median	21.0	22.7	14.2	18.0	14.0	18.5
P ₂ O ₃ (g/kg)	范围 Range	8.4~104.9	11.0~97.8	3.5~62.2	3.8~34.0	2.7~88.7	2.7~104.9
	平均值 Mean	35.9 ± 17.7	47.4 ± 21.1	16.1 ± 12.2	13.1 ± 7.3	20.2 ± 20.6	30.8 ± 21.4
	中位数 Median	32.8	44.2	12.3	10.8	12.2	27.2
K ₂ O (g/kg)	范围 Range	4.3~49.2	3.1~34.3	0.8~40.2	4.1~59.0	2.7~71.4	0.8~71.4
	平均值 Mean	21.7 ± 8.1	15.4 ± 5.9	13.9 ± 9.6	20.6 ± 13.6	20.6 ± 15.6	18.1 ± 10.0
	中位数 Median	22.7	15.0	11.4	17.3	16.6	16.6
氮磷钾总含量 Total N, P ₂ O ₃ , K ₂ O content (g/kg)	范围 Range	28.9~187.0	31.4~140.1	12.4~123.8	24.8~108.5	17.7~301.2	12.4~301.2
	平均值 Mean	82.7 ± 28.6	84.5 ± 25.7	44.7 ± 20.6	50.8 ± 21.0	59.7 ± 58.8	69.4 ± 34.1
	中位数 Median	79.8	84.6	41.3	44.9	51.0	64.0
有机质 Organic matter (%)	范围 Range	9.0~69.8	18.4~71.6	25.3~73.5	19.5~72.6	5.8~74.6	5.8~74.6
	平均值 Mean	42.1 ± 13.5	54.4 ± 12.4	57.4 ± 12.6	54.5 ± 13.3	36.5 ± 20.9	49.4 ± 15.6
	中位数 Median	44.5	58.1	59.5	58.3	26.1	52.8
C/N	范围 Range	4.3~32.5	9.0~55.7	9.8~81.3	12.9~41.7	1.1~142.8	1.1~142.8
	平均值 Mean	11.2 ± 5.0	15.9 ± 7.5	24.9 ± 11.5	19.6 ± 7.2	22.1 ± 28.6	17.3 ± 12.3
	中位数 Median	10.5	14.4	21.7	16.4	16.3	14.9
C/P	范围 Range	3.5~66.2	5.6~82.2	11.0~253.9	17.8~128.7	3.9~210.5	3.5~253.9
	平均值 Mean	19.1 ± 11.5	19.2 ± 12.3	70.2 ± 49.0	67.6 ± 29.2	47.4 ± 49.9	37.9 ± 38.1
	中位数 Median	16.3	15.2	58.1	64.0	27.6	24.1
pH	范围 Range	6.1~9.4	5.7~8.6	6.3~9.1	6.7~9.1	5.2~12.5	5.2~12.5
	平均值 Mean	7.4 ± 0.7	7.3 ± 0.6	7.5 ± 0.5	7.9 ± 0.6	7.3 ± 1.5	7.4 ± 0.7
	中位数 Median	7.3	7.3	7.5	7.9	7.1	7.4
电导率 EC (mS/cm)	范围 Range	1.5~24.6	2.4~17.4	1.5~19.3	3.0~25.4	1.6~80.7	1.5~80.7
	平均值 Mean	9.4 ± 4.2	6.5 ± 3.2	5.9 ± 3.7	7.9 ± 5.1	9.7 ± 16.2	7.7 ± 6.2
	中位数 Median	8.9	5.6	4.6	6.5	6.2	6.8

均分别高出 29.2%~36.3% 和 49.0%~57.3%; 牛粪中 C/N 比值相对较高, 其次是其它有机废弃物和羊粪, 鸡粪和猪粪中 C/N 比值相对较低, 牛粪中 C/N 比值较其它有机废弃物、羊粪、鸡粪和猪粪平均分别高出 12.7%、27.0%、1.2 倍和 56.6%; 牛粪和羊粪中 C/P 比值相对较高, 其次是其它有机废弃物, 鸡粪和猪粪中 C/P 比值相对较低, 牛粪和羊粪中 C/P 比值较其它有机废弃物、鸡粪和猪粪平均分别高出 42.6%~48.1%、2.5~2.7 倍和 2.5~2.7 倍。

2.2.3 商品有机肥与有机废弃物中养分和有机质含量的差异 商品有机肥中全氮含量、全钾含量和养分总含量均高于有机废弃物, 全氮含量、全钾含量和养分总含量平均分别为 31.0、23.9 和 79.8 g/kg ($n = 126$), 较有机废弃物平均分别高出 51.2%、32.0% 和 15.0%; 有机废弃物中全磷含量、有机质含量、C/N 比值和 C/P 比值均高于商品有机肥, 全磷含量、有机质含量、C/N 比值和 C/P 比值平均分别为 30.8 g/kg、49.4%、17.3 和 37.9 ($n = 255$), 较商品有机肥平均分别高出 23.7%、41.5%、22.7% 和 15.2%。

2.2.4 商品有机肥和有机废弃物中 pH 值差异 表 3 和表 4 显示, 商品有机肥的 pH 值 (平均 6.8, $n = 126$) 低于有机废弃物 (平均 7.4, $n = 255$)。商品有机肥中商品鸡粪的 pH 值 (平均 7.4) 高于商品猪粪和其它商品有机肥 (平均分别为 6.7 和 6.6)。有机废弃物中羊粪的 pH 值相对较高, 平均为 7.9; 鸡粪、猪粪、牛粪和其它有机废弃物的 pH 值均值在 7.3~7.5 之间。

2.3 商品有机肥和有机废弃物中盐分状况

由表 3 和表 4 可见, 商品有机肥的 EC 值 (平均 23.5 mS/cm, $n = 126$) 远高于有机废弃物 (平均 7.7 mS/cm, $n = 255$)。商品有机肥中, 其它商品有机肥的 EC 值很高, 其次是商品猪粪, 商品鸡粪的 EC 值相对较低, 其它商品有机肥的 EC 值 (平均 28.6 mS/cm) 较商品猪粪和商品鸡粪平均分别高出 60.6% 和 1.3 倍。有机废弃物中, 鸡粪和其它有机废弃物的 EC 值相对较高 (平均 9.4~9.7 mS/cm), 其次是羊粪, 猪粪和牛粪的 EC 值相对较低, 鸡粪和其它有机废弃物的 EC 值较羊粪、猪粪和牛粪平均分别高出 19.0%~22.8%、44.6%~49.2% 和 59.3%~64.4%。

3 讨论

3.1 商品有机肥和畜禽粪便中重金属含量差异

本研究表明, 商品鸡粪和商品猪粪中 Cd 超标率分别达到 10.3% 和 20.0%, 明显高于鸡粪和猪粪 (超

标率分别为 2.4% 和 1.5%); 商品有机肥中 Pb、Cr 含量远高于有机废弃物, 较有机废弃物平均分别高出 97.1% 和 10.4 倍。畜禽粪便商品有机肥中除主要原料畜禽粪便含有较高含量的重金属外, 其生产工艺流程中加入的粘结剂、无机肥料等物料也含有一定量的重金属, 这可能是造成商品有机肥中重金属含量明显高于有机废弃物的重要原因。商品鸡粪或商品猪粪的主要原料是鸡粪或猪粪, 还含有化肥、其它畜禽粪便、工农业有机废弃物 (如秸秆、蘑菇渣、酒渣等), 以及草 (泥) 碳等中的一种或几种原料; 其它商品有机肥主要原料不够明确, 来源更为复杂。刘荣乐等^[14] 调查分析发现, 商品有机肥中重金属含量与生产原料中重金属含量呈显著正相关。谭晓冬等^[24] 调查指出, 重金属 Cd 含量以畜禽粪便为原料生产的商品有机肥高。程旭艳等^[25] 研究显示, 以猪粪为主要生产原料的商品有机肥中重金属均值最高。商品有机肥大多是经过简单的发酵、脱水、包装就出售了, 没有对重金属进行钝化或者去除的过程。商品有机肥, 特别是商品鸡粪和猪粪 Cd、Pb、Cr 含量显著高于未经商品化的鸡粪和猪粪, 说明商品化后, 重金属在一定程度上积累, 增加了环境风险。因此, 商品有机肥、有机废弃物在施用量上应该有不同的要求。

畜禽粪便等有机废弃物及以畜禽粪便为主要原料生产的商品有机肥中重金属含量直接影响农产品的安全生产。随着规模化、集约化畜牧业的发展, 各种微量元素添加剂的使用也越来越广泛。为了防治畜禽疾病、促进畜禽生长和提高饲料利用率, 在配合饲料中添加铜、锌、砷等重金属元素在世界各国较为普遍, 畜禽饲料添加高剂量的微量元素以及畜禽对微量重金属元素低吸收利用率是造成畜禽粪便中重金属含量超标或明显增加的重要原因。因此, 必须加强畜牧养殖法规和饲料检验方面的管理, 从源头减少重金属进入农业的机会, 减少养殖业带来的环境污染。另外, 商品有机肥中的重金属含量还可能受所加入的粘结剂、无机肥料等物料的影响, 须控制这些物料中重金属含量和选择重金属含量低的物料。

3.2 畜禽粪便中 Cu 和 Zn 含量变化

Cu、Zn 既是作物必需的微量元素, 也是重金属元素。作物对 Cu、Zn 需要量不高, 但对作物的生长发育至关重要, 如果过量会对作物造成损害, 甚至使作物产品中含量超标, 对人体健康构成威胁。我国现有的 NY525-2012 有机肥料中重金属限量标准对

Cu 和 Zn 没有制定相应的限量, 但我国对土壤中重金属 Cu 和 Zn 含量制定了相应的限量标准。我国菜田尤其是设施菜田土壤总 Cu 和总 Zn 含量呈明显积累的趋势^[26], 长期施用畜禽粪便有机肥会在土壤中积累而具有超过土壤环境质量标准中 Cu 和 Zn 限量的风险。菜田尤其是设施菜田土壤总 Cu 和总 Zn 积累与当前畜禽粪便中 Cu 和 Zn 含量大幅增加有关。从表 5 可以看到, 现在的畜禽粪便与传统有机肥已经大不相同, 尤其是鸡粪和猪粪中 Cu、Zn 含量远高于 20 世纪 90 年代初。与 20 世纪 90 年代初和 2005 年结果相比, 当前鸡粪中 Cu 含量分别增加 1.5 倍和 45.0%, Zn 含量分别增加 1.3 倍和 18.5%; 当前猪粪中 Cu 含量分别增加 16.2 倍和 42.7%, Zn 含量分别增加 4.7 倍和 19.7%; 当前牛粪中 Cu 含量分别增加 1.7 倍和 54.8%, Zn 含量分别增加 51.9% 和 0.3%; 当前羊粪中 Cu 含量分别增加 40.4% 和 1.2 倍, Zn 含量分别增加 23.7% 和 10.8%。因此, 开展商品有机肥和有机废弃物中 Cu 和 Zn 限量标准的研究和制定, 对规范和指导商品有机肥的安全生产, 对发展无公害食品和绿色食品生产至关重要, 是保障从农田到餐桌的全过程监控的技术保障。

表 5 畜禽粪便中重金属 Cu 和 Zn 含量演变情况
(mg/kg, 干基)

Table 5 Changes of the contents of heavy metals
(Cu and Zn) in main animal manures

重金属 Heavy metal	时间 Time	鸡粪 Chicken manure	猪粪 Pig manure	牛粪 Cattle manure	羊粪 Sheep manure
Cu	1990 s ^[11]	52.4	37.6	26.9	44.3
	2005 ^[14]	91.6	452.2	46.5	28.7
	2014	132.8	645.2	72.0	62.2
Zn	1990 s	159.6	137.2	100.3	110.5
	2005	309.5	656.2	151.9	123.4
	2014	366.7	785.2	152.4	136.7

注 (Note): 2005 年鸡粪、猪粪、牛粪和羊粪样本数分别为 47、29、42 和 15 个, 2014 年分别为 85、65、59 和 24 个
Numbers of the samples of chicken manure, pig manure, cattle manure and sheep manure were 47, 29, 42 and 15 respectively in 2005, and 85, 65, 59 and 24 in 2014.

3.3 不同商品有机肥和畜禽粪便中养分和有机质含量差异

有机肥料中氮、磷、钾、有机质等含量丰富, 利用好畜禽粪便有机肥及以畜禽粪便为主要原料生产的商品有机肥不但可以有效减少化肥用量, 还能

增加土壤有机质, 实现减肥增效和农田可持续利用。但是猪粪、鸡粪、商品猪粪和商品鸡粪中磷含量较高, 氮磷比例 (N : P₂O₅) 平均分别为 1 : 2.19、1 : 1.44、1 : 1.36 和 1 : 1.27 (表 3、表 4), 因此施用猪粪、鸡粪有机肥时要考虑其中的养分, 注意氮磷钾养分的平衡, 采用以磷素平衡为参考基础的有机肥用量推荐方法, 以防止有机肥过量施用造成土壤磷素积累和面源污染。

本研究还表明, 不同种类的有机废弃物中有机质含量存在较大差异, 牛粪、羊粪和猪粪中有机质含量相对较高, 在 54.4%~57.4% 之间, 较鸡粪和其它有机废弃物平均分别高出 29.2%~36.3% 和 49.0%~57.3%; 牛粪中 C/N 比值相对较高, 较猪粪、鸡粪、羊粪和其它有机废弃物平均分别高出 56.6%、1.2 倍、27.0% 和 12.7%。目前我国菜田一般施用的有机肥以鸡粪、猪粪为主, 此类肥料含速效性养分多, 纤维素较少, 分解速度快, 对土壤腐殖质形成贡献有限。蔬菜种植过程中大量施用化肥和不合理施用有机肥, 从而导致我国主要菜区土壤有机质含量普遍较低, 土壤 C/N 比下降, 土壤环境恶化^[27-28]。因此, 对于种植年限较长的温室和大棚, 要在增施有机肥的基础上, 增施含纤维素较多的作物秸秆、牛粪、羊粪等, 协调好菜田土壤养分与能量间 (土壤 C/N 比) 的平衡, 改善土壤质量, 抑制土壤次生盐渍化, 以保持温室和大棚的高效生产和持续利用。

4 结论与建议

1) 按照我国现有的 NY525-2012 有机肥料中重金属限量标准, 商品鸡粪以 Cd、Pb 和 Cr 超标为主, 超标率分别为 10.3%、17.2% 和 17.2%; 商品猪粪以 Cd 和 As 超标为主, 超标率分别为 20.0% 和 6.7%; 其它商品有机肥以 Cr 超标为主, 超标率为 13.4%。猪粪、鸡粪、其它有机废弃物以 As 超标为主, 超标率分别为 15.4%、7.1% 和 13.6%; 羊粪以 Cd 超标为主, 超标率为 12.5%。

2) 商品有机肥中全氮含量、全钾含量和氮磷钾总含量高于有机废弃物, 有机废弃物中全磷含量、有机质含量、C/N 比值和 C/P 比值高于商品有机肥。商品有机肥中, 商品猪粪的全磷含量、有机质含量和 C/N 比值相对较高, 其它商品有机肥的全氮含量、全钾含量、氮磷钾总含量和 C/P 比值相对较高; 有机废弃物中, 鸡粪和猪粪的全氮含量、全磷含量和氮磷钾总含量相对较高, 鸡粪、羊粪和其它有机废弃物的全钾含量相对较高, 猪粪、牛粪和羊

粪的有机质含量相对较高,牛粪的 C/N 比值相对较高,牛粪和羊粪的 C/P 比值相对较高。

3) 商品有机肥的 EC 值远高于有机废弃物,商品有机肥中其它商品有机肥的 EC 值很高,其次是商品猪粪,商品鸡粪的 EC 值相对较低;有机废弃物中鸡粪和其它有机废弃物的 EC 值相对较高,其次是羊粪,猪粪和牛粪的 EC 值相对较低。

畜禽粪便有机肥及以畜禽粪便为主要原料生产的商品有机肥既是作物高产优质的基础,又是环境污染因子,不合理利用就会污染农产品和环境。商品有机肥和有机废弃物的重金属、养分和盐分含量特点要求在施用时要注意选择合适的种类及其含量状况,安全合理地施用,避免过高投入某一种养分或过多带入某一种重金属元素,造成养分失衡及环境和农产品污染。因此,有必要开展商品有机肥和有机废弃物高效安全施用和长期监测方面的研究,包括养分释放和重金属积累特点、安全用量与土壤年承载量,以及替代化肥的模式和比例,从而为商品有机肥和有机废弃物的科学施用和无公害食品生产提供依据。

致谢: 商品有机肥和有机废弃物样品采取由国家大宗蔬菜产业技术体系各综合试验站站长负责,其他岗位专家参与并给予了指导,在此一并感谢。

参 考 文 献:

- [1] Gabhane J, Prince William S P M, Bidyadhar R, *et al.* Additives aided composting of green waste: Effects on organic matter degradation, composting maturity, and quality of the finished compost[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 114: 382–388.
- [2] 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(20): 4207–4229.
Li S T, Jin J Y. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(20): 4207–4229.
- [3] Bolan N S, Adriano D, Mahimairaja S. Distribution and bioavailability of trace elements in livestock and poultry manure by-products[J]. *Environmental Science Technology*, 2004, 34: 291–338.
- [4] Coggins A M, Jennings S G, Ebinghaus R. Accumulation rates of the heavy metals lead, mercury and cadmium in ombrotrophic peatlands in the west of Ireland[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(2): 260–278.
- [5] Zhao L, Dong Y H, Wang H. Residues of veterinary antibiotics in manures from feedlot livestock in eight provinces of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(5): 1069–1075.
- [6] 邢延铤. 研究和应用环保型饲料是未来饲料工业发展的必然趋势[J]. *饲料工业*, 2015, 26(11): 1–5.
Xing Y X. Study and application of environmental protection feed to be trend in future[J]. *Feed Industry*, 2015, 26(11): 1–5.
- [7] 胡海平, 王代懿, 张丰松, 等. 东北三省不同规模养殖场畜禽饲料和粪便中锌质量分数特征[J]. *环境科学研究*, 2013, 26(6): 689–694.
Hu H P, Wang D Y, Zhang F S, *et al.* Contents of zinc in animal feeds and manures from farms of different scales in the northeast of China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(6): 689–694.
- [8] Zhang Z Q, Wang X B, Li C H, *et al.* Effects of straw addition on increased greenhouse vegetable yield and reduced antibiotic residue in fluvo-aquic soil[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(7): 1423–1433.
- [9] 黄霞, 李廷轩, 余海英. 典型设施土壤重金属含量变化及其风险评价[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(4): 833–839.
Huang X, Li T X, Yu H Y. Risk assessments of heavy metals in typical greenhouse soils[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(4): 833–839.
- [10] Cordovil C M, Cabral F, Coutinho J. Potential mineralization of nitrogen from organic wastes to ryegrass and wheat crops[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(17): 3265–3268.
- [11] 邢文英, 李荣. 中国有机肥料养分数据库[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1999.
Xing W Y, Li R. Database of nutrients in organic manure in China[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1999.
- [12] 李鹏, 齐光海. 饲料添加剂的使用安全研究进展[J]. *饲料工业*, 2006, 27(18): 7–10.
Li P, Qi G H. Advances in security of using feed additive[J]. *Feed Industry*, 2006, 27(18): 7–10.
- [13] 李书田, 刘荣乐, 陕红. 我国主要畜禽粪便养分含量及变化分析[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(1): 179–184.
Li S T, Liu R L, Shan H. Nutrient contents in main animal manures in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1): 179–184.
- [14] 刘荣乐, 李书田, 王秀斌, 王敏. 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 R L, Li S T, Wang X B, Wang M. Contents of heavy metal in commercial organic fertilizers and organic waste[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2): 392–397.
- [15] 刘昱东. 辽宁省有机肥中重金属含量调查分析及科学施用有机肥的建议[J]. *农业科技与装备*, 2012, (1): 10–13.
Liu Y D. Analysis on the survey of heavy metal content in organic fertilizers in Liaoning and suggestions[J]. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2012, (1): 10–13.
- [16] 周博, 朱振国, 周建斌, 陈竹君. 杨凌地区不同畜禽有机肥养分及重金属含量研究[J]. *土壤通报*, 2013, 44(3): 714–718.
Zhou B, Zhu Z G, Zhou J B, Chen Z J. Contents of nutrients and heavy metals in the different livestock and poultry manure[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(3): 714–718.
- [17] 王飞, 邱凌, 沈玉君, 等. 华北地区饲料和畜禽粪便中重金属质量分数调查分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(5): 261–267.
Wang F, Qiu L, Shen Y J, *et al.* Investigation and analysis of heavy metal contents from livestock feed and manure in North China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(5): 261–267.

- [18] 钟杭, 姜烽. 浙江省商品有机肥重金属含量调查与分析[J]. 浙江农业学报, 2013, 25(5): 1092–1095.
Zhong H, Lou F. Investigation and analysis on the heavy metal contents of organic fertilizers in Zhejiang province[J]. *Acta Agriculture Zhejiangensis*, 2013, 25(5): 1092–1095.
- [19] 覃丽霞, 马军伟, 孙万春, 等. 浙江省畜禽有机肥重金属及养分含量特征研究[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(4): 604–610.
Qin L X, Ma J W, Sun W C, *et al.* Characteristics of heavy metal and nutrient contents in livestock manure in Zhejiang province[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2015, 27(4): 604–610.
- [20] 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 R K. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [21] NY/T 1121. 11–2006. 中华人民共和国农业行业标准[S].
NY/T 1121. 11–2006. Agricultural industry standard of the people's Republic of China[S].
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (The third edition)[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2002.
- [23] NY525–2012. 中华人民共和国农业行业标准[S].
NY525–2012. Agricultural industry standard of the people's Republic of China[S].
- [24] 谭晓冬, 董文光. 商品有机肥中重金属含量状况调查[J]. 农业环境与发展, 2006, (1): 50–51.
Tan X D, Liu W G. Survey of heavy metals in organic fertilizer[J]. *Agro-Environment and Development*, 2006, (1): 50–51.
- [25] 程旭艳, 王定美, 乔玉辉, 等. 中国商品有机肥重金属分析[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(2): 72–76.
Cheng X Y, Wang D M, Qiao Y H, *et al.* Analyze on the heavy metal contents in China commodity organic fertilizer[J]. *Environment Pollution and Control*, 2012, 34(2): 72–76.
- [26] 黄绍文, 唐继伟, 李春花. 不同栽培方式菜田耕层土壤重金属状况[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(3): 707–718.
Huang S W, Tang J W, Li C H. Status of heavy metals in vegetable soils under different patterns of land use[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(3): 708–719.
- [27] 黄绍文, 王玉军, 金继运, 等. 我国主要菜区土壤盐分、酸碱性和肥力状况[J]. 植物营养肥料学报, 2011, 17(4): 906–918.
Huang S W, Wang Y J, Jin J Y, *et al.* Status of salinity, pH and nutrients in soils in main vegetable production regions in China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(4): 906–918.
- [28] Qiu S J, Ju X T, Ingwersen J, *et al.* Changes in soil carbon and nitrogen pools after shifting from conventional cereal to greenhouse vegetable production[J]. *Soil & Tillage Research*, 2010, 107(2): 80–87.