

有机物料输入对土壤及玉米籽粒重金属来源解析及风险评估

李传哲, 杨苏, 姚文静, 汪吉东, 张永春, 杨凤娟, 艾玉春

引用本文:

李传哲, 杨苏, 姚文静, 等. 有机物料输入对土壤及玉米籽粒重金属来源解析及风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1230–1239.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1385>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

菌渣猪粪还田下麦稻重金属富集特征及风险评价

周伟, 邓良基, 贾凡凡, 李瀚

农业环境科学学报. 2017, 36(2): 230–240 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1137>

基于健康风险评价的白菜种植土壤中重金属的安全限量研究

周旭, 周安琪, 曹红斌, 刘建伟, 陈艳姣, 张爱琛

农业环境科学学报. 2020, 39(6): 1213–1220 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1367>

施用生物炭对重金属污染农田土壤改良及玉米生长的影响

李衍亮, 黄玉芬, 魏岚, 黄连喜, 黄庆, 许桂芝, 刘忠珍

农业环境科学学报. 2017, 36(11): 2233–2239 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0522>

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

王琼瑶, 李森, 周玲, 王贵胤, 张楚儿, 张世熔

农业环境科学学报. 2016, 35(9): 1764–1772 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0336>

基于PCA和地统计的西南烟田土壤重金属源解析

伍海闻, 罗婷, 马瑾, 黄成毅, 李位波, 陈俊朴

农业环境科学学报. 2020, 39(5): 1010–1018 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1181>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李传哲, 杨 苏, 姚文静, 等. 有机物料输入对土壤及玉米籽粒重金属来源解析及风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1230–1239.

LI Chuan-zhe, YANG Su, YAO Wen-jing, et al. Source analysis and pollution risk assessment of heavy metals in soil and maize grain through the application of organic materials[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(6): 1230–1239.



开放科学 OSID

有机物料输入对土壤及玉米籽粒 重金属来源解析及风险评估

李传哲¹, 杨 苏^{1,3}, 姚文静², 汪吉东^{1*}, 张永春¹, 杨凤娟⁴, 艾玉春¹

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/农业农村部江苏耕地保育科学观测试验站, 南京 210014; 2. 南京林业大学竹类研究所/生物与环境学院, 南京 210037; 3. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 4. 南京市六合区龙袍街道农业服务中心, 南京 211500)

摘 要:在黄泛冲积区添加不同有机物料可以提升土壤肥力, 但是否对土壤环境及作物带来潜在的重金属污染风险尚未知。本研究开展了连续 2 a 的大田环境监测试验, 在玉米轮作条件下采用随机区组设计, 分别为 CK(对照, 不施有机物料)、M1(有机肥用量 $6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、M2(有机肥用量 $12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、M3(有机肥用量 $18 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、S1(秸秆质菇渣用量 $6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、S2(秸秆质菇渣用量 $12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、S3(秸秆质菇渣用量 $18 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、B1(木质菇渣用量 $6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、B2(木质菇渣用量 $12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、B3(木质菇渣用量 $18 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。通过测定各处理 0~20 cm 土层土壤以及玉米籽粒重金属含量变化, 运用 Pearson 相关分析和聚类分析探究土壤重金属来源和作物品质与不同有机物料的关系, 应用潜在生态风险评价法以及污染负荷指数法对土壤进行污染评价。结果表明: 以上不同有机物料投入的综合潜在生态风险危害程度均为中等风险, 重金属 Cd 为主要生态危害贡献因子。等量不同有机物中, 施用有机肥处理对玉米产量的影响最显著, 但对土壤重金属含量的影响也最大; 施用木质菇渣处理提升土壤有机质含量的效果最好, 且对籽粒重金属含量影响效果最小。同种物料添加下, 土壤及籽粒重金属的含量随着施用量的增加而增加, 其中 M2、M3、S3 处理下玉米籽粒中重金属 Pb 含量超标 ($0.2 \sim 0.295 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 其超标率为 35%。应用污染负荷指数法分析结果表明所有处理土壤单因子 Cd 污染等级属于重污染等级, 但除 Cd 以外的其他重金属含量都远低于我国农用地土壤污染风险管控最低标准, 因此土壤重金属含量整体而言仍属于安全等级。研究表明, 目前所有处理的土壤重金属含量属于安全等级, 但存在潜在的中等生态风险, 部分处理玉米籽粒出现轻微 Pb 超标现象, 从快速提高土壤肥力及最大限度减少土壤重金属和农产品污染风险角度, 应减少商品有机肥及秸秆质菇渣的高量施入, 提倡施用木质菇渣更有利于土壤环境和农产品健康的可持续发展。

关键词: 重金属; 有机物料; 环境监测; 污染评价; 玉米

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)06-1230-10 doi:10.11654/jaes.2019-1385

Source analysis and pollution risk assessment of heavy metals in soil and maize grain through the application of organic materials

LI Chuan-zhe¹, YANG Su^{1,3}, YAO Wen-jing², WANG Ji-dong^{1*}, ZHANG Yong-chun¹, YANG Feng-juan⁴, AI Yu-chun¹

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Scientific Observation and Experimental Station of Arable Land Conservation of Jiangsu Province, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China; 2. Bamboo Research Institute/College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 3. College of Resources and Environment Sci-

收稿日期: 2019-12-17 录用日期: 2020-02-15

作者简介: 李传哲(1990—), 男, 山东郓城人, 硕士, 助理研究员, 主要从事农业资源利用研究。E-mail: lichuanzhe66@163.com

*通信作者: 汪吉东 E-mail: jdwang66@163.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800301); 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(17)-1001); 江苏省重点研发计划项目(BF2019378); 江苏省自然科学基金(BK20190748)

Project supported: National Key R&D Program of China(2018YFD0800301); Jiangsu Agricultural Science and Technology Innovation Fund(CX(17)-1001); Key R&D Program of Jiangsu Province(BF2019378); Natural Science Foundation of Jiangsu Province(BK20190748)

ence, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 4. Liuhe District Longpao Street Agricultural Service Center, Nanjing 211500, China)

Abstract: The addition of different organic materials to the alluvial flood district of the Huanghe river can improve the soil fertility of the former. However, the risk of heavy metal pollution to soils and crops is not known. In this study, environmental monitoring tests were conducted in alluvial flood districts for 2 years, and 10 randomized blocks—CK (control, no organic material), M1 ($6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ of organic fertilizer), M2 ($12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ of organic fertilizer), M3 ($18 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ of organic fertilizer), S1 ($6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ of straw mushroom residue), S2 ($12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ of straw mushroom residue), S3 ($18 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ of straw mushroom residue), B1 ($6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ of wood mushroom residue), B2 ($12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ of wood mushroom residue), and B3 ($18 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ of wood mushroom residue)—were marked in a maize-wheat rotation system. The study analyzed the relationship between the source of heavy metals in the soil and crop quality. Different organic materials were used for this, and the heavy metal content in the topsoil (0~20 cm) and maize grain were determined using Pearson relative analysis and clustering analysis. The study also evaluated soil pollution by heavy metals using a potential ecological risk assessment and the pollution load index method. The results indicated that there reached a medium level of potential ecological risk from the organic materials analyzed and that Cd was the main contributor to this. The effects of organic fertilizer application on corn yield and heavy metal content in the soil were the most significant when different organic materials were added in equal quantities. This led to the most significant improvement in soil organic content and to the lowest effect on the heavy content of maize grain from the application of woody mushroom residue. The use of a single material increased the heavy metal content in the soil and maize grain as the fertilizer application rates increased. The Pb content in maize grain exceeded industry standards by 35% in the M2, M3, and S3 treatments. The pollution load index analysis indicated that, in all treatments, the Cd single-factor pollution index reached a high level; however, the content of other heavy metals except Cd was far lower than the minimum standard for soil pollution risk management and control for agricultural land in China. Therefore, overall heavy metal pollution could be considered within a safe level. Although there was a medium level of potential ecological risk, the heavy metal content in all treatments were within a safe level. To improve soil fertility rapidly and reduce the heavy metal pollution risk, the application of commercial organic fertilizer and straw mushroom residue should be minimized. The application of wood mushroom residue is more conducive for the sustainable development of soil environments and agricultural products.

Keywords: heavy metal; organic material; environmental monitoring; pollution evaluation; maize

随着工业发展和城市化进度的加快,大量有害重金属进入生物圈,其中污水灌溉、工业“三废”排放、化肥和农药生产、汽车尾气、城市生活垃圾以及污泥农用有机肥都有可能造成重金属进入土壤并被植物吸收,导致植物体内重金属含量增加^[1]。而农业生产中的有机废料,如秸秆质菌渣、木质菇渣因人为添加加工营养元素等,增加了其重金属污染风险^[2]。当这些农业有机废料施入土壤时,与根系微环境之间相互作用,直接影响作物对土壤重金属的吸收,并且农作物对重金属的吸收程度不同,生产菇渣的原料也各不相同,导致菇渣的主要成分差别很大,而且不同用量的菇渣对土壤重金属影响程度亦不相同,仅仅研究菇渣单一因素对土壤重金属含量影响并不科学。

黄泛冲积区位于江苏省西北部,是江苏省主要的玉米、小麦生产基地之一。土壤主要类型为潮土,表现为“高沙低黏”,保水保肥能力弱,该区域内土壤普遍有机质含量低、土壤肥力差,在很大程度上影响当地作物产量并制约着当地农业的发展^[3]。而有些有机物料廉价并且能够短时间快速提升土壤肥力,在提

高当时作物产量及土壤有机质含量方面具有较大优势^[4]。本文在验证施用有机物料提升土壤地力,增加土壤有机质含量的同时,研究人为施加不同种类、不同用量有机物料对土壤环境以及农产品安全是否存在潜在生态风险进行综合评估,筛选出最佳有机物料以及用量,以期为特定有机物料的推广以及建立农业环境健康可持续利用和农产品安全生产可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验土壤

试验区位于黄河故道某典型区域,土壤类型为潮土,耕作方式为玉米小麦轮作,2017年6月至2018年10月进行大田定位试验,试验地耕作层(0~20 cm)土壤基本理化性状见表1。

1.2 供试物料

供试化肥为尿素(含N 46%)和复合肥(N:P₂O₅:K₂O=18:12:10)。有机肥为阿古利斯有机肥,由江苏泰兴阿古利斯生物科技有限公司提供;秸秆质菌菇渣

表1 土壤基本理化性质
Table 1 Basic state of soil nutrients

pH	有机质 Organic matter/ g·kg ⁻¹	全氮 Total N/ g·kg ⁻¹	有效磷 Available P/ mg·kg ⁻¹	速效钾 Available K/ mg·kg ⁻¹	有效铜 Available Cu/ mg·kg ⁻¹	有效锌 Available Zn/ mg·kg ⁻¹	总铬 Total Cr/ mg·kg ⁻¹	总镉 Total Cd/ mg·kg ⁻¹	总铅 Total Pb/ mg·kg ⁻¹	总汞 Total Hg/ mg·kg ⁻¹	总砷 Total As/ mg·kg ⁻¹
8.58	4.41	0.18	2.63	63.33	14.67	47.91	45.88	2.45	18.53	0.005	7.92

和木质菇渣为秀珍菇培养基废料,均为盐城市亭湖区春秋菌业专业合作社提供。不同物料重金属含量见表2。

1.3 试验设计

试验共设置10个处理:CK(对照,不施有机物料)、M1(有机肥用量6 t·hm⁻²)、M2(有机肥用量12 t·hm⁻²)、M3(有机肥用量18 t·hm⁻²)、S1(秸秆质菇渣用量6 t·hm⁻²)、S2(秸秆质菇渣用量12 t·hm⁻²)、S3(秸秆质菇渣用量18 t·hm⁻²)、B1(木质菇渣用量6 t·hm⁻²)、B2(木质菇渣用量12 t·hm⁻²)、B3(木质菇渣用量18 t·hm⁻²)。小区试验采用定位及完全随机区组排列,保持3个重复并维持小区的位置及处理不变,每个小区面积为96 m²(长12 m,宽8 m),行距为0.75 m,株距为0.25 m,依据当地习惯施肥,每个处理化肥养分总投入为N 300 kg·hm⁻²,P₂O₅ 72 kg·hm⁻²和K₂O 60 kg·hm⁻²,并在玉米七叶期和大喇叭口期各追氮肥一次,基肥和追肥之比为4:2:4,3种有机物料作为基肥一次性施入。

供试作物为玉米鑫玉31,小麦季施肥方式和用量与玉米季一致。玉米种植时间为2017年6月12日播种,10月16日收获;2018年为6月23日种植,10月13日收获。

1.4 测定方法

土壤样品:玉米收获后每小区土样采用S形5点取样法。土样室温下自然风干,除杂、人工进行木棒研磨,混匀,过100目尼龙筛,采用HNO₃、HF、HClO₄消煮、过滤后,采用石墨炉原子吸收光谱法(Solaar M6, Thermo Fisher Scientific, 美国)测定滤液重金属全量Cr、Cd、Pb、Hg、As含量;用DTPA浸提法并采用火焰

原子吸收光谱法(AAnalyst 700, 美国)测定有效态Cu、Zn含量。植株样品:玉米植株取样方式为20株随机混合取样,待玉米脱粒后继续75℃烘干,称质量,研钵研磨后过60目尼龙筛,采用硝酸-高氯酸湿式消解法,重金属各指标测定仪器与土壤相同^[5-6];采用高温外加热重铬酸钾氧化-容量法测定土壤有机质含量;土壤pH值的测定采用雷兹PXS-215型离子酸度计,水土比为2.5:1;分析所用试剂均为优级纯,水为超纯水。

1.5 数据处理

试验分析数据采用Excel 2010整理,运用SPSS 20.0软件进行数据分析,用Excel 2010和Origin 8.0软件做图。

1.6 重金属污染评价标准与方法

1.6.1 评价标准

本研究土壤和玉米籽粒重金属含量,参照我国最新颁布的《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)以及《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762—2017),见表3和表4。

1.6.2 评价方法

本文采用了单因子污染指数法、污染负荷指数法和潜在生态评价指数法相结合来评价土壤重金属污染^[7]。单因子指数反映各个重金属元素的污染程度,污染负荷指数兼顾了单因子污染指数平均值和最高值,突出污染较重的重金属污染物的作用^[8],其计算公式为:

$$P_a^i = \frac{M_a^i}{S_a^i}$$

$$PLI_a = \sqrt[n]{P_a^1 \times P_a^2 \times P_a^3 \times \dots \times P_a^n}$$

表2 肥料重金属含量(mg·kg⁻¹)
Table 2 Heavy metals concentration in fertilizer(mg·kg⁻¹)

肥料 Fertilizer	Cu	Zn	Cd	Cr	Pb	Hg	As
尿素 Urea	0.15	2.06	0.04	11.3	0.13	0.04	0.21
复合肥 Compound fertilizer	7.42	21.4	0.13	15.4	2.15	0.13	0.06
有机肥 Organic fertilizer	85.5	256.8	1.23	62.1	14.2	0.42	5.14
秸秆质菇渣 Straw mushroom residue	123.8	186.7	1.02	73.3	16.8	0.45	2.12
木质菇渣 Wood mushroom residue	35.1	115.6	0.85	55.8	19.2	0.33	6.95

表3 我国农用地土壤污染风险筛选值及背景值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 3 Chinese farmland soil pollution risk screening and background values($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

项目 Item	Cu	Zn	Cr	Cd	Pb	Hg	As
筛选值 Filter values	100	300	250	0.6	170	3.4	25
江苏背景值 Background values	22.3	62.6	77.8	0.13	26.2	0.29	10

注:旱地标准 $\text{pH}>7.5$ 。

表4 中国食品中重金属限量标准($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 4 The heavy metal limit of Chinese food($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

项目 Item	Cu	Zn	Cr	Cd	Pb	Hg	As
标准 Standard	10	50	1.0	0.1	0.2	0.02	0.5

式中: P_a^i 是 a 点上 i 重金属元素的污染指数; M_a^i 是 a 点上 i 重金属元素的实测值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; S_a^i 是 a 点上 i 重金属元素的标准值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; P_a^n 是指 a 点上的第 n 个重金属元素的污染指数, PLI_a 是 a 点上的重金属污染负荷指数,重金属标准值采用江苏省土壤重金属含量背景值^[9],见表3,污染负荷指数法的污染分级见表5。

潜在生态危害指数法是由瑞典学者 Hakanson^[10]在1980年建立的,目前为国际上土壤(沉积物)重金属研究中应用较为广泛的一种。计算公式如下:

$$E_a^i = P_a^i \times T_a^i$$

$$RI_a = \sum_{i=1}^n E_a^i$$

式中: E_a^i 、 P_a^i 、 T_a^i 分别为 a 点上 i 重金属元素的潜在生态风险系数、污染指数以及毒性系数, RI_a 为 a 点重金属元素综合潜在生态风险系数; E_a^n 为 a 点第 n 种重金属元素潜在生态风险系数。重金属毒性系数主要反映重金属毒性水平和生物对重金属污染的敏感程度,其评价指标见表6。

表5 土壤重金属污染等级划分标准

Table 5 The criterion of pollution grade of soil heavy metals

单因子污染指数分级标准 Pollution index criterion of individual factor		污染负荷指数分级标准 Comprehensive pollution index criterion	
污染等级 Pollution grade	污染指数 Pollution index	污染等级 Pollution grade	污染指数 Pollution index
清洁 Clean	$P_i \leq 1$	安全 Safety	$P \leq 0.7$
轻污染 Light pollution	$1 < P_i \leq 2$	警戒 Vigilance	$0.7 < P \leq 1$
中污染 Moderate pollution	$2 < P_i \leq 3$	轻污染 Light pollution	$1 < P \leq 2$
重污染 Heavy pollution	$P_i > 3$	中污染 Moderate pollution	$2 < P \leq 3$
		重污染 Heavy pollution	$P > 3$

表6 潜在生态危害分级标准

Table 6 Grade standard potential ecological risk

项目 Item	轻微 Slight	中等 Medium	强 Strong	很强 Very strong	极强 Greatly strong
E_i^r	<40	40~80	80~160	160~320	>320
RI	<90	90~180	180~360	360~720	>720

2 结果与讨论

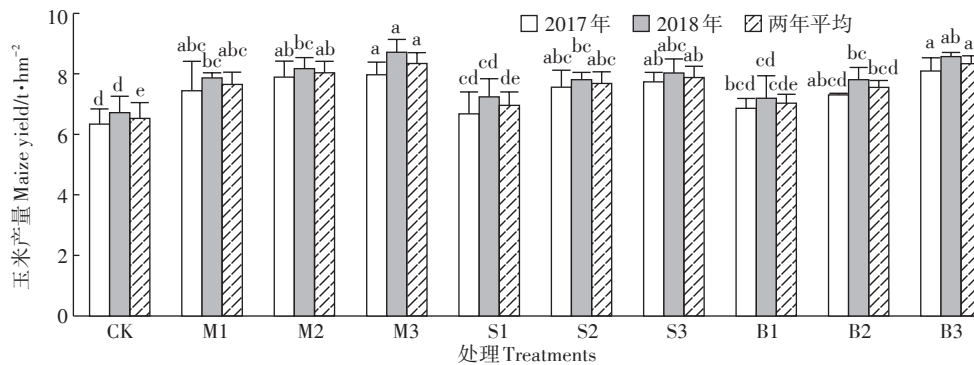
2.1 有机物料输入下玉米籽粒产量与土壤有机质提升状况

2.1.1 不同有机物料添加下玉米产量情况

不用物料添加下玉米籽粒产量如图1所示,可以看出添加不同有机物料均可使玉米产量出现不同程度的增加,同种物料添加下,玉米产量随着施用量的增加而提高。在2017年M3和B3处理玉米增产效果最好,分别比同时期CK处理增产22.00%和27.68%,2018年添加有机物料下玉米产量相较于同时期CK产量增产7.08%~29.66%,其中B1增产最小(7.08%),M3增产幅度最大(29.66%),B3处理产量次之(27.58%)。并且2018年相较于2017年出现了一个较大的增产,增幅在3.30%~9.33%,其中M3增幅最大(9.33%),S2处理增幅最小(3.30%)。有机物料中含有丰富的养分,有机与无机肥料相结合能够协调养分平衡供应,满足玉米对养分的需求,使作物保持高产稳产。该研究结论与温延臣等^[11]与Manna等^[12]结果一致。正常情况下,作物秸秆相较于木屑养分丰富,但在菌菇棒实际生产过程中人为的添加了黄豆粉、麦麸皮等辅料,使得木质菇渣的养分含量更丰富^[13],因此在等量物料添加量下,木质菇渣比秸秆质菇渣处理的玉米更高产。

2.1.2 土壤有机质含量

不同物料添加对土壤有机质含量的提升不同(图2),2018年不同处理土壤有机质含量相较于2017年有较大幅度提升,增幅为3.44%~28.86%,其中B3处理增幅最小(3.44%),M2处理增幅最大(28.86%)。2018年各处理土壤有机质含量相比CK土样提高了51.90%~100.71%,其中B3处理有机质提升幅度最大(100.71%),M1处理有机质提升幅度最小(91.50%)。同种物料添加下,土壤有机质含量随着施用量的增加而提升,等量物料添加下,对土壤有机质提升影响大小为:木质菇渣处理>秸秆菌渣>有机肥处理>CK,施用化肥没有外源有机物的输入,土壤有机C的来源主要是作物残体还田,并且使用化肥可促进作物根系生



同时期不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同
Different letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below

图1 不同物料添加下玉米产量

Figure 1 Maize yield given the addition of different materials

长,提高根际有机质的输入,同时根系分泌物也是作物向土壤输入有机C的重要途径^[14],因此CK处理下,土壤有机质也会有不同程度的提高。

施用菌菇渣能够更快速地提升土壤有机质水平。有研究表明,施用菌菇渣可以提高土壤有益微生物数量,从而进一步活化土壤中的养分,促进根系分泌物增加,提高土壤有机碳^[15-16]。并且木质菇渣的主要成分是木屑,赵亮等^[17]对木屑、小麦秸秆以及棉花有机物料进行对比试验,结果显示木屑提高土壤肥力以及培肥效果最好。而木质菇渣的主要成分是木屑,从而验证木质菇渣比秸秆质菇渣在土壤有机质提升方面效果更好。

2.2 有机物料输入下土壤与玉米籽粒重金属相关分析

2.2.1 土壤重金属含量

在第二季玉米收获后不同物料添加下土壤重金属含量如表7所示。土壤重金属含量总体呈现 $Zn > Cr > Pb > Cu > As > Cd > Hg$, 通过与我国最新颁布的《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB

15618—2018)进行对比得出,除Cd以外其他重金属含量都低于我国农用地土壤污染风险管控最低标准,试验基础土样Cd含量为 $2.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,超出江苏省土壤重金属背景值18倍以上,说明试验地本身存在Cd含量超标,这与陈京都等^[7]对江苏省土壤调查的研究结果一致。通过分析得出:添加有机肥、秸秆质菇渣和木质菇渣 $18 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理土壤Cd含量分别高出江苏土壤背景值23、20、20倍,不同处理土壤Cd含量相较于CK处理增加4.55%~26.32%,其中M3处理土壤重金属Cd含量最高,M2其次,B1处理最低。整体而言,在同种物料下,不同用量之间土壤重金属含量存在差异,但差异不大,等量物料下,施用有机肥对土壤重金属含量的影响最大。林辉等^[18]类似的研究也发现:施用有机肥加大了土壤受重金属污染的风险,2 a 4次施用有机肥后显著提高Zn、Cu、As的含量及活化率;茹淑华等^[19]同样得出:连续7 a施用有机肥的处理均显著增加了耕层土壤Cu、Zn、As和Cd的含量。且随有机肥施用量增加,耕层土壤中Cu、Zn、As和Cd含量

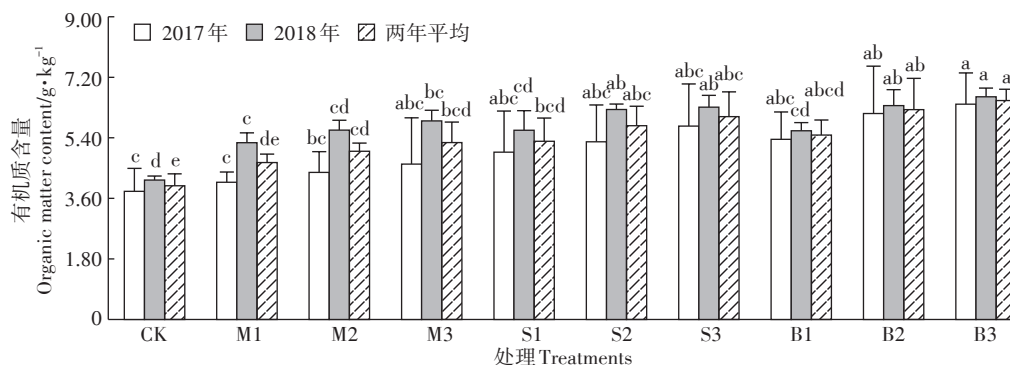


图2 不同处理土壤有机质含量

Figure 2 Soil organic matter content in different treatments

也显著增加^[20]。

2.2.2 玉米籽粒中重金属的含量

如表8所示,各个处理中玉米籽粒重金属含量大小呈现Zn>Cu>Cr>Pb>Cd>As>Hg,同种物料添加下,籽粒重金属含量随着施用量的增加而增加,其中B1与B2处理之间重金属Cu含量存在显著性差异,仅Cd、As含量随着施用量的增加差异不显著,但总体呈增加趋势。在较低菌菇渣用量添加下,籽粒中Zn含量有所降低,S1与B1处理相较于CK分别下降14.64%和13.60%。低用量菌菇渣添加可以减少植株对重金属Zn的吸收,结果与孙磊等^[21]结论相似。总体来看,在较高有机物料施用下,籽粒重金属含量均显著高于CK处理,表明施用较高用量有机物料可使土壤重金属含量增加,并且在根际微环境相互作用下螯合活化出更多的重金属,进而促使了根系对土壤重金属的吸收,使玉米籽粒中重金属含量增加。

2.2.3 玉米籽粒重金属累积量与土壤pH、土壤重金属含量以及有机物料用量相关性分析

作物籽粒中重金属的含量与其土壤重金属含量紧密相关,并且土壤pH被认为是影响作物籽粒重金属最重要的因素^[22],虽然大部分重金属以不可利用态(如氧化物结合态等)存在,不容易被植物吸收,但施入的有机物料与土壤及根际环境结合可使一部分重金属转变成螯合态,加剧了土壤环境污染风险,进而影响作物籽粒重金属含量。

为了研究和探讨这些因素对于玉米籽粒的影响,运用Pearson进行相关性分析,结果如表9所示,土壤pH和玉米籽粒Cu、Zn、Cd、Cr、Pb表现出负相关性。玉米籽粒中Cu、Zn、Hg、As的含量与土壤重金属的含量表现出极显著的正相关性,相关系数分别为0.575、0.636、0.689、0.740,相关系数的不同说明了玉米籽粒对不同重金属的吸收能力不同^[23]。这与王爽等^[24]研

表7 不同处理下土壤重金属含量(mg·kg⁻¹)
Table 7 The soil heavy metals content under different treatments(mg·kg⁻¹)

处理Treatments	Cu	Zn	Cd	Cr	Pb	Hg	As
CK	15.488±1.547c	48.15±2.94e	2.48±0.62b	45.11±0.97b	18.66±2.17c	0.005±0.001g	7.95±0.09b
M1	15.781±0.525c	66.51±7.73bc	2.94±0.16ab	46.96±1.28ab	19.11±0.3bc	0.007±0.002fg	8.97±0.61a
M2	19.639±1.666ab	74.88±4.1ab	3.01±0.34ab	47.16±1.72ab	20.27±0.52abc	0.01±0.001de	9.10±0.49a
M3	20.401±1.852ab	81.54±8.11a	3.13±0.2a	47.83±1.16ab	20.59±1.23abc	0.016±0.001c	9.20±0.18a
S1	19.169±0.925ab	50.96±3.24e	2.61±0.12ab	47.00±0.97ab	20.60±0.54abc	0.011±0.002d	8.76±0.02a
S2	19.859±1.246ab	62.66±6.13cd	2.67±0.05ab	47.93±1.36ab	21.50±0.2a	0.019±0.002b	8.99±0.67a
S3	21.883±2.596a	73.63±9.74ab	2.71±0.25ab	48.48±1.88a	21.79±2.4a	0.023±0.003a	9.18±0.23a
B1	18.612±1.586b	48.57±1.87e	2.59±0.23ab	46.46±1.04ab	18.87±0.74bc	0.005±0.003fg	9.41±0.13a
B2	19.213±1.74ab	54.76±6.19de	2.66±0.14ab	46.76±2.67ab	21.11±0.69ab	0.008±0.001ef	9.60±0.84a
B3	19.375±1.915ab	57.67±4.15cde	2.73±0.26ab	47.14±0.87ab	21.59±0.55a	0.012±0.002d	9.64±0.49a

注:同列不同字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。
Note: Different letters indicate significant differences among treatments (P<0.05). The same below.

表8 玉米籽粒中重金属的含量
Table 8 Content of heavy metals in maize grain

处理Treatments	Cu/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹	Cd/μg·kg ⁻¹	Cr/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹	Hg/μg·kg ⁻¹	As/mg·kg ⁻¹
CK	1.216±0.056c	18.6±0.745bc	37.556±2.342c	0.219±0.012c	0.115±0.032d	3.079±0.012e	0.019±0.009b
M1	1.447±0.053b	19.903±1.793abc	39.04±1.515bc	0.237±0.005bc	0.151±0.019cd	3.266±0.182de	0.026±0.008ab
M2	1.579±0.091ab	21.083±1.536ab	39.113±1.257bc	0.244±0.045abc	0.206±0.062abc	3.485±0.034cde	0.026±0.003ab
M3	1.608±0.061a	21.853±0.163a	39.772±0.806abc	0.251±0.008abc	0.229±0.03ab	3.787±0.004abc	0.029±0.003ab
S1	1.545±0.058ab	15.877±1.6d	39.34±2.452bc	0.248±0.007abc	0.159±0.041bcd	3.58±0.09bcd	0.021±0.004ab
S2	1.624±0.064a	17.66±1.146cd	41.053±0.78ab	0.251±0.045abc	0.181±0.037abcd	3.947±0.429ab	0.027±0.002ab
S3	1.642±0.053a	18.82±1.421bc	41.807±1.244ab	0.254±0.024abc	0.243±0.048a	4.161±0.49a	0.029±0.003ab
B1	1.451±0.047b	16.07±1.896d	41.394±0.579ab	0.224±0.054c	0.159±0.048bcd	3.199±0.024de	0.025±0.002ab
B2	1.649±0.114a	18.03±0.884cd	42.476±1.913a	0.291±0.039ab	0.161±0.04bcd	3.367±0.108de	0.031±0.014ab
B3	1.683±0.106a	19.657±1.455abc	41.765±0.85ab	0.306±0.041a	0.18±0.008abcd	3.583±0.098bcd	0.034±0.007a

究的农田土壤污染严重时,对应的主要作物也会存在一定的重金属超标,但不同作物对重金属的吸收能力不同的结论相似。

玉米籽粒中Cu、Pb、Hg的含量与有机肥的添加量呈显著相关,Cu、Cd、Pb、Hg、As的含量与秸秆质菇渣的用量呈显著相关,玉米籽粒Cu、Cr含量与木质菇渣用量呈显著相关。通过3种有机物料对比可知,秸秆质菇渣用量对籽粒中重金属的含量影响较大,有机肥次之,木质菇渣用量影响最小,从而可以得出3种物料中随着施用量的增加,木质菇渣对籽粒重金属的风险影响最小,有机肥次之,较高用量的秸秆质菇渣对籽粒重金属的风险影响最大。

2.3 不同有机物料添加下土壤与玉米籽粒重金属污染评价

2.3.1 土壤中重金属污染评价

如表10所示,土壤重金属单因子污染指数呈Cd>As>Cr>Zn>Cu>Pb>Hg,其中As、Cr、Zn、Cu、Pb、Hg污染指数均小于1,均属于清洁等级。Cd污染指数(4.127~5.213)大于3,超标率100%,属于重污染等级

(表4),不同处理Cd污染等级均高于其他重金属,这与人为活动或者土壤母质本身等因素已经积累了较高的Cd含量有关。虽然Cd的污染指数达到重污染等级,但单因子指数只能反映各个重金属元素的污染程度,不能全面地反映土壤整体的污染状况,所以运用了污染负荷指数分级标准^[25],结果显示:不同处理土壤整体状况均为安全等级,并且远低于安全标准0.7水平线(表10),因此不同物料添加对于土壤整体的安全暂不构成威胁。

2.3.2 玉米籽粒中重金属污染评价

玉米籽粒中重金属污染评价以我国颁布的《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762—2017)作为评价标准,玉米籽粒中Pb含量超标率为35%(表11),其中以M2、M3、S3处理超标率较多,其他处理均无超标,由此可见,该地区施用较多的有机肥以及秸秆质菇渣可导致玉米Pb污染。这与陈京都等^[7]对江苏省典型区农田土壤及小麦中重金属含量与评价的结论相似,从而可以得出施用木质菇渣作为有机物料时,相较于商品有机肥以及秸秆质菇渣能够更好地保

表9 玉米籽粒与土壤pH、土壤重金属含量以及有机物料用量相关性分析
Table 9 Correlation analysis between the contain heavy metals of maize grain and the pH of farmland soil

项目 Item	籽粒重金属 Heavy metals of grain						
	Cu	Zn	Cd	Cr	Pb	Hg	As
pH值 pH value	-0.238	-0.275	-0.274	-0.178	-0.127	0.254	0.127
土壤重金属含量 Heary metals content in soil	0.575**	0.636**	-0.018	0.106	0.416*	0.689**	0.740**
有机肥用量 Amount of organic fertilizer	0.726*	0.580	0.234	0.268	0.676*	0.822**	0.249
秸秆质菇渣用量 Amount of straw mushroom residue	0.849**	0.179	0.746**	0.470	0.804**	0.630*	0.701*
木质菇渣用量 Amount of mushroom residue	0.846**	0.495	0.539	0.693*	0.304	0.614	0.479

注:*表示在0.05水平上相关,**表示在0.01水平上相关。
Note:* indicates significant correlation at $P<0.05$,** indicates significant correlation at $P<0.01$.

表10 不同处理下重金属污染负荷评价
Table 10 Assessment of heavy metals pollution load under different treatments

处理 Treatments	P_{Cu}	P_{Zn}	P_{Cd}	P_{Cr}	P_{Pb}	P_{Hg}	P_{As}	P_{Li}
CK	0.155±0.015c	0.161±0.010e	4.127±1.026b	0.184±0.010b	0.110±0.013c	0.001±0g	0.318±0.004b	0.136±0.013f
M1	0.158±0.005c	0.222±0.026bc	4.898±0.273ab	0.188±0.005ab	0.112±0.002bc	0.002±0.001fg	0.359±0.024a	0.160±0.010de
M2	0.196±0.017ab	0.250±0.014ab	5.017±0.572ab	0.189±0.007ab	0.119±0.003abc	0.003±0de	0.364±0.020a	0.178±0.002bc
M3	0.204±0.019ab	0.272±0.027a	5.213±0.341a	0.191±0.005ab	0.121±0.007abc	0.005±0c	0.368±0.007a	0.196±0.006a
S1	0.192±0.009ab	0.170±0.011e	4.354±0.202ab	0.188±0.004ab	0.121±0.003abc	0.003±0d	0.35±0.001a	0.168±0.004cd
S2	0.199±0.012ab	0.209±0.020cd	4.455±0.077ab	0.192±0.005ab	0.126±0.001a	0.006±0b	0.36±0.027a	0.190±0.002ab
S3	0.219±0.026a	0.245±0.032ab	4.513±0.424ab	0.194±0.008a	0.128±0.014a	0.007±0.001a	0.367±0.009a	0.205±0.015a
B1	0.186±0.016b	0.162±0.006e	4.314±0.376ab	0.186±0.004ab	0.111±0.004bc	0.002±0fg	0.376±0.005a	0.148±0.004ef
B2	0.192±0.017ab	0.183±0.021de	4.434±0.225ab	0.187±0.004ab	0.124±0.004ab	0.002±0ef	0.384±0.033a	0.163±0.004cd
B3	0.194±0.019ab	0.192±0.014cde	4.551±0.433ab	0.189±0.003ab	0.127±0.003a	0.004±0.001d	0.386±0.020a	0.177±0.009bc

证粮食安全。

2.3.3 土壤中重金属潜在生态危害评价分析

不同物料添加下土壤潜在生态风险评价结果见表12。其中各处理下土壤重金属Cu、Zn、Cr、Pb、Hg、As的潜在生态风险系数均小于40,潜在生态风险级别均为轻微风险,潜在风险系数最小为0.055(Hg),潜在风险系数最大为3.857(As);都远小于40的最高标准。仅重金属Cd潜在生态风险系数(123.8~136.533)表现出较强风险等级。基础土样重金属Cd含量为2.45 mg·kg⁻¹,潜在风险系数为123.8,表明研究区域农田本身土壤重金属Cd存在较高的潜在风险。有学者认为这与潜在生态风险评价体系中重金属的毒性水平的不同有较大关系^[26],各处理土壤综合潜在生态风险系数范围为128.885~162.527,最低值为CK处理(128.885),最高值为M3处理(162.527),综合潜在生态危害分级标准均为中等,但CK与M2、M3处理之间存在显著性差异。整体而言,等量有机物下,综合潜在生态风险危害程度表现为有机肥处理最大,秸秆菌

渣和木质菇渣表现相差不大,Cd为主要的生态危害贡献因子。

2.3.4 土壤重金属聚类分析

分析发现不同物料添加均会使土壤受到不同程度的威胁,其中这些处理对土壤重金属的污染程度的相似性和差异性尚不能够直接体现出来,因此将各处理进行水平聚类分析(图3),并分成5个不同类群。第一类:CK、S1、B1土壤重金属污染程度最小,有机物料添加量不足以对土壤构成威胁,其来源可能为化肥中所含重金属污染、土壤母质结构、大气沉降、交通运输等原因^[27-28]。第二类:B2、B3处理下土壤重金属污染程度较小,相同物料添加量下Zn、Cd、Cr、Hg的含量要低于其他物料添加,说明较高用量的木质菇渣相较于商品有机肥以及秸秆质菇渣更清洁和安全。第三类:M2、M3处理下土壤的Zn、Cd含量最高,而Cd具有较高的重金属潜在风险,该处理下重金属的来源以有机肥为主,施用较多有机肥可能显著增加重金属潜在风险。第四类:M1、S2处理下土壤重金属Zn、Cr、Pb的含量较高,重金属的污染威胁也较大,与施入了重金属含量较高的有机肥以及较高用量的秸秆菌渣有关。第五类:S3处理下土壤重金属Cu、Cr、Pb、Hg含量最高,土壤污染程度最重(0.205),较高用量的秸秆质菇渣显著加大土壤重金属污染程度,这与秸秆质菇渣本身含有较高含量的重金属有关。

由此可见,化肥大量施用以及添加不同有机物料均可能成为土壤重金属的主要来源,不同有机物料的添加会给土壤带来不同程度和种类的重金属污染,造成农田出现较高重金属污染潜在风险。从快速提高土壤肥力以及最大限度减少土壤重金属污染风险的角度,应减少商品有机肥以及秸秆质菇渣的高量施

表 11 玉米籽粒中重金属含量及超标率

Table 11 Heavy metal contents in maize grain and the ratio of samples that exceeded the standard

重金属 Heavy metals	重金属含量/mg·kg ⁻¹				变异 系数 CV/%	超标率 Over-limit ratio/%
	平均值 Mean	最小值 Minimum	最大值 Maximum	标准偏差 STD		
Cu	1.544	1.179	1.788	0.149	9.622	0
Zn	18.756	14.033	22.589	2.199	11.727	0
Cd	0.040	0.035	0.045	0.002	4.888	0
Cr	0.253	0.189	0.352	0.038	15.054	0
Pb	0.178	0.091	0.295	0.049	27.644	35
Hg	0.003	0.003	0.004	0.001	14.637	0
As	0.027	0.009	0.046	0.007	25.481	0

表 12 土壤中重金属潜在生态危害评价分析

Table 12 Evaluation and analysis of potential ecological hazards of heavy metals in soil

处理 Treatments	<i>E</i> _{Cu}	<i>E</i> _{Zn}	<i>E</i> _{Cd}	<i>E</i> _{Cr}	<i>E</i> _{Pb}	<i>E</i> _{Hg}	<i>E</i> _{As}	<i>RI</i>
CK	0.774±0.077c	0.161±0.010e	123.800±30.776b	0.368±0.020b	0.549±0.064c	0.055±0.014g	3.178±0.036b	128.885±30.939b
M1	0.789±0.026c	0.222±0.026bc	146.933±8.201ab	0.376±0.010ab	0.562±0.009bc	0.082±0.02fg	3.589±0.245a	152.553±8.076ab
M2	0.982±0.083ab	0.250±0.014ab	150.500±17.159ab	0.377±0.014ab	0.596±0.015abc	0.114±0.007de	3.639±0.197a	156.458±17.187a
M3	1.020±0.093ab	0.272±0.027a	156.383±10.220a	0.383±0.009ab	0.606±0.036abc	0.184±0.007c	3.679±0.073a	162.527±10.364a
S1	0.958±0.046ab	0.170±0.011e	130.617±6.066ab	0.376±0.008ab	0.606±0.016abc	0.133±0.018d	3.503±0.009a	136.364±6.099ab
S2	0.993±0.062ab	0.209±0.020cd	133.650±2.296ab	0.383±0.011ab	0.632±0.006a	0.227±0.018b	3.597±0.267a	139.692±2.119ab
S3	1.094±0.130a	0.245±0.032ab	135.383±12.712ab	0.388±0.015a	0.641±0.070a	0.275±0.030a	3.673±0.090a	141.699±12.854ab
B1	0.931±0.079b	0.162±0.006e	129.433±11.287ab	0.372±0.008ab	0.555±0.022bc	0.063±0.014fg	3.763±0.052a	135.279±11.253ab
B2	0.961±0.087ab	0.183±0.021de	133.017±6.761ab	0.374±0.021ab	0.621±0.020ab	0.09±0.014ef	3.838±0.335a	139.083±7.092ab
B3	0.969±0.096ab	0.192±0.014cde	136.533±12.979ab	0.377±0.007ab	0.635±0.016a	0.141±0.020d	3.857±0.197a	142.704±13.103ab

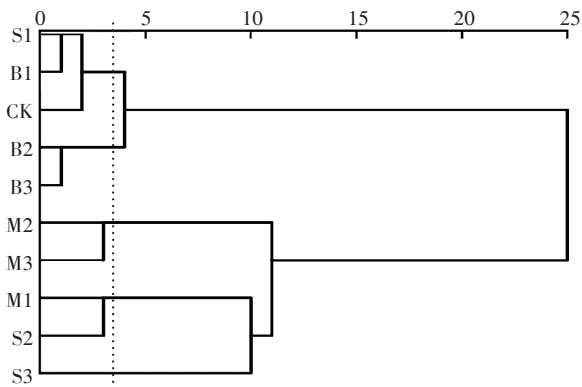


图3 不同处理下土壤重金属含量聚类分析

Figure 3 Cluster analysis of heavy metals content in soil under all treatments

入,提倡施用木质菇渣,有利于农业环境的可持续健康发展。

3 结论

(1)添加不同有机物料均可使土壤重金属含量增加,增幅在0.9%~369.1%,除Cd以外其他重金属含量都低于我国农用地土壤污染风险管控最低标准。随着施用有机物料量的增加玉米籽粒重金属含量呈增加趋势;等量有机物料施用条件下,有机肥对玉米产量的影响最显著,同时对土壤重金属含量的影响最大;M2、M3、S3处理条件下玉米籽粒中重金属Pb含量超标(0.200~0.295 mg·kg⁻¹)。

(2)相关性分析表明研究区域内重金属Cu、Zn、Hg、As较易从土壤向玉米籽粒迁移积累,不同有机物料用量对籽粒中重金属风险影响表现为秸秆质菇渣>有机肥>木质菇渣。根据污染负荷指数分级标准,在所有处理条件下土壤均为安全等级,但存在潜在的中等风险,等量物料添加下,有机肥处理的综合潜在生态风险危害程度最大。

(3)木质菇渣在快速提升土壤有机质含量、增加作物产量以及最大限度减少土壤重金属污染风险等方面具有显著优势,结合当地土壤状况和推广成本等因素,从农业环境可持续发展、农产品质量安全角度综合考虑,应减少商品有机肥以及秸秆质菇渣的高量施入,提倡施用木质菇渣。

参考文献:

- [1] 许晓玲,呼世斌,刘晋波,等.施用污泥堆肥对土壤中重金属累积和大豆产量的影响[J].环境工程,2018,36(3):108-111.
XU Xiao-ling, HU Shi-bin, LIU Jin-bo, et al. Effect of sewage sludge

- compost on soybean: Heavy metal accumulation and yield[J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(3): 108-111.
- [2] 韩建东,宫志远,姚强,等.金针菇菌渣栽培秀珍菇的营养成分分析[J].中国食用菌,2013,32(6):30-31.
HAN Jian-dong, GONG Zhi-yuan, YAO Qiang, et al. Analysis on main nutritional components in *Pleurotus geesterani* fruit bodies cultivated with spent *Flammulina velutipes* substrate[J]. *Edible Fungi of China*, 2013, 32(6): 30-31.
- [3] 赵明松,张甘霖,王德彩,等.徐淮黄泛平原土壤有机质空间变异特征及主控因素分析[J].土壤学报,2013,50(1):1-11.
ZHAO Ming-song, ZHANG Gan-lin, WANG De-cai, et al. Spatial variability of soil organic matter and its dominating factors in Xu-huai alluvial plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(1): 1-11.
- [4] 程存刚,赵德英,吕德国,等.植物源有机物料对果园土壤微生物群落多样性的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(4):913-922.
CHENG Cun-gang, ZHAO De-ying, LÜ De-guo, et al. Affects of plant-derived organic materials and humification driving forces on soil microbial community diversity in orchards[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(4): 913-922.
- [5] 吕琴,陈中云,闵航.重金属污染对水稻田土壤硫酸盐还原菌种群数量及其活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2005,11(3):399-405.
LÜ Qin, CHEN Zhong-yun, MIN Hang. Effect of heavy metal contamination on the population of sulfate reducing bacteria and the sulfate[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2005, 11(3): 399-405.
- [6] 陈怀满,郑春荣,周东美,等.土壤中化学物质的行为与环境质量[M].北京:科学出版社,2002.
CHEN Huai-man, ZHENG Chun-rong, ZHOU Dong-mei, et al. Behavior of chemical substances in soil and environmental quality[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [7] 陈京都,戴其根,许学宏,等.江苏省典型区农田土壤及小麦中重金属含量与评价[J].生态学报,2012,32(11):3487-3496.
CHEN Jing-du, DAI Qi-gen, XU Xue-hong, et al. Heavy metal contents and evaluation of farmland soil and wheat in typical area of Jiangsu Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(11): 3487-3496.
- [8] 傅智慧,俞洁,王飞儿,等.浙江蔬菜基地土壤重金属污染及潜在生态风险[J].环境科学与技术,2013,36(增刊1):334-337,413.
FU Zhi-hui, YU Jie, WANG Fei-er, et al. Pollution and potential ecological risk of soil heavy metals in Zhejiang vegetable bases[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 36(Suppl 1): 334-337, 413.
- [9] 中华人民共和国生态环境部.土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)(GB 15618—2018)[S].北京:中国标准出版社,2018.
Ministry of Ecological Environment of PRC. Soil environmental quality control standard for soil pollution risk of agricultural land (Trial) (GB 15618—2018)[S]. Beijing: China Standards Press, 2018.
- [10] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [11] 温延臣,张曰东,袁亮,等.商品有机肥替代化肥对作物产量和土壤肥力的影响[J].中国农业科学,2018,51(11):2136-2142.

- WEN Yan-chen, ZHANG Yue-dong, YUAN Liang, et al. Crop yield and soil fertility response to commercial organic fertilizer substituting chemical fertilizer[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(11): 2136-2142.
- [12] Manna M C, Swarup A, Wanjari R H, et al. Long-term effect of fertilizer and manure application on soil organic carbon storage, soil quality and yield sustainability under sub-humid and semi-arid tropical India[J]. *Field Crops Research*, 2005, 93: 264-280.
- [13] 王相刚, 许修宏, 缪元霞, 等. 农作物秸秆替代木屑栽培黑木耳的关键性技术[J]. 北方园艺, 2015(5): 160-163.
- WANG Xiang-gang, XU Xiu-hong, MIAO Yuan-xia, et al. The key technology of black fungus cultivation using crop straw instead of sawdust[J]. *Northern Horticulture*, 2015(5): 160-163.
- [14] 龚伟, 颜晓元, 王景燕. 长期施肥对土壤肥力的影响[J]. 土壤, 2011, 43(3): 336-342.
- GONG Wei, YAN Xiao-yuan, WANG Jing-yan. Effect of long-term fertilization on soil fertility[J]. *Soils*, 2011, 43(3): 336-342.
- [15] Karas P A, Makri S, Papadopoulou E S, et al. The potential of organic substrates based on mushroom substrate and straw to dissipate fungicides contained in effluents from the fruit-packaging industry is there a role for *pleurotus ostreatus*[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 124: 447-454.
- [16] 陈世昌, 侯殿明, 吴文祥, 等. 梨园套种平菇对土壤生物活性及果实品质的影响[J]. 果树学报, 2012, 29(4): 583-588.
- CHEN Shi-chang, HOU Dian-ming, WU Wen-xiang, et al. Influence of interplanting *Pleurotus ostreatus* on soil biological activity and fruit quality in pear[J]. *Journal of Fruit Science*, 2012, 29(4): 583-588.
- [17] 赵亮, 刘存寿. 不同有机物料对土壤肥力及团聚体稳定性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(2): 130-136, 144.
- ZHAO Liang, LIU Cun-shou. Effects of different organic materials on soil fertility and aggregates stability[J]. *Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)*, 2013, 41(2): 130-136, 144.
- [18] 林辉, 孙万春, 王飞, 等. 有机肥中重金属对菜田土壤微生物群落代谢的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(11): 2123-2130.
- LIN Hui, SUN Wan-chun, WANG Fei, et al. Effects of heavy metal within organic fertilizers on the microbial community metabolic profile of a vegetable soil after land application[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(11): 2123-2130.
- [19] 茹淑华, 徐万强, 侯利敏, 等. 连续施用有机肥后重金属在土壤-作物系统中的积累与迁移特征[J]. 生态环境学报, 2019, 28(10): 2070-2078.
- RU Shu-hua, XU Wan-qiang, HOU Li-min, et al. Effects of continuous application of organic fertilizer on the accumulation and migration of heavy metals in soil-crop systems[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(10): 2070-2078.
- [20] Xing W, Zhang H, Scheckel K G, et al. Heavy metal and metalloid concentrations in components of 25 wheat (*Triticum aestivum*) varieties in the vicinity of lead smelters in Henan Province, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 188(1): 1-10.
- [21] 孙磊, 郝秀珍, 周东美, 等. 尿素对玉米不同时期重金属 Cu、Zn 和 Cd 吸收的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 227-231.
- SUN Lei, HAO Xiu-zhen, ZHOU Dong-mei, et al. Influence of urea on the uptake of Cu, Zn and Cd of corn at different stages of growth[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(4): 227-231.
- [22] 李永涛, 刘科学, 张池, 等. 广东大宝山地区重金属污染水田土壤的 Cu、Pb、Zn、Cd 含量与 DTPA 浸提态含量的相互关系研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(6): 1110-1114.
- LI Yong-tao, LIU Ke-xue, ZHANG Chi, et al. Relationships between total and DTPA extractable contents of Cu, Pb, Zn, Cd in trace metal contaminated paddy soils of Dabaoshan, Guangdong[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(6): 1110-1114.
- [23] Ramos L, Hernandez L M, Gonzalez M J. Sequential fractionation of copper, lead, cadmium and zinc in soils from or near Donana National Park[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23(1): 50-57.
- [24] 王爽, 李荣华, 张增强, 等. 陕西潼关农田土壤及农作物重金属污染及潜在风险[J]. 中国环境科学, 2014, 34(9): 2313-2320.
- WANG Shuang, LI Rong-hua, ZHANG Zeng-qiang, et al. Assessment of the heavy metal pollution and potential ecological hazardous in agricultural soils and crops of Tongguan, Shaanxi Province[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(9): 2313-2320.
- [25] 方晓波, 史坚, 廖欣峰, 等. 临安市雷竹林土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1883-1891.
- FANG Xiao-bo, SHI Jian, LIAO Xin-feng, et al. Heavy metal pollution characteristics and ecological risk analysis for soil in *Phyllostachys praecox* stands of Lin'an[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(6): 1883-1891.
- [26] 周伟, 邓良基, 贾凡凡, 等. 基于土壤重金属风险和经济效益的双孢蘑菇菌渣还田量估算[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(3): 507-514.
- ZHOU Wei, DENG Liang-ji, JIA Fan-fan, et al. Assessment of *agaricus bisporus* residue application rate based on soil heavy metal risk and economic[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(3): 507-514.
- [27] 江宏, 马友华, 尹国庆, 等. 安徽省某县农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(4): 353-359.
- JIANG Hong, MA You-hua, YIN Guo-qing, et al. Evaluation on heavy metal pollution and potential ecological risk of farmland soils in a county of Anhui Province, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(4): 353-359.
- [28] 张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 等. 大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 环境科学, 2015, 36(11): 4232-4240.
- ZHANG Qian, CHEN Zong-juan, PENG Chang-sheng, et al. Heavy metals pollution in topsoil from Dagang industry area and its ecological risk assessment[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(11): 4232-4240.