文章编号:1000-7601(2022)06-0132-15 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2022.06.15

连续施用农业废弃物组合肥制种玉米田理化性质及酶活性和重金属变化特征

潘艳花[1],曹立国[2],薛治军[3],贺　勇[2],王　强[2],
张文敬[2],夏尚有[4],郑　荣[5],王学强[5]

(1.酒泉市种子管理站,甘肃 酒泉 735000;2.甘肃酒玉种业有限公司,甘肃 酒泉 735000;
3.酒泉凯地农业科技开发有限公司,甘肃 兰州 735000;4.酒泉市肃州区农业技术推广服务中心,甘肃 酒泉 735000;5. 酒泉市农业科学院,甘肃 酒泉 735000)

摘　要:在甘肃省进行了连续 4 a 施用农业废弃物组合肥制种玉米田理化性质及酶活性和重金属变化特征研究。结果表明:农业废弃物组合肥施用量比例为秸秆组合肥 18 t·hm^{-2}∶畜禽粪便组合肥 36 t·hm^{-2}∶废渣组合肥 15 t·hm^{-2}。施用农业废弃物组合肥 4 a 与不施肥比较,制种玉米田容重、pH 值和真菌数量分别降低 6.77%、6.20%和 26.19%;总孔隙度、水稳性团聚体、总持水量、EC 值、可溶性盐和 CEC 分别增加 6.63%、18.95%、6.62%、5.23%、5.36%和 36.10%;有机质、有机碳、有机碳密度、碱解氮、速效磷和速效钾含量分别增加 23.72%、24.10%、15.48%、28.44%、49.92%和 27.97%;细菌数量、放线菌数量、蔗糖酶、脲酶、磷酸酶和多酚氧化酶活性分别增加38.20%、86.60%、63.46%、38.89%、61.48%和 58.82%;Hg、Cd、Cr、Pb 和 Zn 含量分别增加 21.74%、30.00%、24.49%、27.55%和 31.81%。农业废弃物组合肥施用年限与制种玉米田容重、pH 值和真菌数量之间呈显著负相关关系,与总孔隙度、水稳性团聚体、CEC、EC 值、可溶性盐、总持水量、有机质、有机碳密度、速效氮磷钾含量、细菌数量、放线菌数量、酶活性、重金属含量之间呈显著正相关关系。虽然连续 4 a 施用农业废弃物组合肥重金属含量比不施肥高,但重金属含量小于土壤污染临界值,说明研究区域农业废弃物组合肥重金属含量较低,不会对作物造成风险。

关键词:农业废弃物组合肥;理化性质;酶活性;重金属

中图分类号:S513;S152;S153　　**文献标志码**:A

Characteristics of physicochemical properties, enzyme activities and heavy metal changes of seed maize field under continuous application of agricultural waste compost

PAN Yanhua[1], CAO Liguo[2], XUE Zhijun[3], HE Yong[2], WANG Qiang[2],
ZHANG Wenjing[2], XIA Shangyou[4], ZHENG Rong[5], WANG Xueqiang[5]

(1. *Jiuquan Seed Management Station*, *Jiuquan*, *Gansu* 735000, *China*; 2. *Gansu Jiuyu Seed Industry Co.*, *Ltd.*, *Jiuquan*, *Gansu* 735000, *China*; 3. *Jiuquan Kaidi Agricultural Science and Technology Development Co.*, *Ltd.*, *Lanzhou*, *Gansu* 735000, *China*; 4. *Agricultural Technology Extension Service Center of Suzhou District*, *Jiuquan*, *Gansu* 735000, *China*; 5. *Jiuquan Academy of Agricultural Sciences*, *Jiuquan*, *Gansu* 735000, *China*)

Abstract: Physical and chemical properties, enzyme activities and heavy metal changes in the seed production maize field of Gansu Province applied with agricultural waste compost for 4 years were studied. The results showed that the dosage ratio of agricultural waste was 18 t·hm^{-2} in straw group, 36 t·hm^{-2} in livestock and poultry manure group, and 15 t·hm^{-2} in waste residue group. In addition, the bulk density, pH value and fungus quantity of maize seed production group decreased by 6.77%, 6.20% and 26.19% compared with that without the waste compost. Total porosity, water-stable aggregate, total water holding capacity, EC value, soluble salt and CEC increased

收稿日期:2021-07-28　　**修回日期**:2022-03-16

基金项目:甘肃省重点研发计划项目(20YF3NF035);甘肃省拔尖领军人才专项(2020GSSBJRCZX);酒泉重大科技专项资助项目(JQZDKJZX2018001)。

作者简介:潘艳花(1985-),女,甘肃金昌人,正高级农艺师,主要从事土壤改良与培肥研究。E-mail:panyh2006@163.com

by 6.63%, 18.95%, 6.62%, 5.23%, 5.36% and 36.10%. The contents of organic matter, organic carbon, organic carbon density, alkali-hydrolyzed nitrogen, available phosphorus and available potassium increased by 23.72%, 24.10%, 15.48%, 28.44%, 49.92% and 27.97%. The number of bacteria, actinomycetes, activities of sucrase, urease, phosphatase and polyphenol oxidase increased by 38.20%, 86.60%, 63.46%, 38.89%, 61.48% and 58.82%; The contents of Hg, Cd, Cr, Pb and Zn increased by 21.74%, 30.00%, 24.49%, 27.55% and 31.81%. Agricultural waste compost using fixed number of years with seed corn field bulk density, pH value and the number of fungi was significantly negatively correlated, and the aggregate total porosity, water stability, the soluble salt, CEC, EC value, the total water holding capacity, organic matter, organic carbon density, available N, P, K content, number of bacteria, actinomyces, enzyme activity, heavy metals contentwas significantly positively correlated. Although the heavy metal content of maize field with agricultural waste compost was higher than that without the waste compost for 4 consecutive years, the heavy metal content was lower than the critical value of soil pollution, indicating that the heavy metal content of maize field with agricultural waste compost in the study area was low and would not pose a risk to crops.

Keywords: agricultural waste compost; physicochemical properties; enzyme activity; heavy metal

甘肃省河西内陆灌区具有得天独厚的自然环境条件和区位优势,日照时间 3 200~3 400 h,年均温度 7.20~7.5℃,≥10 的积温 2 600~2 800℃,年降水量 86~150 mm,年蒸发量 1 800~2 500 mm[1],是制种玉米良种繁殖的最佳生态区。近 25 a 来,美国杜邦先锋等国内外 90 多家种业集团在此建立了约 10 万 hm^2 国家级杂交玉米制种基地,年繁殖玉米杂交种 6.38×10^5 t,该基地成为全国最大的玉米杂交种繁殖基地[2]。随着制种玉米产业的发展,目前日益凸显的主要问题是长期施用传统化肥导致制种玉米田质量下降,生产的制种玉米产量低、品质差,部分种业集团转向新疆、内蒙和宁夏等地,影响了本区制种玉米产业的可持续发展[3-6]。

甘肃省酒泉市 2016—2020 年农业废弃物资源总量平均为 6.51×10^6 t(畜禽粪便有机肥 5.28×10^6 t,农作物秸秆 1.05×10^6 t,废渣 1.48×10^5 t,饼肥 3.51×10^4 t),其中用于沼气工程、直接还田的占 55%,剩余 2.92 t 的农业废弃物堆放在农村居民点周围,造成农村生态环境污染。经分析,这些农业废弃物含有机质 15.00%~88.30%、有机碳 8.70%~33.24%、N 含量 0.32%~2.57 %、P_2O_5 含量 0.15%~0.47%、K_2O 含量 0.16%~1.56%,而重金属离子 Hg、Cd、Cr 和 Pb 含量均小于国家规定的农业废弃物含量标准(GB8172—87)[7-8]。为了解决甘肃省河西内陆灌区制种玉米田长期施用化学肥料导致的土壤有机质含量低,土壤板结,玉米根系下扎受阻,团聚体、孔隙度和酶活性降低,土壤质量下降,生产的制种玉米品质差和研究区农业废弃物对农村环境的污染等问题,本文以研究区资源丰富的作物秸秆、畜禽粪便肥和废渣为原料,在室内合成农业废弃物组合肥替代传统化肥,旨在为保障研究区制种玉米安全生产和农业废弃物资源化利用提供技术支撑。有关农业废弃物对土壤质量和作物品质的影响,前人做了大量研究工作。在农业废弃物对土壤理化性质的影响方面:王笃超等[9]研究得出有机物料对改善土壤团聚体组成、增加>0.25 mm 水稳性团聚体含量效果比较显著;牛粪、鸡粪能够提高土壤团聚体的稳定性[10-11]。李娟等[12]研究得出羊粪改善了风沙土化学性质;牛粪降低了土壤 pH、EC 和 ESP[13];鸡粪提高了土壤 pH 值和缓冲性能[14]。刘志平等[15]研究得出鸡粪和磷肥配施提高了土壤磷的有效性;羊粪替代化肥提高了土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量[16]。丛艳静等[17]研究得出玉米秸秆还田对土壤有机质含量具有明显的提升作用;羊粪可以提高土壤有机质含量[18];猪粪施用量与土壤有机碳含量之间存在着显著的线性关系[19];玉米秸秆深埋在土壤中增加了土壤有机质含量[20]。在农业废弃物对土壤微生物及酶活性和重金属离子的影响方面:屈皖华等[21]研究发现杨树枝条粉碎还田提高了土壤微生物的代谢活性;玉米秸秆还田为土壤微生物的生长繁殖提供了充足的碳源[22];食用菌渣可以促进土壤微生物的增殖[23];鸡粪和家畜粪便可以明显提高土壤微生物数量[24];牛粪提高了土壤细菌和放线菌的数量,抑制了真菌的增长[25]。张启明等[26]研究发现有机物料与化肥配施能够提高土壤酶的活性;牛粪、麦秸配合施用提高了土壤脲酶和磷酸酶的活性[27-28]。宋姿蓉等[29]研究发现长期施用猪粪、鸡粪、污泥可导致土壤中 Cu 和 Zn 累积;

牛粪与秸秆配合施用,可降低玉米籽粒中 Cd 含量[30];鸡粪、猪粪和牛粪显著提高了土壤有效 Zn 含量[31];鸡粪堆肥处理可以降低重金属离子的生物有效性[32];羊粪和马粪混合施用可以降低土壤中 Cu 和 Zn 的生物有效性[33];猪粪对土壤重金属离子 Cu、Zn 累积具有一定的促进作用[34];鸡粪对土壤中 Pb、Cd 具有较强的钝化作用[35];鸡粪与秸秆和生物炭配合施用降低了 Pb 的有效性,减少了玉米对 Pb 离子的吸收[36];鸡粪和生物炭混合施用减少了玉米对 Cd 的吸收和积累[37];鸡粪中掺入粉煤灰能减少大白菜中重金属的累积[38]。在农业废弃物对作物品质的影响方面:谢志煌等[39]研究认为施用牛粪可以明显提高大豆的脂肪、游离氨基酸和可溶性糖含量;沼渣、秸秆、麦秸、菌渣和稻壳还田有利于改善番茄的品质[40-42];麦秸及稻壳和菌渣还田提高了番茄 Vc 和可溶性糖含量[43];食用菌渣还田可显著提高黄芩可溶性糖和烟叶干物质含量[44-45];羊粪还田提高了火龙果总糖和维生素 C 含量,降低了总酸含量[46]。

综上所述,前人对农业废弃物施用方法研究主要集中在单独施用或者与化肥、粉煤灰 、磷矿粉、污泥、生物炭和稻壳配合施用;对土壤性质的影响主要研究了理化性质、微生物、酶活性和重金属离子;对作物品质的影响主要针对大豆、番茄、黄芩、烟叶和火龙果等作物。而多年施用农业废弃物组合肥对制种玉米田理化性质及酶活性和重金属变化特征的影响尚少见文献报道。研究区畜禽粪便、秸秆、废渣等农业废弃物资源丰富,农业废弃物还田可增加农田有机质含量,还能促进土壤微生物繁殖和酶活性增强,对提高土壤肥力和作物产量、增强固碳能力都具有重要意义。同时,农业废弃物还田有利于提高资源利用效率、减少环境污染和实现农业的可持续发展。因此,在本区域开展施用农业废弃物组合肥对制种玉米田理化性质及酶活性和重金属含量影响的研究,可为科学有效地指导制种玉米生产提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况和试验材料

1.1.1 试验地概况 试验于 2016—2020 年在甘肃省酒泉市肃州区金佛寺镇下四截村二社制种玉米基地上进行(99°38′63″E,38°29′33″N),海拔 1 550 m,年均温 7.2℃,年均降水量 86 mm,年均蒸发量 2 400 mm,无霜期 150 d。土壤类型是灌淤旱作人为土[47],0~20 cm 土层土壤容重、总孔隙度、>0.25 mm 团聚体和总持水量分别为 1.33 g·cm^{-3}、49.81%、21.58%和 996.25 t·hm^{-2};有机质含量、有机碳含量和有机碳密度分别为 16.36、9.46 g·kg^{-1}和 2.52 kg·hm^{-2};CEC(阳离子交换量)、pH 值、可溶性盐、碱解氮、速效磷和速效钾含量分别为 16.29 cmol·kg^{-1}、7.58、1.68 g·kg^{-1}、69.97 mg·kg^{-1}、6.57 mg·kg^{-1}和 118.29 mg·kg^{-1}。

1.1.2 试验材料 畜禽粪便组合肥(牛粪、羊粪、猪粪、生物菌肥风干重量比按 0.6116∶0.2945∶0.0923∶0.0016 混合)粒径 1~20 mm;秸秆组合肥(玉米秸秆、马铃薯藤、豌豆秸秆、秸秆发酵剂风干重量比按 0.5769∶0.3213∶0.1006∶0.0012 混合)粒径 1~20 mm;废渣组合肥(食用菌渣、沼渣、糠醛渣风干重量比按 0.4951∶0.3846∶0.1203 混合)粒径 1~20 mm。参试材料有效成分见表 1,玉米品系为‘敦玉 128’。

1.2 试验方法

1.2.1 农业废弃物组合肥发酵方法 2016 年 3 月 1 日,将风干的畜禽粪便、废渣和作物秸秆分别粉碎过 2 cm 筛,加入尿素(尿素加入量(kg·t^{-1})= 畜禽粪便、废渣、作物秸秆 C/N÷25÷0.46)把碳氮比调整为 25∶1,在玉米秸秆、马铃薯藤和豌豆秸秆加入秸秆发酵剂,喷自来水调节水分含量达到 60%~65%[48],在温室内(室温 25~30℃)堆成 2 m 高的梯形,覆盖塑料薄膜并开直径 3~5 cm 小洞若干。堆内温度降到室温,发酵物料出现灰白色菌丝后,在阴凉干燥处自然风干,测定含水量小于 5%备用,发酵参数见表 2。

1.2.2 试验处理 试验①:农业废弃物组合肥配方筛选。2016 年 4 月 20 日选择秸秆组合肥、畜禽粪便组合肥和废渣组合肥为 3 种原料,每种原料设计 3 个水平施用量,选择正交表 $L_9(3^4)$ 设计 9 个试验处理[49](表 3),按表中用量制成 9 种农业废弃物组合肥。试验②:连续 4 a 施用农业废弃物组合肥对制种玉米田理化性质及酶活性和重金属影响的研究。2017—2020 年 4 月 20 日依据试验①筛选的配方,将秸秆组合肥、畜禽粪便组合肥和废渣组合肥风干重量比按 0.2609∶0.5217∶0.2174 混合,得到农业废弃物组合肥。将农业废弃物组合肥施用年限设计为 0(CK)、1、2、3 a 和 4 a 共 5 个处理,处理 1~4 a 农业废弃物组合肥施用量均为 69 t·hm^{-2}。

表 1　参试材料有效成分

Table 1　The active ingredient of the material

种类 Type	有机质 Organic matter/%	有机碳 Organic carbon/%	C/N	N/%	P_2O /%	K_2O /%	CaO /%	MgO /%	Hg /(mg·kg^{-1})	Cd /(mg·kg^{-1})	Cr /(mg·kg^{-1})	Pb /(mg·kg^{-1})	Zn /(mg·kg^{-1})	有效活菌 Effective living bacterium /(×10^9·g^{-1})	pH	EC /(mS·cm^{-1})	水分含量 Water content/%
猪粪 Pig manure	15.00	8.70	18	0.50	0.40	0.34	0.08	0.06	0.94	2.01	125.10	21.34	210.10	0	7.54	4.56	28.40
牛粪 Cow dung	14.50	8.41	26	0.32	0.25	0.16	0.31	0.11	1.18	1.89	128.43	25.20	184.25	0	7.43	4.13	24.34
羊粪 Sheep dung	31.40	18.21	28	0.65	0.47	0.23	0.33	0.28	1.20	2.76	132.45	22.06	168.47	0	7.28	5.86	16.60
沼渣 Biogas residue	30.42	17.65	26	0.68	0.25	0.42	0	0	0.70	0.37	15.68	11.04	24.63	0	7.36	4.32	15.42
糠醛渣 Furfural residue	56.20	38.39	53	0.73	0.14	0.38	0	0	0.72	0.74	17.24	13.60	92.21		3.42	3.54	9.31
食用菌渣 Edible fungi residue	34.80	20.19	21	0.96	0.21	0.42	0	0	0.47	1.13	14.23	16.24	36.80	0	7.69	3.29	8.21
玉米秸秆 Corn stover	67.10	50.52	53	0.95	0.15	1.18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.86	14.54
豌豆秸秆 Pea stalks	88.30	33.24	13	2.57	0.21	1.08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.12	13.21
马铃薯藤 Potato vine	80.20	46.51	72	0.65	0.27	1.56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.34	16.42
生物菌肥 Biological bacterial fertilizer	12.23	7.09	14	0.51	0.32	0.36	0	0	0	0	0	0	0	2.50	0	3.23	5.45
秸秆发酵剂 Straw starter	14.14	8.20	17	0.48	0.41	1.12	0	0	0	0	0	0	0	1.50	6.37	2.87	4.36
畜禽粪便组合肥 Excrements of livestock combination	19.66	11.40	25	0.44	0.33	0.20	0.14	0.09	1.12	1.42	85.12	126.32	142.32	0.02	7.60	4.85	4.86
秸秆组合肥 Straw combination	62.62	36.32	36	1.01	0.20	1.30	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	2.43	14.51
废渣组合肥 Offscumcombination	36.77	21.33	26	0.83	0.23	0.42	0	0	0.43	0.54	9.05	12.62	93.67		5.39	3.93	10.66
农业废弃物组合肥 Agricultural waste combination	34.91	20.25	30	0.67	0.27	0.55	0.04	0.03	1.24	1.56	94.94	68.18	188.76	0.01	6.82	3.62	5.10

表 2 农业废弃物组合肥发酵参数

Table 2 Agricultural waste fermentation parameters

编号 Serial number	种类 Type	尿素加入量 Amount of urea /(kg·t^{-1})	秸秆发酵剂加入量 The amount ofagent straw fermentation /(kg·t^{-1})	搅拌间隔时间 Stirring interval time/d	搅拌次数 Stirring number	发酵天数 Fermentation days/d
001	猪粪 Pig manure	0	0	30	2	60
002	牛粪 Cow dung	2.26	0	28	3	84
003	羊粪 Sheep dung	2.43	0	31	3	93
004	沼渣 Biogas residue	2.26	0	28	3	84
005	糠醛渣 Furfural residue	4.61	0	45	4	180
006	食用菌渣 Edible fungi residue	0	0	35	2	70
007	玉米秸秆 Corn stover	4.61	6.00	44	4	176
008	豌豆秸秆 Pea stalks	0	6.00	22	2	44
009	马铃薯藤 Potato vine	6.26	6.00	50	4	200

1.2.3 *种植方法* 试验①和②小区面积为 36 m^2(长 8.00 m×宽 4.50 m),农业废弃物组合肥在播种前施入 0~20 cm 耕作层作底肥,播种时间为 2016—2020 年每年的 4 月 20 日,深度 4~5 cm,株距 22 cm,行距 50 cm,父母本行比为 1∶7,再配置满天星父本(父本种植在两行母本中间,株距为 50 cm)。每个小区为 1 个支管单元,在支管单元入口安装闸阀、压力表和水表,分别在玉米拔节期、大喇叭口期、开花期、灌浆期、乳熟期各灌水 1 次,每个小区灌水量 4.80 m^3,其他管理措施同常规制种。

1.2.4 *样品采集方法* 试验①制种玉米收获时每个小区选择中间 3 行,每行随机采集 15 穗,分别测定穗粒数、穗粒重和百粒重。每个小区单独采收,将小区产量折合成公顷产量进行统计分析。试验②制种玉米收获后,分别在每个小区内按对角线布置 5 个采样点,采集 0~20 cm 耕作层土样 5 kg,用四分法留 2 kg(1 kg 新鲜土样放入 4℃冰箱避光保存测定微生物数量和酶活性,另外 1 kg 土样风干过 1 mm 筛,室内测定有机质、pH 值、CEC、可溶性盐、碱解氮、速效磷、速效钾和金属离子)。土壤容重和团聚体用环刀采原状土,不进行风干。

1.2.5 *测定指标与方法* 土壤容重、总孔隙度和>0.25 mm 团聚体测定分别采用环刀法、计算法和团粒结构分析仪法;pH 值、CEC、可溶性盐、有机碳测定分别采用酸度计法(水土比 5∶1)、乙酸铵-氯化铵法、电导法和重铬酸钾氧化-外加热法;碱解氮、速效磷和速效钾测定分别采用扩散法、碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法和中性醋酸铵溶液浸提-火焰光度计法;总持水量(t·hm^{-2})= 面积(m^2)×总孔隙度(%)×土层深度(m)[50];微生物种群数量测定采用稀释平板法,真菌采用马丁氏培养基混菌法培养,细菌采用牛肉膏蛋白胨培养基混菌法培养,放线菌采用高氏 1 号培养基表面涂布法培养,3 类微生物分别在培养后 4、8 d 和 12 d 后观察计数,分别计算出每克干土的含菌数[51];蔗糖酶、脲酶、磷酸酶和多酚氧化酶活性测定分别采用 3,5-二硝基水杨酸比色法、靛酚比色法、磷酸苯二钠比色法和碘量滴定法[52];土壤有机碳密度(kg·hm^{-2})= 有机碳含量(g·kg^{-1})×容重(g·cm^{-3})×采样深度(cm)×0.01[53];Hg、Cd、Pb、Cr 和 Zn 全量测定参考中国科学院南京土壤研究所《土壤理化分析》[54-55]。

1.2.6 *数据分析* 采用 SPSS16.0 统计软件进行数据统计分析,采用 Duncan 新复极差法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 农业废弃物组合肥配方比例确定

由 2016 年 9 月 30 日制种玉米收获后测定数据可以看出(表 3),秸秆组合肥、畜禽粪便组合肥和废渣组合肥对制种玉米田团聚体、CEC 和制种玉米穗粒重、百粒重和产量的主次效应(R)为:畜禽粪便组合肥>秸秆组合肥>废渣组合肥。从各水平均值看出,$K_{A1}>K_{A3}>K_{A2}$,$K_{B3}>K_{B2}>K_{B1}$,$K_{C3}>K_{C1}$ 和 K_{C2},说明农业废弃物组合肥原料间施用量比例为秸秆组合肥 18 t·hm^{-2}∶畜禽粪便组合肥 36 t·hm^{-2}∶废渣组合肥 15 t·hm^{-2},即组合比例为 0.2609∶0.5217∶0.2174。

2.2 连续施用农业废弃物组合肥制种玉米田理化性质和持水量变化特征

2.2.1 *物理性质变化特征* 由 2017—2020 年每年制种玉米收获后测定数据可以看出,制种玉米田容

表 3　$L_9(3^4)$ 正交试验设计与结果分析

Table 3　L9(3^4) orthogonal experiment design and result analysis

处理 Treatment	A（秸秆组合肥）（Straw compost）		B（畜禽粪便组合肥）（Animal manure compost）		C（废渣组合肥）（Waste residue compost）		>0.25 mm 团聚体>>0.25 mm aggregate/%	CEC /(cmol·kg^{-1})	穗粒重 Grain weight per spike/g	百粒重 100-seed weight/g	产量 Yield /(t·hm^{-2})
	施用量 Application amount /(t·hm^{-2})	编码值 Code	施用量 Application amount /(t·hm^{-2})	编码值 Code	施用量 Application amount /(t·hm^{-2})	编码值 Code					
1	18.00	1	12.00	1	5.00	1	18.58±0.25bB	16.11±0.22bB	69.78±0.82bB	22.24±0.13bB	4.71±0.71bB
2	18.00	1	24.00	2	10.00	2	17.52±0.22cB	15.19±0.20cB	65.76±0.77cB	21.00±0.12cB	4.44±0.42cB
3	18.00	1	36.00	3	15.00	3	25.57±0.37aA	22.17±0.31aA	95.97±1.14aA	30.64±0.16aA	6.48±1.03aA
4	36.00	2	12.00	1	10.00	2	6.14±0.01gE	5.33±0.01gE	23.06±0.27gE	7.41±0.08gE	1.56±0.45gE
5	36.00	2	24.00	2	15.00	3	14.66±0.21dD	12.71±0.16dD	55.02±0.64dD	17.54±0.11dD	3.72±0.38dD
6	36.00	2	36.00	3	5.00	1	18.70±0.27bB	16.21±0.23bB	70.21±0.83bB	22.49±0.14bB	4.74±0.67bB
7	54.00	3	12.00	1	15.00	3	13.77±0.18eD	11.94±0.15eD	51.71±0.61eD	16.56±0.07eD	3.49±0.32eD
8	54.00	3	24.00	2	5.00	1	12.97±0.16fD	11.25±0.13fD	48.71±0.59fD	15.57±0.04fD	3.29±0.28fD
9	54.00	3	36.00	3	10.00	2	18.85±0.27bB	16.34±0.23bB	70.76±0.84bB	22.73±0.15bB	1.48±0.64bB
1 水平平均团聚体(K_1) 1 level average aggregate (K_1)	20.56		12.83		16.75						
2 水平平均团聚体(K_2) 2 level average aggregate (K_2)	13.17		15.05		14.17						
3 水平平均团聚体(K_3) 3 level average aggregate (K_3)	15.20		21.04		18.00						
主次效应(R) Primary and secondary effects (R)	7.39		8.21		3.83						
1 水平平均 CEC(K_1) 1 level average CEC (K_1)	17.82		11.13		14.52						
2 水平平均 CEC(K_2) 2 level averageCEC (K_2)	11.42		13.05		12.29						
3 水平平均 CEC(K_3) 3 level average CEC (K_3)	13.18		18.24		15.61						
主次效应(R) Primary and secondary effects (R)	6.40		7.11		3.32						

续表 3：

处理 Treatment	A（秸秆组合肥）（Straw compost）		B（畜禽粪便组合肥）（Animal manure compost）		C（废渣组合肥）（Waste residue compost）		>0.25 mm 团聚体> >0.25 mm aggregate/%	CEC /(cmol·kg^{-1})	穗粒重 Grain weight per spike/g	百粒重 100-seed weight/g	产量 Yield /(t·hm^{-2})
	施用量 Application amount /(t·hm^{-2})	编码值 Code	施用量 Application amount /(t·hm^{-2})	编码值 Code	施用量 Application amount /(t·hm^{-2})	编码值 Code					
1 水平平均穗粒重(K_1) 1 level mean grain weight per spike (K1)	77.17		48.18		62.90						
2 水平平均穗粒重(K_2) 2 level mean grain weight per spike (K_2)	49.42		56.50		53.20						
3 水平平均穗粒重(K_3) 3 level mean grain weight per spike (K_3)	57.06		78.98		67.57						
主次效应(R) Primary and secondary effects (R)	27.75		30.80		14.37						
1 水平平均百粒重(K_1) 1levelAverage100-grain weight(K_1)	24.71		15.32		20.01						
2 水平平均百粒重(K_2) 2levelAverage100-grain weight(K_2)	15.81		18.04		17.05						
3 水平平均百粒重(K_3) 3levelAverage 100-grain weight(K_3)	18.29		25.20		21.50						
主次效应(R) Primary and secondary effects (R)	8.90		9.88		4.45						
1 水平平均产量(K_1) 1 level average yield(K1)	5.21		3.25		4.25						
2 水平平均产量(K_2) 2 level average yield(K_1)	3.38		3.82		3.59						
3 水平平均产量(K_3) 3 level average yield(K_3)	3.85		5.33		4.56						
主次效应(R) Primary and secondary effects (R)	1.83		2.58		0.97						

注：同列数据不同大写字母表示 $LSR_{0.01}$ 水平差异显著，不同小写字母表示 $LSR_{0.05}$ 水平差异显著。下同。

Note: Data in the same column with different capital letters indicate significant difference in $LSR_{0.01}$ level, while different lowercase letters indicate significant difference in $LSR_{0.05}$ level. The same below.

重随着农业废弃物组合肥施用年限的延长而降低,总孔隙度和>0.25 mm 团聚体随着农业废弃物组合肥施用年限的延长而增大。施用农业废弃物组合肥 4 a 与不施肥(CK)比较,显著地降低了容重、增大了总孔隙度、极显著地增大了团聚体(表 4)。施用农业废弃物组合肥 4 a 与 3 a 和 2 a 比较,容重分别降低 2.36%和 3.88%,总孔隙度分别增加 1.98%和 3.49%($P>0.05$),>0.25 mm 团聚体分别增加 4.95%($P>0.05$)和 8.40%($P<0.05$);与施用 1 a 处理比较,容重降低 5.34%,总孔隙度增加 5.02%($P<0.05$),>0.25 mm 团聚体增加 12.98%($P<0.01$);与不施肥处理比较,容重降低 6.77%,总孔隙度增加 6.63%($P<0.05$),>0.25 mm 团聚体增加 18.95%($P<0.01$)。农业废弃物组合肥施用年限与容重之间呈负相关关系,相关系数为-0.9888,与总孔隙度和>0.25 mm 团聚体之间呈正相关关系,相关系数为 0.9935和 0.9793。农业废弃物组合肥施用年限越长,容重越小,总孔隙度和水稳性团聚体越大。

2.2.2　化学性质和持水量变化特征　由表 4 可知,制种玉米田 pH 值随着农业废弃物组合肥施用年限的延长而降低,CEC、EC 值、可溶性盐和总持水量随着农业废弃物组合肥施用年限的延长而增大。施用农业废弃物组合肥 4 a 与 CK 比较,显著地降低了制种玉米田 pH 值,增大了总持水量、EC 值和可溶性盐,极显著地增大了 CEC(表 4)。施用农业废弃物组合肥 4 a 与 3 a 比较,pH 值降低0.42%,EC 值、可溶性盐和总持水量分别增加0.91%、1.14%和 1.97%($P>0.05$),CEC 增加 5.42%($P<0.05$);与 2 a 比较,pH 值降低 2.60%,EC 值、可溶性盐和总持水量分别增加 1.84%、1.72%和 3.48%($P>0.05$),CEC 增加 8.52%($P<0.05$);与 1 a 比较,pH 值降低 4.69%,EC 值和可溶性盐分别增加2.32%和 2.91%($P>0.05$),总持水量增加 5.02%($P<0.05$),CEC 增加 26.11%($P<0.01$);与 CK 比较,pH 值降低6.20%,总持水量、EC 值和可溶性盐分别增加 6.62%、5.23%和 5.36%($P<0.05$),CEC 增加36.10%($P<0.01$)。农业废弃物组合肥施用年限与 pH 值之间呈负相关关系,相关系数为-0.9352,与 CEC、EC 值、可溶性盐和总持水量之间呈正相关关系,相关系数分别为 0.9021、0.9305、0.7014 和 0.9936。

2.3　连续施用农业废弃物组合肥制种玉米田有机质和速效养分含量变化特征

2.3.1　有机质及有机碳和有机碳密度变化特征　由表 5 可知,制种玉米田的有机质、有机碳、有机碳密度随着农业废弃物组合肥施用年限的增加而增大。施用农业废弃物组合肥 4 a 与 CK 比较,极显著地提高了有机质、有机碳和有机碳密度。施用农业废弃物组合肥 4 a 与 3 a 比较,有机质、有机碳和有机碳密度分别增加 4.87%、4.92%和 2.83%($P>0.05$);与 2 a 比较,有机质和有机碳分别增加 13.26%和 13.32%,有机碳密度增加 8.99%($P<0.05$);与 1 a 比较,有机质、有机碳和有机碳密度分别增加 17.47%、17.52%和 11.49%($P<0.01$);与 CK 比较,有机质、有机碳和有机碳密度分别增加 23.72%、24.10%和 15.48%($P<0.01$)。农业废弃物组合肥施用年限与有机质、有机碳和有机碳密度之间呈正相关关系,相关系数分别为 0.9813、0.9812、和 0.9703。农业废弃物组合肥施用年限越长,有机质、有机碳含量越高。

2.3.2　速效氮磷钾含量变化特征　由表 5 可知,制种玉米田碱解氮、速效磷和速效钾含量均随着农业废弃物组合肥施用年限的增加而增大,施用农业废弃物组合肥 4 a 与 CK 比较,极显著地提高了碱解氮、速效磷和速效钾含量。施用农业废弃物组合肥 4 a 与 3 a 比较,碱解氮含量增加4.67%($P>0.05$),速效磷和速效钾含量分别增加6.49%和 6.02%($P<0.05$);与 2 a 比较,碱解氮和速效钾含量分别增加 6.65%和 8.92%($P<0.05$),速效磷含量增加 13.22%($P<0.01$);与 1 a 比较,碱解氮、速效磷和速效钾含量分别增加 11.96%、16.98%和 12.98%($P<0.01$);与 CK 比较,碱解氮、速效磷和速效钾含量分别增加 28.44%、49.92%和 27.97%($P<0.01$)。农业废弃物组合肥施用年限与碱解氮、速效磷和速效钾含量之间呈正相关关系,相关系数分别为 0.9754、0.9766 和 0.9691。

2.4　连续施用农业废弃物组合肥制种玉米田微生物数量、酶活性及重金属含量变化特征

2.4.1　微生物数量变化特征　由表 6 可知,制种玉米田细菌和放线菌数量随着农业废弃物组合肥施用年限的增加而增大,真菌数量随着农业废弃物组合肥施用年限的增加而降低。施用农业废弃物组合肥 4 a 与 CK 比较,极显著地提高了细菌和放线菌数量,极显著地降低了真菌数量。施用农业废弃物组合肥 4 a 与 3 a 比较,细菌和放线菌数量分别增加 1.65%和 4.62%,真菌数量降低6.06%($P>0.05$);与 2 a 比较,细菌数量增加 8.37%($P<0.05$),放线菌数量增加 16.77%,真菌数量降低13.89%($P<0.01$);与 1 a 比较,细菌和放线菌数量分别增加 14.42%和 32.12%,真菌数量降低 20.51%($P<0.01$);与 CK 比较,细菌和放线菌数量分别增加 38.20%和 86.60%,

表 4 连续施用农业废弃物组合肥制种玉米田理化性质和持水量变化特征

Table 4 The change characteristics of physicochemical properties and water holding capacity in seed maize field with agricultural waste compost applied for 4 consecutive years

处理 Treatment	农业废弃物组合肥施用年限 Agricultural waste compost application years/a	容重 Bulk density /(g·cm^{-3})	总孔隙度 Total porosity /%	>0.25 mm 团聚体> >0.25 mm aggregate/%	CEC /(cmol·kg^{-1})	pH	*EC*/ /(mS·cm^{-1})	可溶性盐 Soluble salt /(g·kg^{-1})	总持水量 Water capacity /(t·hm^{-2})
1	0(CK)	1.33±0.07aA	49.81±0.13bA	21.58±0.36bB	16.29±0.30cB	7.58±0.07aA	2.10±0.05bA	1.68±0.03bA	996.25±110.32bA
2	1	1.31±0.03aA	50.57±0.71bA	22.72±0.28bB	17.58±0.44cB	7.46±0.06bA	2.15±0.02aA	1.72±0.02aA	1011.40±10.24bA
3	2	1.29±0.01bA	51.32±0.68aA	23.68±0.44bA	20.43±0.24bA	7.30±0.02bA	2.17±0.06aA	1.74±0.02aA	1026.40±9.87aA
4	3	1.27±0.04bA	52.08±0.84aA	24.46±0.32bA	21.03±0.27bA	7.14±0.10bA	2.19±0.08aA	1.75±0.03aA	1041.60±11.01aA
5	4	1.24±0.10bA	53.11±0.26aA	25.67±0.43aA	22.17±0.41aA	7.11±0.08bA	2.21±0.09aA	1.77±0.01aA	1062.15±11.01aA

表 5 连续施用农业废弃物组合肥制种玉米田有机质、有机碳及速效养分含量变化特征

Table 5 Change characteristics of organic matter, organic carbon and available nitrogen, phosphorus and potassium contents in seed production maize field with agricultural waste compost applied for 4 consecutive years

处理 Treatment	农业废弃物组合肥施用年限 Agricultural waste compost application years/a	有机质 Organic matter /(g·kg^{-1})	有机碳 Organic carbon /(g·kg^{-1})	有机碳密度 Organic carbon density /(kg·hm^{-2})	碱解氮 Alkali N /(mg·kg^{-1})	速效磷 Available P /(mg·kg^{-1})	速效钾 Available K /(mg·kg^{-1})
1	0(CK)	16.36±0.02cB	9.46±0.04cB	2.52±0.01bB	69.97±0.48dC	6.57±0.04dC	118.29±1.44dC
2	1	17.23±0.28bB	9.99±0.98bB	2.61±0.02bB	80.27±0.87cB	8.42±0.10cB	133.97±1.12cB
3	2	17.87±0.30bB	10.36±0.22bB	2.67±0.03bB	84.27±0.90bA	8.70±0.10cB	138.98±1.43cA
4	3	19.30±0.23aA	11.19±0.21aA	2.8±30.05aA	85.86±0.79aA	9.25±0.11bA	142.78±1.84±bA
5	4	20.24±0.41aA	11.74±0.24aA	2.91±0.07aA	89.87±0.67aA	9.85±0.03aA	151.37±1.98aA

真菌数量降低 26.19%($P<0.01$)。农业废弃物组合肥施用年限与真菌数量之间呈负相关关系,相关系数为-0.9918,与细菌和放线菌数量之间呈正相关关系,相关系数分别为 0.9756 和 0.9740。

2.4.2 酶活性变化特征 由表 6 可知,制种玉米田酶活性随着农业废弃物组合肥施用年限的递增而增大,施用农业废弃物组合肥 4 a 与 CK 比较,极显著地提高了蔗糖酶、脲酶、磷酸酶和多酚氧化酶活性。施用农业废弃物组合肥 4 a 与 3 a 比较,蔗糖酶、脲酶和多酚氧化酶活性分别增加4.29%、1.35%和 3.85%($P>0.05$),磷酸酶活性增加 7.07%($P<0.05$);与 2 a 比较,脲酶活性增加7.14%($P<0.05$),蔗糖酶、磷酸酶和多酚氧化酶活性分别增加 19.51%、19.03%和 14.89%($P<0.01$);与 1 a 比较,蔗糖酶、脲酶、磷酸酶和多酚氧化酶活性分别增加 31.27%、13.64%、34.47%和 28.57%($P<0.01$);与 CK 比较,蔗糖酶、脲酶、磷酸酶和多酚氧化酶活性分别增加 63.46%、38.89%、61.48%和58.82%($P<0.01$)。农业废弃物组合肥施用年限与蔗糖酶、脲酶、磷酸酶和多酚氧化酶活性之间呈正相关关系,相关系数分别为0.9694、0.9468、0.9930 和 0.9689。

2.4.3 重金属含量变化特征 由表 7 可知,制种玉米田重金属离子含量随着农业废弃物组合肥施用年限的递增而增大,施用农业废弃物组合肥 4 a 与 CK 比较,极显著地提高了 Hg、Cd、Cr、Pb 和 Zn 含量。施用农业废弃物组合肥 4 a 与 3 a 比较,Cd 和 Zn 含量分别增加 8.33%和 7.41%($P<0.05$),Hg、Cr 和 Pb 含量分别增加 3.70%、2.49%和 2.74%($P>0.05$);与 2 a 比较,Hg、Cd 和 Zn 含量分别增加 12.00%、13.04%和 11.54%($P<0.01$),Cr 和 Pb 含量分别增加 8.20%和 5.33%($P<0.05$);与 1 a 比较,Hg、Cd、Cr 和 Zn 含量分别增加 16.67%、18.18%、14.13%和 16.00%($P<0.01$),Pb 含量增加 9.01%($P<0.05$);与 CK 比较,Hg、Cd、Cr、Pb 和 Zn 含量分别增加 21.74%、30.00%、24.49%、27.55%和 31.81%($P<0.01$)。农业废弃物组合肥施用年限与土壤 Hg、Cd、Cr、Pb 和 Zn 之间呈正相关关系,相关系数分别为 0.9800、0.9657、0.9795、0.9966 和0.9797。虽然连续 4 a 施用农业废弃物组合肥导致重金属含量增加,但其含量仍小于土壤污染临界值[56],说明研究区域农业废弃物组合肥重金属含量较低,不会对制种玉米造成风险。

表 6　连续施用农业废弃物组合肥制种玉米田微生物和酶活性变化特征

Table 6　Characteristics of microbial and enzyme activities in seed maize field with agricultural waste compost applied for 4 consecutive years

处理 Treatment	农业废弃物组合肥施用年限 Agricultural waste compost application years/a	真菌 Fungus /($\times10^7\cdot g^{-1}$)	细菌 Bacteria /($\times10^7\cdot g^{-1}$)	放线菌 Actinomycetes /($\times10^7\cdot g^{-1}$)	蔗糖酶 Sucrase /($mg\cdot g^{-1}\cdot d^{-1}$)	脲酶 Urease /($mg\cdot kg^{-1}\cdot h^{-1}$)	磷酸酶 Phosphatase /($g\cdot kg^{-1}\cdot d^{-1}$)	多酚氧化酶 Polyphenol oxidase /($ml\cdot g^{-1}$)
1	0(CK)	0.42±0.16aA	1.78±0.01cC	0.97±0.05dC	4.16±0.02cC	0.54±0.03dC	2.44±0.03dC	0.34±0.07cC
2	1	0.39±0.13bB	2.15±0.04bB	1.37±0.02cC	5.18±0.07bB	0.66±0.03cB	2.93±0.04cB	0.42±0.03bB
3	2	0.36±0.11cC	2.27±0.02bA	1.55±0.08bC	5.69±0.10bB	0.70±0.04bA	3.31±0.07bB	0.47±0.09bB
4	3	0.33±0.04dD	2.42±0.01aA	1.73±0.07aA	6.52±0.12aA	0.74±0.01aA	3.68±0.09bA	0.52±0.05aA
5	4	0.31±0.01eD	2.46±0.05aA	1.81±0.03aA	6.80±0.87aA	0.75±0.05aA	3.94±0.05aA	0.54±0.02aA

表 7　连续施用农业废弃物组合肥制种玉米田重金属含量变化特征

Table 7　Change characteristics of heavy metal content in seed maize field with agricultural waste compost applied for 4 consecutive years

处理 Treatment	农业废弃物组合肥施用年限 Agricultural waste compost application years/a	Hg /($mg\cdot kg^{-1}$)	Cd /($mg\cdot kg^{-1}$)	Cr /($mg\cdot kg^{-1}$)	Pb /($mg\cdot kg^{-1}$)	Zn /($mg\cdot kg^{-1}$)
1	0(CK)	0.23±0.03bB	0.20±0.05cB	11.23±1.11cB	2.94±0.02cB	0.22±0.02cB
2	1	0.25±0.04bB	0.23±0.07bB	12.92±1.21bA	3.56±0.04bA	0.26±0.05bB
3	2	0.27±0.02aA	0.24±0.08bA	13.64±1.91aA	3.65±0.04aA	0.27±0.04bA
4	3	0.28±0.06aA	0.26±0.04aA	13.98±1.03aA	3.75±0.07aA	0.29±0.05aA
5	4	0.23±0.03bB	0.20±0.05cB	11.23±1.11cB	2.94±0.02cB	0.22±0.02cB

3　讨　论

本研究发现,农业废弃物组合肥施用年限越长,制种玉米田容重越小、总孔隙度和水稳性团聚体越大。这种变化特征与郝小雨等[57]、邵云等[58]、李更新等[59]和李小炜等[60]研究结论相一致。究其原因,一是农业废弃物组合肥将大量有机质带入土壤使土壤疏松,降低了容重,增加了孔隙度;二是组合肥堆肥发酵后松软、疏松、絮状、多孔,因此增加了制种玉米田的孔隙度,降低了容重;三是组合肥中的有机质在土壤中合成的腐殖质促进了水稳性团聚体的形成。本研究还发现,农业废弃物组合肥施用年限越长,制种玉米田 pH 值越小,CEC、EC 值、可溶性盐和总持水量越大。这种变化规律与燕金锐等[61]、姚桂华等[62]、陈彦君等[63]研究结论相吻合,究其原因,一是组合肥在分解过程中产生的有机酸(草酸、氨基酸)降低了 pH 值;二是组合肥在土壤中分解产生的腐殖酸刺激了作物根系的生长,根系分泌的弱酸降低了 pH 值;三是组合肥在土壤中合成的腐殖质是一种含有酚羟基、羧基、甲氧基等多功能团的弱酸,因而降低了 pH 值;四是组合肥吸附能力较强,提高了土壤保肥性,因而增大了土壤的 CEC;五是组合肥在土壤中合成的腐殖质带负电荷,吸附了土壤中的阳离子,因而提高了土壤的 CEC;六是组合肥中的畜禽粪便肥和废渣在分解过程中将盐基离子释放在土壤中,因而提高了土壤的 EC 和可溶性盐含量;七是组合肥在土壤中合成的腐殖质是亲水胶体,吸水率为 500%~600%,因而提高了土壤持水量。

本研究表明,农业废弃物组合肥施用年限越长,制种玉米田有机质、有机碳和速效氮、磷、钾含量越高。蔡瑞婕等[64]、郑凤君等[65]、刘永青等[66]、汪红霞等[67]、王彩绒等[68]、田小明等[69]和龙攀等[70]也得出了相同的结论。究其原因,一是农业废弃物组合肥将大量的有机质和氮、磷、钾养分带入土壤,因而提高了土壤有机质及有机碳和速效氮、磷、钾含量;二是组合肥含有丰富的有机质,其中含有碳、氮、磷、钾等多种营养元素,有机质在土壤中进行矿质化发酵过程中,释放出了多种营养元素,因而提高了土壤速效养分含量;三是组合肥在土壤中分解产生的腐殖酸促进了土壤中难溶性养分的溶解,因而提高了速效养分含量。

本研究发现,制种玉米田细菌和放线菌数量随着农业废弃物组合肥施用年限的增加而增大,真菌数量随着农业废弃物组合肥施用年限的增加而降低。究其原因,一是施用农业废弃物组合肥改变了土壤环境条件,增加了有益微生物的数量,促进了细菌和放线菌的繁殖,抑制了真菌的生长发育;二

是组合肥中有机质及大量元素为微生物提供了碳源和营养物质,促进了细菌和放线菌的繁殖;三是组合肥中的生物菌肥把活性微生物带到土壤中,促进了细菌和放线菌的生长发育[71]。连续4 a施用农业废弃物组合肥极显著地提高了制种玉米田蔗糖酶、脲酶、磷酸酶和多酚氧化酶活性,究其原因,一是组合肥把大量的酶带入土壤;二是组合肥提高了土壤有机碳含量,为依附其上的土壤酶创造了良好的生态环境条件,提高了其活性;三是组合肥增加了土壤有益微生物细菌和放线菌数量,因而提高了土壤酶活性[72]。丁力等[73]研究得出施用动物粪便后提高了土壤酶的活性;施娴等[74]、吴平江等[75]、关天霞等[76]研究指出施用有机肥提高了土壤蔗糖酶、脲酶、多酚氧化酶与磷酸酶的活性。

本研究表明,制种玉米田重金属离子含量随着农业废弃物组合肥施用年限的增加而增大,与不施肥比较,连续4 a施用农业废弃物组合肥极显著地提高了土壤Hg、Cd、Cr、Pb和Zn含量。究其原因,一是农业废弃物组合肥中的畜禽粪便肥把重金属离子带入土壤,叶必雄等[77]研究指出长期施用畜禽粪便的土壤剖面中Cu、Zn、Pb等重金属含量高于未施用畜禽粪便的土壤;袁凯等[78]研究得出猪粪中Cu和Zn含量均值为485.2 mg·kg^{-1}和1 220 mg·kg^{-1},牛粪中Cu和Zn含量均值为53.90 mg·kg^{-1}和155.80 mg·kg^{-1},羊粪中Cu和Zn含量均值为45.70 mg·kg^{-1}和203.80 mg·kg^{-1}。二是畜禽养殖中滥用或超量使用Cu、Zn、Cr等微量元素作为饲料添加剂,这些元素在畜禽体内消化吸收利用率低,致使粪便中重金属Cu、Zn 、Cr等富集,王慧等[79]研究发现江苏省150个养殖场畜禽饲料中Cu、Zn含量范围分别为0~392.1 mg·kg^{-1}和15.9~2 041.8 mg·kg^{-1};薄录吉等[80]研究得出我国11个省(市)规模化养猪场猪饲料Cu含量超标的样品数量高达100%,Zn含量超标的样品数量占到60%~100%;王飞等[81]调查发现,华北地区猪饲料中Cu和Zn含量分别为136.36 mg·kg^{-1}和544.85 mg·kg^{-1},超过“农业部1224公告”对Cu和Zn的限量值,超标率分别为66.67%和80.00%。张辉等[82]研究显示,浙江地区猪饲料中Cu和Zn含量达到了239.39 mg·kg^{-1}和468.46 mg·kg^{-1},超过“农业部2625公告”对Cu和Zn的限量值[83];迪娜·吐尔生江等[84]对黄淮海地区的鸡饲料样品进行分析,饲料样品中的Pb和Cd含量均超过了我国《饲料卫生标准》限量值,超标率分别为39.7%和23.50%。三是组合肥中的秸秆组合肥把重金属离子带入土壤,王琼瑶等[85]研究表明小麦秸秆还田后,水稻植物体各部分的Cu、Zn含量均高于对照(不施肥)。四是畜牧生产者种植牧草和饲草施用了微量元素肥料,牧草和饲草中的Cu和Zn通过食物链富集在畜禽粪便内。土壤重金属含量超过土壤临界值时,将对农作物、农产品等造成严重污染,并通过食物链危害人类健康。本研究连续4 a施用农业废弃物组合肥后,重金属离子含量高于不施肥,但其小于土壤污染临界值[86-87],不会对作物造成污染风险。究其原因是畜禽粪便中的有机质合成的腐殖质吸附重金属离子形成螯合络合物,使重金属离子活性降低。

4 结 论

制种玉米田容重、pH值和真菌数量随着农业废弃物组合肥施用年限的延长而降低,总孔隙度、水稳性团聚体、CEC、EC值、可溶性盐、总持水量、有机质、有机碳、有机碳密度、速效氮磷钾含量、微生物数量、酶活性、重金属含量等指标则随着农业废弃物组合肥施用年限的递增而增大。农业废弃物组合肥施用年限与制种玉米容重、pH值和真菌数量之间呈负相关关系,与总孔隙度、水稳性团聚体、CEC、EC值、可溶性盐、总持水量、有机质、有机碳密度、速效氮磷钾含量、微生物数量、酶活性、重金属含量之间呈正相关关系。连续4 a施用农业废弃物组合肥重金属含量比不施肥高,但其小于土壤污染临界值,不会对作物造成污染风险。

参 考 文 献:

[1] 秦嘉海, 金自学. 张掖市生态环境面临的问题与生态恢复策略[J]. 中国水土保持, 2006,(7): 9-11.
QIN J H, JIN Z X. Faced issues of ecological environment and strategy for ecologic rehabilitation of Zhangye City[J]. Soil and Water Conservation in China, 2006,(7): 9-11.

[2] 佟屏亚. 河西地区玉米制种基地考察报告[J]. 种子世界, 2005,(5): 4-8.
TONG P Y. Inspection report on corn seed production base along Hexi corridor[J]. Seed World, 2005,(5): 4-8.

[3] 侯格平, 吴子孝, 索东让. 张掖市玉米制种连作种植的不利影响与措施[J]. 中国种业, 2012,(1): 31-32.
HOU G P, WU Z X, SUO D R. Adverse effects and measures of continuous cropping for maize seed production in Zhangye City[J]. China Seed Industry, 2012,(1): 31-32.

[4] 张文波. 张掖市玉米制种产业存在的问题及对策[J]. 甘肃农业, 2010,(11): 41-42.
ZHANG W B. Problems and counter measures of maize seed industry in Zhangye City[J].Gansu Agriculture, 2010,(11): 41-42.

[5] 张秀兰, 张建中, 汤晓燕. 甘州区玉米制种存在的问题及对策[J]. 种子世界, 2010,(9): 12-13.
ZHANG X L, ZHANG J Z, TANG X Y. Existing issues in Ganzhou

corn seed production and measures[J]. Seed World, 2010,(9): 12-13.

[6] 闫治斌, 秦嘉海, 王爱勤, 等. 改土型专用肥对玉米田物理性质和玉米经济性状及效益的影响[J]. 水土保持通报, 2012, 32(5): 281-285.
YAN Z B, QIN J H, WANG A Q, et al. Effects of soil improved special fertilizer on physical properties of cornfield and corn economic traits and benefits[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(5): 281-285.

[7] 孙桂阳, 张国言, 董元杰. 不同来源农业废弃物堆肥进程与产品肥效研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 349-360.
SUN G Y, ZHANG G Y, DONG Y J. Composting process of agricultural wastes from different sources and fertilizer efficiency of their products[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 349-360.

[8] 陆欣. 土壤肥料学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2002: 480-481.
LU X. Soil fertilizer science [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2002: 480-481.

[9] 王笃超, 吴景贵. 不同有机物料对连作大豆土壤养分及团聚体组成的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(4): 825-834.
WANG D C, WU J G. Effects of organic manure on soil nutrients and aggregate composition in soil under mono-cropping of soybean[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(4): 825-834.

[10] 徐大兵, 邓建强, 彭五星, 等. 施用牛粪和绿肥对土地整治区玉米产量和土壤理化性质的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(3): 856-862.
XU D B, DENG J Q, PENG W X, et al. Effect of application of cow manure and green manure on corn yield and soil physical-chemical properties in land restoration area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(3): 856-862.

[11] 王超,姜坤,卢瑛,等. 不同有机物料施用对砖红壤团聚体组成和稳定性的影响[J]. 土壤通报, 2019,50(6): 1328-1334.
WANG C, JIANG K, LU Y, et al. Effects of different organic material application on aggregate composition and stability of latosol [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019,50(6): 1328-1334.

[12] 李娟, 韩慧, 常少刚, 等. 羊粪有机肥施用量对沙地甘蓝生长和产量及土壤化学性质的影响[J]. 上海农业学报, 2019, 35(6): 97-101.
LI J, HAN H, CHANG S G, et al. Effects of sheep manure fertilizer application rate on growth and yield and soil chemical properties of *Brassica oleracea* [J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2019, 35(6): 97-101.

[13] 郭军玲, 金辉, 郭彩霞, 等. 不同有机物料对苏打盐化土有机碳和活性碳组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(8): 1290-1299.
GUO J L, JIN H, GUO C X, et al. Effects of organic materials on soil organic carbon and fractions of active carbon in soda saline soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(8): 1290-1299.

[14] 张敬夫, 刘金鑫, 张忠兰, 等. 粉煤灰、磷矿粉与鸡粪配施对果园酸性土壤修复效应及苹果产量品质的影响[J]. 山东农业科学, 2017, 49(8): 82-85.
ZHANG J F, LIU J X, ZHANG Z L, et al. Effects of combined application of flyash, phosphate rock and chicken manure on acidic soil restoration in apple orchard and apple yield and quality[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2017, 49(8): 82-85.

[15] 刘志平, 武雪萍, 李若楠, 等. 温室滴灌条件下施用鸡粪和磷肥对土壤磷素的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(20): 3637-3647.
LIU Z P, WU X P, LI R N, et al. Effect of applying chicken manure and phosphate fertilizer on soil phosphorus under drip irrigation in greenhouse [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52 (20): 3637-3647.

[16] 冯焕德, 党志国, 倪斌, 等. 羊粪发酵肥替代化肥对芒果园土壤性状、叶片营养及果实品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (6): 190-195.
FENG H D, DANG Z G, NI B, et al. Effects of sheep fermentation fertilizer substituting for different quantities of chemical fertilizer on soil characters, leaf nutrition and fruit quality in mango orchard[J]. Soil and Fertilizer Science in China, 2019,(6): 190-195.

[17] 丛艳静, 韩萍. 连续 3 年玉米秸秆还田对土壤理化性状及作物产量的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(17): 95-98.
CONG Y J, HAN P. Maize straw returning for three consecutive years: effects on soil physical and chemical properties and crop yield [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(17): 95-98.

[18] 成钢, 夏莹, 安玉玲, 等. 洞庭湖区羊粪资源化利用现状与技术探讨[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2019,(6): 44-46.
CHENG G, XIA Y, AN Y L, et al. Current situation and technical discussion on resource utilization of sheep manure in Dongting Lake area [J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2019,(6): 44-46.

[19] 石纹碹, 刘世亮, 赵颖,等. 猪粪有机肥施用对潮土速效养分含量及团聚体分布的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(5): 431-438.
SHI W X, LIU S L, ZHAO Y, et al. Effects of pig manure application on available nutrients and aggregate distribution in irrigated desert soil[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017, 34(5): 431-438.

[20] 李波, 邢经伟, 姚名泽, 等. 深埋秸秆量和滴灌量对温室番茄品质、产量及 IWUE 的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2019, 50(1): 51-59.
LI B, XING J W, YAO M Z, et al. Effects of the amounts of deep-buried straw and drip irrigation on quality, yield and IWUE of tomato in greenhouse[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2019, 50(1): 51-59.

[21] 屈皖华, 李志刚, 李健. 单施和配施有机物料对沙化土壤微生物群落功能多样性的短期影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017,(4): 78-85.
QU W H, LI Z G, LI J. Short term response of microbial community functional diversity in desertified soils under fertilized individual and mixed organic materials[J]. Soil and Fertilizer Science in China, 2017,(4): 78-85.

[22] 董珊珊, 窦森. 玉米秸秆不同还田方式对黑土有机碳组成和结构特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(2): 322-328.
DONG S S, DOU S. Effect of different ways of corn stover application to soil on composition and structural characteristics of organic carbon in black soil[J]. Journal of Agro-environment Science, 2017, 36(2): 322-328.

[23] 许灵杰, 王廷清, 袁黔华, 等. 增施蘑菇渣与稻壳粉对土壤微生物及烤烟生长发育的影响[J]. 贵州农业科学, 2017, 45(6):

87-90.
XU L J, WANG T Q, YUAN Q H, et al. Effects of mushroom residue and rice husk powder on soil microbial growth and development of flue-cured tobacco[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2017, 45(6): 87-90.

[24] 王笃超, 吴景贵, 李建明. 不同有机物料对连作大豆土壤养分含量及生物性状的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 258-262, 270.
WANG D C, WU J G, LI J M. Effects of different organic materials on soil nutrient contents and biological properties of continuous cropping of soybean[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3): 258-262, 270.

[25] 王亚奇, 杜桂英, 崔晓文, 等. 一次性施入牛粪对土壤肥力和土壤微生物及酶活性的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2018, 49(2): 181-186.
WANG Y Q, DU G Y, CUI X W, et al. Effects of one-time cattle manure application on soil fertility, microorganism and enzyme activity[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2018, 49(2): 181-186.

[26] 张启明, 陈仁霄, 管成伟, 等. 不同有机物料对土壤改良和烤烟产质量的影响[J]. 土壤, 2018, 50(5): 929-933.
ZHANG Q M, CHEN R X, GUAN C W, et al. Effects of different organic materials on soil improvement and tobacco yield and quality[J]. Soils, 2018, 50(5): 929-933.

[27] 崔虎, 王莉霞, 欧洋, 等. 牛粪-化肥配施对水稻田氮磷迁移转化的影响[J]. 中国环境科学, 2018, 38(6): 2233-2242.
CUI H, WANG L X, OU Y, et al. Effect of combined application of manure and chemical fertilizer on transportation and transformation of nitrogen and phosphorus in paddy field water [J]. China Environmental Science, 2018, 38(6): 2233-2242.

[28] 赵海东, 宋江, 向阳, 等. 小麦秸秆基高分子缓释肥在番茄中的应用效果[J]. 湖北农业科技, 2019, 58(9): 52-57.
ZHAO H D, SONG J, XIANG Y, et al. The application effect of wheat straw-based polymer slow release fertilizer in tomato[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2019, 58(9): 52-57.

[29] 宋姿蓉, 俄胜哲, 袁金华, 等. 不同有机物料对灌漠土重金属累积特征及作物效应的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(19): 3367-3379.
SONG Z R, E S Z, YUAN J H, et al. Heavy metal accumulation in irrigated desert soils and their crop effect after applying different organic materials [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(19): 3367-3379.

[30] 丛源欣, 吴起汉, 陈璐, 等. 牛粪与秸秆配施对玉米体内镉积累及亚细胞分布的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50(3): 725-731.
CONG Y X, WU Q H, CHEN L, et al. Effects of combined application of cow manure and straw on cadmium uptake and subcellular distribution in maize[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(3): 725-731.

[31] 郝佳丽, 卜玉山, 贾峥嵘, 等. 不同有机物料与外源锌对土壤锌形态及生物有效性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(3): 263-268.
HAO J L, BU Y S, JIA Z R, et al. Effects of different organic materials and exogenous Zn on Zn distribution in soil[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2015, 32(3): 263-268.

[32] 卜贵军, 于静, 邸慧慧, 等. 鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究[J]. 环境科学, 2014, 35(11): 4352-4358.
BU G J, YU J, DI H H, et al. Influence of organic matter evolution during composting on the bioavailability of heavy metals[J]. Environmental Science, 2014, 35(11): 4352-4358.

[33] 芦伟, 高月锋, 简路洋, 等. 羊粪作为有机肥对植物和土壤的影响[J]. 家畜生态学报, 2019, 40(9): 86-90.
LU W, GAO Y F, JIAN L Y, et al. Application effect of sheep manure on plant and soil[J]. Journal of Domestic Animal Ecology, 2019, 40(9): 86-90.

[34] 赵睿, 吴智书, 罗阳, 等. 猪粪与农田土壤中重金属累积污染的相关分析[J]. 土壤, 2017, 49(4): 753-759.
ZHAO R, WU Z S, LUO Y, et al. Correlation analysis of heavy metals accumulation pollution in pig manure and farmland soil[J]. Soils, 2017, 49(4): 753-759.

[35] 闫翠侠, 贾宏涛, 孙涛, 等. 鸡粪生物炭表征及其对水和土壤镉铅的修复效果[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13): 225-233.
YAN C X, JIA H T, SUN T, et al. Characteristics of chicken manure biochars and its effect on Cd and Pb remediation in water and soil [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(13): 225-233.

[36] 刘领, 悦飞雪, 李继伟, 等. 秸秆生物炭和鸡粪对铅胁迫下玉米生长和生理特性的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 262-267.
LIU L, YUE F X, LI J W, et al. Effects of stalk-derived biochar and chicken manure on the growth and physiological characters of maize underlead stress[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(4): 262-267.

[37] 悦飞雪, 李继伟, 王艳芳, 等. 施用秸秆生物炭和鸡粪对镉胁迫下玉米生长及镉吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(10): 2118-2126.
YUE F X, LI J W, WANG Y F, et al. Effects of soil amendments with stalk-derived biochar and chicken manure on the growth and Cd uptake of maize under Cd stress[J]. Journal of Agro-environment Science, 2018, 37(10): 2118-2126.

[38] 李敏. 鸡粪不同利用方式对大白菜品质及重金属含量的影响[J]. 作物杂志, 2013,(2): 65-69.
LI M. Effects of different utilization methods of chicken manure on quality and heavy metal content of Chinese cabbage[J]. Crops, 2013, (2): 65-69.

[39] 谢志煌, 李彦生, 金剑, 等. 增施牛粪有机肥对黑土农田大豆营养品质的影响[J]. 土壤与作物, 2018, 7(4): 412-418.
XIE Z H, LI Y S, JIN J, et al. The effects of cattle manure amendment on nutritional quality of soybean in Mollisols farmland[J].Soils and Crops, 2018, 7(4): 412-418.

[40] 贾亮亮, 赵京奇, 杨晨璐, 等. 追施沼肥对番茄生长、产量和品质的影响[J]. 西北农业学报, 2017, 26(6): 897-905.
JIA L L, ZHAO J Q, YANG C L, et al. Effect of topdressing biogas fertilizer on growth, yield and quality of tomato[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2017, 26(6): 897-905.

[41] 宗庆姝, 梁朴, 马晓成, 等. 秸秆生物反应堆与 S-诱抗素对番茄植株生长和果实品质的影响[J]. 北方园艺, 2015,(1): 48-50.
ZONG Q S, LIANG P, MA X C, et al. Effect of straw biological reactor and S-induced resistance element on tomato plant growth and fruit

quality[J]. Northern Horticulture, 2015,(1): 48-50.

[42] 刘中良, 郑建利, 焦娟, 等. 麦秸、菌渣和稻壳还田对日光温室番茄品质及产量的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(11): 2243-2249.
LIU Z L, ZHENG J L, JIAO J, et al. Effects of wheat straw, mushroom dregs and rice husk returning on quality and yield of protected tomato[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2017, 31(11): 2243-2249.

[43] 刘中良, 张艳艳, 谷端银, 等. 农业废弃物还田对番茄品质、产量及土壤氮磷钾含量的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(7): 639-644.
LIU Z L, ZHANG Y Y, GU D Y, et al. Effects of recycled agricultural wastes on tomato quality, yield and soil NPK nutrient content in protected house[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(7): 639-644.

[44] 陈智坤, 邓娴, 王峰伟, 等. 蘑菇渣堆肥滤液对盐胁迫下黄芩种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 北方园艺, 2016,(18): 149-153.
CHEN Z K, DENG X, WANG F W, et al. Effects of edible fungi residue compost filtrate on seed germination and seedling growth of *Scutellaria baicalensis* under salt stress[J]. Northern Horticulture, 2016,(18): 149-153.

[45] 许灵杰, 王廷清, 袁黔华, 等. 增施蘑菇渣与稻壳粉对土壤微生物及烤烟生长发育的影响[J]. 贵州农业科学, 2017, 45(6): 87-90.
XU L J, WANG T Q, YUAN Q H, et al. Effects of mushroom residue and rice husk powder on soil microbial growth and development of flue-cured tobacco[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2017, 45(6): 87-90.

[46] 刘红明, 张晓梅, 李进学, 等. 化肥羊粪配施对火龙果果实品质动态及矿质营养元素的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2017, 32(6): 1079-1084.
LIU H M, ZHANG X M, LI J X, et al. Effects of goat manure combined with chemical fertilizer on fruit quality dynamics and mineral nutrition elements of pitaya fruit[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2017, 32(6): 1079-1084.

[47] 秦嘉海, 吕彪. 河西土壤与合理施肥[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2001: 103-105.
QIN J H, LYU B. Soil and rational fertilization in Hexi[M]. Lanzhou: Lan Zhou University Press,2001: 103-105.

[48] 赖景涛, 闭强, 李英, 等. 畜禽养殖粪污处理新技术[J]. 广西畜牧兽医, 2015,(3): 168.
LAI J T, BI Q, LI Y, et al. Guangxi animal husbandry and veterinary medicine[J]. Guangxi Journal of Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2015,(3): 168.

[49] 明道绪. 田间试验与统计分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 185-188.
MING D X. Field experiment and statistical analysis[M]. Beijing: Science Press, 2005: 185-188.

[50] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-38.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 25-38.

[51] 王贺祥. 农业微生物学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003: 364-366.
WANG H X. Agricultural microbiology[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2003: 364-366.

[52] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986: 89-120.
GUAN S Y. Soil enzymes and their research methods[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986: 89-120.

[53] 黎艳明, 周毅, 陈会智. 粤北次生常绿阔叶林土壤有机碳分布特征研究[J]. 广东林业科技, 2011, 27(4): 6-11.
LI Y M, ZHOU Y, CHEN H Z. Distribution patterns of SOC in secondary evergreen broad-leaf forest in north Guangdong[J]. Guangdong Forestry Science and Technology, 2011, 27(4): 6-11.

[54] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 110-218.
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Physical and chemical analysis of soil[M]. Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1978: 110-218.

[55] 王荫槐. 土壤肥料学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1992: 310-311.
WANG Y H. Soil fertilizer Science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1992: 310-311.

[56] 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 C Z, YANG S, YAO W J, 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.

[57] 郝小雨, 马星竹, 周宝库. 长期单施有机肥黑土大豆产量和土壤理化性质演变特征[J]. 土壤与作物, 2018, 7(2): 222-228.
HAO X Y, MA X Z, ZHOU B K. Variation characteristics of soybean yield and soil physicochemical properties after long-term organic fertilizer application in black soil[J].Soils and Crops, 2018, 7(2): 222-228.

[58] 邵云, 王敬婼, 张紧紧, 等. 耕作和有机物料还田对麦田土壤理化性质及产量效益的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(5): 208-215.
SHAO Y, WANG J R, ZHANG J J, et al. Effects of tillage and organic manures returning to field on soil physical and chemical properties and yield benefits in wheat field[J]. Acta Agriculturae Boreali-sinica, 2017, 32(5): 208-215.

[59] 李更新, 马夙静, 李祥英, 等. 有机肥施用对烟田土壤理化性质的影响[J]. 农业研究与应用, 2018, 31(6): 5-10.
LI G X, MA S J, LI X Y, et al. Effects of organic fertilizer on soil physicochemical properties in tobacco field[J]. Agricultural Research and Application, 2018, 31(6): 5-10.

[60] 李小炜, 孙权, 白春梅. 宁夏中部干旱带玉米地施用有机肥和化肥对土壤理化性质的影响及耕地速效养分需求规律的研究[J]. 陕西农业科学, 2017, 63(6): 21-26.
LI X W, SUN Q, BAI C M. Effects of organic fertilizer and chemical fertilizer on soil physicochemical properties and demand for available nutrients in maize field in arid zone of central Ningxia[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2017, 63(6): 21-26.

[61] 燕金锐, 律其鑫, 高增平, 等. 有机肥与生物炭对沙化土壤理化性质的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(9): 303-307.
YAN J R, LV Q X, GAO Z P, et al. Effects of organic fertilizer and biochar on physical and chemical properties of sandy soil[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(9): 303-307.

[62] 姚桂华, 徐海舟. 朱林刚, 等. 不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率变化特征[J]. 环境科学, 2015, 36(11): 4268-4276.
YAO G H, XU H Z, ZHU L G, et al. Effects of different kinds of organic materials on soil heavy metal phytoremediation efficiency by *Sedum alfredii* hance[J]. Environmental Science, 2015, 36(11): 4268-4276.

[63] 陈彦君, 王德炉, 丁波. 不同有机物覆盖对兔眼蓝莓土壤理化性质的影响[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(6): 78-82.
CHEN Y J, WANG D L, DING B. Effects of different organic matter mulching on soil physicochemical properties of rabbiteye blueberry [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(6): 78-82.

[64] 蔡瑞婕, 肖扬, 吴翔, 等. 虫粪有机肥对设施土壤理化性质及番茄产量的影响[J]. 河南农业科学, 2019, 48(11): 70-74.
CAI R J, XIAO Y, WU X, et al. Effects of faecal organic fertilizer on soil physicochemical properties and tomato yield in greenhouse[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2019, 48(11): 70-74.

[65] 郑凤君, 王雪, 李景, 等. 免耕条件下施用有机肥对冬小麦土壤酶及活性有机碳的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(6): 1202-1213.
ZHENG F J, WANG X, LI J, et al. Effect of no-tillage with manure on soil enzyme activities and soil active organic carbon[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(6): 1202-1213.

[66] 刘永青, 李玉才, 李明军. 土壤局部施加不同种类有机肥对苹果园土壤理化性质和果树养分利用率的改善[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(1): 112-117.
LIU Y Q, LI Y C, LI M J. Improvement of soil physical and chemical properties and nutrient utilization rate of apple trees by localized application of different organic fertilizers[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(1): 112-117.

[67] 汪红霞, 廖文华, 孙伊辰, 等. 长期施用有机肥和磷肥对潮褐土土壤有机质及腐殖质组成的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2014, (6): 39-43.
WANG H X, LIAO W H, SUN Y C, et al. Effects of long-term application of organic manure and phosphate fertilizer on soil organic matter and humus composition[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2014,(6): 39-43.

[68] 王彩绒, 杨学云, 张付申. 施肥对土壤有机质的影响研究[J]. 陕西农业科学, 2000,(7): 13-15.
WANG C R, YANG X Y, ZHANG F S. Effects of fertilization on soil organic matter[J].Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2000, (7): 13-15.

[69] 田小明, 李俊华, 危常州, 等. 连续3年施用生物有机肥对土壤有机质组分、棉花养分吸收及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(5): 1115-1123.
TIAN X M, LI J H, WEI C Z, et al. Effects of continuous application of bio-organic fertilizer for three years on soil organic matter fractions, cotton nutrient absorption and yield[J].Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2012, 18(5): 1115-1123.

[70] 龙攀, 隋鹏, 高旺盛, 等. 不同有机物料还田对农田土壤有机碳以及微生物量碳的影响[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(3): 153-160.
LONG P, SUI P, GAO W S, et al. Effects of agricultural organic wastes incorporation on soil organic carbon and microbial carbon[J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(3):153-160.

[71] 王靖渊, 屠乃美, 何康, 等. 有机肥料对土壤微生物多样性影响研究进展[J]. 天津农业科学, 2016, 22(6): 51-55.
WANG J Y, TU N M, HE K, et al. Effect of organic fertilizer on soil microbial diversity progress[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2016, 22(6): 51-55.

[72] 石慧, 白翠华, 周昌敏, 等. 施用猪粪土壤中抗生素的降解、植物有效性及土壤酶活性变化[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(10): 2039-2047.
SHI H, BAI C H, ZHOU C M, et al. Degradation and phytoavailability of antibiotics in soils amended with pig manure and changes of soil enzyme activity[J]. Journal of Agro-environment Science, 2017, 36(10): 2039-2047.

[73] 丁力, 张清旭, 陈晓婷, 等. 动物源有机肥对茶树生长及其根际土壤酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(20): 121-125.
DING L, ZHANG Q X, CHEN X T, et al. Effects of animal organic fertilizer on the growth and rhizosphere soil enzyme activities of tea tree[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(20): 121-125.

[74] 施娴, 刘艳红, 张德刚, 等. 猪粪与化肥配施对植烟土壤酶活性和微生物生物量动态变化的影响[J]. 土壤, 2015, 47(5): 899-903.
SHI X, LIU Y H, ZHANG D G, et al. Effects of pig manure and chemical fertilizer on the changes of soil enzyme activities and microbial biomass C and N of tobacco-planting Soil[J]. Soils, 2015, 47(5): 899-903.

[75] 吴平江, 夏叶, 薛勇, 等. 生物有机肥对绿洲温室黄瓜产量、品质及土壤酶活性的影响[J]. 中国水土保持, 2019,(4): 53-56.
WU P J, XIA Y, XUE Y, et al. Effects of bioorganic fertilizer on cucumber yield, quality and soil enzyme activities in oasis greenhouse [J]. Soil and Water Conservation in China, 2019,(4): 53-56.

[76] 关天霞, 马国泰, 张昊, 等. 不同类型畜禽粪便有机肥对辣椒产量及根际土壤酶活性的影响[J]. 广东农业科学, 2018, 45(11): 53-59.
GUAN T X, MA G T, ZHANG H, et al. Effects of different types of livestock manure on pepper yield and enzyme activities in rhizosphere soils[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2018, 45(11): 53-59.

[77] 叶必雄, 刘圆, 虞江萍, 等. 施用不同畜禽粪便土壤剖面中重金属分布特征[J]. 地理科学进展, 2012, 31(12): 1708-1714.
YE B X, LIU Y, YU J P, et al. Characteristics of the distribution of heavy metals in the profiles of the soils fertilized with different livestock manures[J]. Progress in Geography, 2012, 31(12): 1708-1714.

[78] 袁凯, 熊苏雅, 梁静, 等. 畜禽粪便中铜和锌污染现状及风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1837-1842.
YUAN K, XIONG S Y, LIANG J, et al. Status and risk analysis of copper and zinc pollution in livestock manure[J]. Journal of Agro-environment Science, 2020, 39(8): 1837-1842.

[79] 王慧, 董元华, 杨云亚, 等. 中国畜禽集约化区饲料和肥料中重金属含量变化[J]. 环境科学学报, 2013, 25(12): 2435-2442.
WANG H, DONG Y H, YANG Y Y, et al. Changes in heavy metal contents in animal feeds and manures in an intensive animal pro-duction region of China[J].Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 25(12): 2435-2442.

(下转第184页)