

不同秸秆发酵还田对制种玉米田土壤肥力质量和玉米品质的影响

刘兴斌¹, 马宗海¹, 闫治斌¹, 樊廷录², 陈绍江³,
王学¹, 马世军¹, 闫富海¹, 马明帮¹, 秦嘉海⁴

(1. 甘肃省敦煌种业集团股份有限公司研究院, 甘肃 酒泉 735000; 2. 甘肃省农业科学研究所, 甘肃 兰州 731000;
3. 中国农业大学农学院, 北京 100010; 4. 河西学院农业与生态工程学院, 甘肃 张掖 734000)

摘要:在甘肃省张掖市甘州区甘浚镇巴吉村连续15 a种植制种玉米基地上,进行了小麦、玉米、蚕豆、豌豆、油菜籽和葵花秸秆发酵还田对制种玉米田土壤肥力质量和玉米品质影响的研究。结果表明:6种发酵秸秆还田后制种玉米田0~20 cm土层容重排序为:小麦秸秆<玉米秸秆<豌豆秸秆<葵花秸秆<油菜籽秸秆<蚕豆秸秆,孔隙度、水稳性团聚体和总持水量排序为:小麦秸秆>玉米秸秆>豌豆秸秆>葵花秸秆>油菜籽秸秆>蚕豆秸秆。制种玉米田pH值排序为:小麦秸秆<玉米秸秆<葵花秸秆<油菜籽秸秆<蚕豆秸秆<豌豆秸秆,CEC、有机质、速效磷、速效钾、微生物数量、酶活性和制种玉米产量排序为:小麦秸秆>玉米秸秆>葵花秸秆>油菜籽秸秆>蚕豆秸秆>豌豆秸秆。小麦秸秆与玉米秸秆、葵花秸秆、油菜籽秸秆、蚕豆秸秆和豌豆秸秆比较,碱解氮分别增加0.87%、3.51%、6.23%、8.07%和9.93%,速效磷分别增加2.20%、2.51%、6.45%、6.67%和7.57%,速效钾分别增加1.98%、3.12%、4.59%、6.12%和6.40%,细菌数量分别增加3.66%、4.70%、11.03%、14.29%和19.54%,放线菌数量分别增加7.28%、8.87%、17.55%、27.01%和36.42%,蔗糖酶活性分别提高0.74%、3.70%、6.56%、12.16%和13.41%,脲酶活性分别提高6.59%、10.23%、16.16%、25.97%和30.20%,磷酸酶活性分别提高3.67%、5.16%、7.62%、8.26%和10.88%,多酚氧化酶活性分别提高4.35%、9.09%、30.91%、41.18%和50.00%,制种玉米产量分别增加2.03%、3.17%、5.33%、6.36%和8.49%。制种玉米可溶性糖、淀粉和粗蛋白含量排序为:小麦秸秆>玉米秸秆>油菜籽秸秆>葵花秸秆>豌豆秸秆>蚕豆秸秆。小麦秸秆与玉米秸秆、油菜籽秸秆、葵花秸秆、豌豆秸秆和蚕豆秸秆比较,可溶性糖含量分别增加2.02%、7.75%、13.25%、18.52%和23.10%,淀粉含量分别增加2.05%、3.11%、6.28%、10.70%和14.13%,粗蛋白含量分别增加1.01%、5.11%、12.56%、13.41%和16.77%。施肥利润和肥料投资效率排序为:小麦秸秆>玉米秸秆>葵花秸秆>油菜籽秸秆>蚕豆秸秆>豌豆秸秆。小麦秸秆与玉米秸秆、葵花秸秆、油菜籽秸秆、蚕豆秸秆和豌豆秸秆比较,制种玉米施肥利润分别增加0.09、0.16、0.25、0.31、0.40万元·hm⁻²,肥料投资效率分别增加0.17、0.40、0.58、0.77、0.97元·元⁻¹。因此,在玉米制种基地上推广小麦秸秆发酵还田,有利于解决土壤肥力质量下降、制种玉米产量和品质低而不稳的问题。

关键词: 秸秆发酵还田; 制种玉米; 土壤肥力; 玉米品质

中图分类号:S513;S147 文献标志码:A

Effects of different fermented straws returning on soil fertility and maize quality in seed maize field

LIU Xingbin¹, MA Zonghai¹, YAN Zhibin¹, FAN Tinglu², CHEN Shaojiang³,
WANG Xue¹, MA Shijun¹, YAN Fuhai¹, MA Mingbang¹, QIN Jiahai⁴

(1. Research Institute of Gansu Dunhuang Seed Industry Group Co., Ltd., Jiuquan, Gansu 735000, China;
2. Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu 731000, China; 3. College of Agronomy,
China Agricultural University, Beijing 100010, China; 4. Hexi Institute College of Agriculture
and Biotechnology, Zhangye, Gansu 734000, China)

Abstract: Effects of fermented wheat, maize, bean, pea, rapeseed and sunflower straw returning on soil fertility and maize quality were studied in Baji village of Ganjun Town, Ganzhou District, Zhangye City, Gansu Prov-

收稿日期:2021-10-14

修回日期:2022-06-06

基金项目:甘肃省科技重大专项(21ZD10NF003);甘肃省重点研发计划项目(20YF3NF035);甘肃省科技重大专项(21ZD10NF002);甘肃省拔尖领军人才专项(BJLJRC200002)

作者简介:刘兴斌(1966-),男,甘肃金塔人,高级农艺师,主要从事作物营养与施肥研究。E-mail: qinjiahai123@163.com

通信作者:闫治斌(1968-),男,甘肃酒泉人,研究员,主要从事种子工程研究。E-mail: yzb13909379099@163.com

ince for 15 consecutive years. The results showed that the order of bulk density of 0~20 cm soil layer in seed maize field after returning 6 kinds of fermented straw was: wheat straw < maize straw < pea stalks < sunflower stalk < rapeseed straw < bean stalk. The order of aggregate porosity, water stability and total capacity was: wheat straw > maize straw > pea straw > sunflower straw > rapeseed straw > beans straw. The order of seed maize field pH value was: wheat straw < maize stover < sunflower stalk < rapeseed straw < bean stalk < pea stalks. The order of CEC, organic matter, available NPK, microorganism quantity, enzyme activity and breeding of maize yield was: wheat straw > maize straw > sunflower stalk > rapeseed straw > beans straw > pea stalks. Compared with maize straw, sunflower straw, rapeseed straw, broad bean straw and pea straw, alkali-hydrolyzed nitrogen increased by 0.87%, 3.51%, 6.23%, 8.07% and 9.93%, and available phosphorus increased by 2.20%, 2.51%, 6.45%, 6.67% and 7.57%. Available potassium increased by 1.98%, 3.12%, 4.59%, 6.12% and 6.40%, the number of bacteria increased by 3.66%, 4.70%, 11.03%, 14.29% and 19.54%, and the number of actinomycetes increased by 7.28%, 8.87%, 17.55%, 27.01% and 36.42%. Sucrase activity increased by 0.74%, 3.70%, 6.56%, 12.16% and 13.41%, and urease activity increased by 6.59%, 10.23%, 16.16%, 25.97% and 30.20%. Phosphatase activity increased by 3.67%, 5.16%, 7.62%, 8.26% and 10.88%, and polyphenol oxidase activity increased by 4.35%, 9.09%, 30.91%, 41.18% and 50.00%. The yield of seed maize increased by 2.03%, 3.17%, 5.33%, 6.36% and 8.49%. The order of soluble sugar contents, starch and crude protein in seed maize was wheat straw > maize straw > rapeseed straw > sunflower straw > pea straw > broad bean straw. Compared with maize straw, rapeseed straw, sunflower straw, pea straw and broad bean straw, the soluble sugar content of wheat straw increased by 2.02%, 7.75%, 13.25%, 18.52% and 23.10%, while the starch content increased by 2.05%, 3.11%, 6.28%, 10.70% and 14.13%, crude protein content increased by 1.01%, 5.11%, 12.56%, 13.41% and 16.77%. The order of fertilizer profit and fertilizer investment efficiency was wheat straw > maize straw > sunflower straw > rapeseed straw > broad bean straw > pea straw. Compared with maize straw, sunflower straw, rapeseed straw, faba bean straw and pea straw, the fertilization profit of seed maize increased by 0.09, 0.16, 0.25, 0.31×10^4 Yuan \cdot hm⁻² and 0.40×10^4 Yuan \cdot hm⁻², and the fertilizer investment efficiency increased by 0.17, 0.40, 0.58, 0.77 Yuan \cdot Yuan⁻¹ and 0.97 Yuan \cdot Yuan⁻¹. The application of fermented wheat straw in maize seed production bases is conducive to solving the problems of soil fertility decline and unstable yield and quality of seed maize.

Keywords: fermented straw returning to field; seed maize; soil fertility; maize quality

甘肃省张掖市属于典型的内陆灌区,由祁连山丰富的冰雪水灌溉农田,常年干燥少雨,日照时数长,昼夜温差大,是杂交玉米良种繁育的最佳生态区。近 20 a 来美国先锋、德国拜耳、法国利马格兰 3 家种业公司和国内 14 家骨干种业集团入驻张掖,建立了国家级玉米制种基地 7.33×10^4 hm², 年生产玉米杂交种 4.73×10^5 t, 占全国玉米制种总面积的 23.90%^[1]。在制种玉米产业发展过程中日益凸显的主要问题是:化肥氮磷钾纯养分与有机肥氮磷钾纯养分投入量为 1 : 0.28^[2], 制种玉米产量的提高主要依赖于化肥的施用。长期施用化肥导致制种玉米田有机质含量低、土壤板结、通透性能差、贮水能力弱,大量元素与微量元素比例失衡,制种玉米产量和品质低而不稳。因此,采用农作物秸秆替代传统化肥,提高制种玉米田土壤肥力是本文研究的关键所在。甘肃省张掖市农作物秸秆资源总量为(风干质量) 1.55×10^6 t^[3](玉米秸秆 0.83×10^6 t,小

麦秸秆 2.35×10^5 t, 大麦秸秆 1.92×10^5 t, 油料秸秆 1.50×10^5 t, 马铃薯藤 1.25×10^5 t, 豆类秸秆 0.18×10^5 t), 用于肥料、饲料和燃料的占 45%, 剩余资源量为 0.85×10^6 t。农作物秸秆堆放在农村居民点周围或者被野外焚烧,造成了严重的生态环境污染和资源浪费。有关作物秸秆对土壤质量及作物产量和品质影响的研究报道较多。其中,关于作物秸秆对土壤质量的影响:吕凯飞等^[4]研究得出秸秆还田土壤容重和 pH 值降低,孔隙度增大;秸秆还田增强了有机碳的输入量,显著提高了土壤有机质含量;秸秆还田提高了土壤有机碳含量;秸秆还田提高了黑土表层有机碳含量^[5-7]。刘武仁等^[8]研究得出秸秆还田显著提高了土壤养分含量;秸秆还田提高了耕作层土壤全氮、硝态氮、碱解氮和速效磷含量^[9];秸秆还田提高了土壤速效钾和缓效钾含量,增加了地上部钾素吸收量^[10];低土壤肥力条件下秸秆还田可以提高土壤的供钾强度^[11]。张丽华等^[12]研究得出秸

秆还田提高了土壤水分利用效率、田间持水量、自然含水量和土壤湿度;小麦-玉米轮作秸秆全量还田提高了土壤水分利用率^[13]。董珊珊等^[14]研究得出玉米秸秆还田为土壤微生物生长繁殖提供了充足的碳源;水稻和小麦秸秆还田提高了土壤细菌和真菌的多样性^[15];随着秸秆还田年限的延长,土壤微生物活性增强^[16];秸秆还田后促进了土壤微生物的大量繁殖^[17];玉米秸秆还田显著提高了土壤微生物的生物量^[18]。战厚强等^[19]研究得出秸秆还田改善了土壤的环境条件,提高了土壤脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶、转化酶、蔗糖酶和蛋白酶活性。关于作物秸秆对作物产量和品质的影响研究方面,贞超等^[20]研究得出秸秆还田小麦产量提高了 10.81%;秸秆还田促进了水稻的生长发育,提高了其产量^[21];玉米秸秆还田可以提高玉米和水稻产量^[22];秸秆还田显著提高了水稻、大豆和玉米的产量^[23];小麦秸秆还田改善了番茄品质,提高了 Vc 和可溶性糖含量^[24];秸秆还田有利于改善小麦品质^[25];稻草还田能够降低烤烟的蛋白质、TN 和烟碱含量^[26]。

综上所述,前人研究主要集中在作物秸秆对土壤理化性质、有机质、养分、水分、微生物数量、酶活性、作物产量和品质方面,而小麦、玉米、蚕豆、豌豆、油菜籽和葵花秸秆发酵还田对制种玉米田土壤肥力质量和玉米品质影响的研究尚少见文献报道。为了解决甘肃省张掖市内陆灌区制种玉米田长期施用化肥导致土壤质量下降以及作物秸秆堆放在农村居民点周围或者野外焚烧对农村生态环境污染和资源浪费的问题,本文进行了不同秸秆发酵还田对制种玉米田土壤肥力质量和玉米品质影响的

研究,旨在为改善制种玉米田环境质量和作物秸秆资源化循环利用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验地概况 试验在甘肃省张掖市甘州区甘浚镇巴吉村三社连续 15 a 种植制种玉米的基地进行(100°12'22"E,38°57'52"N)。该地海拔 1 560 m,年均气温 7.50℃,年平均降水量 116 mm,年蒸发量 1 950 mm,日照时数 3 400 h,无霜期 150 d。土壤类型是灌淤旱作人为土^[27],0~20 cm 耕作层有机质、有机碳和有机碳密度分别为 9.23、5.35 g·kg⁻¹和 1.41 kg·hm⁻²;CEC(阳离子交换量)为 12.08 cmol·kg⁻¹,pH 值为 8.02,碱解氮、速效磷和速效钾分别为 54.14、8.12、128.43 mg·kg⁻¹。前茬作物是制种玉米。

1.1.2 试验材料 参试材料有效成分见表 1,玉米品系为敦玉 810(IN46×Q4-2,中国农业科学院作物科学研究所、甘肃省敦煌种业集团股份有限公司和华中农业大学联合选育)。

1.2 试验方法

1.2.1 作物秸秆发酵方法 2017 年 3 月 1 日,将风干的作物秸秆粉碎过 2 cm 筛,加入尿素将 C:N 调整到 25:1,再加入秸秆发酵剂,喷自来水调节水分含量达到 60%~65%^[28],在温室内(室温 25~30℃)堆成 1.50 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,作物秸秆出现灰白色菌丝后,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。

表 1 参试材料有效成分

Table 1 Active ingredients of test materials

材料 Material	有机质/% Organic matter	N/%	P ₂ O ₅ /%	K ₂ O/%	C:N	长度或粒径/mm Length or grain size	原料来源 Raw material source
小麦秸秆 Wheat straw	83.12	0.65	0.08	1.12	73:1	1~10	农户提供 Provided by famers
玉米秸秆 Maize straw	87.10	0.95	0.15	1.18	53:1	1~10	农户提供 Provided to farmers
蚕豆秸秆 Broad bean straw	78.80	1.05	0.24	1.71	43:1	1~10	农户提供 Provided by famers
豌豆秸秆 Pea stalks	57.30	1.07	0.21	1.08	31:1	1~10	农户提供 Provided by famers
油菜籽秸秆 Canola straw	85.21	0.87	0.14	1.94	56:1	1~10	农户提供 Provided by famers
葵花秸秆 Sunflower straw	92.04	0.82	0.11	1.77	65:1	1~10	农户提供 Provided by famers
尿素 Urea	0.00	46.00	0.00	0.00		1~2	甘肃刘家峡化工厂产品 Gansu Liujiaxia chemical plant products
磷酸二铵 Diammonium phosphate	0.00	18.00	46.00	0.00		3~5	云南云天化国际化工 股份有限公司产品 Products of Yunnan Yuntianhua International Chemical Co., Ltd.
硫酸钾 Potassium sulfate	0.00	0.00	0.00	50.00		1~2	湖北兴银化工有限公司产品 Products of Hubei Xingyin Chemical Co., Ltd.

培养法和高氏一号培养基表面涂布法^[32];蔗糖酶、脲酶、磷酸酶和多酚氧化酶活性测定采用 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^[33];玉米籽粒中粗蛋白用凯氏定氮法测定,可溶性糖和淀粉用蒽酮比色法测定^[34]。

1.2.6 数据分析 连续定点试验 3 a 后,于 2020 年 9 月 30 日制种玉米收获后测定数据,采用 SPSS 16.0 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 秸秆发酵还田对制种玉米田理化性质和持水量的影响

2.1.1 对土壤物理性质的影响 连续定点试验 3 a 后,于 2020 年 9 月 30 日制种玉米收获后测定数据可知(表 4),秸秆还田使制种玉米田土壤疏松、容重降低,施用化肥土壤紧实、容重增大,6 种秸秆还田容重均值为 $1.24 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,分别比传统化肥施用和对照田降低 5.34% 和 6.06%。不同处理土壤容重排序为小麦秸秆<玉米秸秆<豌豆秸秆<葵花秸秆<油菜籽秸秆<蚕豆秸秆<传统化肥<对照。小麦秸秆与玉米秸秆、豌豆秸秆、葵花秸秆和油菜籽秸秆比较,容重分别降低了 0.83%、2.44%、3.22% 和 4.76% ($P>0.05$),与蚕豆秸秆比较降低了 6.25% ($P<0.05$),与传统化肥和对照比较分别降低了 8.40% 和 9.09% ($P<0.01$)。秸秆还田可以增大制种玉米田土壤的孔隙度,6 种秸秆还田孔隙度均值为 53.33%,比传统化肥施用和对照田分别增大 5.46% 和 6.26%。不同处理土壤总孔隙度排序为小麦秸秆>玉米秸秆>豌

豆秸秆>葵花秸秆>油菜籽秸秆>蚕豆秸秆>传统化肥>对照。小麦秸秆与玉米秸秆、豌豆秸秆、葵花秸秆和油菜籽秸秆比较,总孔隙度分别增大了 0.72%、2.11%、2.84% 和 4.32% ($P>0.05$),与蚕豆秸秆比较增大了 5.84% ($P<0.05$),与传统化肥和对照比较分别增大了 8.21% 和 9.03% ($P<0.01$)。秸秆还田提高了制种玉米田水稳性团聚体数量,6 种秸秆还田水稳性团聚体均值为 27.35%,比传统化肥和对照分别增加 15.74% 和 16.93%。不同处理土壤水稳性团聚体排序为小麦秸秆>玉米秸秆>豌豆秸秆>葵花秸秆>油菜籽秸秆>蚕豆秸秆>传统化肥>对照。小麦秸秆与玉米秸秆比较,水稳性团聚体增加了 2.06% ($P>0.05$),与豌豆秸秆和葵花秸秆比较分别增加了 5.19% 和 6.06% ($P<0.05$),与油菜籽秸秆、蚕豆秸秆、传统化肥和对照比较分别增加了 8.44%、9.52%、21.71% 和 22.96% ($P<0.01$)。

2.1.2 对土壤化学性质和持水量的影响 由表 4 可知,各秸秆还田制种玉米田的 pH 值都有不同程度的下降,6 种秸秆还田土壤 pH 值均值为 7.61,比传统化肥和对照田分别降低 3.79% 和 5.11%。不同处理土壤 pH 值变化顺序为:小麦秸秆<玉米秸秆<葵花秸秆<油菜籽秸秆<蚕豆秸秆<豌豆秸秆<传统化肥<对照。小麦秸秆与玉米秸秆、葵花秸秆、油菜籽秸秆和蚕豆秸秆比较,土壤 pH 值分别降低了 1.20%、2.11%、2.51% 和 3.51% ($P>0.05$),与豌豆秸秆、传统化肥和对照比较分别降低了 5.12%、6.20% 和 7.48% ($P<0.05$)。秸秆还田制种玉米田 CEC 呈增加趋势,6 种秸秆还田 CEC 均值为 15.23%,比传统化肥和对照田分别增加 22.63% 和 26.08%。不同

表 4 秸秆还田对制种玉米田理化性质和持水量的影响

Table 4 Effects of straw returning on physicochemical properties and water holding capacity in seed maize field

试验处理编号 Test treatment No.	容重 Bulk density /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	总孔隙度 Total porosity/%	>0.25 mm 水稳性团聚体 > 0.25 mm water stable aggregate/%	CEC /($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)	pH	总持水量 Total water holding capacity/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)
1	1.20±0.01bB	54.72±0.78aA	28.76±0.41aA	15.85±0.28aA	7.42±0.12cA	1094.40±15.62aA
2	1.21±0.03bB	54.33±0.64aA	28.18±0.32aA	15.70±0.22aA	7.51±0.22cA	1086.60±13.21aA
3	1.28±0.02aB	51.70±0.51bA	26.26±0.22cB	14.77±0.31bA	7.69±0.09cA	1034.00±11.24bA
4	1.23±0.04bB	53.59±0.47aA	27.34±0.44bA	14.47±0.34cB	7.82±0.11bA	1071.80±10.34aA
5	1.26±0.01bB	52.45±0.72aA	26.52±0.31cB	15.22±0.41aA	7.61±0.07cA	1049.00±14.14aA
6	1.24±0.06bB	53.21±0.44aA	27.06±0.22bA	15.38±0.38aA	7.58±0.04cA	1064.20±13.64aA
7	1.31±0.04aA	50.57±0.36bB	23.63±0.28dC	12.42±0.25dC	7.91±0.13aA	1011.40±10.97bB
8	1.32±0.03aA	50.19±0.41bB	23.39±0.37dC	12.08±0.31dC	8.02±0.14aA	1003.80±15.04bB

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

Note: Different capital letters in the same column represent significant difference level in $\text{LSR}_{0.01}$, and different lowercase letters represent significant difference level in $\text{LSR}_{0.05}$, the same as below.

处理土壤 CEC 变化顺序为:小麦秸秆>玉米秸秆>葵花秸秆>油菜籽秸秆>蚕豆秸秆>豌豆秸秆>传统化肥>对照。小麦秸秆与玉米秸秆、葵花秸秆和油菜籽秸秆比较,CEC 分别增加了 0.96%、3.06% 和 4.14% ($P>0.05$),与蚕豆秸秆比较增加了 7.31% ($P<0.05$),与豌豆秸秆、传统化肥和对照比较分别增加了 9.54%、27.62% 和 31.21% ($P<0.01$)。秸秆还田能显著提高制种玉米田总持水量,6 种秸秆还田总持水量均值为 $1\ 066.67\ \text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,比传统化肥和对照田分别增加 5.47% 和 6.26%。不同处理土壤总持水量变化顺序为:小麦秸秆>玉米秸秆>豌豆秸秆>葵花秸秆>油菜籽秸秆>蚕豆秸秆>传统化肥>对照。小麦秸秆与玉米秸秆、豌豆秸秆、葵花秸秆和油菜籽秸秆比较,土壤总持水量分别增加了 0.72%、2.11%、2.84% 和 4.32% ($P>0.05$),与蚕豆秸秆比较增加了 5.84% ($P<0.05$),与传统化肥和对照比较分别增加了 8.21% 和 9.03% ($P<0.01$)。

2.2 秸秆发酵还田对制种玉米田有机质及速效氮磷钾含量的影响

2.2.1 对土壤有机质和有机碳的影响

由表 5 可知,秸秆还田促进了制种玉米田有机质的积累,有利于提高有机质、有机碳及有机碳密度和供碳量,6 种秸秆还田有机质、有机碳及有机碳密度和供碳量均值分别为 $12.07\ \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $7.00\ \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1.73\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $15.74\ \text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,与传统化肥和对照田比较,秸秆处理的土壤有机质平均分别增加 29.65% 和 30.77%,土壤有机碳平均分别增加 29.63% 和 30.84%,土壤有机碳密度平均分别增加 21.83% 和 22.70%,土壤供碳量平均分别增加 29.55% 和 30.73%。不同处理土壤的有机质、有机碳及有机碳密度和供碳量变化顺序为:小麦秸秆>玉米秸秆>葵花秸秆>油菜籽秸秆>蚕豆秸秆>豌豆秸秆>传统化肥>对照。小麦秸秆与玉米秸秆还田处理比较,有机质增加了 2.01% ($P>0.05$),与葵花秸秆还田处理比较增加了 5.28% ($P<0.05$),与油菜籽秸秆、蚕豆秸秆、豌豆秸秆、传统化肥和对照处理比较分别增加了 9.66%、16.65%、25.31%、41.46% 和 42.69% ($P<0.01$)。小麦秸秆与玉米秸秆还田处理比较,土壤有机碳增加了 2.00% ($P>0.05$),与葵花秸秆还田处理比较增加了 5.23% ($P<0.05$),与油菜籽秸秆、蚕豆秸秆、豌豆秸秆、传统化肥和对照处理比较分别增加了 9.77%、16.82%、25.45%、41.48% 和 42.80% ($P<0.01$)。小麦秸秆与玉米秸秆处理相比土壤有机碳密度增加了 3.72% ($P>0.05$),与葵花秸秆、油菜籽秸秆、蚕豆秸秆、豌豆秸秆、传统化肥和对照处理比较

分别增加了 8.33%、14.04%、23.42%、33.56%、37.32% 和 38.30% ($P<0.01$)。小麦秸秆与玉米秸秆比较土壤供碳量增加了 2.02% ($P>0.05$),与葵花秸秆比较增加了 5.20% ($P<0.05$),与油菜籽秸秆、蚕豆秸秆、豌豆秸秆、传统化肥和对照比较分别增加了 9.77%、16.78%、25.48%、41.48% 和 42.77% ($P<0.01$)。

2.2.2 对土壤速效氮、磷、钾含量的影响

由表 5 可知,秸秆还田把有机质带到土壤中,有机质在矿质化过程中释放出了氮、磷、钾等矿质元素,提高了制种玉米田碱解氮、速效磷和速效钾含量,6 种秸秆还田碱解氮、速效磷和速效钾含量均值分别为 65.67 、 9.82 、 $148.78\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与传统化肥和对照田比较,土壤碱解氮含量分别增加 6.57% 和 21.30%,土壤速效磷含量分别增加 5.37% 和 20.94%,土壤速效钾含量分别增加 7.92% 和 15.85%。不同处理的土壤碱解氮、速效磷和速效钾含量变化顺序为:小麦秸秆>玉米秸秆>葵花秸秆>油菜籽秸秆>蚕豆秸秆>豌豆秸秆>传统化肥>对照。小麦秸秆与玉米秸秆和葵花秸秆比较,土壤碱解氮分别增加了 0.87% 和 3.51% ($P>0.05$),与油菜籽秸秆比较增加了 6.23% ($P<0.05$),与蚕豆秸秆、豌豆秸秆、传统化肥和对照田比较分别增加了 8.07%、9.93%、11.52% 和 26.93% ($P<0.01$)。小麦秸秆与玉米秸秆和葵花秸秆比较,土壤速效磷分别增加了 2.20% 和 2.51% ($P>0.05$),与油菜籽秸秆、蚕豆秸秆和豌豆秸秆还田处理比较分别增加了 6.45%、6.67% 和 7.57% ($P<0.05$),与传统化肥和对照田比较分别增加了 9.76% 和 25.99% ($P<0.01$)。小麦秸秆与玉米秸秆、葵花秸秆和油菜籽秸秆还田处理比较,土壤速效钾分别增加了 1.98%、3.12% 和 4.59% ($P>0.05$),与蚕豆秸秆和豌豆秸秆还田处理比较分别增加了 6.12% 和 6.40% ($P<0.05$),与传统化肥和对照田比较分别增加了 11.86% 和 20.07% ($P<0.01$)。

2.3 秸秆发酵还田对制种玉米田土壤微生物数量和酶活性的影响

2.3.1 对土壤微生物数量的影响

由表 6 可知,秸秆还田制种玉米田有机碳含量得到提升,为微生物生长发育和繁殖创造了良好的环境条件,提高了土壤微生物的数量,6 种秸秆还田处理土壤细菌和放线菌数量均值为 $2.88 \times 10^7 \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $1.92 \times 10^6 \cdot \text{g}^{-1}$,与传统化肥和对照比较,细菌数量分别增加 1.13 倍和 1.19 倍,放线菌数量分别增加 1.22 倍和 1.27 倍。不同处理土壤细菌和放线菌数量变化顺序为:小麦秸秆>玉米秸秆>葵花秸秆>油菜籽秸秆>蚕豆秸秆>豌

豆秸秆>传统化肥>对照。小麦秸秆与玉米秸秆和葵花秸秆处理比较,土壤细菌数量分别增加了3.66%和4.70% ($P>0.05$),与油菜籽秸秆、蚕豆秸秆、豌豆秸秆、传统化肥和对照田比较分别增加了11.03%、14.29%、19.54%、22.84%和28.40% ($P<0.01$)。小麦秸秆与玉米秸秆处理比较土壤放线菌数量增加了7.28% ($P<0.05$),与葵花秸秆、油菜籽秸秆、蚕豆秸秆、豌豆秸秆、传统化肥和对照田比较分别增加了8.87%、17.55%、27.01%、36.42%、39.87%和46.36% ($P<0.01$)。

2.3.2 对土壤酶活性的影响 由表6可知,秸秆还田后提高了制种玉米田的土壤酶活性,6种秸秆还田蔗糖酶、脲酶、磷酸酶和多酚氧化酶活性均值分别为 $7.67 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $1.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $3.47 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.60 \text{ ml} \cdot \text{g}^{-1}$,与传统化肥和对照田比较,蔗糖酶活性分别增加了1.21倍和1.25倍,脲酶活性分别增加了1.18倍和1.23倍,磷酸酶活性分别增加了1.20倍和1.25倍,多酚氧化酶活性分别增加了1.30倍和1.36倍。不同处理土壤酶活性变化顺序为:小麦秸秆>玉米秸秆>葵花秸秆>油菜籽秸秆>

蚕豆秸秆>豌豆秸秆>传统化肥>对照。小麦秸秆与玉米秸秆和葵花秸秆处理比较,蔗糖酶活性分别增加了0.74%和3.70% ($P>0.05$),与油菜籽秸秆处理比较增加了6.56% ($P<0.05$),与蚕豆秸秆、豌豆秸秆、传统化肥和对照处理比较分别增加了12.16%、13.41%、28.48%和32.68% ($P<0.01$)。小麦秸秆与玉米秸秆处理比较,脲酶活性增加了6.59% ($P<0.05$),与葵花秸秆、油菜籽秸秆、蚕豆秸秆、豌豆秸秆、传统化肥和对照田比较分别增加了10.23%、16.16%、25.97%、30.20%、34.72%和40.58% ($P<0.01$)。小麦秸秆与玉米秸秆比较,磷酸酶活性增加了3.67% ($P>0.05$),与葵花秸秆和油菜籽秸秆比较分别增加了5.16%和7.62% ($P<0.05$),与蚕豆秸秆、豌豆秸秆、传统化肥和对照田比较分别增加了8.26%、10.88%、26.99%和32.49% ($P<0.01$)。小麦秸秆与玉米秸秆处理比较,多酚氧化酶活性增加了4.35% ($P>0.05$),与葵花秸秆、油菜籽秸秆、蚕豆秸秆、豌豆秸秆、传统化肥和对照田比较分别增加了9.09%、30.91%、41.18%、50.00%、56.52%和63.64% ($P<0.01$)。

表5 秸秆还田对制种玉米田有机质及有机碳和速效氮磷钾的影响

Table 5 Effects of straw returning on organic matter, organic carbon and available nitrogen, phosphorus and potassium in seed maize field

试验处理编号 Test treatment No.	有机质 Organic matter /($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有机碳 Organic carbon /($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有机碳密度 Organic carbon density /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	供碳量 Carbon supply /($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	碱解氮 Alkali N /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷 Available P /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾 Available K /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
1	13.17±0.08aA	7.64±0.04aA	1.95±0.07aA	17.19±0.18aA	68.72±0.32aA	10.23±0.09aA	154.21±1.44aA
2	12.91±0.19aA	7.49±0.03aA	1.88±0.05aA	16.85±0.11aA	68.13±0.51aA	10.01±0.06aA	151.22±1.20aA
3	11.29±0.11cB	6.54±0.06cB	1.58±0.01dC	14.72±0.22cB	63.59±0.45bB	9.59±0.12bA	145.31±1.23bA
4	10.51±0.15cB	6.09±0.09cB	1.46±0.03cC	13.70±0.20cB	62.51±0.76bB	9.51±0.10bA	144.93±1.77bA
5	12.01±0.13bB	6.96±0.08bB	1.71±0.05cB	15.66±0.24bB	64.69±0.44bB	9.61±0.04bA	147.44±2.01aA
6	12.51±0.14bA	7.26±0.10bA	1.80±0.03bB	16.34±0.23bA	66.39±0.44bA	9.98±0.11aA	149.54±1.08aA
7	9.31±0.12dC	5.40±0.05dC	1.42±0.04cC	12.15±0.17dC	61.62±0.66bB	9.32±0.07bB	137.86±1.24cB
8	9.23±0.07dC	5.35±0.07dC	1.41±0.02cC	12.04±0.16dC	54.14±0.72cC	8.12±0.02cC	128.43±1.36dC

表6 秸秆还田对制种玉米田微生物数量和酶活性的影响

Table 6 Effects of straw returning on microbial quantity and enzyme activity in seed maize field

试验处理编号 Test treatment No.	细菌 Bacteria /($\times 10^7 \cdot \text{g}^{-1}$)	放线菌 Actinomycetes /($\times 10^6 \cdot \text{g}^{-1}$)	蔗糖酶活性 Sucrase activity /($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	脲酶活性 Urease activity /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	磷酸酶活性 Phosphatase activity /($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	多酚氧化酶活性 Polyphenol oxidase activity /($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$)
1	3.12±0.03aA	2.21±0.10aA	8.12±0.20aA	1.94±0.14aA	3.67±0.11aA	0.72±0.09aA
2	3.01±0.02aA	2.06±0.08bA	8.06±0.18aA	1.82±0.12bA	3.54±0.10aA	0.69±0.04aA
3	2.73±0.01bB	1.74±0.04cB	7.24±0.14bB	1.54±0.02cC	3.39±0.01bA	0.51±0.03cC
4	2.61±0.04bB	1.62±0.02dB	7.16±0.11bB	1.49±0.11cC	3.31±0.05bA	0.48±0.07dD
5	2.81±0.06bB	1.88±0.12cB	7.62±0.16bA	1.67±0.05dB	3.41±0.06bA	0.55±0.06cC
6	2.98±0.05aA	2.03±0.03bB	7.83±0.10aA	1.76±0.03cB	3.49±0.04bA	0.66±0.10bB
7	2.54±0.10bB	1.58±0.01dB	6.32±0.04cC	1.44±0.04cC	2.89±0.08cB	0.46±0.02dD
8	2.43±0.08cB	1.51±0.04dB	6.12±0.10cC	1.38±0.01eD	2.77±0.01cB	0.44±0.05dD

2.4 秸秆发酵还田对制种玉米品质、经济性状和效益的影响

2.4.1 对制种玉米品质的影响 由表7可知,秸秆还田后有效改善了制种玉米品质,6种秸秆还田处理的玉米可溶性糖、淀粉和粗蛋白含量均值分别为21.96%、25.42%和8.40%,与传统化肥和对照处理比较,其可溶性糖含量分别增加了16.01%和25.92%,淀粉含量分别增加了11.15%和29.30%,粗蛋白含量分别增加了13.36%和20.69%。不同处理的可溶性糖、淀粉和粗蛋白含量变化顺序为:小麦秸秆>玉米秸秆>油菜籽秸秆>葵花秸秆>豌豆秸秆>蚕豆秸秆>传统化肥>对照。小麦秸秆与玉米秸秆处理比较,可溶性糖、淀粉和粗蛋白含量分别增加了2.02%、2.05%和1.01% ($P>0.05$);与油菜籽秸秆处理比较,可溶性糖和粗蛋白含量分别增加了7.75%和5.11% ($P<0.05$),淀粉含量增加了3.11% ($P>0.05$);与葵花秸秆处理比较,可溶性糖和粗蛋白含量分别增加了13.25%和12.56% ($P<0.01$),淀粉含量增加了6.28% ($P<0.05$);与豌豆秸秆处理比较,可溶性糖、淀粉和粗蛋白含量分别增加了18.52%、10.70%和13.41% ($P<0.01$);与蚕豆秸秆处理比较,可溶性糖、淀粉和粗蛋白含量分别增加了23.10%、14.13%和16.77% ($P<0.01$);与传统化肥处理比较,可溶性糖、淀粉和粗蛋白含量分别增加了27.99%、17.62%和22.13% ($P<0.01$);与对照田比较,可溶性糖、淀粉和粗蛋白含量分别增加了38.71%、36.83%和30.03% ($P<0.01$)。

2.4.2 对制种玉米经济性状和产量的影响 由表7可知,秸秆还田后改善了制种玉米经济性状,提高了产量,6种秸秆还田处理的穗粒数、穗粒重、百粒重和产量均值分别为350.20粒、69.42g、34.92g和6.26 t·hm⁻²,与传统化肥和对照比较,穗粒数分别增加了9.75%和27.23%,穗粒重分别增加了6.75%和16.83%,百粒重分别增加了5.44%和9.09%,产量分别增加了4.68%和27.24%。不同处理的制种玉

米经济性状和产量变化顺序为:小麦秸秆>玉米秸秆>葵花秸秆>油菜籽秸秆>蚕豆秸秆>豌豆秸秆>传统化肥>对照。小麦秸秆与玉米秸秆处理比较,穗粒数、穗粒重、百粒重和产量分别增加了1.01%、1.42%、0.34%和2.03% ($P>0.05$);与葵花秸秆处理比较,穗粒数、穗粒重、百粒重和产量分别增加了3.07%、3.04%、0.43%和3.17% ($P>0.05$);与油菜籽秸秆处理比较,穗粒数和百粒重分别增加了4.13%和1.21% ($P>0.05$),穗粒重和产量分别增加了5.36%和5.33% ($P<0.05$);与蚕豆秸秆处理比较,穗粒数、穗粒重和产量分别增加了6.56%、6.07%和6.36% ($P<0.05$),百粒重增加了1.53% ($P>0.05$);与豌豆秸秆处理比较,穗粒数增加了9.52% ($P<0.01$),穗粒重和产量分别增加了8.05%和8.49% ($P<0.05$),百粒重增加了1.97% ($P>0.05$);与传统化肥比较,穗粒数、穗粒重和产量分别增加了14.09%、10.93%和9.03% ($P<0.01$),百粒重增加了6.40% ($P<0.05$);与对照田比较,穗粒数、穗粒重、百粒重和产量分别增加了32.25%、21.41%、10.09%和32.52% ($P<0.01$)。

2.4.3 对制种玉米经济效益的影响 由表8可知,秸秆还田提高了制种玉米经济效益,6种秸秆还田处理的增产值、施肥利润和肥料投资效率均值分别为1.07万元·hm⁻²、0.68万元·hm⁻²和1.72元·元⁻¹,与传统化肥处理比较,增产值、施肥利润和肥料投资效率增加了0.22万元·hm⁻²、0.23万元·hm⁻²和0.59元·元⁻¹。不同处理施肥利润和肥料投资效率变化顺序为:小麦秸秆>玉米秸秆>葵花秸秆>油菜籽秸秆>蚕豆秸秆>豌豆秸秆>传统化肥。小麦秸秆与玉米秸秆、葵花秸秆、油菜籽秸秆、蚕豆秸秆、豌豆秸秆和传统化肥处理比较,施肥利润分别增加0.09、0.16、0.25、0.31、0.40、0.43万元·hm⁻²;肥料投资效率分别增加0.17、0.40、0.58、0.77、0.97、1.07元·元⁻¹。

表7 秸秆还田对制种玉米品质及经济性状的影响

Table 7 Effects of straw returning on quality and economic characters of seed maize

试验处理编号 Test treatment No.	可溶性糖 Soluble sugar/%	淀粉 Starch/%	粗蛋白 Crude protein/%	穗粒数 Grain number per spike	穗粒重 Grain weight per spike/g	百粒重 100-grain weight/g	产量 Yield / (t·hm ⁻²)
1	24.19±0.34aA	26.90±0.37aA	9.05±0.13aA	364.03±5.21aA	72.14±1.04aA	35.24±0.51aA	6.52±0.09aA
2	23.71±0.32aA	26.36±0.41aA	8.96±0.14aA	360.39±2.60aA	71.13±1.02aA	35.12±0.55aA	6.39±0.04aA
3	19.65±0.24cC	23.57±0.32cB	7.75±0.24bB	341.62±2.64bA	68.01±0.88bA	34.71±0.42aA	6.13±0.04bA
4	20.41±0.26bB	24.30±0.34cB	7.98±0.10bB	332.38±2.89bB	66.77±0.43bA	34.56±0.33aA	6.01±0.10bA
5	22.45±0.30bA	26.09±0.36aA	8.61±0.08bA	349.61±4.82aA	68.47±0.64bA	34.82±0.48aA	6.19±0.07bA
6	21.36±0.28bB	25.31±0.22bA	8.04±0.21bB	353.18±5.04aA	70.01±0.46aA	35.09±0.41aA	6.32±0.06aA
7	18.93±0.25cC	22.87±0.11cB	7.41±0.10bB	319.08±4.32bB	65.03±0.78cB	33.12±0.24bA	5.98±0.02cB
8	17.44±0.22dD	19.66±0.23cC	6.96±0.04cC	275.26±5.16cC	59.42±0.44dC	32.01±0.31cB	4.92±0.05dC

表 8 秸秆还田对制种玉米经济效益的影响

Table 8 Effects of straw returning on economic benefit of seed maize production

试验处理编号 Test treatment No.	产量 Yield /(t · hm ⁻²)	增产量 Yield increment /(t · hm ⁻²)	增产值 /(万元 · hm ⁻²)		施肥成本 /(万元 · hm ⁻²) Fertilization costs /(10 ⁴ Yuan · hm ⁻²)	施肥利润 /(万元 · hm ⁻²) Fertilization profits /(10 ⁴ Yuan · hm ⁻²)	肥料投资效率 /(元 · 元 ⁻¹) Efficiency of fertilizer investment /(Yuan · Yuan ⁻¹)
			Unit yield increment /(10 ⁴ Yuan · hm ⁻²)	Unit yield increment			
1	6.52±0.09aA	1.60	1.28	0.40	0.88	2.20	
2	6.39±0.04aA	1.47	1.18	0.39	0.79	2.03	
3	6.13±0.04bA	1.21	0.97	0.40	0.57	1.43	
4	6.01±0.10bA	1.09	0.87	0.39	0.48	1.23	
5	6.19±0.07bA	1.27	1.02	0.39	0.63	1.62	
6	6.32±0.06aA	1.40	1.12	0.40	0.72	1.80	
7	5.98±0.02cB	1.06	0.85	0.40	0.45	1.13	
8	4.92±0.05dC						

注:市场价格(元·吨⁻¹):尿素 1 800.00;磷酸二铵 3 800.00;硫酸钾 3 200.00;小麦秸秆 93.00;玉米秸秆 105.00;蚕豆秸秆 150.00;豌豆秸秆 116.00;油菜籽秸秆 145.00;葵花秸秆 135.00;玉米种子 8 000.00。

Note: Market price (Yuan · t⁻¹): Urea 1 800.00; Diammonium phosphate 3 800.00; Potassium sulfate 3 200.00; Wheat straw 93.00; Maize straw 105.00; Broad bean straw 150.00; Pea stalk 116.00; Rapeseed straw 145.00; Sunflower straw 135.00; Maize seed 8 000.00.

3 讨论与结论

6 种发酵秸秆还田后,小麦秸秆比其他秸秆更有利于降低制种玉米田容重、增大土壤孔隙度、提高水稳性团聚体比例和总持水量。究其原因,一是小麦秸秆还田后耕作层土壤有机质含量为 13.17 g · kg⁻¹,分别为玉米、蚕豆、豌豆、油菜籽、葵花秸秆还田处理的 1.02、1.17、1.25、1.10、1.05 倍,小麦秸秆还田后把大量的有机质带入土壤,使土壤疏松,降低了容重,增加了孔隙度;二是小麦秸秆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;三是小麦秸秆还田后在土壤中合成的腐殖质是亲水胶体,因而提高了持水量。钱锐等^[35]研究得出秸秆还田降低了土壤容重,增大了孔隙度;张玉铭等^[36]研究得出秸秆还田显著提升了土壤水稳性团聚体含量;王碧胜等^[37]研究得出秸秆还田后在土壤中合成的腐殖物质,有助于土壤团聚体的形成和稳定;成臣等^[38]研究得出秸秆还田可以有效抑制土壤水分蒸发,提高保水性能;张鹏等^[39]研究得出农作物秸秆还田提高了土壤保水能力。小麦秸秆比其他秸秆有利于提高制种玉米田的 CEC,降低其 pH 值。究其原因,一是小麦秸秆还田后耕作层土壤有机质含量比其他秸秆高,有机质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 CEC;二是有机质在分解过程中产生的有机酸降低了土壤 pH 值,三是有机质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,降低了土壤 pH 值。这种变化特征与党昆

等^[40]研究结论相一致。

6 种发酵秸秆还田后制种玉米田有机质、有机碳、有机碳密度和供碳量变化顺序为:小麦秸秆>玉米秸秆>葵花秸秆>油菜籽秸秆>蚕豆秸秆>豌豆秸秆。究其原因一是小麦秸秆还田后耕作层土壤有机质分别是玉米秸秆、蚕豆秸秆、豌豆秸秆、油菜籽秸秆、葵花秸秆的 1.02、1.17、1.25、1.10、1.05 倍,有机碳密度分别是玉米秸秆、蚕豆秸秆、豌豆秸秆、油菜籽秸秆和葵花秸秆的 1.04、1.30、1.34、1.14、1.08 倍,小麦秸秆把大量的有机质带入土壤,因而增加了有机质和有机碳含量。张雅洁等^[41]研究得出秸秆还田向土壤中输送丰富的有机物质,从而提升了土壤有机质含量;成钢等^[42]研究得出玉米秸秆还田提高了土壤有机质含量。小麦秸秆还田后制种玉米田耕作层土壤速效氮、磷、钾含量比其他秸秆高,究其原因一是小麦秸秆还田后耕作层土壤碱解氮分别是玉米秸秆、蚕豆秸秆、豌豆秸秆、油菜籽秸秆和葵花秸秆的 1.01、1.08、1.10、1.06、1.04 倍,速效磷分别达以上各处理的 1.02、1.07、1.08、1.06、1.03 倍,速效钾分别达 1.02、1.06、1.07、1.05、1.03 倍。王麒等^[43]研究得出秸秆还田为土壤提供了丰富的纤维素、氮、磷、钾及微量元素等;张大伟等^[44]研究得出秸秆还田提高了土壤碱解氮、速效磷和速效钾含量。

6 种发酵秸秆还田后制种玉米田的土壤细菌、放线菌数量及蔗糖酶、脲酶、磷酸酶、多酚氧化酶活性变化顺序为:小麦秸秆>玉米秸秆>葵花秸秆>油菜籽秸秆>蚕豆秸秆>豌豆秸秆。究其原因一是小麦秸秆还田后耕作层土壤有机碳含量比其他秸秆

高,有机碳是土壤微生物生命活动能量物质和营养物质的直接来源,有效促进了细菌和放线菌的繁殖;二是小麦秸秆还田提高了土壤有机碳含量,土壤酶吸附在有机碳上,为土壤酶创造了良好的土壤生态环境条件,因而提高了土壤酶的活性。吴其聪等^[45]研究得出秸秆还田后提高了土壤微生物数量;赵海东等^[46]研究发现秸秆还田可增强土壤酶活性。小麦秸秆比其他秸秆有利于提高制种玉米穗粒数、穗粒重、百粒重、产量、可溶性糖、淀粉和粗蛋白含量。究其原因是小麦秸秆还田后提高了制种玉米田耕作层土壤有机质、有机碳、碱解氮、速效磷和速效钾含量,改善了土壤理化性质和生物学性质,促进了制种玉米的生长发育,因而提高了产量和品质,这与刘慧屿等^[47]的研究结论一致,但刘世平等^[48]则认为,尽管秸秆还田改善土壤质量,但并没有影响作物产量,甚至造成减产,这种变化规律与本研究不一致。有关不同作物秸秆还田数量、C:N调整、腐烂时间、秸秆腐烂对氮素的消耗问题有待进一步研究。

综上所述,小麦秸秆发酵还田降低了制种玉米田容重和pH值,增大了孔隙度和水稳性团聚体含量,提高了田间持水量、CEC、有机质、速效氮磷钾含量、微生物数量、酶活性、制种玉米产量和品质,在一定程度上能够抑制制种玉米田土壤质量下降,是解决制种玉米产量和品质低而不稳问题的途径之一。

参考文献:

- [1] 王娟,郑荣,张东显.张掖市制种玉米连作障碍土壤生态修复技术集成研究[J].农业科技与信息,2015,(6):32-33.
WANG J, ZHENG R, ZHANG D Y. Ecological remediation technology integration of disturbed soil for maize continuous cropping in Zhangye City[J]. Agricultural Science-Technology and Information, 2015, (6): 32-33.
- [2] 闫洽斌,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.
- [3] 赵蕊,毛涛,秦嘉海.有机物料组合肥还田对耕地质量及甜菜品质和效益的影响[J].干旱地区农业研究,2022,40(2):189-196.
ZHAO R, MAO T, QIN J H. Effects of combined organic materials on quality and benefit of cultivated land and sugar beet[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(2): 189-196.
- [4] 吕凯飞,周锋,安瞳昕,等.耕作深度及秸秆还田对耕层土壤理化性状的影响[J].西南农业学报,2021,34(7):1503-1509.
LV K F, ZHOU F, AN T X, et al. Effects of deep ploughing and straw returning on physical and chemical properties of cultivated soil[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34(7): 1503-1509.
- [5] 安思危,付健,杨克军,等.不同耕作和秸秆还田方式对根际土壤养分及玉米产量的影响[J].黑龙江农业科学,2021,(8):1-7.
AN S W, FU J, YANG K J, et al. Effects of different tillage and straw returning treatments on rhizosphere soil nutrients and maize yield[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2021, (8): 1-7.
- [6] 程乙,任昊,刘鹏,等.不同栽培管理模式对农田土壤团聚体组成及其碳、氮分布的影响[J].应用生态学报,2016,27(11):3521-3528.
CHENG Y, REN H, LIU P, et al. Effects of different cultivation practices on composition, carbon and nitrogen distribution of soil aggregates in farmlands[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(11): 3521-3528.
- [7] 刘玲,刘振,杨贵运,等.不同秸秆还田方式对土壤碳氮含量及高油玉米产量的影响[J].水土保持学报,2014,28(5):187-192.
LIU L, LIU Z, YANG G Y, et al. Effects of different modes of straw returned on contents of soil carbon and nitrogen and yield of high oil maize[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(5): 187-192.
- [8] 刘武仁,郑金玉,罗洋,等.秸秆循环还田土壤环境效应变化研究[J].吉林农业科学,2015,40(1):32-36.
LIU W R, ZHENG J Y, LUO Y, et al. Studies on soil environment changes of straws returned into field[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2015, 40(1): 32-36.
- [9] 邓超超,李玲玲,谢军红,等.耕作措施对陇中旱农区土壤细菌群落的影响[J].土壤学报,2019,56(1):207-216.
DENG C C, LI L L, XIE J H, et al. Effects of tillage on soil bacterial community in the dryland farming area of central Gansu[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(1): 207-216.
- [10] 魏建林,崔荣宗,江丽华,等.潮土区小麦-玉米轮作周年秸秆还田及施钾效应研究[J].山东农业科学,2018,50(9):61-65, 71.
WEI J L, CUI R Z, JIANG L H, et al. Effects of straw returning and application of potassium fertilizer under wheat-maize rotation in fluvo-aquic soil area[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2018, 50(9): 61-65, 71.
- [11] 王志勇,白由路,杨俐苹,等.低土壤肥力下施钾和秸秆还田对作物产量及土壤钾素平衡的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(4):900-906.
WANG Z Y, BAI Y L, YANG L P, et al. Effects of application of potassium fertilizer and straw returning on crop yields and soil potassium balance in low-yielding fields[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2012, 18(4): 900-906.
- [12] 张丽华,徐晨,于江,等.半湿润区秸秆还田对土壤水分、温度及玉米产量的影响[J].水土保持学报,2021,35(4):299-306.
ZHANG L H, XU C, YU J, et al. Effects of straw returning on soil moisture, temperature and maize yield in semi humid area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 299-306.
- [13] 赵亚丽,薛志伟,郭海斌,等.耕作方式与秸秆还田对冬小麦-夏玉米耗水特性和水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2014,47(17):3359-3371.

- ZHAO Y L, XUE Z W, GUO H B, et al. Effects of tillage and straw returning on water consumption characteristics and water use efficiency in the winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(17): 3359-3371.
- [14] 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.
- [15] 杨冬静, 谢逸萍, 张成玲, 等. 不同秸秆还田模式土壤微生物多样性分析[J]. *江西农业学报*, 2021, 33(6): 34-42.
- YANG D J, XIE Y P, ZHANG C L, et al. Analysis of soil microbial diversity under different straw returning patterns [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2021, 33(6): 34-42.
- [16] 徐蒋来, 尹思慧, 胡乃娟, 等. 周年秸秆还田对稻麦轮作农田土壤养分、微生物活性及产量的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2015, 21(6): 1100-1105.
- XU J L, YIN S H, HU N J, et al. Effects of annual straw returning on soil nutrients, microbial activity and yield in a rice-wheat rotation system [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2015, 21(6): 1100-1105.
- [17] 何甜甜, 王静, 符云鹏, 等. 等碳量添加秸秆和生物炭对土壤呼吸及微生物生物量碳氮的影响[J]. *环境科学*, 2021, 42(1): 450-458.
- HE T T, WANG J, FU Y P, et al. Effects of adding straw and biochar with equal carbon content on soil respiration and microbial biomass carbon and nitrogen [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(1): 450-458.
- [18] 萨如拉, 杨恒山, 邵继承, 等. 秸秆还田条件下腐熟剂对不同质地土壤真菌多样性的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(7): 1061-1071.
- SA R L, YANG H S, TAI J C, et al. Effect of straw maturing agents on fungal diversity in soil with different textures under returned straw conditions [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(7): 1061-1071.
- [19] 战厚强, 颜双双, 王家睿, 等. 水稻秸秆还田对土壤磷酸酶活性及速效磷含量的影响[J]. *作物杂志*, 2015, (2): 78-83.
- ZHAN H Q, YAN S S, WANG J R, et al. Effects of rice straw returning on activities of soil phosphatase and available P values in soil [J]. *Crops*, 2015, (2): 78-83.
- [20] 负超, 杨春玲, 韩勇, 等. 不同秸秆还田量对安麦 13 产量及产量要素的影响[J]. *中国种业*, 2021, (6): 75-77.
- YUAN C, YANG C L, HAN Y, et al. Effects of different straw returning amount on yield and yield factors of Anmai 13 [J]. *China Seed Industry*, 2021, (6): 75-77.
- [21] 王晓航, 耿艳秋, 金峰, 等. 秸秆还田和地膜覆盖对土壤环境和水稻生长的影响[J]. *华南农业大学学报*, 2018, 39(5): 1-7.
- WANG X H, GENG Y Q, JIN F, et al. Effects of straw returning and plastic film mulching on soil environment and rice growth [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2018, 39(5): 1-7.
- [22] 解占军, 柳赞博, 韩琰萍, 等. 秸秆还田条件下氮肥对玉米产量和土壤肥力的影响[J]. *辽宁农业科学*, 2021, (2): 31-33.
- XIE Z J, LIU Y B, HAN Y Z, et al. Effects of nitrogen fertilizer on maize yield and soil fertility with straw returning [J]. *Liaoning Agricultural Sciences*, 2021, (2): 31-33.
- [23] 闫超, 颜双双, 王家睿, 等. 寒地稻秸还田与施钾肥对土壤水溶性钾和水稻产量的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2015, 46(5): 16-21.
- YAN C, YAN S S, WANG J R, et al. Effect of rice straw retention and potassium fertilizer application in cold region on soluble potassium content in the soil solution and rice yield [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2015, 46(5): 16-21.
- [24] 宗庆妹, 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.
- [25] 周正萍, 田宝庚, 陈婉华, 等. 不同耕作方式与秸秆还田对土壤养分及小麦产量和品质的影响[J]. *作物杂志*, 2021, (3): 78-83.
- ZHOU Z P, TIAN B G, CHEN W H, et al. Effects of different tillage methods and straw returning on soil nutrients and wheat yield and quality [J]. *Crops*, 2021, (3): 78-83.
- [26] 张团. 土壤有机改良措施对烤烟生长发育和品质的影响 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2016.
- ZHANG T. Effects of soil organic improvement measures on growth, development and quality of flue-cured tobacco [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2016.
- [27] 秦嘉海, 吕彪. 河西土壤与合理施肥 [M]. 北京: 兰州大学出版社, 2001: 150-155.
- QIN J H, LV B. Soil and rational fertilization in Hexi [M]. Beijing: Lanzhou University Press, 2001: 150-155.
- [28] 张雪辰, 邓双, 王旭东. 快腐剂对畜禽粪便堆肥过程中腐熟度的影响[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(2): 888-894.
- ZHANG X C, DENG S, WANG X D. Impact of decay promoting agent on maturity changes during composting of livestock and poultry manure [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(2): 888-894.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 秦嘉海, 王进. 北方作物营养与施肥 [M]. 北京: 兰州大学出版社, 2005: 96-109.
- QIN J H, WANG J. Crop nutrition and fertilization in northern China [M]. Beijing: Lanzhou University Press, 2005: 96-109.
- [32] 王贺祥. 农业微生物学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 364-366.
- WANG H X. Agricultural microbiology [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2003: 364-366.
- [33] 关松荫. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 农业出版社, 1986: 89-120.
- GUAN S Y. Soil enzymes and their research methods [M]. Beijing:

- Agricultural Press, 1986; 89-120.
- [34] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2000;123-137.
- LI H S. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000; 123-137.
- [35] 钱锐,刘洋,郭茹,等.覆膜秸秆还田对旱作农田土壤水温及春玉米产量的影响[J].西北农业学报,2021,30(4):532-544.
- QIAN R, LIU Y, GUO R, et al. Effects of straw returning to field and plastic film mulching on soil water, temperature and maize yield in upland fields[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2021, 30(4): 532-544.
- [36] 张玉铭,胡春胜,陈素英,等.耕作与秸秆还田方式对碳氮在土壤团聚体中分布的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(9):1558-1570.
- ZHANG Y M, HU C S, CHEN S Y, et al. Effects of tillage and straw returning method on the distribution of carbon and nitrogen in soil aggregates[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(9): 1558-1570.
- [37] 王碧胜,于维水,武雪萍,等.添加玉米秸秆对旱作土壤团聚体及其有机碳含量的影响[J].中国农业科学,2019,52(9):1553-1563.
- WANG B S, YU W S, WU X P, et al. Effect of straw addition on the formation of aggregates and accumulation of organic carbon in dryland soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(9): 1553-1563.
- [38] 成臣,汪建军,程慧煌,等.秸秆还田与耕作方式对双季稻产量及土壤肥力质量的影响[J].土壤学报,2018,55(1):247-257.
- CHENG C, WANG J J, CHENG H H, et al. Effects of straw returning and tillage system on crop yield and soil fertility quality in paddy field under double-cropping-rice system[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(1): 247-257.
- [39] 张鹏,贾志宽,王维,等.秸秆还田对宁南半干旱地区土壤团聚体特征的影响[J].中国农业科学,2012,45(8):1513-1520.
- ZHANG P, JIA Z K, WANG W, et al. Effects of straw returning on characteristics of soil aggregates in semi-arid areas in southern Ningxia of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(8): 1513-1520.
- [40] 党昆,陈伟,张洪淇,等.秸秆还田和地膜覆盖对稻区土壤理化性质及水稻产量的影响[J].东北农业科学,2021,46(4):11-16.
- DANG K, CHEN W, ZHANG H Q, et al. Soil research mechanism of combining straw returning with plastic film mulching to increase rice yield[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2021, 46(4): 11-16.
- [41] 张雅洁,陈晨,陈曦,等.小麦-水稻秸秆还田对土壤有机质组成及不同形态氮含量的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(11):2155-2161.
- ZHANG Y J, CHEN C, CHEN X, et al. Effects of wheat and rice straw returning on soil organic matter composition and content of different nitrogen forms in soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(11): 2155-2161.
- [42] 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 technology of sheep manure resource utilization in Dongting Lake area[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2019, (6): 44-46.
- [43] 王麒,宋秋来,冯延江,等.施用氮肥对还田水稻秸秆腐解的影响[J].江苏农业科学,2017,45(11):197-201.
- WANG Q, SONG Q L, FENG Y J, et al. Effects of nitrogen application on decomposition of rice straw in returning field[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(11): 197-201.
- [44] 张大伟,刘建,王波,等.连续两年秸秆还田与不同耕作方式对直播稻田土壤理化性质的影响[J].江西农业学报,2009,21(8):53-56.
- ZHANG D W, LIU J, WANG B, et al. Effects of straw-returning and different tillage modes on physical and chemical properties of direct seeding paddy soil[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2009, 21(8): 53-56.
- [45] 吴其聪,张丛志,张佳宝,等.不同施肥及秸秆还田对潮土有机质及其组分的影响[J].土壤,2015,47(6):1034-1039.
- WU Q C, ZHANG C Z, ZHANG J B, et al. Effects of different fertilization and straw returning on soil organic matter and its components in fluvo-aquic soil[J]. Soils, 2015, 47(6): 1034-1039.
- [46] 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].湖北农业科学,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.
- [47] 刘慧屿,何志刚,刘艳,等.低温堆腐与秸秆深翻还田对玉米产量及土壤微生物群落的影响[J].土壤通报,2021,52(4):873-884.
- LIU H Y, HE Z G, LIU Y, et al. Effects of low-temperature compost and deep tillage returning of maize straw on maize yield and soil microbial community[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(4): 873-884.
- [48] 刘世平,聂新涛,戴其根,等.免耕套种与秸秆还田对水稻生长和稻米品质的影响[J].中国水稻科学,2007,21(1):71-76.
- LIU S P, NIE X T, DAI Q G, et al. Effects of interplanting with zero tillage and wheat straw manuring on rice growth and grain quality[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2007, 21(1): 71-76.