

田 伟, 胡金霞, 李 刚, 等. 耕作方式与绿肥种植对玉米产量和土壤质量的影响[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(6): 1272-1277.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2017.06.011

耕作方式与绿肥种植对玉米产量和土壤质量的影响

田 伟¹, 胡金霞², 李 刚¹, 张 弛¹, 王 超¹, 陈秋会¹, 王 磊¹, 徐大兵³, 席运官¹

(1. 环境保护部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042; 2. 济宁市兖州区检验检测中心, 山东 济宁 272000; 3. 湖北省农业科学院植保土肥研究所, 湖北 武汉 430064)

摘要: 通过3年的田间试验, 以常规耕作+施有机肥(CC)为对照, 研究了免耕+不种绿肥(ZT)、免耕+种植绿肥(ZG)、常规耕作+不种绿肥(CT)、常规耕作+种植绿肥(CG)处理对玉米产量和土壤质量的影响。研究表明: 当绿肥种植与免耕技术配合使用较单一技术能够显著提高玉米产量, 促进作物对土壤氮磷的吸收, 改善土壤理化性质, 提高土壤微生物数量和活性, 而且3年玉米籽粒的平均干物质质量达到了1 198 kg/hm², 为有机农业习惯施肥处理CC的91.94%, 可以作为有机农业生产过程中改善土壤肥力和提高作物产量的有效措施, 同时能够减少有机肥施用引起的环境风险。

关键词: 绿肥; 免耕; 玉米; 产量; 土壤质量

中图分类号: S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2017)06-1272-06

Effects of tillage mode and green manure application on maize yield and soil quality

TIAN Wei¹, HU Jin-xia², LI Gang¹, ZHANG Chi¹, WANG Chao¹, CHEN Qiu-hui¹, WANG Lei¹, XU Da-bing³, XI Yun-guan¹

(1. Nanjing Institute of Environmental Sciences of the Ministry of Environmental Protection of China, Nanjing 210042, China; 2. Yanzhou Center for Product Quality Control, Jinan 272000, China; 3. Plant Protection and Soil Fertilizer Institute, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China)

Abstract: A three-year field experiment was conducted to evaluate the effects of tillage mode and green manure application on maize yield and soil quality. Five treatments including no tillage + without planting green manure (ZT), no tillage + planting green manure (ZG), conventional tillage + without planting green manure (CT), conventional tillage + planting green manure (CG) and the reference conventional tillage + organic manure (CC) were set up. The results showed that, compared with the treatment of ZT and CG, the treatment of ZG could significantly increase the yield of maize, promote the

absorption of soil nitrogen and phosphorus in crop, improve soil physical and chemical properties, increase the quantity and activity of soil microbes. The average yield of maize grain was 1 198 kg/hm² under the treatment of ZG, and it reached 91.94% of the yield under the treatment of CC. In conclusion, the use of green manure and no tillage technology was an effective method to improve soil quality and crop yield, and it could reduce the environmental risk caused by heavy application of organic manure.

收稿日期: 2017-04-18

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(20160303、20160201、GYZX170101); 云南省环保公益专项(45012); 国家科技重大专项(2014ZX07206001-01)

作者简介: 田 伟(1983-), 男, 山东聊城人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为有机农业与土壤修复。(Tel) 15950583466; (E-mail) tw79210@163.com

通讯作者: 徐大兵, (E-mail) dabing_xu@163.com; 席运官, (E-mail) xygofrc@126.com

Key words: green manure; no tillage; maize; yield; soil quality

生态环境恶化(土壤沙漠化、盐渍化、养分耗竭等)和食品安全问题间接地促进了有机农业的发展。在过去十年,世界有机农业以每年 20% 的速率增长,截止 2014 年底,全球以有机方式管理的农地面积达到了 $4.37 \times 10^7 \text{ hm}^2$ (包括处于转换期的土地),其中中国 $1.90 \times 10^6 \text{ hm}^2$,居世界第四位^[1]。有机农业作为一种提高土壤肥力,控制农业面源污染,增加食品安全的有效方式在世界范围内得到了广泛认可^[2]。

在中国有机农业生产过程中,有机肥是植物主要的营养物质来源。但是,研究表明:连续施用有机肥,尤其是以畜禽粪便为主要来源的有机肥,可能引起土壤重金属累积,磷素淋溶风险增加,土壤微生物多样性下降等环境风险^[3-5]。欧盟一些地区已经制定相关法规限制以有机肥作为农作物氮、磷等营养物质主要来源的行为^[6]。土壤有机质是评价土壤质量的重要指标,与作物产量密切相关,增加外源有机物质的投入和减少对土壤的扰动均是维持土壤有机质含量和作物产量的重要措施,例如:免耕与种植绿肥。免耕和绿肥种植是有机农业和常规农业的重要契合点,关于两种技术同时采用对土壤质量和作物产量的影响研究报道相对较少,本研究拟同时采用这两种技术改善土壤质量和提高农作物产量,通过开展田间试验的方式进行验证,以期对有机农业生产过程中土壤肥力的提升提供技术指导。

1 材料与方法

1.1 研究地点

田间试验选址在江苏省仪征市江扬农业生态有限公司四庄基地。仪征市位于江苏省中部,长江下游沿岸,东经 $119^\circ 02' \sim 119^\circ 22'$,北纬 $32^\circ 14' \sim 32^\circ 36'$,属北亚热带沿江季风气候,光能资源丰富,雨量较为充沛,年均降水量为 1 015 mm,年平均日照时数为 2 226.5 h,年均气温为 15°C 。

1.2 试验处理

以有机农业习惯施肥和耕作方式的常规耕作+施有机肥(CC)为对照,设计免耕+不种绿肥(ZT)、免耕+种植绿肥(ZG)、常规耕作+不种绿肥(CT)、常规耕作+种植绿肥(CG) 4 个处理,每个处理设置 3

个重复,共 15 个小区,小区规格为 $4 \text{ m} \times 5 \text{ m}$,采用豆科绿肥玉米的轮作方式。2013–2014 年度绿肥作物为绿豆,2014–2015 和 2015–2016 年度种植绿肥品种为箭舌豌豆。绿豆种植时间为 2014 年 4 月中旬,采收时间为 2014 年 5 月中旬,两季豌豆种植为每年的 10 月中旬,采收时间为第 2 年 4 月中旬。玉米种植时间为每年的 5 月上旬,收获时间为每年 9 月下旬。

免耕+种植绿肥(ZG)处理采用镰刀齐地刈割,称质量,点种玉米后覆于土壤表面;常规耕作+种植绿肥(CG)处理同样齐地刈割,称质量,然后人工翻压至土壤 20 cm 以下,翻压两周后点种玉米;常规耕作+施用有机肥(CC)处理,按照 15 t/hm^2 施用量撒施牛粪有机肥于土壤表面,采用与 CG 处理相同的方式翻压,翻压两周后点种玉米,每个小区种植玉米 100 棵。玉米长至 40 cm 左右时进行人工定苗。玉米生长过程中,完全按有机方式进行管理,人工除草,喷洒生物源、植物源和矿物源农药进行病虫害防治。除常规耕作+施用有机肥(CC)(对照)外,其余 4 个处理均未施用外源有机肥或者化学肥料。

1.3 样品采集与分析

1.3.1 样品采集 玉米收获后进行土壤样品采集。在小区内随机选择 3 个点,用采样器采集 0~20 cm 的土壤样品,混合后,采用四分法平均分成两份,一份保存于 4°C 冰箱,一份自然风干。

1.3.2 生物量的测定 采取全区收获方式齐地切割地上部并称质量计鲜草产量,同时在每个小区内选取 3 株长势均匀的绿肥植株用作养分含量测定。用全区收获方式,测定玉米籽粒鲜质量,放入烘箱中 65°C 烘至少 12 h 后称其干质量。

1.3.3 土壤理化性质测定 土壤容重(BD)采用环刀法测定;最大持水量(MWHC)采用威尔科克斯法测定;孔隙度(POR)采用环刀法测定;土壤 pH 值测定采用过 20 目筛(0.85 mm)风干土,使用 PHS-3C mv/pH 探测器进行测定,水土比为 5:1;土壤全氮(TN)测定采用过 60 目筛(0.25 mm)风干土,使用重铬酸钾-硫酸消化法;土壤有机碳(SOC)采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法测定;土壤全磷(TP)测定采用过 100 目筛(0.15 mm)风干土,使用高氯酸消煮-钼锑抗显色法;土壤速效磷(AP)测定采用过

18 目筛(1.00 mm)风干土,使用碳酸氢钠法;土壤全钾(TK)测定采用过 100 目筛(0.15 mm)风干土,使用氢氧化钠熔融-火焰光度计法;土壤有效钾(AK)测定采用过 18 目筛(1.00 mm)风干土,使用醋酸铵-火焰光度计法。

1.3.4 土壤微生物量碳、微生物量氮和荧光素二乙酸酯(FDA)水解酶活性分析 土壤微生物量碳和微生物量氮测定采用新鲜土样,使用氯仿熏蒸浸提法,样品熏蒸同时设置不熏蒸对照,随后以硫酸钾溶液振荡浸提,过滤后滤液用元素分析仪测定,微生物量碳、氮的换算系数均为 0.45。FDA 水解酶按照 Swisher 的方法测定^[7],在 490 nm 下比色测定荧光素浓度,酶活性用 mg/(kg·h)表示。每个处理重复 3 次。

1.4 数据处理

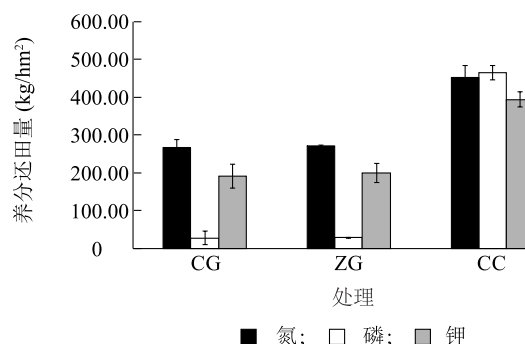
数据经 Excel 2010 整理后,采用 SPSS 18.0 软件进行单因素方差分析,不同处理之间采用 Duncan's 新复极差法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同处理条件下 3 年养分还田总量

如图 1 所示,氮、磷、钾 3 年还田总量在免耕+种植绿肥处理(ZG)中分别为 270.37 kg/hm²、28.05 kg/hm²和 198.36 kg/hm²,在常规耕作+种植绿肥处理(CG)中分别为 267.28 kg/hm²、27.12 kg/hm²和 190.36 kg/hm²,耕作方式的差异并未显著影响不同处理绿肥营养物质的还田总量。另外,按照有机农田习惯施肥量,常规耕作+施有机肥处理(CC)3 年投入的氮、磷、钾总量分别为 452.41 kg/hm²、464.38 kg/hm²和 393.20 kg/hm²,均显著高于 ZG 和 CG 处

理,尤其是磷素投入量,分别为 ZG 和 CG 处理的 16.55 倍和 17.12 倍。



CG: 常规耕作+种植绿肥; ZG: 免耕+种植绿肥; CC: 常规耕作+施有机肥。

图 1 3 年绿肥和有机肥养分还田总量

Fig.1 Total nutrients returned to soil from green manure and compost over a three-year period in three treatments

2.2 耕作方式与绿肥种植对玉米干物质质量、氮和磷含量以及吸收量的影响

如表 1 所示:与有机农业生产习惯处理 CC 相比,尽管种植绿肥处理(ZG 和 CG)无论秸秆还是籽粒 3 年的平均干物质质量均有一定程度的降低,但是差异并不显著。连续 3 年不投入外源有机肥而进行绿肥种植,导致了 ZT 和 CT 处理玉米秸秆和籽粒的干物质质量 3 年平均值显著降低。耕作方式以及绿肥种植并没有影响玉米秸秆和籽粒中氮磷的含量,但是,由于不同处理玉米秸秆和籽粒干物质质量有差异,所以耕作方式与绿肥种植均不同程度的影响了作物对氮磷的吸收。与常规耕作+施有机肥处理(CC)处理相比,只有 ZG 处理玉米秸秆和籽粒对氮磷的吸收总量差异不显著。

表 1 耕作方式与绿肥种植对玉米干物质质量、氮和磷含量以及吸收量的影响

Table 1 Effects of tillage mode and green manure application on dry matter yield, N and P contents and N and P uptake by maize

处 理	干物质质量(kg/hm ²)		氮含量(g/kg)		磷含量(g/kg)		全氮吸收量(kg/hm ²)	全磷吸收量(kg/hm ²)
	秸秆	籽粒	秸秆	籽粒	秸秆	籽粒		
免耕+不种绿肥(ZT)	2 346b	475c	5.17a	12.37a	1.03a	2.24a	18.00c	3.48c
常规耕作+不种绿肥(CT)	2 017b	431c	5.11a	12.76a	0.97a	2.17a	15.80d	2.90d
免耕+种植绿肥(ZG)	4 838a	1 198b	5.02a	12.46a	1.19a	2.31a	39.20a	8.52a
常规耕作+种植绿肥(CG)	4 629a	1 003b	5.04a	12.15a	1.12a	2.30a	35.52b	7.49b
常规耕作+施有机肥(CC)	4 929a	1 303a	5.07a	12.35a	1.07a	2.32a	41.08a	8.30a

表格中数据均为 3 年试验平均值。同列数据后不同小写字母表示差异达显著水平($P<0.05$)。

2.3 耕作方式与绿肥种植对土壤容重、孔隙度和田间持水量的影响

如表 2 所示:经过 3 年的处理,常规耕作+不种绿肥处理(CT)的土壤容重由 1.31 g/cm³下降到 1.23 g/cm³,降低了 6.10%。免耕+种植绿肥处理(ZG)的土壤容重较免耕+不种绿肥处理(ZT)下降了 11.38%,较常规耕作+种植绿肥处理(CG)下降了 5.20%,较常规耕作+施有机肥处理(CC)下降了 7.63%。另外,田间持水量和土壤孔隙度的分析也得到了基本一致的研究结果。

2.4 耕作方式与绿肥种植对土壤化学性质的影响

不同处理土壤化学性质呈现了对耕作方式和绿肥种植的不同响应。如表 3 所示,除了常规耕作+施有机肥处理(CC)由于有机肥的连续施用 pH 显著提高外,其他处理之间并没有明显差异。在同时不施有机肥的情况下,免耕+种植绿肥处理(ZG)耕作层土壤有机质和全氮的含量明显高于其他 3 个处

理。2 个种植绿肥处理对耕作层土壤中速效磷和速效钾的含量产生了显著的影响,但对全磷和全钾的含量影响不明显。ZG 处理和 CG 处理速效磷的含量分别为 49.37 mg/kg 和 54.23 mg/kg,速效钾的含量分别为 105.21 mg/kg 和 100.37 mg/kg,明显高于 ZT 和 CT 处理。

表 2 耕作方式与绿肥对土壤容重、孔隙度和田间持水量的影响
Table 2 Effect of tillage mode and green manure application on soil bulk density, soil porosity and field water capacity

处理	土壤容重 (g/cm ³)	田间持水量 (%)	土壤孔隙度 (%)
免耕+不种绿肥(ZT)	1.23b	33.06b	54.01c
常规耕作+不种绿肥(CT)	1.31a	33.11b	54.36c
免耕+种植绿肥(ZG)	1.09d	34.05a	55.71a
常规耕作+种植绿肥(CG)	1.15c	34.23a	55.96a
常规耕作+施有机肥(CC)	1.18c	33.62ab	55.33b

同列数据后不同小写字母表示差异达显著水平($P<0.05$)。

表 3 耕作方式与绿肥种植对耕作层土壤(0~20 cm)化学性质的影响

Table 3 Effects of tillage made and green manure application on soil chemical properties of plough layer (0~20 cm)

处理	pH	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	速效磷 (mg/kg)	全钾 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
免耕+不种绿肥(ZT)	6.20b	9.15c	0.46c	0.17b	24.32c	0.72b	73.27c
常规耕作+不种绿肥(CT)	6.35b	8.97d	0.35d	0.15b	27.15c	0.73b	74.23c
免耕+种植绿肥(ZG)	6.37b	12.03b	0.62b	0.23b	49.37b	0.79b	105.21b
常规耕作+种植绿肥(CG)	6.24c	10.25c	0.53c	0.22b	54.23b	0.77b	100.37b
常规耕作+施有机肥(CC)	6.95a	13.05a	0.77a	0.47a	67.30a	0.95a	120.14a

同列数据后不同小写字母表示差异达显著水平($P<0.05$)。

2.5 耕作方式与绿肥种植对土壤微生物数量与活性的影响

如表 4 所示,耕作方式差异与绿肥种植显著影响了耕作层土壤微生物量碳和微生物量氮的含量,具体顺序为:常规耕作+不种绿肥处理(CT)<免耕+不种绿肥处理(ZT)<常规耕作+种植绿肥处理(CG)<免耕+种植绿肥处理(ZG)<常规耕作+施有机肥处理(CC)。从结果不难发现,在本试验条件下,耕作方式的差异对土壤微生物量的影响小于绿肥种植。

土壤微生物以异养型种群为主,其生命活动需要消耗一定的能量。图 1 数据表明,以 15 t/hm²的有机肥施用量,连续 3 年外源营养物质的投入明显高于其他处理,促进了微生物的繁殖。3 年的免耕处理,减少了农事操作对土壤的扰动,同时大量的玉米残根及低分子量的根系分泌物均是 ZT 处理微生

物量明显高于 CT 处理的重要因素。常规耕作+施有机肥处理(CC)的 MB-C/MB-N 的比值最低(5.03),而常规耕作+不种绿肥处理(CT) MB-C/MB-N 的比值最高(5.76)(表 4),由此可以认为,CT 处理中放线菌和真菌的相对含量较 CC 处理有的一定的增加。另外,常规耕作+种植绿肥处理(CG) FDA 水解酶活性为常规耕作+施有机肥处理(CC)的 68.13%,差异显著($P<0.05$)。

3 讨论

绿肥是一种养分完全的优质生物肥源,在提供作物养分、防止水土流失、改善生态环境等方面均有良好作用,与有机肥施用构成了有机农业生产过程中农作物营养物质的重要来源^[8]。免耕与绿肥种植是影响土壤肥力的重要因素。本研究发现,绿肥

种植处理 ZG 和 CG 第 1 年玉米干物质质量显著低于 CC 处理, 而 3 年平均值则差异并不显著, 与 Dou 等^[9]以玉米为研究对象开展的绿肥试验结论相似。耕作方式同样没有引起玉米秸秆和籽粒干物质质量的显著差异, 可能与本试验免耕操作的时间较短有关。Tiscareno 等^[10]发现, 随着免耕时间的增加, 免耕处

理玉米的产量甚至能够超过常规耕作处理。据报道豆科作物每年的固氮量可达 70 kg/hm^2 , 另外, 豆科作物秸秆和根系降解腐烂产生的有机酸, 有助于土壤中难利用氮、磷元素向有效态转化, 促进玉米对氮、磷的吸收^[11]。另外, 土壤中微生物活性的变化也许是促进作物对氮、磷吸收的另外一个重要原因。

表 4 耕作方式与绿肥对土壤微生物数量与活性的影响

Table 4 Effects of tillage mode and green manure application on soil microbial biomass and activity

处理	微生物量碳 (mg/kg)	微生物量氮 (mg/kg)	MB-C/MB-N	FDA 水解酶活性 [mg/(kg·h)]
免耕+不种绿肥 (ZT)	74.35c	13.18d	5.64a	25.37d
常规耕作+不种绿肥 (CT)	55.17d	9.58e	5.76a	26.58d
免耕+种植绿肥 (ZG)	106.23b	19.94b	5.32b	47.18b
常规耕作+种植绿肥 (CG)	93.74bc	17.35c	5.40b	36.21c
常规耕作+施有机肥 (CC)	127.13a	25.27a	5.03c	53.15a

同列数据后不同小写字母表示差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

农业生产过程中, 由于化肥的长期过量施用, 土壤板结问题日益严峻。土壤容重是反映土壤松紧度的重要指标, 它受到土壤疏松度、质地类型、有机质含量、土壤结构类型和耕作等因素影响。而孔隙度与容重密切相关, 它们之间呈反比关系。免耕、绿肥种植和有机肥施用等对土壤容重的影响一直受到众多学者的关注^[6,8,12]。通过免耕配合绿肥种植, 将绿肥根系残留在土壤, 以绿肥秸秆作为覆盖作物能够更有效地降低土壤容重, 改善土壤结构。绿肥在土壤微生物的作用下, 产生大量腐殖质, 能改善土壤通透性, 增强土壤保水保肥能力。然而, 免耕处理对土壤容重和土壤孔隙度的影响结论不一。徐世宏等^[13]认为, 免耕 1 年、2 年和 5 年其耕作层土壤容重均比常规耕作降低, 下降了 $2.56\% \sim 3.05\%$ 。江添茂等^[14]的试验结果表明, 全年免耕土壤容重明显增加。我们认为不同研究结论可能与耕作制度和土壤类型差异有关。因为, 施彩仙等^[15]研究发现土壤在翻耕过程中受机具压实是导致常规耕作土壤容重增加的重要因素, 而刘怀珍等^[16]则发现粘质土适合免耕, 棕壤土不宜长期免耕。

许多研究结果表明翻压绿肥能够引起土壤 pH 值降低, 然而, 土壤 pH 值的变化与绿肥的翻压量和翻压种类有关, 对于偏酸性的环境, 绿肥种植反而能提高土壤 pH 值。江西省红壤研究所试验发现种植紫云英 3 年后土壤 pH 值由 5.1 上升到 5.8。

土壤有机质的含量与土壤肥力水平密切相关,

它含量的高低取决于土壤本身的有机质含量与有机质的矿化。本研究发现相对于绿肥翻压还田处理, 绿肥作为覆盖作物覆盖于土壤表面, 有机质降解速率明显较低, 有利于土壤有机质的积累^[17]。另外, 每季残留于土壤中的玉米根系和常规耕作方式对土壤的扰动也是 ZG 处理土壤有机质明显高于 CG 处理的重要因素。土壤全氮含量的变化规律与有机质含量的变化规律相似。李月梅等^[18]同样研究发现, 保护性耕作能显著增加氮素在土壤中的积累, 并随着保护性耕作年限的增加, 含量逐渐增加。绿肥矿化产生的有机酸对土壤原有氮、磷的活化以及绿肥自身降解释放的氮、磷是种植绿肥处理土壤有效态氮、磷的重要来源。高玲等^[19]研究结果表明种植紫云英绿肥提高了石灰土氮、磷、钾的有效态和全氮含量, 但对全磷和全钾的含量增加不显著, 与本试验以绿豆和豌豆作为绿肥得到的研究结论一致。

土壤微生物可以作为土壤有机质及养分循环和转化的动力, 也是土壤养分的储备库, 在土壤养分转化和供给中起着重要作用^[20-21]。土壤微生物尽管所占比例很小, 但由于其对外界条件变化敏感, 因而能够及时反映土壤质量状况。本研究发现耕作方式的差异对土壤微生物量的影响小于绿肥种植小于有机肥施用。李正等^[22]同样研究认为, 连续多年翻压绿肥能够显著提高土壤微生物量碳和土壤微生物量氮含量, 这种培肥效果随翻压年限的增加而提高。除了养分投入多少外, 土壤结构的差异也是影响土

壤微生物含量的重要因素,在一定范围内,土壤田间持水能力越强,微生物数量越多。

土壤微生物量碳与土壤微生物量氮比可以反映微生物群落结构信息,一般情况下细菌的碳氮比在5:1左右,放线菌在6:1左右,真菌则在10:1左右。本研究发现CT处理中放线菌和真菌的相对含量较CC有一定的增加,文献报道在贫瘠土壤状况下放线菌更易成为优势微生物,而真菌含量的增加则更易引起作物病害的发生,因为真菌中包含了更多的病原微生物。不同的耕作和施肥方式对土壤微生物种群的影响,有必要开展更深入的研究^[23]。荧光素二乙酸酯(FDA)水解酶活性与微生物活性间的相关性比其它酶活性更显著,被认为能作为快速而有效反映土壤微生物活性的指标。Tian等^[5]研究了水旱轮作系统施肥方式对土壤微生物活性的影响,结果表明,土壤FDA水解酶活性与土壤微生物DNA含量呈现了明显的正相关($P < 0.01$, $r = 0.956$, $n = 9$),与本文的研究结论一致。

参考文献:

- [1] WILLER H, YUSSEF M. The world of organic agriculture, statistics and emerging trends [M]. Switzerland: FIBL and IFOAM, 2016: 1-2.
- [2] STOCKDALE E A, SHEPHERD M A, FORTUNE S, et al. Soil fertility in organic farming systems-fundamentally different [J]. Soil Use & Management, 2010, 18(S1):301-308.
- [3] TIAN W, ZHANG Z, HU X, et al. Short-term changes in total heavy metal concentration and bacterial community composition after replicated and heavy application of pig manure-based compost in an organic vegetable production system [J]. Biology and Fertility of Soils, 2015, 51(5): 593-603.
- [4] 李 晟,顾洪如,张 霞,等.熟化猪发酵床垫料对白菜产量及重金属积累的影响[J].江苏农业科学,2016,44(12):201-203.
- [5] TIAN W, WANG L, LI Y, et al. Responses of microbial activity, abundance, and community in wheat soil after three years of heavy fertilization with manure-based compost and inorganic nitrogen [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2015, 213: 219-227.
- [6] TOMMY D, GREET R, NICOLE V, et al. Farm compost amendment and non-inversion tillage improve soil quality without increasing the risk for N and P leaching [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2016, 225: 126-139.
- [7] SWISHER R, CARROLL G C. Fluorescein diacetate hydrolysis as an estimator of microbial biomass on coniferous needle surfaces [J]. Microbial Ecology, 1980, 6(3): 217-226.
- [8] 王 璐,吴建富,潘晓华,等.紫云英和稻草还田免耕抛栽对水稻产量和土壤肥力的影响[J].中国农学通报,2010,26(20):299-303.
- [9] DOU Z, FOX R H, TOTH J D. Tillage effect on seasonal nitrogen availability in corn supplied with legume green manures [J]. Plant and Soil, 1994, 162(2): 203-210.
- [10] TISCARENO-LOPEZ M, BAEZ-GONZALEZ A D, VELASQUEZ-VALLE M, et al. Agricultural research for watershed restoration in central Mexico [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1999, 54(4): 686-692.
- [11] 杨春霞,赵志平,杨丽萍,等.不同覆盖绿肥养分特性及其对橡胶园土壤理化性质的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(2): 467-474.
- [12] ASTIER M, MASS J M, ETCHEVERS-BARRA J D, et al. Short-term green manure and tillage management effects on maize yield and soil quality in an Andisol [J]. Soil & Tillage Research, 2006, 88(1/2): 153-159.
- [13] 徐世宏,郎 宁,李如平,等.连续免耕抛秧对稻田土壤理化性状的影响[J].杂交水稻,2006,21(S1): 134-136.
- [14] 江添茂,郑云峰,邱美强.不同免耕栽培方式对水稻产量及土壤肥力的影响研究[J].中国农学通报,2009,25(22): 162-165.
- [15] 施彩仙.免耕与翻耕直播对土壤特性及水稻生长的影响[J].中国土壤与肥料,1999(5):8-10.
- [16] 刘怀珍,黄 庆,李康活,等.水稻免耕抛秧栽培时间对棕壤土壤理化性状的影响[J].广东农业科学,2002(6):28-31.
- [17] BEARE M H, NEELY C L, COLEMAN D C, et al. Characterizations of a substrate-induced respiration method for measuring fungal, bacterial and total microbial biomass on plant residues. [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 1992, 34(1): 65-73.
- [18] 李月梅.保护性耕作对土壤养分及部分物理性状的影响[J].农机化研究,2011(11):148-152.
- [19] 高 玲,刘国道.绿肥对土壤的改良作用研究进展[J].北京农业,2007(36):29-33.
- [20] 陈桂芬,刘 忠,黄雁飞,等.不同施肥处理对连作蔗田土壤微生物量、土壤酶活性及相关养分的影响[J].南方农业学报,2015,46(12):2123-2128.
- [21] 石元豹,曹 兵,宋丽华.CO₂浓度倍增对宁夏枸杞种植地土壤养分及微生物的影响[J].江苏农业学报,2016,32(1):201-206.
- [22] 李 正,刘国顺,敬海霞,等.翻压绿肥对植烟土壤微生物量及酶活性的影响[J].草业学报,2011,3(20): 225-232.
- [23] ZHAO J, ZHANG R, XUE C, et al. Pyrosequencing reveals contrasting soil bacterial diversity and community structure of two main winter wheat cropping systems in China [J]. Microbiology Ecology, 2014, 67(2): 443-453.

(责任编辑:姜华琬)