

洱海流域不同有机肥替代对土壤理化性质及油菜产量的影响

万辰, 马瑛骏, 张克强, 王风, 沈仕洲

引用本文:

万辰, 马瑛骏, 张克强, 等. 洱海流域不同有机肥替代对土壤理化性质及油菜产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2494–2502.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1026>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

洱海流域不同施肥模式对稻田氮磷径流流失的影响

姜海斌, 沈仕洲, 谷艳茹, 于双, 邹洪涛, ArifHusain, 张磊, 张克强

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1305–1313 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1292>

洱海流域典型农区不同施肥处理下稻田氨挥发变化特征

吴凡, 张克强, 谢坤, 王风, 王瑞琦, 尹高飞, 沈仕洲

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1735–1742 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1621>

施用鸡粪有机肥对种植小油菜土壤微生物群落结构多样性的影响

李可, 孙彤, 孙涛, 徐应明, 孙约兵

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2316–2324 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0036>

稻作条件下不同施肥模式对盐碱化土壤细菌和古菌群落结构的影响

李明, 马飞, 肖国举

农业环境科学学报. 2018, 37(3): 495–504 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1107>

长期配施有机肥对宁夏引黄灌区水稻产量和稻田氮素淋失及平衡特征的影响

刘汝亮, 张爱平, 李友宏, 王芳, 赵天成, 陈晨, 洪瑜

农业环境科学学报. 2015, 34(5): 947–954 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.05.018>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

万辰, 马瑛骏, 张克强, 等. 洱海流域不同有机肥替代对土壤理化性质及油菜产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2494–2502.

WAN C, MA Y J, ZHANG K Q, et al. Effects of different organic fertilizer substitutions on soil physical and chemical properties and rapeseed yield in Erhai Lake basin, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11): 2494–2502.



开放科学 OSID

洱海流域不同有机肥替代对土壤理化性质及油菜产量的影响

万辰^{1,2,3}, 马瑛骏^{1,3,4}, 张克强^{1,3}, 王凤^{1,3}, 沈仕洲^{1,3*}

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 3. 云南大理农田生态系统国家野外观测研究站, 云南 大理 671004; 4. 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030)

摘要:为探究洱海流域油菜种植合理的施肥方式, 研究不同有机肥替代对土壤理化性质及油菜产量的影响, 在云南大理农田生态系统国家野外观测研究站进行油菜田间试验。田间试验设置不施肥(CK); 常规化肥施用(CF); 以CF氮素折纯计算, 设30%固体、液体有机肥替代(T1、T4); 70%固体、液体有机肥替代(T2、T5); 100%固体、液体有机肥替代(T3、T6), 共8个处理。结果表明: 与试验前土壤相比, 除CF和T6处理土壤全氮含量提升2.66%和6.57%外, 各施肥处理土壤全氮和全磷含量有下降趋势, T1、T2、T3土壤全磷含量与有机肥配施比例增加呈正相关, 而T4、T5、T6呈负相关, 施用液体有机肥使土壤铵态氮、硝态氮、有效磷含量在短时间内大幅提高; 除T4处理外, 有机肥的施用对土壤有机质含量均有提升作用, 其中T5处理效果最好, 提升了28.66%; T1、T2、T4处理均导致土壤容重较试验前土壤上升, 上升幅度分别为15.84%、16.83%、17.82%; 液体有机肥替代处理均导致土壤pH值较试验前土壤有所下降, 单施液体有机肥下降幅度最大, 降低5.17%; 与CF处理相比, 随着有机肥替代比例增加, 油菜株高、角果长度、单株角果数、千粒质量、油菜产量均呈下降趋势, T1~T6处理油菜产量减少18.06%~76.65%, 30%有机肥替代(T1、T4)与CF处理差异较小。综合考虑不同施肥处理对环境和油菜产量的影响, 30%固体有机肥替代(T1)是较优的施肥方式。

关键词:洱海流域; 有机肥; 油菜; 土壤理化性质; 产量

中图分类号: S565.4; S153 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)11-2494-09 doi:10.11654/jaes.2021-1026

Effects of different organic fertilizer substitutions on soil physical and chemical properties and rapeseed yield in Erhai Lake basin, China

WAN Chen^{1,2,3}, MA Yingjun^{1,3,4}, ZHANG Keqiang^{1,3}, WANG Feng^{1,3}, SHEN Shizhou^{1,3*}

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 3. National Field Observation and Research Station of Farmland Ecosystem in Dali, Yunnan, Dali 671004, China; 4. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: This study aimed to explore the rational fertilization methods for rapeseed planting in the Erhai Lake basin, to study the impact of different organic fertilizer substitutions on soil nutrients and rapeseed yield. The rapeseed field experiment was carried out in the

收稿日期: 2021-09-06 录用日期: 2021-09-20

作者简介: 万辰(1997—), 男, 河北唐山人, 硕士研究生, 主要研究方向为农业面源污染防治。E-mail: chenwan97@163.com

*通信作者: 沈仕洲 E-mail: shenshizhou@126.com

基金项目: 云南省专家工作站项目(202005AF150204); 云南省重大科技专项计划项目(202102AE090011); 云南省基础研究青年基金项目(2019FD120); 国家重点研发计划项目(2017YFD0800103)

Project supported: The Yunnan Province Expert Workstation Project (202005AF150204); The Major Science and Technology Special Plan Project of Yunnan Province (202102AE090011); The Yunnan Basic Research Youth Fund (2019FD120); The National Key Research and Development Program of China (2017YFD0800103)

National Field Observation and Research Station of the Farmland Ecosystem in Dali, Yunnan. The experiment set no fertilization (CK), conventional chemical fertilizer fertilization (CF), based on the total nitrogen of CF fertilization treatment, and set solid organic fertilizer to replace 30%, 70%, and 100% chemical fertilizer treatments (T1, T2, T3) and liquid organic fertilizer to replace 30%, 70%, 100% chemical fertilizer treatment (T4, T5, T6). The results of the study showed that, compared with the soil before the experiment, except for CF and T6 with soil total nitrogen content increased by 2.66% and 6.57%, the total nitrogen and total phosphorus content of the soil under all fertilization treatments had a downward trend, and the total phosphorus content of T1, T2, and T3 soils was positively correlated with the increase in the proportion of organic fertilizers. However, T4, T5, and T6 were negatively correlated. The application of liquid organic fertilizer considerably increased the soil ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, and available phosphorus levels in a short time. In addition to T4 treatment, the application of organic fertilizer increased the content of soil organic matter, and T5 treatment had the best effect, increased by 28.66%; T1, T2, and T4 treatments all caused the soil bulk density to increase compared with the soil before the test by 15.84%, 16.83%, and 17.82%, respectively. All of the liquid organic fertilizer substitution treatments caused the soil pH to decrease compared with the soil before the test. Single application of liquid organic fertilizer caused the greatest decrease, at 5.17%. Compared with single application of chemical fertilizer, as the replacement ratio of organic fertilizer increased, rapeseed plant height, silique length, number of siliques per plant, 1000-seed weight, and rapeseed yield all showed a downward trend, whereas T1~T6 oilseed rape yield decreased by 18.06%~76.65%; 30% organic fertilizer substitution (T1, T4) showed little difference compared with CF. Considering the effects of different fertilization treatments on the environment and rapeseed yield, 30% solid organic fertilizer substitution (T1) was found to be the superior fertilization method.

Keywords: Erhai Lake basin; organic fertilizer; rapeseed; soil physical and chemical property; yield

化肥在我国农业生产中占有重要地位,施用化肥是提高土壤肥力和作物产量的必要措施^[1]。近年来,为提高产量而过量施用化肥导致的土壤地力退化,特别是土壤有机质含量下降和土壤养分失衡,对土壤质量和作物产量造成了长期的负面影响^[2]。20世纪80年代以来,我国大力推荐施用有机肥。有机肥养分全面,有机质含量高,肥效长,能改善土壤生态系统使其良性循环,改良土壤,保持土壤肥力,提高农产品质量,减少或消除长期单施或过量施用化学肥料带来的负面影响^[3]。有研究表明,化学肥料与有机肥配施可以增加土壤养分,提高土壤保肥能力以及肥料利用率,促进作物可持续生产^[4-5]。刘彦伶等^[6]的研究发现,施用有机肥显著提高了土壤有机质、全氮、速效氮、全磷、速效磷的含量,特别是有机肥与化肥配施效果最为明显。因为施用有机物料增加了土壤有机碳库,使微生物活性增强,从而促进土壤有机质转化,增加了土壤氮磷有效养分^[7]。张鑫等^[8]的研究发现,与常规施肥相比,配施腐植酸、有机肥的土壤有机质含量平均增加2.38%和2.98%,速效氮含量平均增加5.69%和9.82%,有效磷含量平均增加14.47%和19.60%。有机肥肥效较慢,养分含量较低,难以满足作物生长期对养分的需求,因此,需要与化学肥料配合使用,以达到高产、稳产的效果^[9-12]。马肖等^[13]的研究结果表明,在化肥减量25%,有机肥配施量为3 375 kg·hm⁻²和4 500 kg·hm⁻²时,油菜产量分别提高102.0 kg·hm⁻²和343.5 kg·hm⁻²,

增产5.6%和19.0%。在我国发布《到2020年化肥使用量零增长行动方案》的大背景下,有机无机肥配施的施肥方式将是我国今后施肥发展的必然趋势。

洱海位于云南大理白族自治州中部,是云南省第二大高原淡水湖以及国家重点保护水域。农业是该流域的基础产业^[14]。2000年以来,随着洱海流域的快速发展,洱海污染负荷不断增加,水质不断下降,已成为富营养化初期湖泊。农业面源污染是导致洱海水质下降和富营养化的重要因素^[15]。研究发现^[16-17],不合理的种植结构和施肥管理是造成农田氮磷流失、洱海富营养化加剧的重要原因。例如,在流域农业产业中,大蒜种植对种植业总氮和总磷的贡献率最大,占到流域种植业总排放量的74%^[18]。油菜属于旱季越冬作物,对水肥需求较低,同时具有较高的经济价值,推广油菜种植对于洱海流域替代以大蒜为主的高水肥作物、改善种植结构具有重要意义。本研究设置不同有机肥替代的施肥处理,通过田间定位试验研究不同无机有机肥配比施肥对洱海流域土壤理化性质和油菜产量的影响,探究适宜当地油菜生产的环境友好型施肥方式,为洱海流域种植结构调整、农田科学合理施肥提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于云南省大理市喜洲镇,云南大理农田

生态系统国家野外观测研究站(25°53'34"N, 100°10'27"E)。该地区气候属典型的低纬高原中亚热带西南季风气候,海拔高度1 980 m,年平均气温14.6℃,主导风向为西南风,多年平均降雨量为1 048 mm^[19]。供试土壤为暗棕壤,试验开始前0~20 cm土壤基本理化性质见表1。

1.2 试验设计

试验共设8个处理:空白,不施用肥料(CK);单施化肥(CF);70%化肥+30%固体有机肥(T1);30%化肥+70%固体有机肥(T2);100%固体有机肥(T3);70%化肥+30%液体有机肥(T4);30%化肥+70%液体有机肥;100%液体有机肥(T6)。以肥料氮素折纯计算各处理施肥量,各处理施肥量见表2。每个处理设3个重复,共24个小区,每个小区面积为30 m²(5 m×6 m),随机区组设计。

田间试验时间为2020年12月1日至2021年5月6日。其中,固体有机肥在翻耕前一次性施入,翻耕深度约20 cm;50%氮肥、50%液体有机肥、全部磷肥、全部钾肥在翻耕后第2 d一次性施入;其余氮肥和液体有机肥在越冬期(苗肥)施用20%、初薹期施用30%。常规施肥中氮肥为尿素(含氮量46%),磷肥为过磷酸钙(含磷量16%),钾肥为氯化钾(含钾量60%);固体有机肥为牛粪有机肥(精制商品有机肥),氮(N)2.3%,磷(P₂O₅)2.4%,钾(K₂O)5.7%;液体有机肥为含腐植酸的水溶肥,氮(N)120 g·L⁻¹,磷(P₂O₅)30 g·L⁻¹,钾(K₂O)50 g·L⁻¹。种植密度为25 000株·hm⁻²。

1.3 测定项目及方法

油菜收获后,采用五点混合法采集每个小区0~20 cm的土壤样品,风干,再根据不同指标要求研磨过筛。土壤容重采用环刀法测定,土壤pH值用土/水(1:2.5)浸提法测定,有机质采用重铬酸钾容量法测定,全氮采用浓硫酸-蒸馏滴定法测定,全磷采用浓硫酸高氯酸消煮-钼锑抗比色法测定,铵态氮采用靛酚蓝比色法测定,硝态氮采用氯化钾浸提-分光光度法测定,有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定^[20]。

在油菜收获后进行产量构成因素测量及统计,每小区选取代表性植株6株,将整个植株带根挖出洗净。用卷尺测量株高,并调查一次分枝数、单株角数、每角粒数、角果长度、千粒质量;同时每个小区油菜割秆后,晾晒干燥7 d,再分别进行打收称取质量,测定其产量^[21]。

1.4 统计与分析

利用SPSS 25.0对数据进行方差分析及显著性差异分析,用Origin 2019做图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对土壤氮素的影响

由图1A可知,不同施肥处理对土壤全氮含量影响较大。其中CK、T1、T2、T3、T4和T5处理收获后土壤全氮含量较试前含量均有所下降,下降幅度分别为19.42%、4.48%、11.06%、15.59%、1.96%和1.43%,随着固体有机肥配施比例的增加,全氮含量呈下降趋

表1 试验前土壤基本理化性质

Table 1 Soil physicochemical properties before experiments

土壤深度 Soil depth/cm	pH	容重 Bulk density/(g·cm ⁻³)	有机质 OM/(g·kg ⁻¹)	全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	全磷 TP/(g·kg ⁻¹)	铵态氮 NH ₄ -N/(mg·kg ⁻¹)	硝态氮 NO ₃ -N/(mg·kg ⁻¹)	有效磷 AP/(mg·kg ⁻¹)
0~20	6.96	1.01	21.59	4.37	0.47	0.56	0.91	1.85

表2 各处理油菜施肥量和养分折纯(kg·hm⁻²)

Table 2 Fertilizer amount and nutrient content of rapeseed in each treatment(kg·hm⁻²)

处理 Treatment	固体有机肥 Solid organic fertilizer	液体有机肥 Liquid organic fertilizer	化肥 Fertilizer			合计折纯 Fold pure total		
			尿素 Urea	过磷酸钙 SSP	氯化钾 MOP	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK	0	0	0	0	0	0	0	0
CF	0	0	313	375	108	144	60	65
T1	1 870	0	220	263	77	144	87	153
T2	4 391	0	94	113	34	144	123	270
T3	6 261	0	0	0	0	144	150	357
T4	0	358	220	263	77	144	53	64
T5	0	842	94	113	34	144	43	62
T6	0	1 200	0	0	0	144	36	60

势;CF与T6处理的全氮含量增加,增加幅度分别为2.66%和6.57%。

由图1B和图1C可知,各施肥处理中,除T2处理土壤铵态氮下降11.77%和T3处理土壤硝态氮下降1.64%外,土壤铵态氮、硝态氮含量较试验前土壤均得到提高,而不施肥处理的含量均降低,分别降低22.36%、33.21%,说明施肥对提高土壤铵态氮和硝态氮的含量有明显的促进作用。T1、T4和T6处理对土

壤铵态氮含量提升较大,增幅范围在28.99%~39.92%。对于土壤硝态氮,固体有机肥配施处理与液体有机肥配施处理差异明显,浓度分别增加1.10%~108.79%和71.18%~270.94%,可以看出液体有机肥的处理效果比固体有机肥更加显著。单施液体有机肥处理的土壤铵态氮和硝态氮含量提升均最大,分别为39.92%和270.94%。

2.2 不同施肥处理对土壤磷素的影响

由图2A可知,除T3处理土壤全磷含量较试验前上升0.99%外,其余各处理较试验前土壤均降低。固体有机肥与液体有机肥处理效果差异较大,T1、T2、T3处理土壤全磷含量与有机肥配施比例变化呈正相关,而T4、T5、T6处理呈负相关,且固体有机肥对增加土壤全磷含量的效果优于液体有机肥,在相同配比条件下,固体有机肥处理效果分别比液体有机肥高1.53%、8.20%、17.84%。

由图2B可知,对于土壤有效磷,与试验前土壤相比,除CK和T3处理分别下降16.55%和3.33%外,其余施肥处理有效磷含量均有所提升;其中CF和T1处理效果没有显著差异($P>0.05$),而不同配比液体有机肥处理间差异较大,T4、T5、T6处理土壤有效磷含量

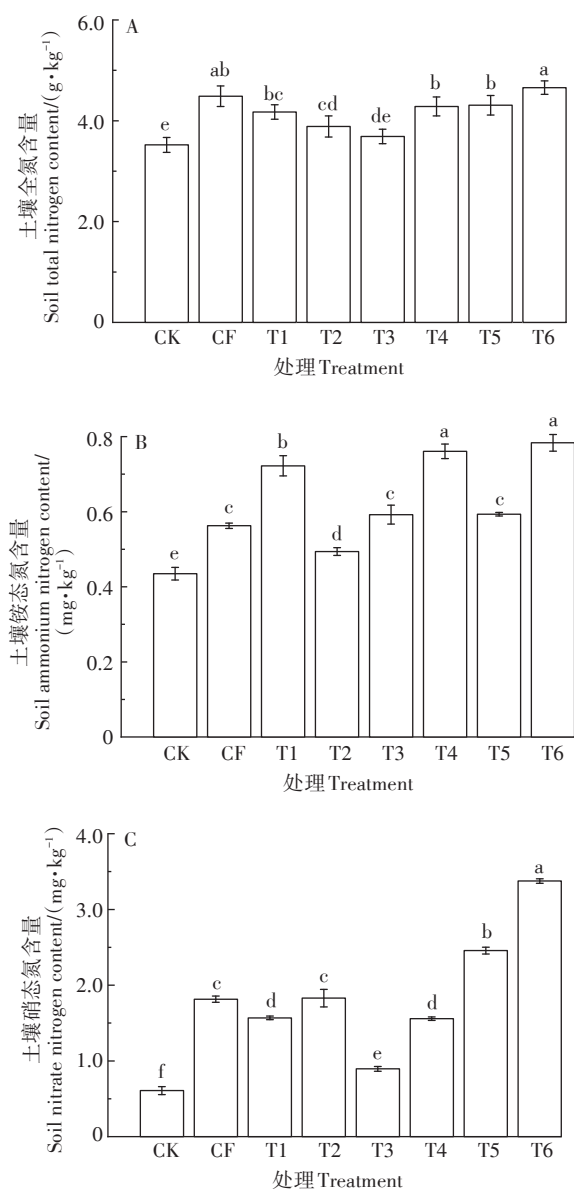


图1 不同施肥处理土壤氮素含量比较
Figure 1 Comparison of soil nitrogen content in different fertilization treatments

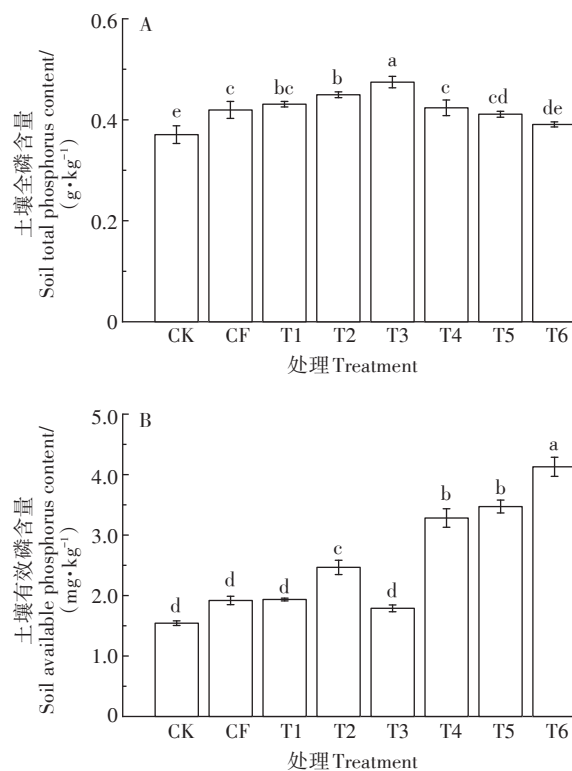


图2 不同施肥处理土壤磷素含量比较
Figure 2 Comparison of soil phosphorus content in different fertilization treatments

较试验前分别提升了77.40%、87.66%、123.24%，且液体有机肥的效果明显优于其他施肥处理。

2.3 不同施肥处理对土壤有机质的影响

由图3可以看出,不同施肥处理对土壤有机质含量变化的影响不同。土壤有机质含量随有机肥配比的增加呈先上升后下降的趋势,不同种类有机肥均是70%有机肥+30%化肥的配比效果最好,T2与T5处理有机质含量分别增加了17.70%和28.66%,而单施有机肥的T3和T6处理有机质含量较试验前土壤提升较小;CK、CF、T4处理土壤有机质含量较试验前土壤均有所下降,下降幅度分别为16.11%、3.40%和8.43%。除T4外,有机肥的施用对增加土壤有机质含量均有提升作用。

2.4 不同施肥处理对土壤容重和pH值的影响

由表3可知,各施肥处理土壤容重变化趋势为:CK、CF、T3和T6处理均导致土壤容重较试验前土壤有所下降,下降幅度分别为5.94%、9.90%、9.90%和3.96%,其中单施化肥和单施固体有机肥处理土壤容重下降最多;各无机有机肥配施处理对土壤容重的影响存在差异,与试验前土壤相比,T5处理对土壤容重的影响效果不显著,而T1、T2和T4处理使土壤容重上升幅度较大,提升幅度分别达到15.84%、16.83%和17.82%。

由表3可知,不同施肥处理土壤pH值大小为CK>T2>T1>CF>T3>T4>T5>T6,除液体有机肥与化肥配比处理外,其余处理pH值较试验前土壤均有所上升,其中T4处理对土壤pH值影响最小,较试验前土壤pH值仅下降0.11,CK处理土壤pH值提升最大,提升幅度为5.89%,CF、T1、T3施肥处理pH值变化较为接近,分别提升2.87%、3.31%、2.44%。而液体有机肥

表3 不同施肥处理土壤容重和pH值比较

Table 3 Comparison of soil bulk density and pH value in different fertilization treatments

处理 Treatment	容重 Bulk density/(g·cm ⁻³)	pH
CK	0.95±0.01c	7.37±0.04a
CF	0.91±0.01c	7.16±0.09bc
T1	1.17±0.04a	7.19±0.08bc
T2	1.18±0.07a	7.26±0.06ab
T3	0.91±0.03c	7.13±0.04c
T4	1.19±0.06a	6.85±0.08d
T5	1.06±0.02b	6.76±0.06d
T6	0.97±0.08bc	6.60±0.06e

注:同列数值后不同小写字母表示处理间在P<0.05水平差异显著。下同。

Note: Different letters in the same column indicate significant differences among different treatments (P<0.05). The same below.

的施用普遍导致土壤pH值降低,与试验前土壤相比,T4、T5处理土壤pH值分别下降1.58%、2.88%,单施液体有机肥的T6处理土壤pH值下降幅度最大,下降5.17%。

2.5 不同施肥处理对油菜产量构成的影响

从表4可以看出,不同施肥处理对油菜农艺性状有一定的影响。各施有机肥处理中,随着有机肥配比比例的增加,除T5较T4处理油菜株高上升16.98%外,油菜株高、角果长度、单株角果数、千粒质量均呈下降趋势,T3与T1相比分别下降42.40%、30.62%、45.80%、41.95%,T6与T4相比分别下降19.81%、19.98%、30.44%、20.18%;对于一次分枝数和每角粒数,不同施肥处理间没有显著差异,说明施肥不是影响这两个性状的主要因素;不同施肥处理小区产量的大小为CF>T4>T1>T5>T6>T2>T3>CK,与CF处理相比,T1、T2、T3、T4、T5、T6处理的油菜产量分别降低了18.06%、50.35%、76.65%、13.97%、19.08%、31.72%,单施固体有机肥的T3处理表现最差,小区产量仅比不施肥处理高5.37%。

3 讨论

3.1 不同施肥处理对土壤养分的影响

施肥最直接的作用是增加土壤氮磷等养分含量。研究表明,与试验前土壤相比,有机无机肥配比处理除T6处理全氮含量上升6.57%外,全氮、全磷含量均有不同程度的下降;对于土壤全氮,随着固体有机肥配施比例的提升,氮素含量下降幅度变大,原因是有机肥分解缓慢,大部分氮素随有机肥停留在土壤

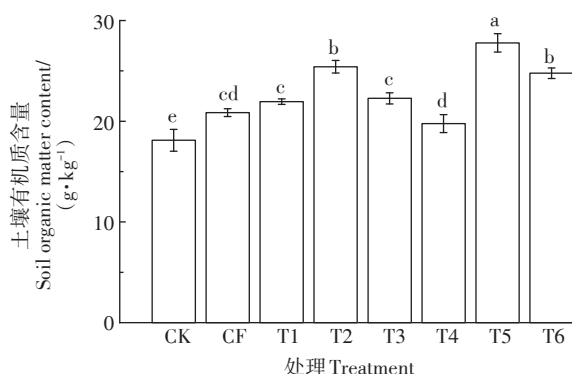


图3 不同施肥处理土壤有机质含量比较

Figure 3 Comparison of soil organic matter content in different fertilization treatments

表4 不同施肥处理油菜产量构成比较

Table 4 Comparison of yield composition of rapeseed in different fertilization treatments

处理 Treatment	株高 Plant height/m	一次分枝数 Number of branches/ (枝·株 ⁻¹)	角果长度 Silique length/cm	单株角果数 Pod number per plant/(个·株 ⁻¹)	每角粒数 Seed number per pod/(粒·荚 ⁻¹)	千粒质量 Thousand grain weight/kg	小区产量(30 m ²) Plot yield/kg
CK	0.77±0.07c	4.00±1.00a	8.81±0.32b	45.33±6.66c	21.67±2.08a	2.25±0.11c	5.03±0.86c
CF	1.25±0.08a	5.00±1.00a	9.08±0.28b	91.33±5.86a	25.00±1.00a	3.91±0.37b	22.70±6.50a
T1	1.24±0.06a	4.33±0.58a	9.13±0.11b	88.00±2.65a	23.00±2.00a	3.91±0.21b	18.60±8.85ab
T2	0.76±0.06c	4.00±1.00a	7.54±0.08c	59.00±1.00b	20.67±2.08a	3.60±0.27b	11.27±3.27bc
T3	0.72±0.03d	4.33±1.53a	6.30±0.24d	48.33±1.53c	21.33±3.51a	2.27±0.32c	5.30±1.62c
T4	1.06±0.08b	4.33±0.58a	9.56±0.14a	92.00±2.00a	21.33±3.78a	4.56±0.27a	19.53±6.03ab
T5	1.24±0.08a	5.33±1.53a	8.74±0.19b	65.00±4.36b	22.67±1.53a	3.69±0.16b	18.37±5.61ab
T6	0.85±0.03c	3.67±0.58a	7.65±0.22c	64.00±2.00b	20.67±2.52a	3.64±0.17b	15.50±2.08ab

表层,在同等施氮条件下较化肥生效慢;随着液体有机肥配施比例的提升,氮素含量下降幅度变小,原因是液体有机肥中含有的大量速效养分能快速提高土壤氮素含量水平。对于土壤全磷,T1~T3处理土壤全磷含量与有机肥配施比例变化呈正相关,而T4~T6处理呈负相关,原因是以氮素折纯确定施肥量,随着同等氮素下有机肥配比的增加,固体有机肥肥料中磷素的占比大幅增加,而液体有机肥中磷素占比却大幅减小,因此在实际生产中,应为液体有机肥配施一定量的磷肥,以补充磷素。

施肥对土壤铵态氮、硝态氮、有效磷含量也有明显的影响。与试验前土壤相比,在不施肥的情况下土壤铵态氮、硝态氮、有效磷含量下降显著,除T2、T3处理外其他施肥处理土壤铵态氮、硝态氮、有效磷含量均有提升,原因是T2、T3处理的固体有机肥占比过高,肥效缓慢;液体有机肥的施用能使土壤铵态氮、硝态氮、有效磷含量在短时间内大幅提高,尤其是在单施液体有机肥的情况下,增幅分别达到39.92%、270.94%、123.24%。柴彦君等^[22]和张宏伟等^[23]的研究结果表明,有机肥中的大量腐植酸对于培肥改良土壤具有重要作用,特别是对提升土壤速效养分含量有显著作用。这可能是由于腐植酸富含各种官能团,这些官能团能与土壤中富含氮、磷养分的阳离子形成络合物,减少土壤氮素、磷素的各種流失,抑制氮、磷在土壤中的固定,能使土壤释放更多的无效态氮和磷,同时有机物料的施用增加了土壤有机碳库,增强了微生物的活性,从而促进土壤有机质转化,提高了土壤氮磷速效养分的含量。

研究表明有机肥的施用使大量有机质进入土壤,30 a长期定位试验表明,施有机肥的西北地区和华北

地区土壤有机质含量平均增加了51%和68%,南方旱地和长江流域水田土壤有机质含量平均增加24%^[24]。刘灿华等^[25]的研究发现,单施化肥土壤有机质含量明显降低,有机无机肥配施土壤有机质含量增加,其中化肥配施腐植酸的土壤有机质含量高于其他处理。本研究发现,不施肥处理的土壤有机质含量下降了16.0%,说明没有有机肥的施入会导致土壤有机质不断被消耗,随有机肥施用配比的增加土壤有机质的含量也呈上升趋势,说明有机肥的施用可以直接将有机质带入土壤,其中70%液体有机肥+30%化肥的配比效果最好,使土壤有机质增加28.66%。有机质不仅能提高土壤总孔隙度、含水量、阳离子交换量,还能强化土壤微生物代谢,加速土壤有机质矿化,从而产生大量有机酸,并通过酸溶作用促进土壤养分释放,使农田生态系统良性循环。

3.2 不同施肥处理对土壤物理性质的影响

土壤容重是重要的土壤物理性质指标,土壤容重大小可较好地反映土壤结构、透气性、透水性和溶质迁移潜力^[26]。不同施肥处理有机物料的比例,能对土壤容重产生较大影响。OPOKU-KWANOWAA等^[27]的研究表明,有机肥处理组与空白对照组相比,土壤容重下降了5.6%~18.0%,孔隙度显著提升了6.0%~25.9%,且在处理后的土壤中记录到较高的黏粒含量和淤泥含量。本研究发现,与试验前土壤相比,不施肥处理、单施化肥、单施固体有机肥和单施液体有机肥分别使土壤容重下降了6.32%、9.90%、9.90%、3.96%,单施化肥效果最好,而有机无机肥配施均导致土壤容重上升,这可能是因为化肥的加入导致有机肥分解缓慢,短时间内无法促进土壤团聚体的形成。众多研究显示^[28-30],有机肥处理的土壤气相普遍偏

高,而液相普遍偏低,原因是有机肥的施入使土壤中有机无机复合体增加,有利于土壤微团聚体的形成,能有效提高土壤的孔隙度,疏松土壤,促进土壤微生物活性的提升,降低土壤容重。王改兰等^[31]的研究发现,单施化肥也能改善土壤的物理性质,如土壤容重、土壤孔隙度等。但是单施化肥不利于土壤物理结构的形成,且有损害土壤物理结构的趋势,这需要有有机肥施用长期定位试验进一步验证。

土壤pH值直接影响土壤肥力和作物生长发育。在我国长江三角洲地区,蔬菜种植规模较高,大面积种植导致复种指数高,且施用肥料以化肥为主,肥料投入比例较高。这种种植模式导致该地区土壤出现酸化现象^[32]。本研究发现,固体有机肥的施用使土壤pH值有所提升,其中单施固体有机肥的施肥方式维持土壤pH值的效果最好,而液体有机肥的施用普遍导致土壤pH值的降低,与试验前土壤相比,T4、T5、T6处理分别导致土壤pH值下降了1.58%、2.88%和5.17%。张世民等^[33]发现,沼肥处理无论在壤土还是砂壤土的各处理中pH值均为最低,表明沼肥的施入有降低土壤pH值的效果。王毅琪等^[34]也发现,随施用沼液浓度的提高,土壤pH值呈明显下降趋势。这与本研究结果相符,原因可能是液体有机肥中含有大量腐植酸。

3.3 不同施肥处理对油菜产量的影响

研究结果表明,单施化肥处理的油菜产量达到最大,与其相比,T1、T2、T3、T4、T5、T6处理的油菜产量分别减少了18.06%、50.35%、76.65%、13.97%、19.08%、31.72%,除CK外,单施固体有机肥处理的油菜产量最低,仅有 $1\,766\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,原因是有机肥肥效缓慢,不能满足油菜生长期旺盛的养分需求,因此有机肥需要与化肥配合使用才能达到最好的效果,其中T1、T4处理施肥效果较好,较单施化肥仅降低了18.06%、13.97%;随着有机肥在肥料配比中的增加,油菜株高、角果长度、单株角果数、千粒质量也均呈下降趋势,这也是施用有机肥造成油菜减产的原因之一,可能是在油菜蕾薹期养分供给不足,可以通过增加基肥施用比例和在蕾薹期中追施速效肥的方法解决,从而维持施用有机肥后的油菜产量。有机无机肥配施虽然会造成作物一定程度的减产,但考虑到有机肥对土壤培肥是一个较为缓慢的过程,长期进行有机无机配施在增产方面可能有更好的效果,可通过开展有机肥施用的长期定位试验,阐明有机无机肥配施对作物和环境的长期影响。

4 结论

(1)与单施化肥相比,有机肥的施加使土壤有机质含量显著增加;除单施化肥和单施液体有机肥处理土壤全氮含量提升2.66%和6.57%外,其他各土壤全氮、全磷含量较试验前均下降;施加液体有机肥使土壤速效养分显著增加。

(2)与无机有机肥配施相比,单施有机肥土壤容重有所下降;液体有机肥的施用会导致土壤pH值下降,且随着液体有机肥施用占比的提升下降幅度增大。

(3)各无机有机肥配施处理均比单施化肥降低了油菜产量,综合考虑不同施肥处理对土壤环境和油菜产量的影响,30%固体有机肥替代的施肥方式既能维持油菜的产量,又能改善土壤理化性质,是较优的施肥方式。

参考文献:

- [1] 陈永高,张瑞斌.不同施肥模式对太湖流域农田土体氮磷流失与营养累积的影响[J].水土保持通报,2016,36(2):115-119. CHEN Y G, ZHANG R B. Effects of fertilization patterns on loss of soil nitrogen, phosphorus and nutrients accumulation in farmlands of Taihu Lake basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(2):115-119.
- [2] 史常亮,郭焱,朱俊峰.中国粮食生产中化肥过量施用评价及影响因素研究[J].农业现代化研究,2016,37(4):671-679. SHI C L, GUO Y, ZHU J F. Evaluation of over fertilization in China and its influencing factors[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2016, 37(4):671-679.
- [3] 宁川川,王建武,蔡昆争.有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J].生态环境学报,2016,25(1):175-181. NING C C, WANG J W, CAI K Z. The effects of organic fertilizers on soil fertility and soil environmental quality: A review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(1):175-181.
- [4] LIU E K, YAN C R, MEI X R, et al. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on soil chemical and biological properties in northwest China[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3):173-180.
- [5] 唐继伟,林治安,许建新,等.有机肥与无机肥在提高土壤肥力中的作用[J].中国土壤与肥料,2006(3):44-47. TANG J W, LIN Z A, XU J X, et al. Effect of organic manure and chemical fertilizer on soil nutrient[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2006(3):44-47.
- [6] 刘彦伶,李渝,张雅蓉,等.长期不同施肥处理对黄壤性水稻土理化性质的影响[J].江苏农业科学,2017,45(19):294-298. LIU Y L, LI Y, ZHANG Y R, et al. Effects of long-term different fertilization treatments on the physical and chemical properties of yellow paddy soil[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(19):294-298.
- [7] CAI Z J, WANG B R, XU M G, et al. Intensified soil acidification from chemical N fertilization and prevention by manure in an 18-year field experiment in the red soil of southern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(2):260-270.

- [8] 张鑫,牛世伟,叶鑫,等.不同施肥处理对辽北春玉米土壤理化性质及产量的影响[J].西南农业学报,2020,33(9):2013-2017. ZHANG X, NIU S W, YE X, et al. Effects of different fertilization treatments on soil physicochemical properties and spring maize yield in northern Liaoning Province[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 33(9):2013-2017.
- [9] 杨忠赞,迟凤琴,匡恩俊,等.有机肥替代对土壤理化性状及产量的综合评价[J].华北农学报,2019,34(增刊1):153-160. YANG Z Z, CHI F Q, KUANG E J, et al. Comprehensive evaluation of soil physical and chemical properties and yield by substitution of organic manure[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2019, 34(Suppl 1):153-160.
- [10] 白雪纯,张君红,冯魁亮,等.化肥减量配施有机肥对青贮玉米产量、营养价值及土壤微生物活性的影响[J].草业科学,2020,37(2):348-354. BAI X C, ZHANG J H, FENG K L, et al. Effects of chemical fertilizer reduction and application of organic manure on the yield and nutritive value of *Zea mays* and soil microbial activity[J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(2):348-354.
- [11] 刘芳君,陈雍旭,张晓月,等.有机无机肥料配施对长春地区大豆玉米轮作体系产量及土壤理化性质影响[J].农业开发与装备,2017(4):80-81. LIU F J, CHEN Y X, ZHANG X Y, et al. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on yield of soybean and corn rotation system and soil physical and chemical properties in Changchun region[J]. *Agricultural Development & Equipments*, 2017(4):80-81.
- [12] 宋以玲,于建,陈士更,等.化肥减量配施生物有机肥对油菜生长及土壤微生物和酶活性影响[J].水土保持学报,2018,32(1):352-360. SONG Y L, YU J, CHEN S G, et al. Effects of reduced chemical fertilizer with application of bio-organic fertilizer on rape growth, microorganism and enzymes activities in soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(1):352-360.
- [13] 马肖,刘木兰,何潇,等.化肥减量配施有机肥对油菜产量形成及菜籽品质的影响[J].作物研究,2020,34(6):518-524. MA X, LIU M L, HE X, et al. Effects of reducing chemical fertilizer combined with organic fertilizer on yield formation and rapeseed quality of *Brassica napus*[J]. *Crop Research*, 2020, 34(6):518-524.
- [14] 项颂,吴越,吕兴菊,等.洱海流域农业面源污染空间分布特征及分类控制策略[J].环境科学研究,2020,33(11):2474-2483. XIANG S, WU Y, LÜ X J, et al. Characteristics and spatial distribution of agricultural non-point source pollution in Erhai Lake basin and its classified control strategy[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(11):2474-2483.
- [15] 陈小华,钱晓雍,李小平,等.洱海富营养化时间演变特征(1988—2013年)及社会经济驱动分析[J].湖泊科学,2018,30(1):70-78. CHEN X H, QIAN X Y, LI X P, et al. Long-term trend of eutrophication state of Lake Erhai in 1988—2013 and analyses of its socio-economic drivers[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(1):70-78.
- [16] COOKE J G. Nutrient transformations in a natural wetland receiving sewage effluent and the implications for waste treatment[J]. *Water Science & Technology*, 1994, 29(4):209-217.
- [17] 鲁如坤,时正元,施建平.我国南方6省农田养分平衡现状评价和动态变化研究[J].中国农业科学,2000,33(2):63-67. LU R K, SHI Z Y, SHI J P. Nutrient balance of agroecosystem in six provinces in southern China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(2):63-67.
- [18] 段四喜,杨泽,李艳兰,等.洱海流域农业面源污染研究进展[J].生态与农村环境学报,2021,37(3):279-286. DUAN S X, YANG Z, LI Y L, et al. Progress of agricultural non-point source pollution in Erhai Lake basin: A review[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(3):279-286.
- [19] 姜海斌,沈仕洲,谷艳茹,等.洱海流域不同施肥模式对稻田氮磷径流流失的影响[J].农业环境科学学报,2021,40(6):1305-1313. JIANG H B, SHEN S Z, GU Y R, et al. Effects of different fertilization treatments on runoff losses of nitrogen and phosphorus in paddy fields in Erhai Lake basin[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2021, 40(6):1305-1313.
- [20] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2008. LU R K. Analytical methods of soil agricultural chemistry[M]. Beijing:China Agricultural Science Press, 2008.
- [21] 王建红,张贤,李增强,等.有机肥在油-稻轮作田块对油菜生长和土壤肥力的影响[J].中国土壤与肥料,2017(4):31-36. WANG J H, ZHANG X, LI Z Q, et al. Effects of organic fertilizer on rape growth and soil fertility in rape-rice rotation field[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(4):31-36.
- [22] 柴彦君,黄利民,董越勇,等.沼液施用量对毛竹林地土壤理化性质及碳储量的影响[J].农业工程学报,2019,35(8):214-220. CHAI Y J, HUANG L M, DONG Y Y, et al. Effects of biogas slurry application rates on soil physical and chemical properties and carbon storage of bamboo forest[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(8):214-220.
- [23] 张宏伟,陈港,唐爱民,等.腐植酸共聚物改良后土壤中磷肥有效性的研究[J].土壤肥料,2002(6):39-40. ZHANG H W, CHEN G, TANG A M, et al. Study on the availability of phosphate fertilizer in soil improved by humic acid copolymer[J]. *Soils and Fertilizers Sciences*, 2002(6):39-40.
- [24] 张淑香,张文菊,沈仁芳,等.我国典型农田长期施肥土壤肥力变化与研究展望[J].植物营养与肥料学报,2015,21(6):1389-1393. ZHANG S X, ZHANG W J, SHEN R F, et al. Variation of soil quality in typical farmlands in China under long-term fertilization and research expedition[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(6):1389-1393.
- [25] 刘灿华,袁天佑,闫军营,等.减氮配施腐植酸对耕层土壤理化性质的影响[J].中国土壤与肥料,2020(5):77-83. LIU C H, YUAN T Y, YAN J Y, et al. Effects of combined application of humic acid and reducing N fertilizer on soil physical and chemical properties[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2020(5):77-83.
- [26] ELISA S, CHRISTIAN R, HUGO R, et al. Soil bulk density pedotransfer functions of the humus horizon in arable soils[J]. *Geoderma*, 2011, 163(1/2):74-82.
- [27] OPOKU-KWANOWAA Y, WU J G, CHEN X D, et al. Soil physicochemical properties variation in black soil after the long-term application of different organic amendments[J]. *Asian Journal of Advances in Agricultural Research*, 2020, 12(2):24-34.
- [28] 颜雄,彭新华,张杨珠,等.长期施肥对红壤性水稻土理化性质的

- 影响及土壤肥力质量评价[J]. 湖南农业科学, 2015(3):49-52. YAN X, PENG X H, ZHANG Y Z, et al. Basic physical and chemical properties and assessment for soil fertility quality of paddy soil under long-term fertilization[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2015(3):49-52.
- [29] 柴华, 何念鹏. 中国土壤容重特征及其对区域碳贮量估算的意义[J]. 生态学报, 2016, 36(13):3903-3910. CHAI H, HE N P. Evaluation of soil bulk density in Chinese terrestrial ecosystems for determination of soil carbon storage on a regional scale[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(13):3903-3910.
- [30] 秦海娟, 颌建明, 李静, 等. 不同施肥模式对蒜苗生长及土壤性状的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2020, 55(5):47-55. QIN H J, JIE J M, LI J, et al. Effects of different fertilization modes on growth and soil properties of green garlic[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2020, 55(5):47-55.
- [31] 王改兰, 段建南, 贾宁凤, 等. 长期施肥对黄土丘陵区土壤理化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2006(4):82-85, 89. WANG G L, DUAN J N, JIA N F, et al. Effects of long-term fertilization on soil physical and chemical property in loess hilly area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006(4):82-85, 89.
- [32] 韩沛华, 闵炬, 诸海焘, 等. 长三角地区设施蔬菜施肥现状及土壤性状研究[J]. 土壤, 2020, 52(5):994-1000. HAN P H, MIN J, ZHU H T, et al. Fertilization status and soil physiochemical properties of greenhouse vegetable system in Yangtze River delta[J]. *Soils*, 2020, 52(5):994-1000.
- [33] 张世民, 朱友娟, 张宏勇, 等. 沼肥与化肥配施对不同质地棉田土壤理化性状和酶活性的影响[J]. 塔里木大学学报, 2017, 29(2):75-81. ZHANG S M, ZHU Y J, ZHANG H Y, et al. Effects of combined application of biogas manure and chemical fertilizer on soil physical-chemical properties and enzyme activities in different texture soil of cotton[J]. *Journal of Tarim University*, 2017, 29(2):75-81.
- [34] 王毅琪, 韩文彪, 赵玉柱, 等. 沼液对土壤理化性质的影响[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(1):193-195. WANG Y Q, HAN W B, ZHAO Y Z, et al. Effects of biogas slurry on soil physical and chemical properties[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, 44(1):193-195.