

# 不同有机物施用对油菜—红薯轮作模式下养分吸收利用的影响

邬梦成<sup>1</sup>, 李鹏<sup>1</sup>, 张欣<sup>1</sup>, 成艳红<sup>2</sup>, 李大明<sup>2</sup>, 刘满强<sup>1</sup>, 李辉信<sup>1</sup>, 胡锋<sup>1</sup>, 焦加国<sup>1</sup>

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏省有机固体废物资源化协同创新中心, 南京 210095;

2. 江西省红壤研究所, 南昌 331717)

**摘要:** 探讨不同有机物施用对土壤肥力与作物养分吸收利用的影响, 以达到农田培肥和提升作物养分利用效率的目的。2015年在江西省红壤研究所布置田间施肥试验, 设置不施肥(CK)、常量化肥(CF)、减量化肥(RF)、全量化肥配施秸秆(CFR)、减量化肥配施秸秆(RFR)、全量化肥配施生物黑炭(CFB)、减量化肥配施生物黑炭(RFB)、减量化肥配施猪粪(RFP)、减量化肥配施蚓粪(RFV) 9种不同施肥处理, 研究全量化肥和减量40%化肥条件下配施不同有机物对土壤肥力及作物养分利用效率的影响。结果表明: 施用有机物的各处理油菜籽粒和红薯产量较CF处理都有所增加, 其中以RFP和RFV处理增产效果最为显著, 其增幅分别为76.69%、75.01%和84.73%、69.72%; 有机物的施用提升了土壤有机质、全氮、全磷、速效磷和速效钾含量, 在连续施肥下, 土壤养分水平进一步提升; 在红薯和油菜季, 不论全量化肥还是减量40%化肥, 配施有机物处理相比CF处理均不同程度提高了氮肥、钾肥的表观利用率和偏生产力, 其中红薯季RFP处理提升效果最佳, 分别达到43.22%、48.55%和22.00、21.45 kg/kg, 但其磷肥表观利用率和磷肥偏生产力较低, 仅为1.91%和3.25 kg/kg; 油菜季RFV处理的肥料贡献率最高, 达到80.41%, 但其农学效率较低, 为0.67 kg/kg。因此, 有机物的施用可以达到土壤培肥、增加作物产量和提高作物肥料养分利用率的目的, 对于农业生产有重要意义。

**关键词:** 有机物施用; 土壤培肥; 养分利用率

**中图分类号:** S146

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2018)01-0320-07

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.01.050

## Effects of Different Organic Matters Application on Nutrient Absorption and Utilization in Rape and Sweet Potato Rotation Mode

WU Mengcheng<sup>1</sup>, LI Peng<sup>1</sup>, ZHANG Xin<sup>1</sup>, CHENG Yanhong<sup>2</sup>,

LI Daming<sup>2</sup>, LIU Manqiang<sup>1</sup>, LI Huixin<sup>1</sup>, HU Feng<sup>1</sup>, JIAO Jiaguo<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Jiangsu Collaborative Innovation Center for Solid Organic Waste Resource Utilization, Nanjing 210095; 2. Jiangxi Institute of Red Soil, Nanchang 331717)

**Abstract:** This study investigated the effects of different organic materials on soil fertility and crop nutrient absorption and utilization, so as to achieve farmland fertilization and improve crop nutrient use efficiency. A field fertilization experiment was conducted in Jiangxi Institute of Red Soil in 2015 to compare the effects of full scale chemical fertilizer and 40% of chemical fertilizer combined with different organic materials on soil fertility and crop nutrient use efficiency. Nine fertilization treatments were set in this experiment, including no fertilizer (CK), chemical fertilizer (CF), reduction of chemical fertilizer (RF), chemical fertilizer combined with straw (CFR), reduction of chemical fertilizer combined with straw (RFR), chemical fertilizer combined with biochar (CFB), reduction of chemical fertilizer combined with biochar (RFB), reduction of chemical fertilizer combined with pig manure (RFP), reduction of chemical fertilizer combined with vermicompost (RFV). The results showed that compared with the treatments of CF that added chemical fertilizer only, the application of organic materials increased the yields of rapeseed and sweet potato, and the yields in RFP and RFV treatments increased significantly, with an increase of 76.69% and 75.01%, 84.73% and 69.72%, respectively. The application of organic materials enhanced the content of organic matter, total nitrogen, total phosphorus, available phosphorus and potassium, and the soil nutrient level was also further improved under continuous fertilization. In sweet potato and rape seasons, compared with the CF treatment,

收稿日期: 2017-08-25

资助项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503121); 国家重点研发计划项目(2016YFD0200106)

第一作者: 邬梦成(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事有机肥的应用研究。E-mail: 2015103071@njau.edu.cn

通信作者: 焦加国(1981-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土壤生态学研究。E-mail: jiaguojiao@njau.edu.cn

the application of organic materials could promote the apparent recovery efficiencies and partial factor productivities of nitrogen and potassium fertilizers, and the effect of RFP treatment was best in sweet potato season, the corresponding parameters increased to 43.22%, 48.55% and 22.00 and 21.45 kg/kg respectively, however, the apparent recovery efficiency (1.91%) and partial factor productivity (3.25 kg/kg) of phosphorus in this treatment were low. In rape season, fertilizer contribution rate in the RFV treatment was the highest (80.41%), but the agronomic efficiency was low, which was just 0.67 kg/kg. Therefore, the application of organic materials can improve soil fertility, increase crop yield and the utilization of fertilizer nutrients, which is significance for agricultural production.

**Keywords:** organic application; soil fertility; nutrient utilization efficiency

施肥是影响土壤质量演化及其可持续利用最为普遍的农业措施之一,也是作物增产最有效的途径。近 30 年来,中国化肥施用量高速增长,施用化肥成为最主要的粮食增产措施<sup>[1]</sup>。据国家统计局数据,2013 年化肥生产量 7 037 万 t(折纯),农用化肥施用量 5 912 万 t(折纯)。但作为速效肥料,长期单施化肥会造成土壤酸化、板结、含水量降低,土壤养分流失等一系列土壤退化问题,而过量使用化肥无疑会加剧土壤退化<sup>[2]</sup>。同时,化肥的大量施用也会降低肥料利用率<sup>[3]</sup>,不利于农业可持续发展。因此,减少化肥用量,改善土壤状况成为了现在农业生产中的重要课题。而有机肥料施用可以在一定程度上改善化肥所造成的对土壤和环境的负面影响。有机肥料不仅含有作物生长发育所需的各种大、中量元素和微量元素,同时含有有机质和各种腐殖物质,在提供作物养分、维持地力平衡、更新土壤有机质等方面有着促进作用<sup>[4]</sup>。研究<sup>[5-6]</sup>表明,施用有机肥可以有效改良土壤状况,提高土壤有机质含量,达到土壤培肥的效果,从而促进农作物增产。

作物对其生长环境适应的对策是多种多样的,提高养分利用效率,以最小的养分吸收量来生产最多的新生物量是作物适应贫乏环境的重要策略之一。对农作物生产来说,如果农作物的养分利用效率高,就意味着能够以较小的投入得到更高的产出。研究<sup>[7-8]</sup>表明,合理的氮、磷、钾肥配施对作物的生长及养分吸收利用有很好的促进作用,对作物有明显的增产效果,而有机—无机肥配合施用会达到更好的土壤培肥及增产效果<sup>[9]</sup>,长期施用有机肥对作物产量与养分利用效率都有显著提升效果<sup>[10]</sup>。国内外研究<sup>[11-13]</sup>学者开展了大量的田间试验研究工作,从农学角度应用肥料表观利用率、肥料偏生产力、肥料农学利用率、肥料贡献率等重要参数分析和评价了在不同作物上的肥料养分利用效率,这些肥料养分利用率定量评价指标对于准确分析不同作物对肥料的响应程度和指导施肥具有重要意义。

本研究通过设置在施用化肥的基础上施用不同有机物试验,分析土壤肥力状况及作物养分吸收利用率等指标,研究减肥条件下施用有机物料对土壤肥力

与作物养分吸收利用的影响,为农田减肥和配施有机肥提供可靠的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地设在江西省红壤研究所(116°20'24" E, 28°15'30" N),该地属中亚热带季风气候,年均降水量 1 537 mm,年蒸发量 1 100~1 200 mm。年均气温 17.7~18.5 °C,最热月(7月)平均气温为 28.0~29.8 °C。海拔 25~30 m,坡度 5°,为典型的低丘红壤地貌。

### 1.2 供试土壤与试验设计

供试土壤成土母质为第四纪红黏土,基本理化性质为:有机质 14.52 g/kg,全氮 0.95 g/kg,全磷 0.49 g/kg,全钾 17.63 g/kg,碱解氮 89.64 mg/kg,速效磷 21.23 mg/kg,速效钾 159.69 mg/kg,pH 4.5。

供试有机物:水稻秸秆,由当地水稻田提供;生物黑炭,由水稻秸秆烧制而成;猪粪,鲜猪粪经高温堆制发酵后的腐熟猪粪;蚓粪,腐熟猪粪接种蚯蚓后,在一定温度和湿度下堆腐后的产物;猪粪和蚓粪均由江西归根生态科技有限公司提供。4 种有机物养分含量见表 1。供试红薯和油菜的品种:红薯品种为苏薯 8 号,油菜品种为丰油 730 号。

表 1 有机物养分含量 单位:g/kg

有机物	全氮	全磷	全钾	有机质
水稻秸秆	7.01	2.65	16.65	685.06
生物黑炭	9.39	9.43	16.96	648.10
猪粪	12.10	63.43	8.61	399.54
蚓粪	10.72	58.39	9.02	362.39

试验于 2015 年 5 月布置,共设置 9 个处理,每个处理 4 次重复,小区面积 28 m<sup>2</sup>(4 m×7 m),沟宽 40 cm,完全随机区组排列。每年 5 月和 10 月为油菜、红薯的收获和播种时期,秸秆、生物黑炭、猪粪、蚓粪和化肥均作为基肥在作物移栽前一次性施入,每年施 2 季,田间灌溉、除草均由当地完成,不施农药。不同施肥处理与每季作物施肥用量见表 2。

### 1.3 样品采集与测定

于 2016 年 5 月(油菜收获期)和 2016 年 10 月(红薯收获期)进行土壤和植株样品的采集。

表 2 不同施肥处理化肥与有机物施用量

处理	施肥设置	施肥量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	施用方式
CK	对照,不施任何肥料		
CF	全量化肥,依据当地化肥施用量	N:253.6,P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> :375,K <sub>2</sub> O:300.0	
RF	减量化肥,全量化肥基础上减施 40%	N:153.6,P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> :225,K <sub>2</sub> O:178.6	
CFR	全量化肥配施水稻秸秆	N:253.6,P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> :375,K <sub>2</sub> O:300.0,秸秆:4500	地表覆盖
RFR	减量化肥配施水稻秸秆	N:153.6,P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> :225,K <sub>2</sub> O:178.6,秸秆:4500	地表覆盖
CFB	全量化肥配施生物黑炭	N:253.6,P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> :375,K <sub>2</sub> O:300.0,生物黑炭:1500	旋耕混施
RFB	减量化肥配施生物黑炭	N:153.6,P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> :225,K <sub>2</sub> O:178.6,生物黑炭:1500	旋耕混施
RFP	减量化肥配施猪粪	N:153.6,P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> :225,K <sub>2</sub> O:178.6,猪粪:15000	旋耕混施
RFV	减量化肥配施蚓粪	N:153.6,P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> :225,K <sub>2</sub> O:178.6,蚓粪:15000	旋耕混施

土壤样品:采用多点混合采样方法采集 0—20 cm 土壤,将采回的土壤置于室内通风阴干,研磨供理化分析用。土壤全氮、全磷、碱解氮、速效磷、速效钾、总有机碳的测定均采用常规分析方法<sup>[14]</sup>。

植株样品:每个小区采集代表性的 10 株植株,其中 5 株用于考种,另外 5 株用于植株样品制备,其中油菜植株分为茎、角壳、籽粒,红薯植株分为茎蔓、叶、薯块;油菜果实从采集的样品中取一部分进行角壳与籽粒分离,确定其比例;红薯地上部从采集的样品中取一部分进行茎蔓与叶分离,确定茎叶比例。将采集到的植株各部位样品分别进行杀青、烘干处理后研磨粉碎,用于全氮、全磷、全钾的测定<sup>[14]</sup>。

作物产量:油菜和红薯在收获期分别测定每个小区作物产量与地上部总生物量。

#### 1.4 参数计算与统计分析

参考张福锁等<sup>[11]</sup>的方法,用以下参数来表征肥料的利用效率。

肥料表观利用率( $RE, \%$ )反映作物对施入土壤中的肥料养分的回收率, $RE=(\text{施肥区植株养分吸收量}-\text{不施肥区植株养分吸收量})/\text{施肥量} \times 100\%$ 。

肥料贡献率( $FCR, \%$ )指施肥所增加的作物产量占施肥区产量的百分比, $FCR=(\text{施肥区产量}-\text{不施肥区产量})/\text{施肥区产量} \times 100\%$ 。

肥料农学效率( $AE, \text{kg}/\text{kg}$ )指单位施肥量所增加的作物籽粒产量(薯类干产), $AE=(\text{施肥区作物产量}-\text{不施肥区作物产量})/\text{施肥量}$ 。

肥料偏生产力( $PF, \text{kg}/\text{kg}$ ):指投入的单位肥料所能产生的作物籽粒产量(薯类干产), $PF=\text{施肥区产量}/\text{施肥量}$ 。

试验数据采用 Excel 2013 和 SPSS 22.0 软件进行统计分析,采用 Duncan 检验法( $P < 0.05$ )进行方差分析和显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同有机物施用对土壤肥力的影响

由表 3 可知,在油菜季和红薯季,配施有机物均不同程度提高了土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮和速效磷含量,以减量 40% 化肥配施猪粪或蚓粪处理提升效果最明

显;配施水稻秸秆和生物黑炭对土壤速效钾含量的提升效果最佳。以红薯季为例,在配施不同有机物料后,土壤各养分含量得到提升,其中 RFP 和 RFV 处理与 CF 处理相比,土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮和速效磷含量均显著增加,增幅 20.59%~369.80%。全量化肥配施水稻秸秆处理速效钾含量显著高于 CF 处理,增幅 20.65%。由于有机物连续施用的累积效应,红薯季土壤有机质、全氮、速效磷和速效钾含量均高于油菜季,其中速效钾含量提升最为明显;油菜季土壤全磷和碱解氮含量要高于红薯季,这可能是油菜季的凋落物、根茬和根系多于红薯季造成。

### 2.2 不同有机物施用对作物产量与地上部生物量的影响

由图 1 可知,不同有机物的施用均可促进油菜和红薯产量、地上部生物量的增加,在所有施肥处理中,减量 40% 化肥配施猪粪和蚓粪显著促进了红薯和油菜的地上部生物量和产量的增加。在油菜季,CF 处理的油菜籽粒产量和地上部生物量分别相当于 RFP 和 RFV 处理的 56.22%,54.37% 和 54.13%,52.47%;在红薯季,相比 CF 处理,RFP 和 RFV 处理显著增加了红薯产量与地上部生物量,分别增产 75.01%,81.52% 和 69.72%,94.25%。

### 2.3 不同有机物施用对作物养分吸收与累积的影响

不同有机物施用均可促进作物植株各部位中的 N、P、K 养分含量。在油菜季(表 4),相比 CF 处理,施用有机物处理提高了油菜茎、角壳、籽粒中 K 含量,其中 RFP 和 RFV 处理的油菜各部位的 N、P、K 含量均最高,显著高于其他处理。在红薯季,施用有机物处理的红薯各部位中的 P、K 养分含量均高于 CF 处理,相比 CF 处理,RFP 和 RFV 处理显著提高了红薯各部位的 N、P 含量,这可能是由于猪粪和蚓粪中的 N、P 含量均较高,有利于植株养分的吸收和累积。结果表明,有机物料促进了作物对 N、P、K 养分的吸收,而减量 40% 化肥配施猪粪和蚓粪效果最佳。

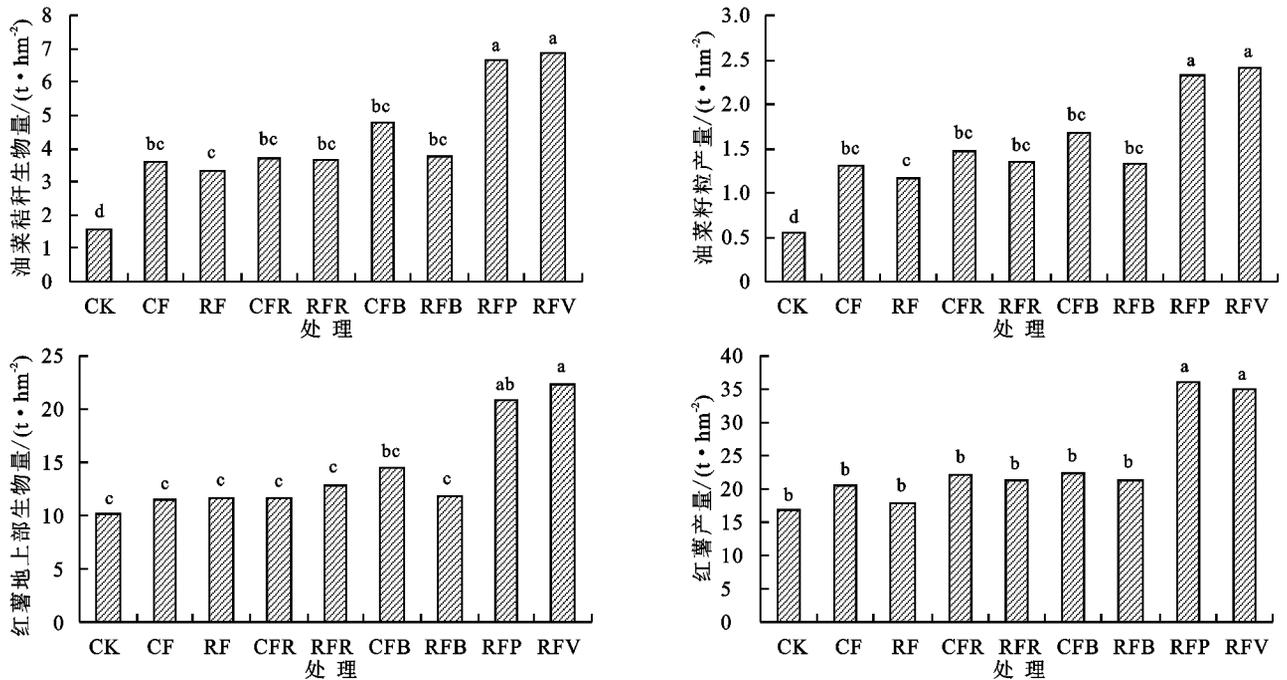
作物养分累积量为作物各部位养分含量与相应部位生物量相乘所得。配施有机物后油菜和红薯生物量及各部位养分含量得到提升,故油菜和红薯的各部位养分累积量也得到相应增加。在油菜季(表 5),从总体上看,施用有机物促进了油菜植株各部位氮(N)、磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)、钾(K<sub>2</sub>O)的累积量及氮、磷、钾累积总量,其中以

减量 40% 化肥配施猪粪和蚓粪处理的提升效果最为显著。而红薯季与油菜季并无明显差异。

表 3 不同有机物施用对土壤养分含量的影响

处理	有机质/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (g · kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效磷/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	
油菜季	CK	14.20d	0.99b	0.71c	87.8b	27.9d	162.2d
	CF	15.05cd	1.01b	0.74c	90.5ab	36.5cd	236.5ab
	RF	14.66d	1.01b	0.72c	89.3b	30.8cd	216.6bc
	CFR	15.92bc	1.04b	0.74c	90.8ab	40.8c	257.5a
	RFR	15.41bcd	1.02b	0.75c	89.2b	39.5c	238.4ab
	CFB	16.01bc	1.04b	0.74c	92.7ab	37.3cd	242.3ab
	RFB	16.67ab	1.03b	0.75c	89.6b	38.8c	236.8ab
	RFP	16.50abc	1.30a	0.98b	100.9a	121.1b	207.7bc
	RFV	17.63a	1.11b	1.06a	98.8ab	132.4a	197.8c
	红薯季	CK	14.19b	0.98c	0.60c	64.2b	27.0c
CF		15.71b	1.02c	0.68c	66.7b	36.8c	277.4b
RF		14.56b	1.01c	0.62c	66.1b	25.9c	204.1c
CFR		16.21b	1.09c	0.72c	70.0b	39.8c	334.7a
RFR		16.55b	1.06c	0.70c	66.5b	44.3c	296.3ab
CFB		16.70b	1.05c	0.70c	65.8b	40.9c	283.1b
RFB		16.45b	1.04c	0.72c	65.9b	46.3c	282.3b
RFP		21.13a	1.23b	0.95b	79.6a	149.9b	271.8b
RFV		21.32a	1.40a	1.13a	84.1a	172.6a	272.2b

注:同一列内不同小写字母分别代表处理间差异显著性( $P < 0.05$ )。下同。



注:不同的小写字母表示不同处理间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

图 1 不同有机物施用对作物产量和地上部生物量的影响

#### 2.4 不同有机物施用对作物养分利用率的影响

由表 6 可知,在油菜季,施用有机物处理对油菜的氮肥表观利用率、钾肥表观利用率、氮肥偏生产力和钾肥偏生产力均有一定程度的提升,其中 RFP 和 RFV 处理提升效果最佳,与 CF 处理相比均达到显著水平,分别提升了 40.13%,56.95%,24.54%,46.64%和 59.50%,59.59%,35.16%,46.84%;RFP 和 RFV 处理的肥料贡献率均显著高于 CF 处理,分别提升了 15.46%和 16.54%,但其磷肥表观利用率、磷肥偏生产力及农学效率均低于其他各处理,分别为 2.47%,

1.11,0.61 kg/kg 和 2.72%,1.19,0.67 kg/kg。施用水稻秸秆和生物黑炭处理的磷肥偏生产力均高于 CF 处理,其中 RFR 和 RFB 处理达到显著水平。施用水稻秸秆和生物黑炭处理的农学效率与 CF 处理相比没有显著差异,但在数值上均高于 CF 处理,其中减量 40% 化肥下配施生物黑炭处理最高,相比 CF 处理提升了 22.71%。相比油菜季,红薯季各处理的肥料偏生产力、肥料表观利用率、农学效率和肥料贡献率在趋势上整体没有明显变化,而红薯肥料贡献率、农学效率和肥料偏生产力相比油菜均有所增加。

表 4 不同有机物施用对作物植株各部位养分含量的影响

单位: %

处理	茎(茎蔓)			角壳(叶)			籽粒(块根)			
	N	P	K	N	P	K	N	P	K	
油菜季	CK	0.55b	0.05b	1.45d	0.83ab	0.06c	1.53b	2.96c	0.32b	0.51c
	CF	0.59b	0.07b	1.68bcd	1.01ab	0.07c	1.54b	3.21bc	0.46b	0.64bc
	RF	0.58b	0.06b	1.59cd	0.99ab	0.07c	1.57ab	3.22bc	0.38b	0.59bc
	CFR	0.57b	0.05b	1.90ab	1.10a	0.08bc	1.70ab	3.27bc	0.38b	0.63bc
	RFR	0.56b	0.05b	1.85abc	0.94ab	0.07c	1.81a	3.22bc	0.41b	0.62bc
	CFB	0.58b	0.06b	1.84abc	0.72b	0.07c	1.82a	3.41ab	0.43b	0.69ab
	RFB	0.69ab	0.05b	1.83abc	0.80ab	0.07c	1.69ab	3.51ab	0.36b	0.62bc
	RFP	0.79a	0.17a	1.98a	1.11a	0.14a	1.69ab	3.55ab	0.70a	0.72ab
	RFV	0.74ab	0.16a	1.97a	1.10a	0.12a	1.72ab	3.66a	0.73a	0.82a
红薯季	CK	0.61c	0.08c	1.68b	2.29c	0.14b	1.80c	0.78d	0.09b	0.89c
	CF	0.87ab	0.08bc	1.88b	2.99ab	0.17b	1.82c	1.35abc	0.11b	1.01bc
	RF	0.70bc	0.08bc	1.78b	2.67abc	0.15b	1.98bc	1.01cd	0.10b	1.04bc
	CFR	0.69bc	0.12bc	2.20b	2.79abc	0.19b	2.34b	1.21abc	0.13b	1.26abc
	RFR	0.64c	0.15b	1.73b	2.36c	0.18b	2.17bc	1.06cd	0.11b	1.21bc
	CFB	0.95a	0.09bc	1.97b	2.82abc	0.17b	1.91c	1.41abc	0.12b	1.29abc
	RFB	0.72bc	0.11bc	2.16b	2.53bc	0.18b	2.16bc	1.10bcd	0.13b	1.04bc
	RFP	1.00a	0.22a	2.75a	3.25a	0.27a	2.86a	1.56a	0.22a	1.34ab
	RFV	1.01a	0.23a	2.95a	3.09ab	0.25a	2.82a	1.51ab	0.23a	1.61a

表 5 不同有机物施用对作物植株各部位养分积累量的影响

单位: kg/hm<sup>2</sup>

处理	N				P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>				K <sub>2</sub> O				
	茎 (茎蔓)	角壳 (叶)	籽粒 (块根)	总计	茎 (茎蔓)	角壳 (叶)	籽粒 (块根)	总计	茎 (茎蔓)	角壳 (叶)	籽粒 (块根)	总计	
油菜季	CK	3.70c	6.47c	13.88d	24.05c	0.75b	0.98c	3.43c	5.16c	12.36e	12.02d	2.94d	27.32d
	CF	12.37b	11.09bc	43.84bc	67.30b	1.82b	2.66bc	11.24b	15.72b	32.33de	31.74c	11.46bc	75.5bc
	RF	10.18bc	14.39bc	36.73c	61.30b	2.78b	2.74bc	10.00b	15.52bc	34.06de	28.22c	8.32c	70.60c
	CFR	12.86b	17.90b	47.95bc	78.71b	2.69b	3.13b	11.67b	17.49b	54.58cd	27.82c	11.19bc	93.59bc
	RFR	13.91b	14.51bc	41.18c	69.60b	2.81b	2.29bc	11.05b	16.15b	48.37cd	32.37c	10.19bc	90.93bc
	CFB	16.73b	13.53bc	57.21b	87.47b	3.79b	3.11b	16.40b	23.30b	64.06bc	41.17bc	13.91b	119.14b
	RFB	13.99b	12.82bc	45.92bc	72.73b	2.26b	2.47bc	11.25b	15.98b	45.54cd	36.05c	9.08c	90.67bc
	RFP	29.06a	30.21a	83.05a	142.32a	15.15a	8.79a	38.74a	62.68a	85.88ab	61.34a	20.73a	167.95a
	RFV	29.17a	31.68a	89.79a	150.64a	14.73a	7.87a	41.50a	64.10a	93.43a	55.70ab	24.59a	173.72a
红薯季	CK	5.52d	14.32b	33.25c	53.19e	1.67b	2.10b	8.67b	12.44b	19.83b	13.65b	44.73c	78.20c
	CF	10.00bcd	21.73b	71.40bc	103.13bcd	2.01b	3.09b	12.97b	18.07b	25.37b	16.84b	67.221c	109.42b
	RF	7.20cd	20.16b	45.86bc	73.23cde	2.11b	2.91b	10.26b	15.28b	25.45b	18.90b	58.78c	103.13bc
	CFR	7.06cd	18.71b	45.07bc	70.83de	2.53b	2.97b	8.58b	14.07b	27.61b	19.36b	57.43c	104.39bc
	RFR	9.18cd	20.81b	52.67bc	82.66cde	6.12a	4.15ab	12.35b	22.62b	26.55b	24.00ab	61.73c	112.28b
	CFB	11.92abc	24.92ab	74.59bc	111.42bc	3.02b	3.46b	14.56b	21.03b	29.27b	20.24ab	75.52bc	125.03b
	RFB	6.85cd	16.41b	50.68bc	73.92cde	2.50b	2.73b	13.58b	18.81b	23.71b	16.81b	57.06c	97.58bc
	RFP	14.36bc	26.41ab	127.83a	168.59a	8.12a	6.32a	27.55a	41.99a	63.22a	29.09ab	127.64a	219.95a
	RFV	15.94a	39.29a	81.58ab	136.80ab	9.23a	6.71a	27.57a	43.51a	60.50a	35.26a	111.38ab	207.14a

表 6 不同有机物施用对作物养分利用率的影响

处理	肥料 贡献率/%	农学效率/ (kg·kg <sup>-1</sup> )	肥料偏生产力/(kg·kg <sup>-1</sup> )			肥料表观利用率/%			
			N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	
油菜季	CF	69.00bc	1.14a	6.03c	4.07c	5.06c	26.99e	6.68a	28.36b
	RF	58.44d	1.24a	7.60ab	5.19ab	6.53ab	30.13cde	4.82ab	29.16b
	CFR	73.10b	1.23a	6.16bc	4.56bc	4.69c	27.86de	5.08ab	28.42b
	RFR	66.18bc	1.38a	7.55ab	5.95a	5.53bc	34.82bc	6.45a	32.68b
	CFB	71.54b	1.22a	6.25bc	4.30bc	5.15c	28.50cde	4.73ab	32.54b
	RFB	64.19cd	1.40a	7.91a	5.55a	6.52ab	34.19bcd	5.28ab	35.43b
	RFP	79.67a	0.61b	7.51ab	1.11d	7.42a	37.82ab	2.47b	44.51a
	RFV	80.41a	0.67b	8.15a	1.19d	7.43a	43.05a	2.72b	45.26a
	CF	55.19a	3.95a	22.01ab	14.88ab	18.60ab	27.15bc	1.87ab	14.02b
红薯季	RF	40.02ab	3.43abc	25.56a	17.44a	21.98ab	25.36bc	1.87ab	20.03b
	CFR	37.44ab	1.62bc	12.98b	9.62b	11.18b	15.12c	1.49b	11.69b
	RFR	31.73b	2.13abc	22.99ab	18.11a	16.84ab	31.22ab	4.90a	17.72b
	CFB	33.22b	1.47c	19.36ab	13.32ab	15.96ab	34.32ab	2.56ab	17.75b
	RFB	43.54ab	3.72ab	27.25a	19.12a	22.47a	25.86bc	3.23ab	16.85b
	RFP	53.86a	1.24c	22.00ab	3.25c	21.45ab	43.22a	1.91ab	48.55a
	RFV	54.18a	1.27c	20.90ab	2.57c	16.02ab	39.37ab	1.60b	40.09a

### 3 讨论

#### 3.1 不同有机物施用对作物生长和土壤肥力的影响

本研究中,在连续施肥下,施用有机物特别是猪粪和蚓粪的有机质和全氮含量均高于单施化肥,与邓文悦等<sup>[15]</sup>研究结果一致。因为单施化肥处理促进了土壤有机质的矿化损失<sup>[15]</sup>。本研究中施用猪粪和蚓粪处理土壤速效磷含量显著高于其他各处理,这是因为猪粪和蚓粪的施入增加了土壤中磷素含量,同时增加了土壤有机质含量,从而减少无机磷的固定,促进无机磷分解<sup>[16]</sup>。本研究表明连续施肥可以增加土壤速效钾含量,特别是施用有机物效果更为明显。长期施肥能有效增加土壤速效钾含量,这与钾在土壤中主要以难溶或固定形态存在,施入土壤中钾保留的较多,流失的较少有关<sup>[17]</sup>。

有机肥或有机无机配施往往会提高土壤中养分含量,对于土壤和化肥养分的释放有调控作用,能够使作物在整个生长阶段得到稳定的养分供给,从而提高作物产量<sup>[18]</sup>。在本研究中,与单施化肥相比,施用有机物增加了油菜和红薯的产量和地上部生物量,其中又以减量 40% 化肥下施用猪粪和蚓粪增产效果最佳,这与田昌等<sup>[19]</sup>、Zhao 等<sup>[20]</sup>的田间试验研究结果一致。这是因为有机物的施入能够增加土壤中的氮磷钾养分含量,促进作物对土壤中氮磷钾养分的吸收,从而提高作物产量<sup>[21]</sup>。

#### 3.2 不同有机物施用对作物养分累积和利用效率的影响

肥料利用效率体现了作物对于肥料的吸收利用情况。本研究表明,在施用有机物后,特别是减量 40% 化肥下配施猪粪和蚓粪有利于油菜和红薯对于氮、磷、钾养分的吸收累积,促进了油菜籽粒和红薯对氮、磷、钾养分的累积,这与李絮花等<sup>[22]</sup>的研究结果一致。有机肥对作物根系生长和根系活力有促进作用,使作物生长后期仍有较高的根系吸收养分能力,同时促进根系对氮、磷、钾的吸收及作物对养分的利用。

本试验中,施用有机物对作物的农学效率、肥料贡献率及氮肥和钾肥的表观利用率、偏生产力均有提升效果,而减量 40% 化肥配施猪粪和蚓粪对作物氮肥和钾肥的表观利用率和偏生产力提升效果更为显著,说明有机物能显著提高作物对肥料的利用程度及肥料的增产效益,这与 Martínez 等<sup>[23]</sup>、高洪军等<sup>[24]</sup>、Duan 等<sup>[25]</sup>、Agegnehu 等<sup>[26]</sup>的研究结果一致。主要是由于有机物的施用增加了土壤碳源、根系生物量及根系分泌物,改变了土壤生长环境,促进微生物的生长繁殖,增加土壤微生物生物量碳氮及土壤养分含量,促进了微生物及相关酶类物质的活性,从而增加了作物易吸收利用养分的转化量与转化速率<sup>[27-28]</sup>,进而促进了氮素和钾素利用效率的提升。而猪粪和蚓

粪本身携带有大量的微生物,施入土壤后会改变土壤中微生物的群落结构,同时猪粪和蚓粪中含有大量的腐殖物质,能促进作物的生长发育。施用水稻秸秆和生物黑炭提高了磷肥偏生产力和磷肥表观利用率,而施用猪粪和蚓粪处理磷肥利用效率有所降低,这可能是由于猪粪和蚓粪中的磷素含量过高。不论是油菜季还是红薯季,磷肥利用效率普遍偏低,这主要是由于红壤中含有大量的铁铝氧化物能够固定土壤中的磷素,从而降低了土壤溶液中生物可利用磷含量<sup>[29]</sup>,作物对土壤中磷的吸收利用性降低。

有机物对作物、土壤肥力和养分转化的影响过程比较复杂,本研究只考虑了全量化肥和减量 40% 化肥施用不同有机物的施肥措施下土壤肥力和作物对养分吸收利用的情况,没有综合考虑其他因素可能对土壤肥力和作物养分利用效率的影响。因此,在今后的研究中,应综合考虑全量化肥和减施 40% 化肥施用不同有机物下土壤中微生物群落结构变化、微生物及相关酶类物质活性、有机物中养分矿化和土壤中养分元素转化等因素,进一步探明减施化肥配施有机物对作物养分利用效率的影响机制,为有机物的合理施用提供有效的科学依据。

### 4 结论

(1)与全量化肥相比,有机物的施用增加了油菜和红薯的产量,提升了土壤中各养分含量,而施用猪粪和蚓粪的效果最为显著,对油菜和红薯产量的增幅均达到 75% 以上,土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮含量均显著增加,增幅为 19.31%~66.18%。整体上来看,施用猪粪和蚓粪的效果要好于施用秸秆和生物黑炭。

(2)有机物的施用提升了油菜和红薯的养分含量与养分累积量,提升效果依次为蚓粪>猪粪>生物黑炭>水稻秸秆。

(3)与全量化肥相比,有机物的施用能够提升油菜和红薯的养分利用效率,其中施用猪粪和蚓粪的效果最佳,氮肥和钾肥表观利用率均达到 40% 以上;整体而言,4 种有机物对油菜和红薯养分利用效率提升效果依次为蚓粪>猪粪>生物黑炭>水稻秸秆。

#### 参考文献:

- [1] 高菊生,李菊梅,徐明岗,等.长期施用化肥对红壤旱地作物和水稻产量影响[J].中国农学通报,2008,24(1):286-292.
- [2] Kaiser M, Ellerbrock R H. Functional characterization of soil organic matter fractions different in solubility originating from a long-term field experiment [J]. Geoderma, 2005, 127(3): 196-206.
- [3] 杨小梅,刘树伟,秦艳梅,等.中国玉米化学氮肥利用率

- 的时空变异特征[J]. 中国生态农业学报, 2013, 20(10): 1184-1192.
- [4] 王立刚, 李维炯, 邱建军, 等. 生物有机肥对作物生长、土壤肥力及产量的效应研究[J]. 土壤肥料, 2004, 41(5): 12-16.
- [5] 马忠明, 王平, 陈娟, 等. 适量有机肥与氮肥配施方可提高河西绿洲土壤肥力及作物生产效益[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1298-1309.
- [6] Li R, Tao R, Ling N, et al. Chemical, organic and bio-fertilizer management practices effect on soil physico-chemical property and antagonistic bacteria abundance of a cotton field: Implications for soil biological quality [J]. Soil and Tillage Research, 2017, 167(4): 30-38.
- [7] 刘秀秀, 鲁剑巍, 王寅, 等. 氮磷钾肥施用对油菜产量及养分吸收利用的影响[J]. 中国油料作物学报, 2014, 36(4): 483-488.
- [8] 李慧, 马常宝, 鲁剑巍, 等. 中国不同区域油菜氮磷钾肥增产效果[J]. 中国农业科学, 2013, 46(9): 1837-1847.
- [9] Yang Z C, Zhao N, Huang F, et al. Long-term effects of different organic and inorganic fertilizer treatments on soil organic carbon sequestration and crop yields on the North China Plain [J]. Soil and Tillage Research, 2015, 146(10): 47-52.
- [10] 陈贵, 赵国华, 张红梅, 等. 长期施用有机肥对水稻产量和氮磷养分利用效率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017, 54(1): 92-97.
- [11] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- [12] 张玉平, 荣湘民, 刘强, 等. 有机无机肥配施对旱地作物养分利用率及氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3): 44-48.
- [13] Xin X, Qin S, Zhang J, et al. Yield, phosphorus use efficiency and balance response to substituting long-term chemical fertilizer use with organic manure in a wheat-maize system [J]. Field Crops Research, 2017, 208(7): 27-33.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] 邓文悦, 柳开楼, 田静, 等. 长期施肥对水稻土不同功能有机质库碳氮分布的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 468-479.
- [16] 刘树堂, 姚源喜, 隋方功, 等. 长期定位施肥对土壤磷、钾素动态变化的影响[J]. 生态环境学报, 2003, 12(4): 452-455.
- [17] He P, Yang L, Xu X, et al. Temporal and spatial variation of soil available potassium in China (1990—2012) [J]. Field Crops Research, 2015, 173(3): 49-56.
- [18] 高菊生, 黄晶, 董春华, 等. 长期有机无机肥配施对水稻产量及土壤有效养分影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 314-324.
- [19] 田昌, 彭建伟, 宋海星, 等. 有机肥化肥配施对冬油菜养分吸收、籽粒产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012, 4(12): 70-74.
- [20] Zhao J, Ni T, Li J, et al. Effects of organic - inorganic compound fertilizer with reduced chemical fertilizer application on crop yields, soil biological activity and bacterial community structure in a rice - wheat cropping system [J]. Applied Soil Ecology, 2016, 99(18): 1-12.
- [21] 唐莉娜, 陈顺辉. 不同种类有机肥与化肥配施对烤烟生长和品质的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(11): 258-262.
- [22] 李絮花, 杨守祥, 于振文, 等. 有机肥对小麦根系生长及根系衰老进程的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(4): 467-472.
- [23] Martínez E, Domingo F, Roselló A, et al. The effects of dairy cattle manure and mineral N fertilizer on irrigated maize and soil N and organic C [J]. European Journal of Agronomy, 2017, 83(2): 78-85.
- [24] 高洪军, 朱平, 彭畅, 等. 等氮条件下长期有机无机配施对春玉米的氮素吸收利用和土壤无机氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 318-325.
- [25] Duan Y, Xu M, Gao S, et al. Nitrogen use efficiency in a wheat - corn cropping system from 15 years of manure and fertilizer applications [J]. Field Crops Research, 2014, 157(2): 47-56.
- [26] Agegnehu G, Nelson P N, Bird M I. The effects of biochar, compost and their mixture and nitrogen fertilizer on yield and nitrogen use efficiency of barley grown on a Nitisol in the highlands of Ethiopia [J]. Science of the Total Environment, 2016, S569/570(11): 869-879.
- [27] Wongkiew S, Hu Z, Chandran K, et al. Nitrogen transformations in aquaponic systems: A review [J]. Aquacultural Engineering, 2017, 76(1): 9-19.
- [28] Zhu S, Vivanco J M, Manter D K. Nitrogen fertilizer rate affects root exudation, the rhizosphere microbiome and nitrogen-use-efficiency of maize [J]. Applied Soil Ecology, 2016, 107(11): 324-333.
- [29] Otinga A N, Pypers P, Okalebo J R, et al. Partial substitution of phosphorus fertiliser by farmyard manure and its localised application increases agronomic efficiency and profitability of maize production [J]. Field Crops Research, 2013, 140(1): 32-43.