

高 飞,汪志鹏,赵 贺,等. 低地力条件下有机肥部分替代化肥对作物产量和土壤性状的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(1): 83-91.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.01.012

低地力条件下有机肥部分替代化肥对作物产量和土壤性状的影响

高 飞, 汪志鹏, 赵 贺, 李辉信, 焦加国

(南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095)

摘要: 在江苏省黄河故道低肥力土壤条件下,探究有机肥替代化肥对小麦玉米和水稻小麦轮作体系中作物产量及土壤养分的影响,以明确低肥力土壤中有机肥替代化肥的规律和潜力。田间试验于 2017 年 10 月布置,设置 6 个不同处理,分别为不施肥(CK)、常量化肥(F)、常量化肥+40%有机肥(FM_{0.4})、NPK 总养分相等情况下分别用有机肥替代 20%(F_{0.8}M_{0.2})、40%(F_{0.6}M_{0.4})及 60%(F_{0.4}M_{0.6})化肥。结果表明:(1)小麦玉米轮作体系中,有机肥替代化肥在小麦季产量明显降低,其中有机肥替代 60%化肥时,小麦产量显著降低而在玉米季产量无显著差异。在水稻小麦轮作体系中,不同比例有机肥替代化肥对作物产量的影响不显著。(2)施肥提升了小麦玉米和水稻小麦轮作体系中土壤有机质含量,小麦玉米轮作体系中土壤有机质提升 8.07%~36.61%,水稻小麦轮作体系土壤有机质提升 7.69%~40.22%。随着有机肥替代比例的增加,小麦玉米轮作体系中土壤全氮及速效钾含量呈降低趋势,而土壤磷素及碱解氮含量逐渐升高;水稻小麦轮作体系中土壤全氮含量逐渐降低,土壤全磷、碱解氮、速效钾含量逐渐升高。(3)相关性分析结果表明,作物产量与土壤全氮、碱解氮及速效磷含量均呈显著或极显著的正相关关系。综上所述,黄河故道地区由于基础地力较低,有机肥替代化肥并未表现出对作物的增产作用,但有机肥的投入有效地改善了土壤的养分状况,因此该区低肥力土壤在作物栽培中应当维持化肥用量并增施有机肥,以提升耕地质量。

关键词: 黄河故道; 有机肥替代化肥; 作物产量; 土壤肥力

中图分类号: S158 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2020)01-0083-09

Effects of partial substitution for chemical fertilizer by organic monure on crop yield and soil properties under low soil fertility

GAO Fei, WANG Zhi-peng, ZHAO He, LI Hui-xin, JIAO Jia-guo

(College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Under the low soil fertility condition of the ancient bed of Yellow River in Jiangsu province, the effects of partial substitution for chemical fertilizer on crop yield and soil nutrient in different rotation systems of wheat-maize and wheat-rice were explored in order to clarify the replacement rules and potentials. Field experiment was arranged in October 2017, and six different treatments were set up, namely no fertilizer (CK); chemical fertilizer (F); an additional 40% organic fertilizer on the basis of chemical fertilizer(FM_{0.4}); in the case of equal total nutrient of NPK, 20% (F_{0.8}M_{0.2}), 40% (F_{0.6}M_{0.4}) and 60% (F_{0.4}M_{0.6}) of chemical fertilizers were replaced by organic fertilizer respectively. The results

收稿日期:2019-05-14

基金项目:江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(17)1001]

作者简介:高 飞(1993-),男,安徽利辛人,硕士研究生,主要从事土壤生态学方面的研究。(E-mail)2016103073@njau.edu.cn

通讯作者:焦加国,(E-mail)jiaguojiao@njau.edu.cn

showed that the yield of wheat decreased significantly by using organic fertilizer as partial substitution for chemical fertilizer in wheat-maize rotation system. When 60% of the chemical fertilizers were replaced by organic fertilizer, yield of wheat decreased significantly, but there was no

significant difference in maize yield. Under wheat-rice rotation system, the effect of substitution for chemical fertilizers by different proportions of organic fertilizers on crop yield was not significant. Fertilization increased the content of soil organic matter, the content of soil organic matter increased by 8.07%–36.61% in the wheat-maize rotation system, and the content of soil organic matter increased by 7.69%–40.22% in the wheat-rice rotation system. With the increase of organic fertilizer replacement ratio, the contents of total nitrogen and available potassium in soil were decreased, while the contents of soil phosphorus and alkali nitrogen were gradually increased in wheat-maize rotation system. The contents of total phosphorus, alkali nitrogen and available potassium in soil increased gradually, while the total nitrogen content decreased in wheat-rice rotation system. The results of correlation analysis showed that there was significant or extremely significant positive correlation between crop yield and soil total nitrogen, alkali nitrogen and available phosphorus. In summary, due to the low basic soil fertility in the ancient bed of Yellow River, the replacement of chemical fertilizer by organic fertilizer did not show an increase in crop yield, but the input of organic fertilizer effectively improved the nutrient status of the soil. Therefore, it is necessary to maintain the amount of chemical fertilizer and increase the application of organic fertilizer to improve the quality of cultivated land in this area.

Key words: ancient bed of Yellow River; organic manure replacing chemical fertilizer; crop yield; soil fertility

江苏省黄河故道地区资源丰富,土壤的生产潜力较大,是全省重要的粮食生产区,对于江苏省乃至全国的粮食生产都有重要作用,然而这一地区的土壤生产力低下,土壤有机质及各种养分含量较低,土壤具有砂性强、钙质多的特点,土壤结构和保水保肥能力差,作物平均产量不高^[1-2]。有机肥部分替代化肥是土壤培肥和提高作物产量的重要途径^[3-4],也是实现中国化肥零增长的重要技术途径之一^[5]。

有研究结果表明有机肥部分替代化肥对土壤肥力具有明显的改善作用。温延臣等^[4]对华北平原冬小麦-夏玉米的研究结果表明,商品有机肥部分替代化肥能保证作物稳产、高产,并且能够培肥地力。随着有机肥替代化肥比例的增高,土壤氮、磷、钾的含量也越高^[6]。有机肥具有肥效释放缓慢的特点,不同比例有机肥替代化肥对作物产量的影响差异较大。有研究结果表明,有机肥替代部分化肥养分(或化学氮)对作物增产作用最明显^[7-9]。还有的研究结果表明有机肥替代70%以上的化肥养分(或化学氮)依旧可以提高作物产量^[3,10]。然而,并不是所有的有机肥替代都可以增加作物产量。林治安等^[11]的研究结果表明,有机肥替代50%化肥养分造成小麦和玉米产量显著降低。刘杏兰等^[12]研究结

果也表明,随着有机肥替代量的增加,小麦玉米轮作体系中作物的产量有明显的下降趋势。蔡秋华等^[13]的研究结果表明有机肥配施减量化肥与常规化肥相比,烟草产量显著降低。

前人对有机肥替代的研究较多,但在基础地力极低的土壤中进行有机肥替代的研究较少。本研究旨在通过有机肥部分替代化肥,分析黄河故道地区低肥力土壤条件下有机肥替代化肥对小麦-玉米和小麦-水稻轮作体系中作物产量和土壤性状的影响,以提出适合黄河故道地区不同轮作体系下的有机肥替代方案,为黄河故道地区有机肥的合理替代提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2017年10月至2018年10月在江苏省滨海县三坝村江苏黄河湾绿色科技有限公司(北纬34°06′08″,东经119°51′16″)进行。该地处于北亚热带向南暖温带过渡性气候带,为湿润的季风气候。年平均气温14.1℃,年平均降雨量949.5mm,无霜期211d,全年日照2236.3h。供试土壤为潮土,土壤基础理化性质见表1。

表1 麦玉和稻麦轮作模式下土壤基础理化性质

Table 1 Basic properties of soil in two rotation systems of wheat-maize and wheat-rice

轮作制度	pH	有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)	碱解氮(mg/kg)	速效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)
小麦玉米轮作	8.41	3.72	0.23	0.50	26.43	3.47	81.51
水稻小麦轮作	8.50	4.86	0.27	0.51	29.80	11.74	84.21

1.2 供试材料

供试小麦品种为华麦 7 号,玉米品种为蠡玉 31,水稻品种为华粳 5 号。氮肥为尿素(含 N 46%),磷肥为过磷酸钙(含 P_2O_5 12%),钾肥为氯化钾(含 K_2O 60%)。试验所用商品有机肥为江苏绿方园生物科技有限公司生产的严博士有机肥,含水率为 35.0%,养分含量分别为 N 1.87%、 P_2O_5 3.16%、 K_2O 2.79%,有机质含量为 45.0%。

1.3 试验设计

试验设置 6 个处理,每个处理 3 个重复。具体处理为:(1)不施肥(CK);(2)常量化肥(F);(3)常量化肥+40%有机肥(有机肥的养分总量为常量化肥总养分的 40%)($FM_{0.4}$);(4)80%常量化肥+20%有机肥(有机肥的养分总量为常量化肥总养分的 20%)($F_{0.8}M_{0.2}$);(5)60%常量化肥+40%有机肥(有机肥的养分总量为常量化肥总养分的 40%)($F_{0.6}M_{0.4}$);(6)40%常量化肥+60%有机肥(有机肥的养分总量为常

量化肥总养分的 60%)($F_{0.4}M_{0.6}$)。处理 4~6 分别为有机肥替代化肥总养分的 20%、40%和 60%。除处理 3 外,其他施肥处理的 NPK 养分总量相同。

小麦玉米轮作小区面积为 221.85 m^2 ($15.3\text{ m} \times 14.5\text{ m}$),小区间用 0.5 m 宽的沟隔离,周边设有 0.5 m 宽的保护行。小麦季氮(N)、磷(P_2O_5)、钾(K_2O)施用量分别为 270 kg/hm^2 、 150 kg/hm^2 、 75 kg/hm^2 ,玉米季氮(N)、磷(P_2O_5)施用量分别为 300 kg/hm^2 、 90 kg/hm^2 ,不施钾肥(表 2)。水稻小麦轮作小区面积为 443.70 m^2 ($15.3\text{ m} \times 29.0\text{ m}$),在水稻季试验开始前,小区之间设置田埂,并且使用厚塑料膜包裹田埂,防止水稻生长过程中因为灌水需要而造成小区之间肥水的交换。小麦季氮(N)、磷(P_2O_5)、钾(K_2O)施用量分别为 240 kg/hm^2 、 150 kg/hm^2 、 75 kg/hm^2 ,水稻季氮(N)、磷(P_2O_5)、钾(K_2O)施用量分别为 225 kg/hm^2 、 90 kg/hm^2 、 90 kg/hm^2 。

表 2 试验处理及施肥量

Table 2 Test treatments and fertilizer rate

处理	小麦玉米轮作				水稻小麦轮作			
	化肥用量(kg/hm^2)			有机肥 (t/hm^2)	化肥用量(kg/hm^2)			有机肥 (t/hm^2)
	N	P_2O_5	K_2O		N	P_2O_5	K_2O	
CK	0	0	0	0	0	0	0	0
F	270(300)	150(90)	75(0)	0	240(225)	150(90)	75(90)	0
$FM_{0.4}$	270(300)	150(90)	75(0)	3.89(3.07)	240(225)	150(90)	75(90)	3.66(3.19)
$F_{0.8}M_{0.2}$	216(240)	120(72)	60(0)	1.95(1.53)	192(180)	120(72)	60(72)	1.83(1.59)
$F_{0.6}M_{0.4}$	162(180)	90(54)	45(0)	3.89(3.07)	144(135)	90(54)	45(54)	3.66(3.19)
$F_{0.4}M_{0.6}$	108(120)	60(36)	30(0)	5.84(4.60)	96(90)	60(36)	30(36)	5.49(4.78)

括号内数值为玉米季或水稻季的施肥量。

小麦(水稻、玉米)播种之前把其所需要的磷肥、钾肥和有机肥作为基肥一次性施入土壤,氮肥每一季均分 3 次施入土壤,其中 40%的氮肥用作基肥,后期在小麦(水稻)分蘖期、孕穗期和玉米的拔节期、大喇叭口期各追施 30%的氮肥。

1.4 测试项目与方法

1.4.1 土壤样品采集及测定 每一季作物收获后,采用多点混合取样法取 0~20 cm 耕作层土样,并去除土壤表层杂质及根系。样品带回实验室,风干、过筛后保存,以供土壤理化性状分析。土壤 pH 值采用 1.0:2.5 土水比(质量体积比)悬液电位法测定,土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法-外加热法测定,全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定,碱解氮含

量采用碱解扩散法测定,速效磷含量采用 0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法(Olsen 法)测定,速效钾含量采用 1 mol/L 乙酸铵浸提-火焰光度法测定^[14]。

1.4.2 作物测产

1.4.2.1 小麦和水稻测产方法 在作物(水稻或小麦)成熟期,选取有代表性的样方 1 m^2 ,将样方内的作物全部从茎基部割掉,放入网袋中。统计样方内作物有效穗数,自然风干后称质量,并进行脱粒、称质量,折算成作物产量。同时,每个样方选取有代表性的 20 穗作物带回实验室进行考种,统计作物的穗粒数和千粒质量,每个处理选取 3 个样方进行测定。

1.4.2.2 玉米测产方法 玉米成熟期,选取 $2\text{ m} \times 10\text{ m}$

的样方,统计样方内玉米的株数和有效穗数,将样方内的玉米穗全部剥下、称质量,然后每个样方随机取 20 穗玉米称质量,待自然风干后脱粒、称质量,计算 20 穗玉米产量进而推算样方产量。另外再选取有代表性的 3 穗玉米带回实验室进行考种,统计玉米的穗粒数及百粒质量,每个处理选取 3 个样方进行测定。

1.5 数据处理

采用 Excel 2010 进行数据整理,使用 SPSS 25.0 进行统计分析并进行单因素方差分析(One way ANOVA),土壤性质与作物产量的关系用 Pearson 相

关系数分析,采用 Origin 2018 进行作图。

2 结果与分析

2.1 有机肥部分替代化肥对作物产量及其构成的影响

2.1.1 小麦玉米轮作体系 施肥显著增加了不同轮作体系的作物产量(表 3),显著增加了小麦、玉米的有效穗数及穗粒数,但对作物的粒质量均未有显著影响。随着有机肥替代比例的增加,小麦的有效穗数显著降低。

表 3 不同有机无机肥配比下小麦玉米轮作体系作物产量及其构成因素

Table 3 Crop yield and its components in wheat-maize rotation system under different organic fertilizer-inorganic fertilizer ratios

处理	小麦				玉米				周年产量 (t/hm ²)
	1 hm ² 有效穗数 (×10 ⁴)	穗粒数	千粒质量 (g)	产量 (t/hm ²)	1 hm ² 有效穗数 (×10 ⁴)	穗粒数	百粒质量 (g)	产量 (t/hm ²)	
CK	262.7c	16b	37.6a	1.15c	3.8c	161b	29.8b	5.82c	0.97c
F	660.7a	32a	38.8a	7.00a	5.6a	492a	37.1a	7.20b	14.20a
FM _{0.4}	559.3b	34a	39.4a	6.52a	5.3a	511a	35.8a	8.53a	15.05a
F _{0.8} M _{0.2}	617.7ab	30a	40.1a	6.02ab	5.1a	514a	34.0ab	6.37b	12.39b
F _{0.6} M _{0.4}	590.0ab	29a	37.6a	5.94ab	4.5b	484a	33.0ab	6.68b	12.62b
F _{0.4} M _{0.6}	530.7b	30a	39.9a	4.82b	5.1a	506a	35.2a	6.50b	11.32b

各处理见表 2。同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

小麦玉米轮作体系小麦季,常量化肥+增施有机肥处理相比于单施化肥处理并未对作物产量有提升作用,可能是由于有机肥提供的缓效养分对作物产量的贡献率在短时间内还没有显现出来。NPK 总养分相同时,随着有机肥替代比例的增加,小麦因土壤养分供应不足尤其是前期氮素供应不足导致分蘖减少^[15],进而导致产量降低,其中有机肥替代 60% 化肥的处理,小麦产量较单施化肥处理显著降低。而在玉米季,常量化肥+增施有机肥处理较单施化肥处理产量显著增加,随着有机肥中养分逐渐

释放,为玉米生长提供了更多的养分资源;与单施化肥相比,随着有机肥替代比例的增加,作物产量有降低趋势,但与单施化肥处理间没有显著差异。从周年产量来看,增施有机肥相比于单施化肥可使小麦玉米周年产量增产 6.70%。

2.1.2 水稻小麦轮作体系 施肥处理显著增加了水稻小麦轮作体系作物产量(表 4),显著增加了小麦(水稻)的有效穗数及穗粒数,但显著降低了小麦的千粒质量,对水稻千粒质量的影响不显著。

表 4 不同有机无机肥配比下稻麦轮作体系作物产量及其构成因素

Table 4 Crop yield and its components in wheat-rice rotation system under different organic fertilizer-inorganic fertilizer ratios

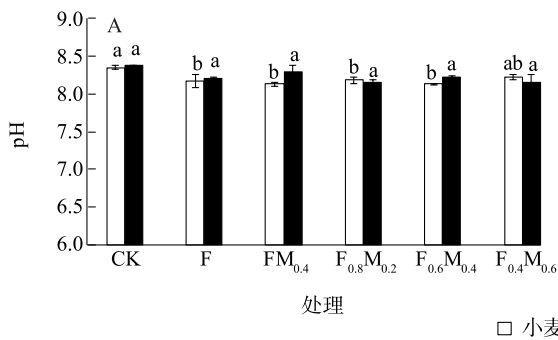
处理	小麦				水稻				周年产量 (t/hm ²)
	有效穗数 (×10 ⁴ /hm ²)	穗粒数	千粒质量 (g)	产量 (t/hm ²)	有效穗数 (×10 ⁴ /hm ²)	穗粒数	千粒质量 (g)	产量 (t/hm ²)	
CK	455.7b	19b	47.4a	2.49c	427.0b	59c	28.5a	3.25c	5.74c
F	631.7a	32a	38.0b	6.29ab	530.0a	111ab	28.7a	7.75a	14.04a
FM _{0.4}	644.0a	30a	40.3b	6.50a	538.0a	114a	28.9a	8.01a	14.51a
F _{0.8} M _{0.2}	625.0a	34a	41.3b	5.52b	540.4a	99ab	27.5a	6.49b	12.01b
F _{0.6} M _{0.4}	592.0a	29a	39.2b	6.19ab	438.6b	121a	27.4a	6.65b	12.84b
F _{0.4} M _{0.6}	574.3a	35a	42.3ab	6.21ab	561.0a	89b	28.8a	6.77b	12.98b

各处理见表 2。同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

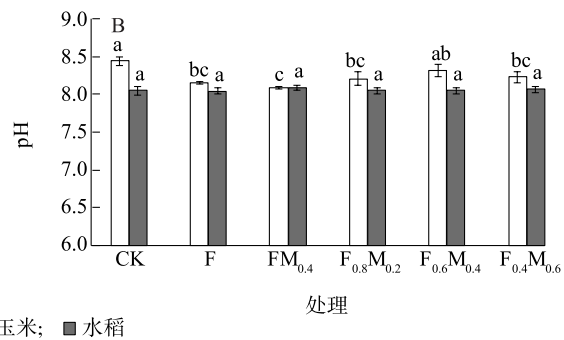
在水稻小麦轮作体系中,常量化肥+增施有机肥处理较单施化肥处理,作物产量略有增加,但未达到显著水平;不同有机肥替代比例处理与单施化肥处理相比,作物产量均有降低趋势,但差异均不显著。从小麦产量可以看出,虽然稻麦轮作试验地的基础地力稍高,但其小麦产量并没有高于小麦玉米轮作试验地,这可能与水田小麦投入的总养分略低于旱地小麦有关。从周年产量来看,增施有机肥相比于单施化肥可使小麦水稻周年产量增产 3.33%。

2.2 有机肥部分替代化肥对土壤性状的影响

2.2.1 土壤 pH 小麦玉米轮作体系小麦季,施肥降



低了土壤 pH 值,土壤 pH 的变化范围为 8.13~8.35;在玉米季,土壤 pH 值变化不显著,其变化范围为 8.16~8.37(图 1a)。水稻小麦轮作体系小麦季,施肥降低了土壤 pH 值,不同施肥处理土壤 pH 变化范围为 8.09~8.44,但是水稻季各施肥处理土壤 pH 值的差异不显著,土壤 pH 变化范围为 8.04~8.07(图 1b)。施肥后小麦季土壤 pH 降低,主要原因是施用化学氮肥,导致土壤 pH 降低^[16]。



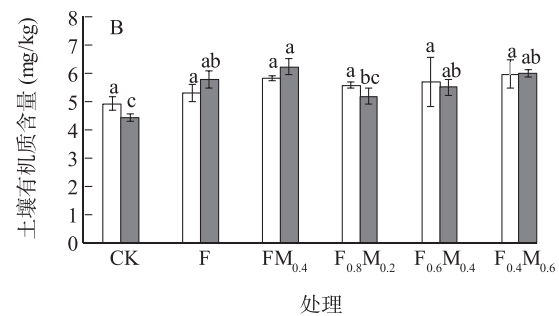
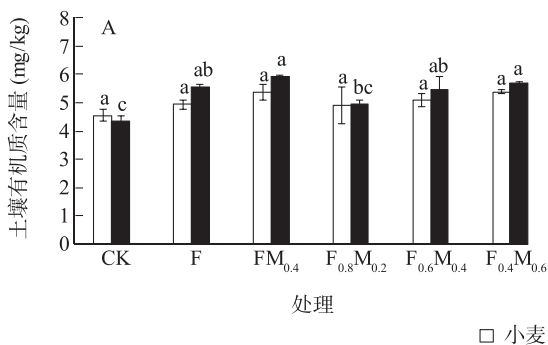
各处理见表 2。A:小麦玉米轮作;B:水稻小麦轮作。不同字母表示同种作物在不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

图 1 不同施肥处理对两种轮作体系土壤 pH 的影响

Fig.1 Effects of different fertilization treatments on soil pH in two rotation systems

2.2.2 土壤有机质、全氮、全磷含量 施肥增加了不同轮作体系土壤有机质含量(图 2)。在小麦玉米轮作体系中(图 2a),小麦季单施化肥土壤有机质含量相比于对照提升了 8.50%,而常量化肥+增施有机肥处理提升了 18.11%;NPK 总养分相同时,有机肥替代 20%、40%及 60%化肥处理的土壤有机质含

量分别较对照增加了 8.07%、11.71%和 18.40%。玉米季单施化肥土壤有机质含量相比于对照提升了 28.08%,而常量化肥+增施有机肥处理提升了 36.61%;NPK 总养分相同时,有机肥替代 20%、40%及 60%化肥处理的土壤有机质分别较对照增加了 13.71%、25.69%和 31.31%。



各处理见表 2。A 为小麦玉米轮作;B 为水稻小麦轮作。不同字母表示同种作物在不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

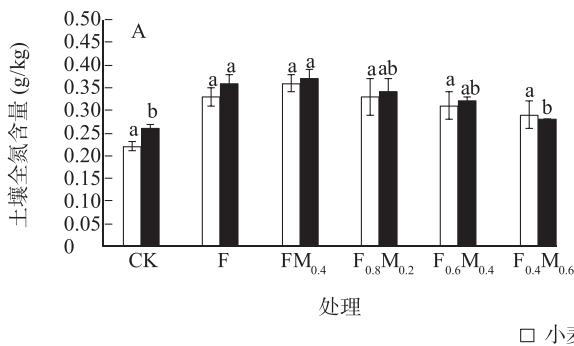
图 2 不同施肥处理对两种轮作体系土壤有机质含量的影响

Fig.2 Effects of different fertilization treatments on soil organic matter content in two rotation systems

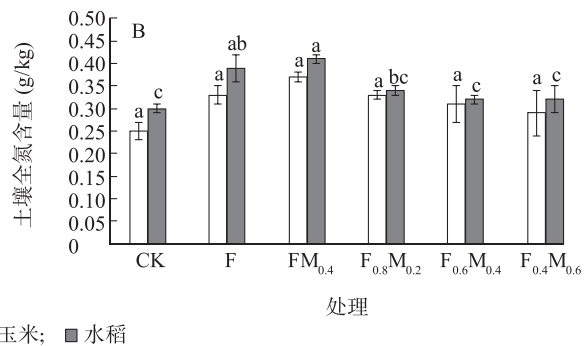
在水稻小麦轮作体系中(图 2b),小麦季单施化

肥土壤有机质含量相比于对照提升了 7.69%,而常

化肥+增施有机肥处理提升了 18.37%;NPK 总养分相同时,有机肥替代 20%、40%及 60%化肥处理的土壤有机质含量分别较对照增加了 13.15%、15.25%和 21.00%。水稻季相比于对照,单施化肥土壤有机质含量提升了 30.12%,而常量化肥+增施有机肥处理提升了 40.22%;NPK 总养分相同时,有机肥替代 20%、40%及 60%化肥处理的土壤有机质含量分别较对照增加了 16.47%、23.84%和 34.76%。



小麦玉米轮作体系中(图 3a),无论小麦季还是玉米季,常量化肥+增施有机肥处理土壤全氮含量均高于单施化肥处理,但未达到显著水平;NPK 总养分相同时,不同有机肥替代比例处理的土壤全氮含量均低于单施化肥处理,且随着有机肥替代比例的增加,土壤全氮含量逐渐降低。水稻小麦轮作体系中(图 3b),土壤全氮含量变化趋势与小麦玉米轮作体系中一致。



各处理见表 2。A 为小麦玉米轮作;B 为水稻小麦轮作。不同字母表示同种作物在不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

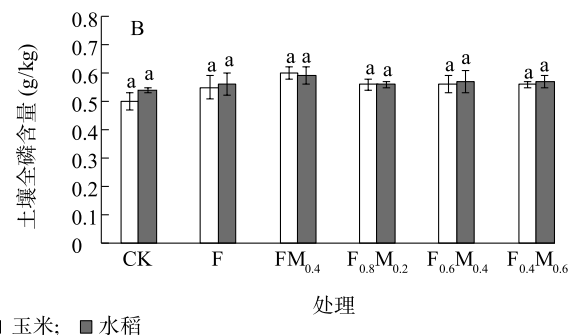
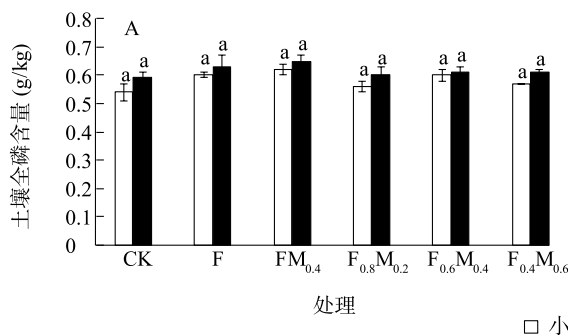
图 3 不同施肥处理对两种轮作体系土壤全氮含量的影响

Fig.3 Effects of different fertilization treatments on soil total nitrogen content in two rotation systems

无论是小麦玉米轮作体系(图 4a)还是水稻小麦轮作体系(图 4b),施肥处理对土壤全磷含量均有一定的提高作用,但不同处理间差异均不显著。常量化肥+增施有机肥处理土壤全磷含量均略高于单施化肥处理;NPK 总养分相同时,随着有机肥替代比例的增加,土壤全磷含量略有增加。

两种轮作体系中,随着有机肥替代比例的增加,土壤有机质含量均呈上升趋势,这表明投入的有机物料越多,土壤有机质的积累也越多,这与以往的研究结果^[17-18]相一致。这是因为有机物料的投入及

作物残体是土壤有机质的重要来源^[19-20]。随着有机肥投入量的增加,两种轮作体系土壤的全氮含量均有降低的趋势,而土壤全磷含量有增加趋势。随着有机肥替代比例的增加,向土壤中投入的氮素总量降低,而向土壤中投入的磷素总量在增加,这是导致土壤全氮含量降低,土壤全磷含量增加的重要原因。作物收获时带走了土壤中的氮素,而且根系和根系分泌物的产量会影响归还的有机氮量,最终导致土壤全氮含量发生了显著变化^[21]。



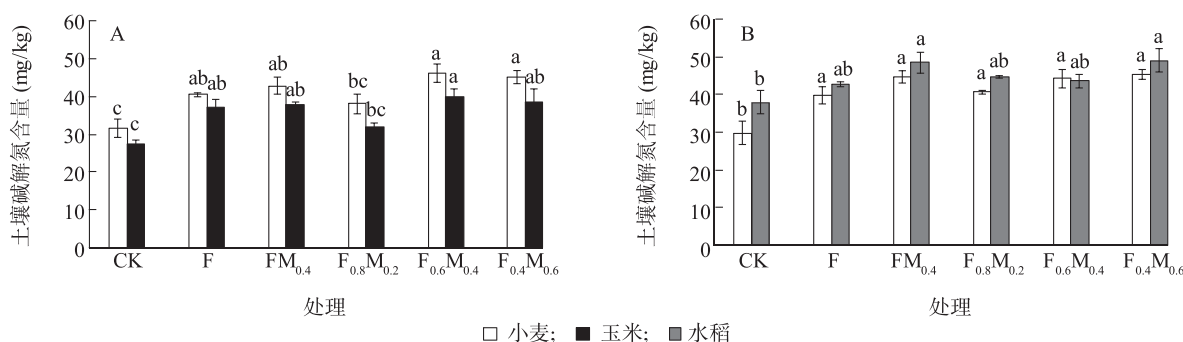
各处理见表 2。A 为小麦玉米轮作;B 为水稻小麦轮作。不同字母表示同种作物在不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

图 4 不同施肥处理对两种轮作体系土壤全磷含量的影响

Fig.4 Effects of different fertilization treatments on soil total phosphorus content in two rotation systems

2.2.3 土壤碱解氮、速效磷和速效钾含量 在小麦玉米轮作体系中(图 5a),无论小麦季还是玉米季,与单施化肥相比,增施有机肥土壤碱解氮含量均有一定的增加,但未达到显著水平。当有机肥替代 20% 化肥时,土壤碱解氮含量低于单施化肥处理,而有机肥替代 40%、60% 化肥时,土壤碱解氮含量要高

于单施化肥处理。水稻小麦轮作体系中(图 5b),常量化肥+增施有机肥比单施化肥更能促进土壤碱解氮含量的增加。NPK 总养分相同时,不同有机肥替代处理均较单施化肥处理提升了土壤碱解氮含量,且随着有机肥替代比例的增加,两季土壤的碱解氮含量均呈上升趋势。



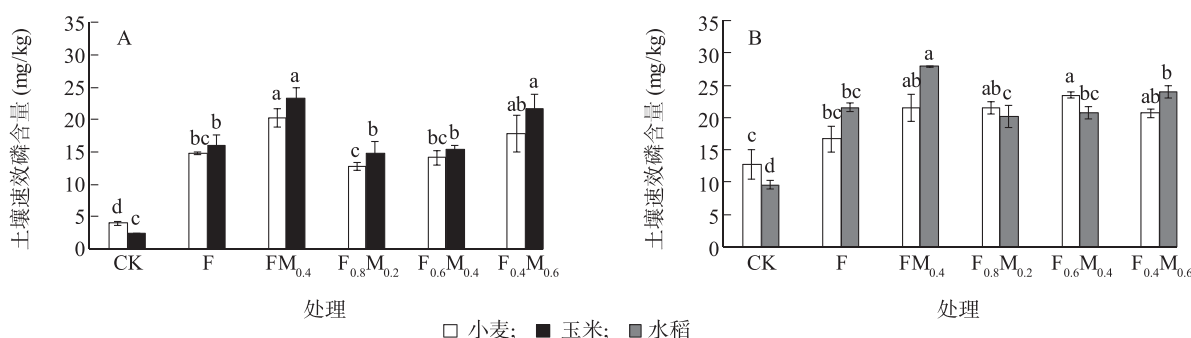
各处理见表 2。A 为小麦玉米轮作;B 为水稻小麦轮作。不同字母表示同种作物在不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 5 不同施肥处理对两种轮作体系土壤碱解氮含量的影响

Fig.5 Effects of different fertilization treatments on soil alkali-nitrogen content in two rotation systems

在水稻小麦轮作体系中(图 6a),无论小麦季还是玉米季,常量化肥+增施有机肥处理土壤速效磷含量均显著高于单施化肥处理。NPK 总养分相同时,随着有机肥替代比例的增加,两季土壤速效磷含量均呈上升趋势,有机肥替代 60% 化肥的处理对土壤速效磷含量有明显的增加作用。在水稻小麦轮作体系中(图 6b),同样以常量化肥+增施有机肥处理土壤速效磷含量高于单施化肥处理。NPK 总养分

相同时,随着有机肥替代比例的增加,小麦季土壤速效磷含量呈增加趋势,且土壤速效磷含量均较单施化肥处理高。但水稻季只有当有机肥替代较多的化肥时 ($F_{0.4}M_{0.6}$),土壤速效磷含量才高于单施化肥处理。土壤速效磷含量变异较大,可能与有机肥中含磷量 (3.16%) 较高有关,并且随着有机肥替代量的增加,土壤中磷素投入量是增加的。



各处理见表 2。A 为小麦玉米轮作;B 为水稻小麦轮作。不同字母表示同种作物在不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 6 不同施肥处理对两种轮作体系土壤速效磷含量的影响

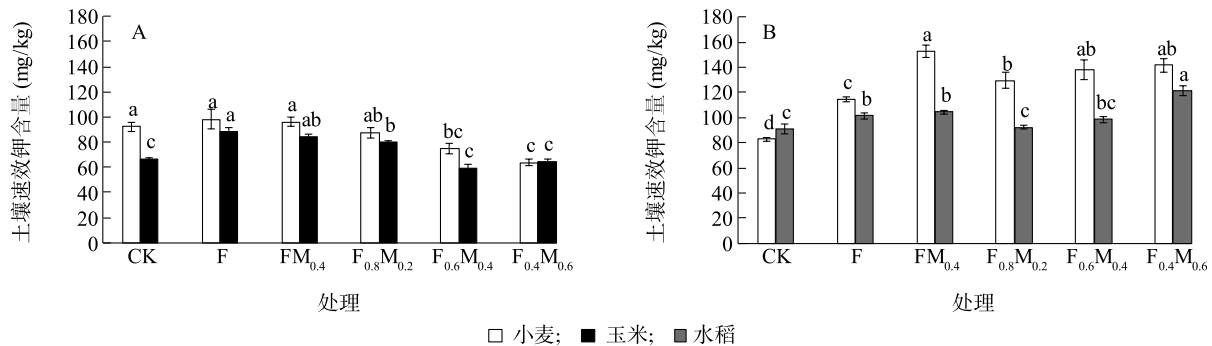
Fig.6 Effects of different fertilization treatments on soil available phosphorus content in two rotation systems

小麦玉米轮作体系中(图 7a),无论小麦季还是玉米季,常量化肥+增施有机肥处理与单施化肥处理土壤速效钾含量并未有明显变化。NPK 总养分相同时,随着有机肥替代比例的增加,土壤速效钾含

量较单施化肥处理均有不同程度的降低,且当有机肥替代 40%、60% 化肥时,土壤速效钾含量显著低于单施化肥处理。在水稻小麦轮作体系小麦季(图 7b),常量化肥+增施有机肥处理、不同比例有机肥

替代化肥处理均比单施化肥处理显著增加了土壤速效钾含量,且随着有机肥替代比例的增加,土壤速效钾含量呈上升趋势。水稻季土壤速效钾含量明显低于小麦季,常量化肥+增施有机肥相比于单施化肥

对土壤速效钾的提升作用较小。随着有机肥替代比例的增加,土壤速效钾含量呈增加趋势,且仅当有机肥替代 60% 化肥时土壤速效钾含量高于单施化肥处理。



各处理见表 2。A 为小麦玉米轮作;B 为水稻小麦轮作。不同字母表示同种作物在不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 7 不同施肥处理对两种轮作体系土壤速效钾含量的影响

Fig.7 Effects of different fertilization treatments on soil available potassium content in two rotation systems

两种轮作体系中,随着有机肥替代比例的增加,土壤中碱解氮及速效磷含量均有上升趋势,水稻小麦轮作体系土壤速效钾含量也呈上升趋势。已有研究表明,土壤速效磷、速效钾含量与配施有机肥的用量呈正相关^[6,22-23]。有机肥替代化肥并未提高小麦玉米轮作体系土壤速效钾的含量,这可能是因为小麦对钾素的需求量较大,而有机肥替代了氯化钾的用量,并且有机肥中钾素释放较为缓慢,玉米季不施钾肥也会加速土壤钾素的消耗。水稻季土壤速效钾含量较小麦季减少,这主要是由于水稻对土壤钾素的过度消耗。

综合作物产量和土壤养分变化可以看出,有机肥部分替代化肥虽然可以提高土壤肥力,但对产量有一定的降低作用。这可能是因为试验中氮肥的用

量大幅度低于农民习惯施肥的用量。

2.3 土壤养分与作物产量的相关关系

小麦玉米和水稻小麦轮作体系的作物产量与当季土壤有机质及养分含量间的皮尔逊相关性分析结果(表 5)表明:小麦玉米轮作体系中,小麦产量仅与土壤全氮、碱解氮以及速效磷含量呈显著或极显著正相关关系。玉米产量与土壤全磷、速效钾含量的相关性不显著,与土壤有机质及其他养分含量呈显著或极显著正相关关系。水稻小麦轮作体系中,小麦产量与土壤有机质含量无显著相关关系,但与各种养分之间均存在显著或极显著的正相关关系。水稻产量与土壤有机质、全氮、碱解氮及速效磷含量呈显著或极显著正相关关系,与土壤全磷、速效钾含量的相关性未达到显著水平。

表 5 作物产量与土壤养分之间的相关性 ($n=18$)

Table 5 Correlation between crop yield and soil nutrients ($n=18$)

轮作体系	项目	有机质含量	全氮含量	全磷含量	碱解氮含量	速效磷含量	速效钾含量
小麦玉米轮作	小麦产量	0.379	0.646 *	0.455	0.528 *	0.747 **	0.075
	玉米产量	0.823 **	0.634 *	0.384	0.696 **	0.883 **	0.396
水稻小麦轮作	小麦产量	0.511	0.534 *	0.647 *	0.883 **	0.669 **	0.820 **
	水稻产量	0.803 **	0.593 *	0.503	0.650 **	0.903 **	0.450

** 表示相关性在 0.01 水平上显著(双尾),* 表示相关性在 0.05 水平上显著(双尾)。

在两种轮作体系的前茬,由于基础地力较低,有机肥中的养分并不能及时满足作物的需求^[4],作物产量与土壤速效养分含量呈显著正相关关系^[24],更

依赖于化学肥料的投入;而到了后茬,土壤有机质与作物产量均呈正相关关系,表明土壤有机质的提升对作物产量有一定的促进作用^[25]。

3 结 论

在低肥力的小麦玉米轮作体系中,60%的有机肥替代化肥导致小麦较大幅度减产,而在肥力稍高的水稻小麦轮作体系中,虽然不同比例有机肥替代化肥也导致作物产量减少,但影响不显著。本研究并未发现有机肥替代化肥对作物产量有提升作用,但试验结果均表明有机肥替代化肥明显改善了土壤养分状况。因此低肥力土壤不宜采用有机肥大量替代的方式,应当考虑在常规施肥基础上增施有机肥。

参考文献:

- [1] 苏璧耀. 江苏省黄河故道地区土壤的机械组成和化学性质[J]. 南京师大学报(自然科学版), 1986(4): 91-97.
- [2] 黄以柱. 黄河故道区域土地资源开发利用研究[J]. 自然杂志, 1995, 17(4): 211-215.
- [3] 吕凤莲, 侯苗苗, 张弘毅, 等. 壤土冬小麦-夏玉米轮作体系有机肥替代化肥比例研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 22-32.
- [4] 温延臣, 张曰东, 袁亮, 等. 商品有机肥替代化肥对作物产量和土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(11): 2136-2142.
- [5] 谢军, 赵亚南, 陈轩敬, 等. 有机肥氮替代化肥氮提高玉米产量和氮素吸收利用效率[J]. 中国农业科学, 2016, 49(20): 3934-3943.
- [6] 邢鹏飞, 高圣超, 马鸣超, 等. 有机肥替代部分无机肥对华北农田土壤理化特性、酶活性及作物产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(3): 98-104.
- [7] 李占, 丁娜, 郭立月, 等. 有机肥和化肥不同比例配施对冬小麦-夏玉米生长、产量和品质的影响[J]. 山东农业科学, 2013, 45(7): 71-77.
- [8] 欧杨虹, 徐阳春, 沈其荣. 有机氮部分替代无机氮对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. 江苏农业学报, 2009, 25(1): 106-111.
- [9] 李超, 刘思超, 杨晶, 等. 不同有机肥部分替代基施化学氮肥对双季稻生长发育及产量的影响[J]. 南方农业学报, 2018, 49(6): 1102-1110.
- [10] 赵军, 李勇, 冉炜, 等. 有机肥替代部分化肥对稻麦轮作系统产量及土壤微生物区系的影响[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(4): 594-602.
- [11] 林治安, 赵秉强, 袁亮, 等. 长期定位施肥对土壤养分与作物产量的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2809-2819.
- [12] 刘杏兰, 高宗, 刘存寿, 等. 有机-无机肥配施的增产效应及对土壤肥力影响的定位研究[J]. 土壤学报, 1996, 33(2): 138-147.
- [13] 蔡秋华, 赵正雄, 左进香, 等. 有机肥配施减量化肥对烤烟青枯病及其根际微生物的影响[J]. 烟草科技, 2018, 51(11): 20-27.
- [14] 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, 2000: 12-14.
- [15] 张殿顺, 董翔云, 刘树庆. 不同施氮水平对春小麦生长发育及其氮素代谢指标的影响[J]. 华北农学报, 2006, 21(S2): 42-45.
- [16] 姬钢, 徐明岗, 文石林, 等. 不同植被类型下红壤 pH 和交换性酸的剖面特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2639-2645.
- [17] GUO L Y, WU G L, LI Y, et al. Effects of cattle manure compost combined with chemical fertilizer on topsoil organic matter, bulk density and earthworm activity in a wheat-maize rotation system in Eastern China[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 156(2): 140-147.
- [18] ZHANG W J, XU M G, WANG X J, et al. Effects of organic amendments on soil carbon sequestration in paddy fields of subtropical China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2012, 12(4): 457-470.
- [19] BENBI D K, BISWAS C R, BAWA S S, et al. Influence of farm-yard manure, inorganic fertilizers and weed control practices on some soil physical properties in a long-term experiment[J]. Soil Use and Management, 1998, 14(1): 52-54.
- [20] 汪景宽, 徐英德, 丁凡, 等. 植物残体向土壤有机质转化过程及其稳定机制的研究进展[J]. 土壤学报, 2019, 56(3): 1-13.
- [21] 刘恩科, 赵秉强, 胡昌浩, 等. 长期施氮、磷、钾化肥对玉米产量及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 789-794.
- [22] 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.
- [23] 聂佳如. 有机肥与化肥配施对土壤养分的影响研究[J]. 环境科学与管理, 2016, 41(9): 52-55.
- [24] NIE S W, HUANG S M, ZHANG S Q, et al. Effects of various fertilizations on soil organic carbon and total nitrogen in winter wheat-summer corn rotation in the Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. Journal of Food, Agriculture & Environment, 2012, 10(1): 567-572.
- [25] 孟凡乔, 吴文良, 辛德惠. 高产农田土壤有机质、养分的变化规律与作物产量的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(4): 370-374.

(责任编辑:张震林)