

韩 上, 武 际, 张祥明, 等. 增施有机肥对稻田亚耕层土壤的培肥效应[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(4): 334-341.

HAN Shang, WU Ji, ZHANG Xiang-ming, et al. Effects of increasing application of organic fertilizer on subsoil fertility betterment in paddy field[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(4): 334-341.

增施有机肥对稻田亚耕层土壤的培肥效应

韩 上^{1,2}, 武 际^{1,2*}, 张祥明^{1,2}, 胡 鹏³, 杨友兵³, 李 敏^{1,2}, 王 慧^{1,2}, 唐 杉^{1,2}

(1.安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 合肥 230031; 2.养分循环与资源环境安徽省重点实验室, 合肥 230031; 3.巢湖市农业技术推广中心, 合肥 238000)

摘 要:通过大田试验,研究在施用化肥的基础上增施有机肥对耕层(0~15 cm)和亚耕层(15~30 cm)土壤养分含量及水稻产量的影响。结果表明,与单施化肥相比,增施牛粪和饼肥明显提升了土壤有机质、全氮和有效磷含量:在 0~15 cm 土层,增幅分别为 32.17% 和 10.96%、30.69% 和 6.56%、131.48% 和 31.74%;在 15~30 cm 土层,增幅分别为 10.72% 和 4.77%、6.72% 和 3.64%、62.69% 和 11.40%。增施有机肥后水稻产量增加、年度间稳定性提升,其中增施牛粪后产量增加 7.98%,变异系数降低 3.90 个百分点,增施饼肥后产量增加 7.72%,变异系数降低 3.20 个百分点。水稻产量和土壤各养分指标均存在一定程度的正相关,其中在亚耕层产量与有机质、全氮、有效磷的相关系数均高于耕层。耕层和亚耕层土壤有机质、全氮和有效磷含量极显著($P<0.01$)影响水稻产量的稳定性。综上,增施有机肥在提高耕层和亚耕层土壤养分含量、水稻产量及其稳定性上均有较好效果,耕层和亚耕层土壤养分状况对水稻产量及其稳定性均有显著影响,生产上要重视对亚耕层土壤的培肥。

关键词:有机培肥;土壤养分;耕层;亚耕层;产量

中图分类号:S141

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2018)04-0334-08

doi: 10.13254/j.jare.2017.0319

Effects of increasing application of organic fertilizer on subsoil fertility betterment in paddy field

HAN Shang^{1,2}, WU Ji^{1,2*}, ZHANG Xiang-ming^{1,2}, HU Peng³, YANG You-bing³, LI Min^{1,2}, WANG Hui^{1,2}, TANG Shan^{1,2}

(1. Soil and Fertilizer Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China; 2. Anhui Provincial Key Laboratory of Nutrient Recycling, Resources & Environment, Hefei 230031, China; 3. The Agricultural Technology Extension Center of Chaohu City, Hefei 238000, China)

Abstract: Field trials were conducted to study the effect of soil nutrient contents in topsoil (0~15 cm) and subsoil (15~30 cm) and rice yield on the basis of the application of chemical fertilizer adding organic fertilizer. The results showed that the increasing application of cattle manure and cake fertilizer obviously improved the contents of organic matter, total nitrogen and available phosphorus in soil, with increase by 32.17% and 10.96%, 30.69% and 6.56%, 131.48% and 31.74% in topsoil, while improved by 10.72% and 4.77%, 6.72% and 3.64%, 62.69% and 11.40% in subsoil, respectively compared with the single fertilizer treatment. The treatments of increasing application of organic fertilizers increased rice yield and inter-annual stability. The yield of the increasing application of cattle manure and cake fertilizer treatments increased by 7.98% and 7.72%, while the coefficient of variation decreased by 3.90% and 3.20%. There were positive correlations of a certain extent between the rice yield and the soil nutrient indexes. The correlation coefficients of the yield with soil organic matter, total nitrogen and available phosphorus in subsoil was higher than those in topsoil. The contents of soil organic matter, total nitrogen and available phosphorus presented extremely significant ($P<0.01$) correlations with rice yield stability in topsoil and subsoil. In summary, increasing application of organic fertilizer had good effects on soil nutrient contents, rice yield and its stability. The emphasis of fertility betterment should be put on subsoil in production because the nutrient contents in topsoil and subsoil both could present an appreciable effect on rice yield and its stability.

Keywords: organic fertilizer; soil nutrient; topsoil; subsoil; yield

收稿日期:2017-12-11 录用日期:2018-02-06

基金项目:安徽省重点研究与开发计划项目(1704e1002237);公益性行业科研专项(201503122);安徽省农业科学院科研项目(18C1020);安徽省农业科学院院长青年创新基金项目(16B1019)

作者简介:韩 上(1989—),男,河南信阳人,硕士,助理研究员,主要从事植物营养与作物施肥技术研究。E-mail:hs0059@126.com

*通信作者:武 际 E-mail:wuji338@163.com

水稻是我国最重要的粮食作物之一,2015 年全国播种面积和产量仅次于玉米,占粮食作物总播种面积和总产量的 26.66%和 33.51%^[1]。随着超级稻项目的启动,1996 年我国水稻单产已超过 6 211.5 kg·hm⁻²,至 2015 年达 6 892.5 kg·hm⁻²,增产率为 10.96%^[2]。在资源环境约束日趋强化的大背景下,如何继续保持水稻稳产高产对我国粮食安全意义重大^[3]。水稻单产高低又和土壤肥力水平密切相关^[4],而合理进行土壤培肥是维持和提升土壤肥力水平的最主要措施^[5-6],也是作物高产优质的重要保证^[7-8]。近年来,水稻每 667 m²产量达到 700 kg 左右的高产田块不断出现,但重演性较低。究其原因,除了受品种生产潜力、栽培技术和气候等因素制约外,土壤肥力状况是非常关键的因素。在提升耕地土壤肥力的众多培肥措施中,最有效的途径就是有机物料或者有机肥料的投入,即土壤有机培肥^[9-10]。关于土壤有机培肥对土壤肥力水平影响的研究,前人在土壤物理、化学、生物学性质方面做了大量工作^[11-16],但大部分研究集中在对土壤耕层的影响^[17-19],对土壤亚耕层的培肥效果鲜见报道^[20]。土壤亚耕层紧接在耕作层之下,亚耕层土壤肥力的改善对于构建肥沃耕层、提升农田基础地力意义重大。为此,本团队开展有机肥增量施用对土壤耕层、亚耕层土壤养分含量和水稻产量的影响研究,以期为进一步研究耕地地力提升和作物高产稳产提供科学依据。

1.1 试验概况

试验于 2012 年 5 月至 2016 年 10 月,在安徽省巢湖市中埠镇进行。试验区为当地高产田块,水稻-小麦轮作。供试土壤为水稻土,试验开始前测定耕层厚度为 15 cm,基本理化性质见表 1。供试水稻品种为新两优 343,育苗移栽,栽插密度为 25 万穴·hm⁻²。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the soil

土层/cm	pH	有机质/ g·kg ⁻¹	全氮/ g·kg ⁻¹	有效磷/ mg·kg ⁻¹	速效钾/ mg·kg ⁻¹
0~15	6.81	36.39	1.86	18.32	146.26
15~30	7.05	21.08	1.18	7.89	111.12

1.2 试验设计

试验设 4 个处理:(1) CK,不施用化肥和有机肥;(2)单施化肥,N 肥用量 210 kg·hm⁻²,氮肥运筹 5:3:2;(3)增施饼肥,N 肥用量 210 kg·hm⁻²,氮肥运筹 4:3:3,施用饼肥 2250 kg·hm⁻²;(4)增施牛粪,N 肥用量 210

kg·hm⁻²,氮肥运筹 4:3:3,施用牛粪 30 000 kg·hm⁻²。每个处理 3 次重复,小区面积 36 m²,随机区组排列。每季作物收获后将地上部秸秆全部移出小区,留茬高度小于 10 cm;水稻移栽前以小区为单位撒施部分氮肥、全部磷钾肥和有机肥,人工翻耕后整细耙平,翻耕深度 25 cm 左右。各处理磷钾肥用量均为 P₂O₅ 60 kg·hm⁻²,K₂O 90 kg·hm⁻²,氮肥在水稻分蘖期和抽穗期追施。其他管理措施在水稻生育期内保持一致。小麦季各处理施肥和其他管理措施均保持一致,N、P₂O₅和 K₂O 用量分别为 180、60 kg·hm⁻²和 75 kg·hm⁻²。供试肥料分别为尿素(含 N 46%),过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%),氯化钾(含 K₂O 60%)。饼肥平均养分含量为 N 5.95%、P 0.61%、K 1.10%;牛粪来源于周边中等规模的标准化畜禽养殖场,平均养分含量为 N 0.35%、P 0.21%、K 0.27%。

1.3 测定项目与方法

在 2012 年水稻基肥施用前,分层采集耕层(0~15 cm)和亚耕层(15~30 cm)土样,作为本研究基础土壤,采用常规方法测定基本理化性质^[21]。

在水稻成熟期,按小区实收水稻籽粒计重。2016 年 10 月水稻收获时,分层采集 0~15 cm 和 15~30 cm 土层土样,采用常规方法测定土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾含量。

水稻产量稳定性以统计学上的变异系数(CV)表示。变异系数可以衡量同一品种作物不同年份平均产量之间的变异程度^[22],CV 越大说明产量稳定性越低。

计算公式为:CV=σ/Y

式中:σ 为标准差,kg·hm⁻²;Y 为平均产量,kg·hm⁻²。

1.4 数据分析

用 Excel 2010 进行数据分析和图表处理,用 SPSS 19.0 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对土壤有机质和全氮含量的影响

不同处理对不同土层土壤有机质和全氮含量的影响见表 2。5 季水稻收获后,施肥各处理在耕层(0~15 cm)和亚耕层(15~30 cm)土壤有机质含量均高于不施肥处理,其中以增施牛粪处理最高。与基础土壤相比,不施化肥处理在 2 个土层有机质含量均有一定程度下降,其中在亚耕层降幅更大,达到 4.39%;单施化肥处理有机质含量没有明显变化;增施牛粪和饼肥处理在耕层和亚耕层均有明显提升,提升幅度分别为 33.20%、11.82%和 12.84%、6.77%。单施化肥、增施饼

肥和增施牛粪处理的耕层土壤全氮含量与不施肥处理相比,分别提高了 0.10、0.22 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 0.67 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,增幅为 5.65%、12.57% 和 38.07%;亚耕层分别提高了 0.07、0.11 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 0.14 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,增幅为 6.08%、9.94% 和 13.21%;与基础土壤相比,也均有不同程度提升。与单施化肥处理相比,增施饼肥处理的土壤全氮含量在 2 个土层均有一定提升,但均未达到显著水平;增施牛粪处理显著提升了耕层土壤全氮含量,对亚耕层全氮含量也有一定提升,增幅分别为 30.69% 和 6.72%。综上,不施肥使土壤有机质和全氮含量有下降的趋势;单施化肥只能维持土壤有机质和全氮含量不降低;在施用化肥的基础上增施有机肥,土壤有机质和全氮含量在耕层和亚耕层均会明显升高。

2.2 不同施肥处理对土壤有效磷和速效钾含量的影响

施肥各处理在 2 个土层土壤有效磷含量均显著高于不施肥处理(表 3)。不施肥处理明显降低了耕层

和亚耕层土壤有效磷含量,降幅分别达到了 26.54% 和 25.58%。单施化肥土壤有效磷含量在耕层和亚耕层也有一定程度降低,降幅分别为 7.21% 和 3.60%。增施有机肥处理增加了土壤有效磷含量,耕层增施牛粪和增施饼肥处理分别提高 114.78% 和 22.23%,在亚耕层也分别提高了 56.84% 和 7.39%。同一处理耕层土壤有效磷含量是亚耕层的 2.23~3.18 倍,有效磷含量在不同土层中分布差异明显。与有效磷含量相比,各处理对土壤速效钾含量的影响相对较小。不施肥处理降低了耕层土壤速效钾含量,降幅为 6.53%,对亚耕层速效钾含量没有明显影响。单施化肥处理速效钾含量没有明显变化。增施有机肥处理显著增加了耕层土壤速效钾含量,其中增施牛粪处理增幅更大;在亚耕层,增施饼肥处理土壤速效钾含量与单施化肥处理接近,增施牛粪处理仍显著提高了土壤速效钾含量,增幅超过 10%。

表 2 施肥对土壤有机质和全氮含量的影响

Table 2 Effect of fertilizers application on the contents of soil organic matter and total nitrogen

土层	处理	有机质/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	有机质与基础土壤相比/%	全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮与基础土壤相比/%
0~15 cm	基础土壤	36.39	—	1.86	—
	CK	35.99±0.73c	-1.11	1.78±0.03c	-4.41
	单施化肥	36.67±1.45c	0.78	1.88±0.07bc	0.99
	增施饼肥	40.69±1.80b	11.82	2.00±0.06b	7.61
	增施牛粪	48.47±1.48a	33.20	2.45±0.05a	31.98
15~30 cm	基础土壤	21.08	—	1.18	—
	CK	20.15±0.83c	-4.39	1.12±0.02b	-5.32
	单施化肥	21.48±1.02bc	1.91	1.19±0.04ab	0.43
	增施饼肥	22.51±0.72ab	6.77	1.23±0.09ab	4.09
	增施牛粪	23.79±0.74a	12.84	1.26±0.06a	7.18

注:同列数字后不同字母表示差异达 0.05 显著水平。下同。

表 3 施肥对土壤有效磷和速效钾含量的影响

Table 3 Effect of fertilizers application on the contents of soil available phosphorus and available potassium

土层	处理	有效磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效磷与基础土壤相比/%	速效钾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾与基础土壤相比/%
0~15 cm	基础土壤	18.32	—	146.26	—
	CK	13.46±0.73d	-26.54	136.71±10.26c	-6.53
	单施化肥	17.00±0.71c	-7.21	145.85±18.29c	-0.28
	增施饼肥	22.39±1.98b	22.23	166.07±27.11b	13.54
	增施牛粪	39.35±3.73a	114.78	185.41±7.88a	26.77
15~30 cm	基础土壤	7.89	—	111.12	—
	CK	5.87±0.88c	-25.58	110.96±5.98b	-0.15
	单施化肥	7.61±0.80b	-3.60	114.04±7.32b	2.62
	增施饼肥	8.47±0.63b	7.39	111.63±5.93b	0.46
	增施牛粪	12.37±0.60a	56.84	126.30±2.19a	13.66

2.3 不同施肥处理对水稻产量及其稳定性的影响

施肥各处理显著提高了水稻产量及其稳定性(表 4)。与 CK 相比,单施化肥处理各年度的增产率在 28.59%~72.82%,增施饼肥处理为 40.01%~82.91%,增施牛粪处理为 37.89%~83.16%。与单施化肥处理相比,增施牛粪或饼肥处理在各年度均有一定的增产效果。其中增施牛粪处理 2012—2015 年的增产效果均达到了显著水平,增产率为 7.23%~17.35%;增施饼肥处理在 2012、2014 和 2015 年的增产效果达到了显著水平,在 2013 年产量也有一定提升,增产率为 4.48%;2016 年各施肥处理产量比较接近。CK 处理的水稻产量整体上随着试验的进行有降低的趋势,2015 年的产量只有 2012 年的 71.05%,2016 年也只有 77.47%;施肥各处理的产量除 2015 年整体相对低外,年度间无明显变化规律。2015 年产量相对较低可能与夏季持续低温寡照有关。综合 5 季产量数据来看,与 CK 相比,施肥对水稻产量的提升幅度为 53.51%~65.77%,变异系数降低 4.57~8.47 个百分点。增施牛粪和饼肥处理的产量分别达到了 10 640 kg·hm⁻² 和 10 614 kg·hm⁻²,均超过了 10 500 kg·hm⁻²,二者产量无明显差异。与单施化肥处理相比,增施牛粪和饼肥处理分别增产 7.98%和 7.72%。同时增施牛粪和饼肥处理的变异系数均在 6%以下,明显低于单施化肥和不施肥处理。

2.4 土壤化学性质与水稻产量的相关性分析

不同深度土层土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾含量和水稻产量的相关分析结果见表 5。总的来看,水稻产量和不同土层土壤各养分含量均呈一定程度的正相关,各养分含量间也均呈显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)的正相关。耕层的水稻产量和土壤各养分含量呈显著正相关,土壤有机质和有效磷含量与其他各养分含量间均呈极显著($P<0.01$)正相关。亚耕层的水稻产量与土壤有机质含量相关性最高,达到了极显著($P<0.01$)水平;与全氮、有效磷含量的相关性也均达到显著水平;除土壤速效钾外,与土壤有机质、全氮和有效磷含量的相关系数均高于耕层对应指标。综上所述,除速效钾外,水稻产量与其他土壤养分含量的相关性在亚耕层更高一些;土壤有机质、有效磷与其他土壤养分含量在耕层和亚耕层均呈极显著($P<0.01$)正相关。

进一步对水稻产量变异系数和各养分含量的相关性进行分析(表 6),结果表明,变异系数和不同土层土壤各养分含量均呈一定程度的负相关。在耕层,产量的变异系数与有机质、全氮、有效磷、速效钾含量均呈极显著($P<0.01$)负相关。在亚耕层,产量变异系数与土壤有机质、全氮和有效磷含量呈极显著($P<0.01$)负相关。说明耕层各养分含量对水稻产量稳定性均有极显著影响;亚耕层土壤有机质含量是水稻产

表 4 施肥对水稻产量及其变异系数的影响
Table 4 Effect of fertilizers application on rice yield and coefficient of variation

处理	水稻产量/kg·hm ⁻²						变异系数/%
	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	5 年平均	
CK	7870c	6384c	6151c	5592c	6097b	6419b	13.41a
单施化肥	10 120b	9801b	10 430b	8381b	10 537a	9854a	8.85b
增施饼肥	11 019a	10 240ab	11 251a	9776a	10 785a	10 614a	5.65c
增施牛粪	10 852a	10 514a	11 266a	9835a	10 734a	10 640a	4.95c

表 5 土壤养分含量与水稻产量的相关性
Table 5 The correlation between soil nutrient contents and rice yield

相关系数	0~15 cm					15~30 cm				
	Y	X1	X2	X3	X4	Y	X1	X2	X3	X4
Y	1.000					1.000				
X1	0.618*	1.000				0.781**	1.000			
X2	0.620*	0.939**	1.000			0.659*	0.865**	1.000		
X3	0.641*	0.970**	0.984**	1.000		0.704*	0.896**	0.765**	1.000	
X4	0.590*	0.826**	0.689*	0.714**	1.000	0.301	0.638**	0.615*	0.818**	1.000

注:Y 为 5 季水稻平均产量,X1 为有机质含量,X2 为全氮含量,X3 为有效磷含量,X4 为速效钾含量;* 表示 $P<0.05$,** 表示 $P<0.01$ 。下同。

表 6 土壤养分含量与水稻产量变异系数的相关性
Table 6 The correlation between soil nutrient contents and coefficient of variance of rice yield

相关系数	变异系数	
	0~15 cm	15~30 cm
X1	-0.762**	-0.807**
X2	-0.773**	-0.720**
X3	-0.772**	-0.793**
X4	-0.724**	-0.458

量年度间变异的最主要影响因素,土壤有效磷和全氮含量次之。

3 讨论

耕地是农业生产中最基本和最重要的生产资料,但长期重用轻养的生产方式和以旋耕为主的耕作措施会使土壤耕层变浅、理化性质变劣^[23],进而导致耕地土壤肥力下降、作物产量降低^[24-25]。本研究开始前,供试田块所在区域水稻每 667 m² 产量常年在 600~650 kg,但因长期旋耕,耕层厚度只有 15 cm。而作物生长发育所需要的大部分养分和水分都来自于土壤耕层^[26]。如何培肥亚耕层土壤,使之成为耕层的一部分,实现肥沃耕层构建的目标将是土壤肥料学科的研究重点。本研究发现,与单施化肥相比,增施有机肥能更好地培肥亚耕层土壤。以增施牛粪为例,土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾含量分别提高了 10.72%、6.72%、62.69%和 10.75%。培肥后的亚耕层土壤养分状况明显改善,与单施化肥处理耕层的养分差距进一步减小,随着继续增施有机肥,耕地地力应该会持续提升。

耕层是否肥沃与土壤有机质和大量养分元素的含量密切相关,通常肥沃的土壤其各项养分指标也整体较高^[27]。长期的研究表明,有机肥料和无机肥料配合施用可以明显改善土壤养分状况^[28-30]。曾骏等^[31]利用 18 年的长期定位试验,研究得出化肥和有机肥长期配合施用可以显著提高 0~7.5、7.5~15 cm 和 15~30 cm 土层土壤有机质含量,而长期单施化肥对各土层土壤有机质含量没有显著影响。李文军等^[20]发现化肥均衡施用配施有机肥显著促进 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤全氮含量及储量的增加,同时该效应随土层加深而明显减弱。本研究也发现,在施用化肥的基础上增施牛粪或者饼肥不仅能明显提升耕层土壤有机质和全氮含量,对亚耕层有机质和全氮含量也有较好提升效果。其中土壤有机质含量在耕层(0~15 cm)的

提升幅度分别为 33.20%、11.82%,全氮的提升幅度分别为 31.98%、7.61%;在亚耕层(15~30 cm)分别为 12.84%、6.77%和 7.18%、4.09%。而连续 5 年单施化肥后土壤有机质和全氮含量在 0~15 cm 和 15~30 cm 土层均没有明显提高。单施化肥的效果远不及化肥和有机肥配合施用,这应该是因为长期无机氮肥的投入降低了土壤 C/N 比,加速了土壤中原有有机质的分解^[31-32],而有机肥本身含有大量的微生物和有机碳,化肥和有机肥配合施用时土壤的有机质含量通过矿化作用和腐殖化作用得到显著增加^[33]。

侯红乾等^[34]研究表明,无论单施化肥还是化肥有机肥配施都可以较大幅度提高耕层土壤有效磷和速效钾含量;与单施化肥相比,化肥有机肥配施对土壤有效磷的提升效果更明显,对土壤速效钾的影响相对较小。本研究结果表明,单施化肥并不能提高土壤有效磷含量;而增施有机肥显著提高了土壤有效磷含量,耕层和亚耕层分别提高了 22.23%~114.78%和 7.39%~56.84%,其中增施牛粪处理提升效果更明显。单施化肥的土壤速效钾含量在耕层和亚耕层均没有明显变化;增施有机肥明显提高了耕层土壤速效钾含量,增幅在 13.54%~26.77%,增施牛粪对亚耕层土壤速效钾含量也有明显提升。增施牛粪或饼肥对土壤有效磷和速效钾的提升效果好于单施化肥的主要原因可能是因为单施化肥主要是通过增加土壤速效养分含量来提高土壤供肥强度,施用有机肥主要是通过改善土壤养分库容来提高土壤供肥容量,二者配合施用既可以增加土壤缓冲能力又可以维持土壤较好的无机养分供应能力^[35-36]。综合来看,与基础土壤相比,连续 5 年单施化肥除了使耕层土壤有效磷下降 1.32 mg·kg⁻¹,降幅达 7.21%外,土壤有机质、全氮和速效钾含量在耕层和亚耕层均没有明显升高或降低。化学肥料合理施用时,单施化肥在一定程度上也可以维持土壤养分水平。

作物产量是土壤质量的综合反映,也是土壤培肥的一个重要指标^[36]。本研究单施化肥处理连续 5 季的水稻每 667 m² 平均产量达到 657 kg。如何在保证水稻高产的同时,通过合理的培肥措施维持和提高土壤肥力水平,构建肥沃耕层、实现“藏粮于地”,达到水稻持续高产稳产的目标,是本研究的最终目的。研究发现,有机无机配施不仅能增加作物产量还能提高产量的稳定性^[37-38]。本试验条件下,与单施化肥相比,增施有机肥后水稻产量连续 5 季均有不同程度的提高,其中增施牛粪处理的平均增幅为 7.98%,增施饼肥的为

7.72%。在 2015 年水稻产量整体较低的情况下,增施有机肥的增产效果更为明显。同时,增施有机肥处理的产量变异系数由单施化肥的 8.85% 下降到 6% 以下,说明增施有机肥后水稻产量年度间的稳定性增加。增施有机肥在提高水稻产量的同时,对耕层和亚耕层土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾含量均具有较好的提升效果。相关分析表明,水稻产量与不同土层土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾含量均呈一定程度的正相关,其中与有机质、全氮、有效磷在亚耕层的相关系数均高于耕层对应指标。同时,耕层和亚耕层土壤有机质、全氮和有效磷含量均极显著影响水稻产量的稳定性。上述分析表明,除耕层土壤外,亚耕层土壤养分状况对水稻产量及其稳定性也有较大影响,生产上为获得作物高产稳产进行土壤培肥时,不仅要关注耕层,更要重视对亚耕层土壤的培育。

4 结论

(1) 5 年的试验结果表明,在合理施用化肥的基础上增施牛粪或者饼肥均能明显提升耕层(0~15 cm)和亚耕层(15~30 cm)土壤有机质、全氮和有效磷含量。

(2) 与单施化肥相比,增施有机肥提高了水稻产量及其稳定性,其中增施牛粪后产量增加 7.98%,变异系数降低 3.90 个百分点;增施饼肥后产量增加 7.72%,变异系数降低 3.20 个百分点。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. Chinese statistical yearbook 2016[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.
- [2] 程式华. 中国超级稻育种技术创新与应用[J]. 中国农业科学, 2016, 49(2): 205-206.
CHENG Shi-hua. Breeding technique innovation and application of China's super rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(2): 205-206.
- [3] 鲁艳红, 廖育林, 聂 军, 等. 连续施肥对不同肥力稻田土壤基础地力和土壤养分变化的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(21): 4169-4178.
LU Yan-hong, LIAO Yu-lin, NIE Jun, et al. Effect of successive fertilization on dynamics of basic soil productivity and soil nutrients in double cropping paddy soils with different fertilities[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(21): 4169-4178.
- [4] 李建军, 辛景树, 张会民, 等. 长江中下游粮食主产区 25 年来稻田土壤养分演变特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 92-103.
LI Jian-jun, XIN Jing-shu, ZHANG Hui-min, et al. Evolution characteristics of soil nutrients in the main rice production regions, the middle-lower reach of Yangtze River of China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(1): 92-103.
- [5] 沈善敏. 中国土壤肥力[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 309-312.
SHEN Shan-min. Soil fertility in China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998: 309-312.
- [6] 温延臣, 李燕青, 袁 亮, 等. 长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 91-99.
WEN Yan-chen, LI Yan-qing, YUAN Liang, et al. Comprehensive assessment methodology of characteristics of soil fertility under different fertilization regimes in North China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(7): 91-99.
- [7] 王 芳. 有机培肥措施对土壤肥力及作物生长的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
WANG Fang. Effects of organic amendments on soil fertility plant growth[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014.
- [8] 王伯仁, 徐明岗, 文石林. 长期不同施肥对旱地红壤性质和作物生长的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 97-100, 144.
WANG Bo-ren, XU Ming-gang, WEN Shi-lin. Effect of long time fertilizers application on soil characteristics and crop growth in red soil upland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1): 97-100, 144.
- [9] Almendros G, Dorado J. Molecular characteristics related to the biodegradability of humic acid preparations[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 50(2): 227-236.
- [10] 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 Shu-xiang, ZHANG Wen-ju, SHEN Ren-fang, et al. Variation of soil quality in typical farmlands in China under long-term fertilization and research expedition[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(6): 1389-1393.
- [11] 宋 春, 韩晓增, 王凤菊, 等. 长期不同施肥条件下黑土水稳性团聚体中磷的分布及其有效性[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 272-276.
SONG Chun, HAN Xiao-zeng, WANG Feng-ju, et al. Distribution and availability of phosphorus in black soil water-stable aggregate under different long-term fertilizations[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(2): 272-276.
- [12] Mikha M M, Rice C W. Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(3): 809-816.
- [13] Macci C, Doni S, Peruzzi E, et al. Almond tree and organic fertilization for soil quality improvement in southern Italy[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 95(Suppl): S215-S222.
- [14] 赵 晶, 孟庆峰, 周连仁, 等. 长期施用有机肥对草甸碱土土壤酶活性及养分特征的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2014(2): 23-26, 34.
ZHAO Jing, MENG Qing-feng, ZHOU Lian-ren, et al. Effect on soil enzyme activity and nutrient content in meadow alkali soil at long-term application of organic manure[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014(2): 23-26, 34.
- [15] Bohme L, Bohme F. Soil microbiological and biochemical properties

- affected by plant growth and different long-term fertilization[J]. *Euro-pean Journal of Soil Biology*, 2006, 42(1):1-12.
- [16] 邵兴芳, 徐明岗, 张文菊, 等. 长期有机培肥模式下黑土碳与氮变化及氮素矿化特征[J]. 植物营养与肥科学报, 2014, 20(2):326-335.
- SHAO Xing-fang, XU Ming-gang, ZHANG Wen-ju, et al. Changes of soil carbon and nitrogen and characteristics of nitrogen mineralization under long-term manure fertilization practices in black soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(2):326-335.
- [17] 黄东风, 王利民, 李卫华, 等. 培肥措施培肥土壤的效果与机理研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(2):127-135.
- HUANG Dong-feng, WANG Li-min, LI Wei-hua, et al. Research progress on the effect and mechanism of fertilization measure on soil fertility[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(2):127-135.
- [18] 洪 曦, 高菊生, 罗尊长, 等. 不同施肥措施对红壤稻田氮磷平衡及生态经济效益的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1):158-166.
- HONG Xi, GAO Ju-sheng, LUO Zun-chang, et al. Effects of different fertilization on nitrogen and phosphorus balance and eco-economic benefits in red paddy field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1):158-166.
- [19] 周卫军, 王凯荣, 张光远, 等. 有机与无机肥配合对红壤稻田系统生产力及其土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9):1109-1113.
- ZHOU Wei-jun, WANG Kai-rong, ZHANG Guang-yuan, et al. Effects of inorganic-organic fertilizer incorporation on productivity and soil fertility of rice cropping system in red soil area of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(9):1109-1113.
- [20] 李文军, 彭保发, 杨奇勇. 长期施肥对洞庭湖双季稻区水稻土有机碳、氮积累及其活性的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(3):488-500.
- LI Wen-jun, PENG Bao-fa, YANG Qi-yong. Effects of long-term fertilization on organic carbon and nitrogen accumulation and activity in a paddy soil in double cropping rice area in Dongting Lake of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(3):488-500.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京: 中国农业出版社, 2000:25-144.
- BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000:25-144.
- [22] 胡秉民, 耿 旭. 作物稳定性分析法[M]. 北京: 科学出版社, 1993:43-48.
- HU Bing-min, GENG Xu. Analysis of crop stability[M]. Beijing: Science Press, 1993:43-48.
- [23] 裴泽莲, 王福义, 程 晋, 等. 土壤肥沃耕层构建模式[J]. 农业科技与装备, 2014(7):68-69.
- PEI Ze-lian, WANG Fu-yi, CHENG Jin, et al. Construction model for fertile topsoil[J]. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2014(7):68-69.
- [24] 王志强, 刘宝元, 王旭艳, 等. 东北黑土区土壤侵蚀对土地生产力影响试验研究[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39(10):1397-1412.
- WANG Zhi-qiang, LIU Bao-yuan, WANG Xu-yan, et al. Erosion effect on the productivity of black soil in Northeast China[J]. *Sci China Ser D: Earth Sci*, 2009, 39(10):1397-1412.
- [25] Rhoton F E, Lindbo D L. A soil depth approach to soil quality assessment[J]. *Journal Soil and Water Conservation*, 1997, 52(1):66-72.
- [26] 王玉玲, 李 军. 黄土旱塬区平衡施肥下不同土壤耕作模式的蓄水纳墒及作物增产增收效应研究[J]. 植物营养与肥科学报, 2016, 22(1):151-163.
- WANG Yu-ling, LI Jun. Study on soil water storage, crop yields and incomes under different soil tillage patterns with balance fertilization in the Loess Dryland region[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(1):151-163.
- [27] 王 寅, 李小坤, 李雅颖, 等. 红壤不同地力条件下直播油菜对施肥的响应[J]. 土壤学报, 2012, 49(1):121-129.
- WANG Yin, LI Xiao-kun, LI Ya-ying, et al. Responses of direct-seeding rapeseed to fertilization in fields of red soil different in fertility[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(1):121-129.
- [28] 查 燕, 武雪萍, 张会民, 等. 长期有机无机配施黑土土壤有机碳对农田基础地力提升的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23):4649-4659.
- ZHA Yan, WU Xue-ping, ZHANG Hui-min, et al. Effects of long-term organic and inorganic fertilization on enhancing soil organic carbon and basic soil productivity in black soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23):4649-4659.
- [29] 胡 诚, 宋家咏, 李 晶, 等. 长期定位施肥土壤有效磷与速效钾的剖面分布及对作物产量的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(4):673-676.
- HU Cheng, SONG Jia-yong, LI Jing, et al. Profile distribution of soil available phosphorus and available potassium concentrations and crop grain yields in long-term fertilization experiment[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(4):673-676.
- [30] 周建斌, 李昌纬, 赵伯善, 等. 化肥及有机肥配施定位试验的研究: 作物产量及土壤养分含量的变化[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 1993, 21(2):61-65.
- ZHOU Jian-bin, LI Chang-wei, ZHAO Bo-shan, et al. Fixed position experiments of inorganic fertilizer and organic manure in balance application to Lou soil: Variations in crop yields and soil nutrients[J]. *Acta Univ Agric Boreali-occidentalis*, 1993, 21(2):61-65.
- [31] 曾 骏, 郭天文, 包兴国, 等. 长期施肥对土壤有机碳和无机碳的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2008(2):11-14.
- ZENG Jun, GUO Tian-wen, BAO Xing-guo, et al. Effects of soil organic carbon and soil inorganic carbon under long-term fertilization[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2008(2):11-14.
- [32] 徐阳春, 沈其荣, 雷宝坤, 等. 水旱轮作下长期免耕和施用有机肥对土壤某些肥力性状的影响[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4):549-552.
- XU Yang-chun, SHEN Qi-rong, LEI Bao-kun, et al. Effect of long-term no-tillage and application of organic manure on some properties of soil fertility in rice/wheat rotation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(4):549-552.
- [33] 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.
- NIE Jia-ru. Influence of organic manure and chemical fertilizer on soil nutrients[J]. *Environmental Science and Management*, 2016, 41(9): 52-55.
- [34] 侯红乾, 刘秀梅, 刘光荣, 等. 有机无机肥配施比例对红壤稻田水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(3):516-523.
- HOU Hong-qian, LIU Xiu-mei, LIU Guang-rong, et al. Effect of long-term located organic-inorganic fertilizer application on rice yield and soil fertility in red soil area of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(3):516-523.
- [35] 巨晓棠, 谷保静. 氮素管理的指标[J]. 土壤学报, 2017, 54(2):281-296.
- JU Xiao-tang, GU Bao-jing. Indexes of nitrogen management[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(2):281-296.
- [36] 荣勤雷, 梁国庆, 周 卫, 等. 不同有机肥对黄泥田土壤培肥效果及土壤酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5):1168-1177.
- RONG Qin-lei, LIANG Guo-qing, ZHOU Wei, et al. Effects of different organic fertilization on fertility and enzyme activities of yellow clayey soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(5): 1168-1177.
- [37] 唐 杉, 王允青, 赵决建, 等. 紫云英还田对双季稻产量及稳定性的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(11):3086-3093.
- TANG Shan, WANG Yun-qing, ZHAO Jue-jian, et al. Effects of milk vetch application on double cropping rice yield and yield stability[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(11):3086-3093.
- [38] 高洪军, 彭 畅, 张秀芝, 等. 长期不同施肥对东北黑土区玉米产量稳定性的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23):4790-4799.
- GAO Hong-jun, PENG Chang, ZHANG Xiu-zhi, et al. Effect of long-term different fertilization on maize yield stability in the northeast black soil region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23):4790-4799.