

姚冬辉,魏宗强,颜晓,等.商品有机肥替代部分化肥对双季水稻产量及重金属含量的影响[J].江西农业大学学报,2020,42(5):863-871.



商品有机肥替代部分化肥对双季水稻产量及重金属含量的影响

姚冬辉,魏宗强,颜晓,卢志红,吴建富*

(江西农业大学 国土资源与环境学院/江西省鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室,江西 南昌 330045)

摘要:【目的】研究商品有机肥替代部分化肥对双季水稻产量及重金属含量的影响,为南方稻区商品有机肥合理施用及其风险性评价提供科学依据。【方法】以中嘉早17和五丰优T025为早、晚季试验材料,采用大田定位试验,设单施NPK化肥(F)、商品有机肥3 000 kg/hm²(M₁F)、3 750 kg/hm²(M₂F)和4 500 kg/hm²(M₃F)与化肥配施4个处理,在氮磷钾养分用量相等的条件下,研究商品有机肥替代部分化肥对水稻产量及土壤、稻米和稻壳中重金属含量的影响。【结果】2年4季平均产量由高到低依次为处理F、M₁F、M₂F和M₃F,但F、M₁F处理差异不显著,却均显著高于M₃F处理,增幅为6.56%~8.97%,M₂F、M₃F处理间差异显著。土壤中重金属As、Pb、Cd、Cr、Cu和Zn含量均随商品有机肥用量的增加表现为递增的趋势,而Hg含量未检出。早、晚稻稻壳中重金属含量几乎均高于稻米,稻米和稻壳中重金属Cd、Cr、Cu、Zn含量和稻壳中Pb含量均随商品有机肥用量的增加呈增加的趋势,Hg、As含量均未检出,稻米中Pb含量未检出,但均未超过土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(GB 15618—2018)和食品安全国家标准(GB 2762—2017)。【结论】2年4季定位试验表明,商品有机肥分别替代早、晚稻16.4%和15.0%的化学氮肥(相当于每季施用3 000 kg/hm²商品有机肥),能维持水稻周年产量与单施化肥基本持平,保证水稻稳产增产,且每年还节约化学氮肥15.7%,磷肥47.3%,钾肥34.3%。

关键词:化肥减量;商品有机肥;水稻;产量;重金属

中图分类号:S511.4⁺2 文献标志码:A 文章编号:1000-2286(2020)05-0863-09

Effects of Commercial Organic Fertilizer Partially Replacing Chemical Fertilizer on Yield and Heavy Metal Content of Double-Season Rice

YAO Dong-hui, WEI Zong-qiang, YAN Xiao, LU Zhi-hong, WU Jian-fu*

(College of Land Resources and Environment, Key Laboratory of Poyang Lake Basin Agricultural Resource and Ecology of Jiangxi Province, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: [Objective] The effects of commercial organic fertilizer partially replacing chemical fertilizer on rice yield and heavy metal content were studied in order to provide a scientific basis for rational application of commercial organic fertilizer and its risk evaluation in southern rice area. [Method] Zhongjiazao 17 and

收稿日期:2020-03-16 修回日期:2020-05-10

基金项目:国家自然科学基金项目(31660596)和国家重点研发计划项目(2017YFD0301601)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(31660596) and National Key R&D Program of China(2017YFD0301601)

作者简介:姚冬辉, orcid.org/0000-0001-6450-6092, qinghyqing@163.com; *通信作者:吴建富, 教授, 博士, 主要从事土壤肥料与作物养分管理和土壤生态修复研究, orcid.org/0000-0003-3766-7733, wjf6711@126.com。

Wufengyou T025 were used as the experimental materials, field experiments were conducted in double cropping rice field to study the effects of commercial organic fertilizer partially replacing chemical fertilizer on rice yield and heavy metal contents in soil, rice and rice husk. Four experiment treatments were set, including single application of NPK chemical fertilizer (F), commercial organic fertilizer application with 3 000 (M_1F), 3 750 (M_2F), 4 500 kg/hm^2 (M_3F) respectively under the conditions of equal amounts of nitrogen, phosphorus and potassium nutrients. **[Result]** The average yield of four seasons in two years was in the order of $F > M_1F > M_2F > M_3F$. The rice yield of F and M_1F treatments showed no significant difference, but significantly higher than that of M_3F , which increased by 6.56%–8.97%, the yield difference between treatment M_2F and treatment M_3F was significant. Soil heavy metal contents of As, Pb, Cd, Cr, Cu and Zn increased with the increasing of commercial organic fertilizer application, while Hg was not detected. The contents of heavy metals in early and late rice husks were almost all higher than that in rice. The contents of heavy metals Cd, Cr, Cu and Zn in rice, rice husks and the content of Pb in rice husks increased with the increasing of commercial organic fertilizer application. Hg and As were not detected in rice and rice husk, and Pb was not detected in rice, either. The contents of all heavy metals were all up to the soil environment quality risk control standard for soil contamination of agriculture land (GB 15618—2018) and the national standards for food safety GB 2762—2017). **[Conclusion]** The 2-year and 4-season location tests showed that commercial organic fertilizer replacement of 16.4% and 15.0% of chemical nitrogen fertilizer in early and late rice respectively, corresponding an application of 3 000 kg/hm^2 of commercial organic fertilizer per season, can maintain the annual yield of rice basically equal to that from single application of fertilizer, and ensure stable rice production and increase yield, and it also saves 15.7% of chemical nitrogen fertilizer, 47.3% of phosphate fertilizer and 34.3% of potash fertilizer every year.

Keywords: chemical fertilizer reduction; commercial organic fertilizer; rice; yield; heavy metal

【研究意义】化肥是重要的农业生产资料,在促进粮食生产和农业发展等方面发挥了重要的作用。但过量或不合理施用化肥,带来了土壤板结、酸化、环境污染和生态平衡破坏等一系列问题,严重威胁着我国农产品质量和农业生态环境^[1-2]。因此,在增产稳产前提下,大力发展和使用商品有机肥料,减少化肥的投入量,对提升耕地质量、农产品质量与生态环境质量以及促进化肥零增长战略目标的实现均具有重要的理论意义和实用价值。【前人研究进展】畜禽粪便作为一种优质的有机资源,不仅含有丰富的有机质,而且还含有作物生长所必需的大量和中、微量元素。但是,由于养猪饲料中含有较高的Cu、Zn、As等重金属元素,使得猪粪中重金属含量较高,尤其是Cu、Zn含量过高,给猪粪直接还田带来潜在风险,对农产品和生态环境安全产生严重的威胁^[3-4]。研究结果^[5-9]表明,长期猪粪直接还田能提高表层土壤Cu、Zn、Cr、As等重金属含量及其有效性,其影响程度与猪粪用量有关;但也有研究^[10-11]指出,适量添加猪粪到Cu或Cd污染土壤中可以减少土壤Cu、Cd的迁移能力,降低Cu、Cd的生物有效性。自我国提出实现化肥零增长目标以来,畜禽粪便无害化处理、商品化利用已经越来越受到重视。研究表明,商品有机肥替代部分化肥在提高作物产量^[12-14],促进养分吸收^[15-17],改善土壤理化和生物学性状^[18-19]等方面产生积极的影响,同时也引起了土壤和农产品中重金属含量增加的负面影响^[13,20]。【本研究切入点】但已有的报道大多都是对土壤或农产品中某个或某几个重金属进行研究,而同时对于商品有机肥替代部分化肥对双季稻田土壤、稻米和稻壳中重金属As、Hg、Pb、Cd、Cr、Cu、Zn含量影响的研究还鲜见报道。【拟解决的关键问题】因此,本试验在等量氮磷钾养分施用条件下,研究商品有机肥替代部分化肥对双季水稻产量及土壤、稻米和稻壳中重金属含量的影响,为南方稻区商品有机肥合理施用及其风险性评价提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料

供试早、晚稻品种分别为中嘉早17和五丰优T025。供试的商品有机肥是以猪粪为主要原料,添加

其他农业废弃物和微生物发酵菌剂经槽式好氧发酵制成,由江西怡农生物科技有限公司提供,其主要成分和含量分别为有机质 56.1%, N 1.18%, P_2O_5 1.78%, K_2O 2.58%, 水分 23.6%, pH 6.4, As 2.8 mg/kg, Pb 21.4 mg/kg, Cd 0.9 mg/kg, Cr 26.1 mg/kg, Cu 370.2 mg/kg, Zn 781.9 mg/kg, Hg 含量未检出。氮、磷、钾化肥分别用尿素(N 46.4%)、钙镁磷肥(P_2O_5 12.4%)和氯化钾(K_2O 60.0%)。试验地土壤为潮沙泥田,试验前土壤有机质含量为 25.12 g/kg, pH 值为 5.6, 全氮为 1.321 g/kg, 碱解氮为 102.4 mg/kg, 有效磷为 12.38 mg/kg, 速效钾为 88.3 mg/kg。常年种植双季水稻,种植制度为稻-稻-冬闲。

1.2 试验设计

2016—2017年在江西省新干县界埠镇廖圩村粮油绿色高产高效创建基地进行早、晚稻田间定位试验。设4个处理:单施NPK化肥(F);商品有机肥每季3 000 kg/hm²+NPK化肥(M₁F);商品有机肥每季3 750 kg/hm²+NPK化肥(M₂F);商品有机肥每季4 500 kg/hm²+NPK化肥(M₃F)。商品有机肥用量根据其含N量计算,早稻替代16.4%~24.6%的化学N肥,晚稻替代15.0%~22.6%的化学氮肥,各处理氮、磷、钾养分施用量相同,商品有机肥输入的氮磷钾养分不足部分用化肥补充(表1),N:P₂O₅:K₂O施用比例为2:1:2。早稻氮肥按基肥、分蘖肥与穗肥质量比5:2:3施用。晚稻氮肥按基肥、分蘖肥与穗肥质量比4:2:4施用。早、晚稻钾肥均按分蘖肥与穗肥质量比7:3施用。商品有机肥、磷肥一次性做基肥施用。每处理3次重复,随机排列,小区面积20 m²。小区间土壤用塑料薄膜包裹,单排单灌。人工移栽。早、晚稻栽插密度分别为13.3 cm×23.3 cm和13.3 cm×26.6 cm。其他按常规高产栽培要求进行。

表1 试验处理与养分投入量

Tab.1 Experimental treatment and nutrient input

kg/hm²

季别 Season	处理 Treatment	N			P_2O_5			K_2O		
		商品有机肥 Commercial organic fertilizer	化肥 Chemical fertilizer	合计 Total	商品有机肥 Commercial organic fertilizer	化肥 Chemical fertilizer	合计 Total	商品有机肥 Commercial organic fertilizer	化肥 Chemical fertilizer	合计 Total
早稻 Early rice	F	0	165.0	165.0	0	82.5	82.5	0	165.0	165.0
	M ₁ F	27.0	138.0	165.0	40.8	41.7	82.5	59.1	105.9	165.0
	M ₂ F	33.8	131.2	165.0	51.0	31.5	82.5	73.9	91.1	165.0
	M ₃ F	40.6	124.4	165.0	61.2	21.3	82.5	88.7	76.3	165.0
晚稻 Late rice	F	0	180.0	180.0	0	90.0	90.0	0	180.0	180.0
	M ₁ F	27.0	153.0	180.0	40.8	49.2	90.0	59.1	120.9	180.0
	M ₂ F	33.8	146.2	180.0	51.0	39.0	90.0	73.9	106.1	180.0
	M ₃ F	40.6	139.4	180.0	61.2	28.8	90.0	88.7	91.3	180.0

F: 单施NPK化肥; M₁F: 商品有机肥每季3 000 kg/hm²+NPK化肥; M₂F: 商品有机肥每季3 750 kg/hm²+NPK化肥; M₃F: 商品有机肥每季4 500 kg/hm²+NPK化肥。下同

F: Apply NPK fertilizer; M₁F: Commercial organic fertilizer 3 000 kg/hm² per season+NPK fertilizer; M₂F: Commercial organic fertilizer 3 750 kg/hm² per season+NPK fertilizer; Commercial organic fertilizer 4 500 kg/hm² per season+NPK fertilizer. the same as below

1.3 测定项目与方法

1.3.1 考种与测产 早、晚稻收割前1 d,每小区调查60莖有效穗,按平均有效穗数取代表性植株5莖进行考种;每小区实割200莖,脱粒后晒干、称量、测产。同时,各取300 g干谷供重金属含量测定。

1.3.2 土壤采集 2017年晚稻成熟期,每小区按“S”型线路采集耕作层(0~18 cm)土壤混合样品,供土壤重金属As、Hg、Pb、Cd、Cr、Cu和Zn含量测定。

1.3.3 重金属含量测定方法 土壤、稻米和稻壳中重金属含量委托北京子田科技有限公司测定。土壤全量Pb、Cd、Cr、Cu和Zn的含量按农业部行业标准NY/T 1613—2008^[21]方法检测。全量As、Hg按GB/T 22105.1—2008^[22]和GB/T 22105.2—2008^[23]方法测定。稻米、稻壳中Cu、Zn、Hg和As含量按GB/T 5009—2003^[24]方法检测;Pb含量按GB 5009.12—2010^[25]方法检测;Cd、Cr含量按GB 5009—2014^[26]方法检测。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2010 和 DPS 7.05 软件进行统计分析,利用 Duncan 新复极差法(LSR)进行显著性检验,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 化肥减量配施商品有机肥对水稻产量及其构成因素的影响

由表 2 可以看出,在等量氮磷钾养分施用条件下,2016 年,早、晚稻产量随商品有机肥用量的增加均呈下降的趋势。早稻产量 M_1F 处理与 F 、 M_2F 处理差异不显著,却显著高于 M_3F 处理,增幅为 9.24%;晚稻产量 F 处理与 M_1F 处理差异不显著,却显著高于 M_2F 、 M_3F 处理,增幅为 7.66%~7.79%,而 M_1F 处理产量高于 M_2F 、 M_3F 处理,增幅为 6.40%~6.53%,但处理间差异不显著。2017 年早稻产量变化趋势与 2016 年基本一致;而晚稻产量 F 、 M_1F 、 M_2F 处理间差异不显著,却均显著高于 M_3F 处理,增幅为 6.63%~10.83%。2 年 4 季平均产量由高到低依次为处理 F 、 M_1F 、 M_2F 和 M_3F ,但 F 、 M_1F 处理差异不显著,却显著高于 M_3F 处理,增幅为 6.56%~8.97%, M_2F 、 M_3F 处理间差异显著。说明在等量氮磷钾养分施用水平下,每季用 3 000 kg/hm² 的商品有机肥替代部分化肥能维持水稻周年产量与单施化肥基本持平,而且每年还节约化学氮肥 15.7%,磷肥 47.3%,钾肥 34.3%。

表 2 化肥减量配施商品有机肥对双季稻产量的影响

Tab.2 Effect of combined applications of commercial organic fertilizer and chemical fertilizer reduction on yield of double cropping rice

处理 Treatment	2016		2017		平均值 Average
	早稻	晚稻	早稻	晚稻	
	Early rice	Late rice	Early rice	Late rice	
F	7.08a	8.58a	8.71a	8.19a	8.14a
M_1F	7.09a	8.48ab	8.40ab	7.88a	7.96ab
M_2F	6.86ab	7.97b	8.22bc	8.03a	7.77b
M_3F	6.49b	7.96b	8.02c	7.39b	7.47c

同列数据后不同字母表示差异达到 5% 的显著水平,下同

Different letters in the same column followed by different letters mean significantly different at the 5% level,the same as below

从产量构成因素(表 3)来看,无论是早稻还是晚稻,单位面积有效穗数均随商品有机肥用量增加呈下降的趋势。早稻有效穗数 F 处理与 M_1F 处理基本持平,却显著高于 M_2F 、 M_3F 处理,增幅为 8.51%~

表 3 化肥减量配施商品有机肥对早、晚稻产量构成的影响

Tab.3 Effect of combined applications of commercial organic fertilizer and chemical fertilizer reduction on yield components of early and later rice

季别	处理	有效穗/(10 ⁴ ·hm ⁻²)	每穗粒数/粒	结实率/%	千粒质量/g
Season	Treatment	Effective panicle	No. of grains per panicle	Filled grain percentage	1 000-Grain weight
早稻 Early rice	F	334.0a	119.7a	84.9b	26.2a
	M_1F	323.4a	120.2a	87.7a	26.3a
	M_2F	307.8b	119.2a	87.6a	26.4a
	M_3F	298.8b	119.5a	86.1ab	26.4a
晚稻 Late rice	F	323.4a	140.8a	81.3a	25.1a
	M_1F	318.7a	133.9b	82.0a	25.0a
	M_2F	310.8ab	134.0b	84.1a	25.3a
	M_3F	300.9b	132.5b	85.4a	25.1a

数据为 2 年的平均值

Values are the average of two years

11.78%, M_1F 处理显著高于 M_2F 、 M_3F 处理, 增幅为 5.07%~8.23%, 而 M_2F 、 M_3F 处理差异不显著; 晚稻有效穗数 F 处理与 M_1F 、 M_2F 处理差异不显著, F 、 M_1F 处理均显著高于 M_3F 处理, 增幅为 5.92%~7.48%, 而 M_2F 、 M_3F 处理差异显著。每穗粒数早稻处理间差异不显著; 晚稻 M_1F 、 M_2F 、 M_3F 处理差异不显著, 但均显著低于 F 处理, 降幅为 4.83%~5.89%。早稻结实率 M_1F 、 M_2F 、 M_3F 处理差异不显著, 但 M_1F 、 M_2F 处理均显著高于 F 处理, 增幅为 3.18%~3.30%; 晚稻处理间差异不显著。千粒质量处理间无显著差异。这与有关报道基本一致^[12]。

2.2 化肥减量配施商品有机肥对土壤重金属含量的影响

表 4 表明, 随着商品有机肥用量的增加, 土壤中重金属 As、Pb、Cd、Cr、Cu 和 Zn 含量均表现为递增的趋势, 而 Hg 含量未检出。这可能与有机肥中重金属含量和输入量有关, 但均未超过土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(GB 15618-2018)。土壤中 As 含量 M_3F 和 M_2F 处理差异不显著, 却显著高于 M_1F 和 F 处理, 增幅分别为 6.22% 和 21.31%, 而 M_1F 和 M_2F 处理差异不显著, 却均显著高于 F 处理, 增幅分别为 14.21% 和 17.87%。Pb 含量 M_3F 与 M_2F 处理差异不显著, 却均显著高于 M_1F 和 F 处理, 而 M_1F 和 F 处理差异显著; Cd 含量处理间差异均达显著水平, M_3F 处理较 M_1F 、 M_2F 和 F 处理增幅达 7.84%~48.65%, M_2F 处理较 M_1F 和 F 处理增幅达 13.33%~37.84%, M_1F 处理较 F 处理增幅达 21.62%。Cr 含量处理间差异均不显著。Cu、Zn 含量 M_1F 、 M_2F 、 M_3F 处理间差异均不显著, 却均显著高于 F 处理, 增幅分别为 7.81%~11.73% 和 5.89%~8.86%。说明施用猪粪源商品有机肥易引起土壤重金属积累, 增加土壤污染风险, 这与有关研究基本一致^[13]。

表 4 化肥减量配施商品有机肥对土壤重金属含量的影响(2017 年)

Tab.4 Effect of combined applications of commercial organic fertilizer and chemical fertilizer reduction on soil heavy metals contents in 2017

处理 Treatment	As	Hg	Pb	Cd	Cr	Cu	Zn
F	0.901c	0	37.291b	0.037d	47.291a	28.210b	79.351b
M_1F	1.029b	0	37.305b	0.045c	47.443a	30.412a	84.026a
M_2F	1.062ab	0	37.310a	0.051b	47.479a	30.966a	85.199a
M_3F	1.093a	0	37.313a	0.055a	47.520a	31.518a	86.387a

2.3 化肥减量配施商品有机肥对稻米和稻壳中重金属含量的影响

表 5 显示, 在氮磷钾等养分施用量相同的条件下, 早、晚稻稻米和稻壳中重金属 Cd、Cr、Cu、Zn 含量和稻壳中 Pb 含量均随着商品有机肥用量的增加呈增加的趋势, Hg、As 含量均未检出, 稻米中 Pb 含量未检出。各处理水稻稻壳中重金属含量几乎均高于稻米。稻壳中 Pb 含量早稻 M_3F 处理显著高于 M_2F 、 M_1F 和 F 处理, 增幅为 18.92%~25.0%, M_2F 处理显著高于 M_1F 和 F 处理, 增幅为 5.11%, 而 M_1F 和 F 处理差异不显著; 而晚稻 M_3F 、 M_2F 和 M_1F 处理间差异不显著, 却均显著高于 F 处理, 增幅为 11.05%~18.23%。早、晚稻稻米和稻壳中 Cd 含量均以 M_3F 处理为最高, M_1F 处理为最小, 但早稻稻米处理间差异显著, 稻壳 M_3F 处理显著高于其它 3 个处理, 增幅为 47.96%~61.11%, M_2F 处理显著高于 M_1F 、 F 处理, 增幅为 6.52%~8.89%; 晚稻稻米中 Cd 含量 M_2F 、 M_3F 处理差异不显著, 均显著高于 M_1F 、 F 处理, 稻壳中 M_3F 处理与 M_2F 处理差异显著, 且均显著高于 M_1F 、 F 处理。早、晚稻稻米和稻壳中 Cr、Cu 含量变化趋势基本一致, 均以 M_3F 处理为最高, F 处理为最小。早稻稻米中 Zn 含量 M_3F 处理显著高于 M_2F 、 M_1F 和 F 处理, 增幅为 5.98%~29.29%, 而 M_2F 、 M_1F 处理差异不显著, 均显著高于 F 处理, 增幅分别为 21.99% 和 18.42%; 稻壳中 Zn 含量 M_3F 、 M_2F 处理差异不显著, 均显著高于 F 处理, 增幅分别为 7.78% 和 5.37%, M_3F 处理显著高于 M_1F 处理, 而 M_1F 、 F 处理差异不显著。晚稻稻米中 Zn 含量处理间差异显著, 稻壳中 M_3F 、 M_2F 与 M_1F 处理差异不显著, 但 M_3F 、 M_2F 处理均显著高于 F 处理, 增幅分别为 6.79% 和 5.26%。说明施用猪粪源商品有机肥易引起稻谷中重金属含量增加, 其增幅程度与有机肥用量有关。但各施肥处理早、晚稻稻米和稻壳中重金属 As、Hg、Pb、Cd、Cr、Cu 和 Zn 含量均未超过食品安全国家标准(GB 2762—2017)。

表 5 化肥减量配施商品有机肥对稻米和稻壳中重金属含量的影响(2017 年)

Tab.5 Effect of combined applications of commercial organic fertilizer and chemical fertilizer reduction on heavy metals contents in rice and rice hull in 2017

季别 Season	处理 Treatment	mg/kg									
		Pb		Cd		Cr		Cu		Zn	
		稻米 Rice	稻壳 Rice hull	稻米 Rice	稻壳 Rice hull	稻米 Rice	稻壳 Rice hull	稻米 Rice	稻壳 Rice hull	稻米 Rice	稻壳 Rice hull
早稻	F	0	1.76c	0.075c	0.092c	0.156d	0.460c	7.32c	8.84c	33.01c	39.84c
Early rice	M ₁ F	0	1.76c	0.058d	0.090c	0.169c	0.542b	7.59b	9.31b	39.09b	40.10bc
	M ₂ F	0	1.85b	0.101b	0.098b	0.213b	0.553b	8.75b	9.72b	40.27b	41.98ab
	M ₃ F	0	2.20a	0.117a	0.145a	0.235a	0.609a	9.63a	12.55a	42.68a	42.94a
晚稻	F	0	1.81b	0.103b	0.106c	0.093d	0.219c	5.73d	6.52d	29.31d	42.56b
Late rice	M ₁ F	0	2.01a	0.096c	0.105c	0.413c	0.574b	7.14c	10.96c	32.26c	43.36ab
	M ₂ F	0	2.08a	0.139a	0.151b	0.520b	0.592b	8.34b	12.08b	39.55b	44.80a
	M ₃ F	0	2.14a	0.144a	0.177a	0.577a	0.661a	8.89a	13.21a	43.31a	45.45a

3 讨论

3.1 化肥减量配施商品有机肥对水稻产量的影响

有机肥料与化肥配合施用是我国农作物施肥发展的主要方向。研究^[12-16,27-31]表明,与单施化肥相比,有机肥与化肥配施不仅可以实现作物的稳产增产,而且还可以减少化肥用量。试验研究表明,在等量氮磷钾养分施用条件下,早、晚稻产量均随有机肥用量的增加而呈下降趋势,处理间的大致趋势由高到低依次为 F、M₁F、M₂F 和 M₃F, F、M₁F 处理差异不显著,却显著高于 M₃F 处理,增幅为 6.56%~8.97%,其原因可能是单施化肥的处理可以快速补充作物生长所需养分,而有机肥在土壤中释放养分的速率较为缓慢,难以及时满足作物对养分的需求,从而导致商品有机肥替代部分化肥的处理水稻产量低于单施化肥处理,这与前人研究结果基本一致^[32-33]。产量构成因素方面,有研究表明,猪粪堆肥与化肥配合施用能够显著增加水稻每穗籽粒数和实粒数^[15-16]。但也有研究指出,与单施化肥相比,商品有机肥替代部分化肥的处理对产量构成因素(有效穗数、穗粒数和千粒质量)未表现出显著影响^[12]。本 2 年定位试验结果表明,早、晚稻的有效穗数随商品有机肥用量的增加而呈下降趋势,早稻结实率呈增加的趋势,晚稻变化不明显,而对每穗粒数和千粒质量影响较小,这可能与供试的土壤、水稻品种和商品有机肥的性质不同有关。

3.2 化肥减量配施商品有机肥对土壤、稻米和稻壳中重金属含量的影响

畜禽粪便作为有机资源在有机农业和农业可持续发展中占有重要地位。近年来,随着耕地土壤质量提升工程的开展和化肥零增长战略的实施,中国有机肥的需求量和施用量呈现增加的趋势。因此,越来越多的研究开始关注集约化养猪粪便的利用方式及其对环境的潜在风险。有研究指出,长期施用猪粪显著提高了土壤 Cu、Zn、Cr、As 含量,施用商品有机肥可增加土壤中 Cr、Cu、Zn、Cd、Pb 和 As 等重金属的积累,并导致农产品中重金属含量升高^[5-8,12],其影响程度一方面取决于猪粪或商品有机肥中重金属含量高低;另一方面取决于猪粪或商品有机肥一次性输入农田的数量与施用年限。2 年定位试验结果表明,在商品有机肥施用量为 3 000~4 500 kg/hm²,土壤中重金属 AS、Pb、Cd、Cr、Cu 和 Zn 含量均随商品有机肥用量的增加表现为递增的趋势,而 Hg 含量未检出,但均符合土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(GB 15618—2018),这可能与商品有机肥中重金属含量和输入量有关,这与黄小洋等^[34]研究结果基本一致;早、晚稻稻米和稻壳中重金属 Cd、Cr、Cu、Zn 含量和稻壳中 Pb 含量均随着商品有机肥用量的增加呈增加的趋势,而 Hg、As 含量均未检出,稻米中 Pb 含量未检出,稻壳中重金属含量几乎均高于稻米,这与陈院华等^[35]研究结果基本一致,符合食品安全国家标准(GB 2762—2017)。但长期施用以猪粪为主要原料加工的商品有机肥是否引起土壤、稻米和稻壳中重金属污染需进一步研究。因此,在农业生产上要

注重商品有机肥的选择和安全使用,因地制宜地控制好商品有机肥的施用量,避免其对土壤和作物生产安全构成威胁。此外养殖企业和饲料加工厂还可以更新畜禽饲料加工方式,减少含重金属添加剂的使用,也能有效减少土壤和作物中的重金属的积累,保障土壤和粮食安全。

参考文献:

- [1] 赖庆旺,李茶苟,黄庆海.红壤性水稻土无机肥连施与土壤结构特性的研究[J].土壤学报,1992,29(2):168-174.
Lai Q W, Li C G, Huang Q H. Effect of continuous application of inorganic fertilizer on soil structure properties of paddy soil derived from red soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 1992, 29(2): 168-174.
- [2] Doran J W, Zeiss M R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality[J]. Applied Soil Ecology, 2000, 15(1): 3-11.
- [3] 黄绍文,唐继伟,李春花.我国商品有机肥和有机废弃物中重金属、养分和盐分状况[J].植物营养与肥料学报,2017,23(1):162-173.
Huang S W, Tang J W, Li C H. Status of heavy metals, nutrients, and total salts in commercial organic fertilizers and organic wastes in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2017, 23(1): 162-173.
- [4] 刘荣乐,李书田,王秀斌,等.我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量状况与分析[J].农业环境科学学报,2005,24(2):392-397.
Liu R L, Li S T, Wang X B, et al. Contents of heavy metal in commercial organic fertilizers and organic waste[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2005, 24(2): 392-397.
- [5] 王开峰,彭娜,王凯荣,等.长期施用有机肥对稻田土壤重金属含量及其有效性的影响[J].水土保持学报,2008,22(1):105-108.
Wang K F, Peng N, Wang K R, et al. Effects of long-term manure fertilization on heavy metal content and its availability in paddy soils[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(1): 105-108.
- [6] 李本银,黄绍敏,张玉亭,等.长期施用有机肥对土壤和糙米铜、锌、铁、锰和镉积累的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(1):129-135.
Li B Y, Huang S M, Zhang Y T, et al. Effect of long-term application of organic fertilizer on Cu, Zn, Fe, Mn and Cd in soil and brown rice[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(1): 129-135.
- [7] 李大明,柳开楼,黄庆海,等.长期施用猪粪红壤稻田土壤Cu、Zn累积规律[J].生态学报,2015,35(3):709-716.
Li D M, Liu K L, Huang Q H, et al. Accumulation dynamic of soil Cu and Zn under long-term application of pig manure in red paddy field[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3): 709-716.
- [8] 柳开楼,余跑兰,谭武贵,等.长期施用猪粪对红壤旱地、水稻土肥力和土壤As转化的影响[J].生态环境学报,2015,24(6):1057-1062.
Liu K L, Yu P L, Tan W G, et al. Effect of long-term application of pig manure on soil arsenic content and fertility of red up-land and paddy soils[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(6): 1057-1062.
- [9] 柳开楼,李大明,黄庆海,等.红壤稻田长期施用猪粪的生态效益及承载力评估[J].中国农业科学,2014,47(2):303-313.
Liu K L, Li D M, Huang Q H, et al. Ecological benefits and environmental carrying capacities of red paddy field subjected to long-term pig manure amendments[J]. China Agriculture Science, 2014, 47(2): 303-313.
- [10] 马荣辉,朱蕊,宗玉统,等.猪粪对黑土-水稻系统中铜的化学形态、生物积累和有效性的影响[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2012,38(1):108-118.
Ma R H, Zhu R, Zong Y T, et al. Cu fractions, accumulation and bioavailability in black soil-rice system affected by application of pig manures[J]. Journal of Zhejiang University (Agric & Life Sci), 2012, 38(1): 108-118.
- [11] 余鑫,张敏,万亚男,等.猪粪对生菜和菠菜吸收和累积镉的影响[J].环境科学与技术,2015,38(7):71-76.
Yu Y, Zhang M, Wan Y N, et al. Effects of pig manure on cadmium speciation in soil and accumulation in lettuce and spinach[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(7): 71-76.
- [12] 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.

- Wen Y C, Zhang Y D, Yuan L, et al. Crop yield and soil fertility response to commercial organic fertilizer substituting chemical fertilizer[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(11): 2136-2142.
- [13] 谢国雄, 王京文, 张丹, 等. 商品有机肥对作物产量及土壤与农产品中重金属积累的影响[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(29): 97-104.
- Xie G X, Wang J W, Zhang D, et al. Effects of commercial organic fertilizer application on crop yield and heavy metals accumulation in soil and agricultural products[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(29): 97-104.
- [14] 孟琳, 张小莉, 蒋小芳, 等. 有机肥料氮替代部分无机氮对水稻产量的影响及替代率研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(2): 290-296.
- Meng L, Zhang X L, Jiang X F, et al. Effects of partial mineral nitrogen substitution by organic fertilizer nitrogen on the yields of rice grains and its proper substitution rate[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(2): 290-296.
- [15] 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.
- Xie J, Zhao Y N, Chen X J, et al. Nitrogen of organic manure replacing chemical nitrogenous fertilizer improve maize yield and nitrogen uptake and utilization efficiency[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(20): 3934-3943.
- [16] 哈丽哈什·依巴提, 张丽, 陆强, 等. 猪粪堆肥与化肥不同配施方式对水稻产量和养分累积的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2013, 36(5): 77-82.
- Halhashi·Yibati, Zhang L, Lu Q, et al. Effects of different combined applications of pig manure compost and inorganic fertilizers on rice yield and nutrients accumulation[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2013, 36(5): 77-82.
- [17] 朱荣红, 董彩霞, 沈其荣, 等. 配施有机肥提高化肥氮利用效率的微生物作用机制研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2): 282-288.
- Zhu C H, Dong C X, Shen Q R, et al. Microbial mechanism on enhancement of inorganic fertilizer-N use efficiency for combined use of inorganic and organic fertilizers[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(2): 282-288.
- [18] 孙向平, 李国学, 肖爱平, 等. 施用猪粪堆肥对玉米产量及土壤理化性质的影响分析[J]. *中国麻业科学*, 2013, 35(5): 258-264.
- Sun X P, Li G X, Xiao A P, et al. Impact of pig manure compost on maize yield and soil properties[J]. *Plant Fiber Sciences in China*, 2013, 35(5): 258-264.
- [19] 王海斌, 张清旭, 陈晓婷, 等. 动物源有机肥对茶树根际土壤酸度及微生物的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2017, 19(5): 115-122.
- Wang H B, Zhang Q X, Chen X T, et al. Effect of animal manure on soil acidity and microbe of tea tree rhizosphere[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2017, 19(5): 115-122.
- [20] 黄新灿, 章明奎. 长期施用猪粪源有机肥对蔬菜-土壤系统重金属积累的影响[J]. *农学学报*, 2016, 6(4): 30-35.
- Huang X C, Zhang M K. Long-term application of pig manure compost affecting heavy metal accumulation in vegetable soil system[J]. *Journal of Agriculture*, 2016, 6(4): 30-35.
- [21] 中华人民共和国农业部. 土壤质量 重金属测定 王水回流消解原子吸收法: NY/T 1613—2008[S]. 北京: [出版者不详], 2008.
- Ministry of Agriculture of the PRC. Soil quality—analysis of soil heavy metals—atomic absorption spectrometry with aqua regia digestion: NY/T 1613—2008[S]. Beijing: [s.n.], 2008.
- [22] 中华人民共和国农业部. 土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第1部分 土壤中总汞的测定: GB/T 22105.1—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- Ministry of Agriculture of the PRC. Soil quality—analysis of total mercury, arsenic and lead contents—atomic fluorescence spectrometry—Part 1—analysis of total mercury contents in soils: GB/T 22105.1—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [24] 中华人民共和国卫生部. 食品卫生检验方法: GB/T 5009—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- Ministry of health of the PRC. methods of food hygienic analysis: GB/T 5009—2003[S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.
- [25] 食品安全国家标准 食品中镉的测定: GB 5009.15—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- National food safety standard—determination of cadmium in food: GB 5009.15—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.

- [26] 中华人民共和国卫生部.食品安全国家标准:GB 5009—2014[S].中华人民共和国食品安全国家标准,2014.
Ministry of Health, PRC. National Standard for Food Safety: GB5009—2014[S]. National Standard for Food Safety of the People's Republic of China, 2014.
- [27] 徐明岗,李冬初,李菊梅,等.化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J].中国农业科学,2008,41(10):3133-3139.
Xu M G, Li D C, Li J M, et al. Effects of organic manure application combined with chemical fertilizers on nutrients absorption and yield of rice in Hunan of China[J]. China Agriculture Science, 2008, 41(10): 3133-3139.
- [28] 孟琳,张小莉,蒋小芳,等.有机肥料氮替代部分化肥氮对稻谷产量的影响及替代率[J].中国农业科学,2009,42(2):532-542.
Meng L, Zhang X L, Jiang X F, et al. Effects of partial mineral nitrogen substitution by organic fertilizer nitrogen on the yields of rice grains and their proper substitution rate[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(2): 532-542.
- [29] 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,(2):314-324.
Gao J S, Huang J, Dong C H, et al. Effects of long-term combined application of organic and chemical fertilizers on rice yield and soil available nutrients[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, (2): 314-324.
- [30] 马臣,刘艳妮,梁路,等.有机无机肥配施对旱地冬小麦产量和硝态氮残留淋失的影响[J].应用生态学报,2018,29(4):1240-1248.
Ma C, Liu Y N, Liang L, et al. Effects of combined application of chemical fertilizer and organic manure on wheat yield and leaching of residual nitrate-n in dryland soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(4): 1240-1248.
- [31] 吕凤莲,侯苗苗,张弘弢,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.
Lu F L, Hou M M, Zhang H T, et al. Replacement ratio of chemical fertilizer nitrogen with manure under the winter wheat-summer maize rotation system in Lou soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(1): 22-32.
- [32] 胡丹丹.有机养分替代部分化肥对水稻生长及土壤理化性质的影响[D].南昌:江西农业大学,2018.
Hu D D. Effects of partial organic nutrient substitution on rice growth and soil physicochemical properties[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2018.
- [33] 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 H Q, Liu X M, Liu G R, et al. Effects of organic and inorganic fertilizer ratio on rice yield and soil fertility in red soil paddy fields[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(3): 516-523.
- [34] 黄小洋,邵劲松,马运涛.施用猪粪有机肥对土壤环境质量的影响[J].河南农业科学,2017,46(11):60-68.
Huang X Y, Shao J S, Ma Y T. Effects of pig manure application on soil environmental quality[J]. Henan Agricultural Sciences, 2017, 46(11): 60-68.
- [35] 陈院华,李建国,杨涛,等.水稻品种镉积累特征及相关性研究[J].江西农业学报,2017,29(9):10-14.
Chen Y H, Li J G, Yang T, et al. Research on accumulation characteristic and correlation of cadmium in various rice varieties[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2017, 29(9): 10-14.