



有机肥替代化肥对旱地小麦产量和养分利用效率的影响及其经济环境效应

张奇茹¹, 谢英荷^{1, 2, 3}, 李廷亮^{1, 2, 3}, 刘凯¹, 姜丽伟¹, 曹静¹, 邵靖琳¹

(¹山西农业大学资源与环境学院, 山西太谷 030801; ²山西农业大学农业资源与环境国家级实验教学示范中心, 山西太谷 030801;

³山西农业大学山西省土壤肥料研究生教育创新中心, 山西太谷 030801)

摘要: 【目的】通过5年连续监测有机肥、生物有机肥替代化肥对旱地小麦产量、养分利用、经济及土壤环境的影响, 以期旱地小麦科学高效生产提供施肥依据。【方法】于2013—2018年在山西省洪洞县旱地麦田试验区, 通过农户施肥(FP)、测控施肥(OF)、有机肥替代化肥(OFM)和生物有机肥替代化肥(OFB)4个处理, 分析有机肥替代化肥对黄土旱塬冬小麦产量构成, 经济效益, 养分吸收转移特征, 肥料利用效率, 土壤环境等的影响。【结果】(1)与FP处理相比, OFM、OFB处理5年平均减施化肥氮素35%, 籽粒产量显著提高17.2%—21.4%, 纯收入显著提高44.3%—54.7%; 与OF处理相比, OFM、OFB处理5年平均替代化肥氮素40%, 增加了公顷穗数和千粒重, 籽粒产量显著提高6.0%—9.8%, 纯收入显著提高12.9%—21.0%。(2)OFM、OFB处理与OF处理相比, 籽粒氮含量显著提高9.6%—12.8%, 磷含量显著提高12.5%—17.9%; 籽粒氮、磷、钾的花前营养器官转移量与花后土壤吸收量均有所提高, 特别是促进了籽粒中氮、磷素的花后土壤吸收量, 分别显著提高了48.8%—50.5%, 70.5%—76.2%。(3)与OF处理相比, OFM处理的钾肥农学效率和偏生产力显著提高33.9%和6.2%。OFB处理的氮、磷肥的表现回收率显著提高48.6%和65.5%, 氮、钾肥的农学效率显著提高71.3%和51.3%, 偏生产力显著提高20.3%和10.0%。(4)经过5年的有机肥、生物有机肥替代化肥处理, 土壤肥力(有机质, 全氮, 有效磷, 速效钾)有所提高, 表层土壤硝态氮残留显著减少9.6%—23.0%, 且2 m土层硝态氮无明显淋溶现象。【结论】有机肥、生物有机肥替代化肥可以提高小麦籽粒对氮、磷、钾的吸收, 促进氮、磷素的花后土壤吸收, 提高肥料的利用效率, 显著降低土壤硝态氮残留量, 有助于提升土壤肥力, 最终获得较高的经济和环境效益, 是旱地麦田高效持续生产和发展绿色农业的一项重要措施。

关键词: 旱地小麦; 有机替代; 产量效率; 环境效应

Effects of Organic Fertilizers Replacing Chemical Fertilizers on Yield, Nutrient Use Efficiency, Economic and Environmental Benefits of Dryland Wheat

ZHANG QiRu¹, XIE YingHe^{1, 2, 3}, LI TingLiang^{1, 2, 3}, LIU Kai¹, JIANG LiWei¹, CAO Jing¹, SHAO JingLin¹

(¹College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, Shanxi; ²National Experimental Teaching Demonstration Center of Agricultural Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, Shanxi; ³Shanxi Provincial Soil and Fertilizer Postgraduate Education Innovation Center, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, Shanxi)

Abstract: 【Objective】In order to provide the fertilization basis for scientific and efficient production of dryland wheat, the

收稿日期: 2020-06-15; 接受日期: 2020-09-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0200401)、国家公益性行业(农业)科研专项(201503124)

联系方式: 张奇茹, E-mail: 1575938795@qq.com. 通信作者谢英荷, E-mail: xieyinghe@163.com

effects of organic fertilizer and biological organic fertilizer replacing chemical fertilizer on wheat yield, nutrient utilization, economy and soil environment were monitored continuously for 5 years. 【Method】 From 2013 to 2018 in the dryland wheat field area of Hongtong County, Shanxi Province, there were four different fertilization patterns, including farmer pattern (FP), optimized fertilizers pattern (OF), optimized fertilizers+organic fertilizers pattern (OFM), and optimized fertilizers+biological organic fertilizers pattern (OFB), which were used to analyze the effects on the yield composition, economic benefits, nutrient absorption and transfer characteristics, fertilizer use efficiency, and soil environment of dry wheat in the Loess Plateau. 【Result】 (1) Compared with the FP treatment, the average nitrogen fertilizer application was reduced by 35%, and the grain yield was significantly increased by 17.2%-21.4%, and net income was significantly increased by 44.3%-54.7% under OFM and OFB treatments, respectively; compared with the OF treatment, the average nitrogen substitution rate of OFM and OFB in five years was 40%, the spike number per hectare and 1000 grain weight were increased, and the grain yield was significantly increased by 6.0%-9.8%, and net income was significantly increased by 12.9%-21.0% under OFM and OFB treatments, respectively. (2) Compared with OF treatment, the contents of nitrogen in grain was significantly increased by 9.6%-12.8%, and the contents of phosphorus in grain was significantly increased by 12.5%-17.9% under OFM and OFB treatments, respectively; the transport amount at pre-anthesis of nitrogen, phosphorus and potassium of grain and the soil absorption after bloom were also increased, especially the soil absorption of nitrogen and phosphorus after anthesis was significantly increased by 48.8%-50.5% and 70.5%-76.2% under OFM and OFB treatments, respectively. (3) Compared with the OF treatment, the agronomic efficiency and partial productivity of potassium fertilizer under OFM treatment were significantly increased by 33.9% and 6.2%, respectively. The results showed that the apparent recovery rate of nitrogen and phosphorus fertilizer was increased by 48.6% and 65.5%, the agronomic efficiency of nitrogen and potassium fertilizer up by 71.3% and 51.3%, respectively, and the partial productivity was increased by 20.3% and 10.0%, respectively. (4) Organic fertilizers and biological organic fertilizers instead of chemical fertilizer increased soil fertility (organic matter, total nitrogen, available phosphorus, available potassium contents), nitrate nitrogen residue in soil surface was significantly decreased by 9.6%-23.0%, and there was no obvious leaching phenomenon of nitrate nitrogen in 2 m soil layer after 5 years. 【Conclusion】 Instead of chemical fertilizer, organic fertilizers and biological organic fertilizers could improve the absorption of nitrogen, phosphorus and potassium in wheat grain, promote the absorption of nitrogen and phosphorus in soil after anthesis, improve the utilization efficiency of fertilizer, and significantly reduce the residue of nitrate nitrogen in soil, and alleviate soil alkalization, which was helpful to improve soil fertility and ultimately obtain higher economic and environmental benefits. Therefore, it was an important measure for the efficient and sustainable production of dryland wheat fields and the development of green agriculture.

Key words: dryland wheat; organic fertilizer replacing chemical fertilizer; yield efficiency; environmental effects

0 引言

【研究意义】小麦是我国主要粮食作物, 种植面积占粮食种植面积的 22%, 其中 70% 为旱地小麦, 产量占小麦总产 20% 以上^[1]。化肥对小麦的影响举足轻重, 但现阶段化肥施用存在严重不合理现象, 主要表现为重施化肥、氮肥过量和不足并存, 造成环境污染, 影响人体健康^[2]。近年来, 通过有机肥替代部分化肥, 在不减产甚至增产的前提下减少化肥的施用, 这是我国深入开展化肥零增长行动, 加快推进绿色农业发展的重要措施^[3]。有机肥 (尤其是畜禽粪便) 与生物有机肥是目前研究较多的有机肥料, 在提升土壤肥力方面有各自的优势^[4]。明确不同有机肥替代化肥条件下的小麦产量, 养分吸收转运, 土壤环境等情况, 为黄土高原小麦生产合理高效施肥提供依据, 对农业环境的改善具有促进作用。【前人研究进展】有机肥能提

高作物产量, 肥料利用率及土壤肥力, 降低土壤硝态氮残留。刘金华^[5]研究表明等氮条件下, 商品有机肥替代化肥处理能提高小麦株高和产量。杨修一等^[6]研究表明有机肥替代化肥氮素, 配合控释尿素施用, 可显著增加土壤总碳和铵态氮含量。沈冰涛等^[7]研究表明与单施化肥处理相比, 有机肥替代化肥能提高小麦产量和土壤养分及部分酶活性。赵聪等^[8]研究表明, 有机肥配施低量无机肥既能提高土壤肥力, 又能缓解硝态氮在土壤剖面中的累积和淋溶。吕凤莲等^[9]研究表明, 有机肥替代 75% 化肥氮可以提高作物产量和氮效率, 增加年经济效益, 同时有效减少土壤硝态氮的残留量。MARCOTE 等^[10]研究表明, 增施有机肥料和微生物肥料有利于改善土壤理化性质和微生物区系。宋震震等^[11]研究发现, 长期施用有机肥能显著增加土壤微生物碳和氮, 能提高土壤碱性磷酸酶和蔗糖酶的活性。宋松等^[12]研究表明生物有机肥可以改善土壤团粒

结构,根系环境和土壤酶活性,提高作物吸收养分能力。韩晓增等^[13]研究发现,长期施用有机肥能使土壤pH稳定在一个适宜作物生长的范围。【本研究切入点】黄土高原是典型的旱作麦田区,过量施肥导致养分损失严重。以往的相关研究大多集中在施肥对产量等的影响,本项研究在测控施肥即“1 m 土层硝态氮监控施氮肥,0—40 cm 土层磷、钾衡量施肥”基础上,分别用有机肥、生物有机肥替代部分化肥,研究长期有机替代后养分利用转移及土壤环境效应等。【拟解决的关键问题】本研究依托旱地小麦水肥高效长期定位试验区,每年在测控定量减施氮肥的基础上,以有机肥和生物有机肥替代部分化肥,试验进行5年,研究其对小麦产量及其构成,籽粒氮、磷、钾含量,养分的转移吸收,肥料利用效率及土壤环境等的影响,以便为当地麦田生产的科学环境友好施肥管理以及绿色农业发展提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2013—2018年在山西省洪洞县刘家垣镇旱地麦田产区进行,试验区处于山西省中南部,气候干燥,降水量少。此地区年均日照时间在2 450 h左右,年均平均气温为12℃以下,一年的有效积温约3 327℃,平均年降水量460—500 mm,每年的降水主要集中在7、8、9月份,是一个典型的雨养旱地农业区。试验土壤类型为石灰性褐土,土壤质地为中

壤,播前表层土壤各养分含量为:有机质 15.3 g·kg⁻¹,全氮 0.8 g·kg⁻¹,硝态氮 8.1 mg·kg⁻¹,有效磷 11.7 mg·kg⁻¹,速效钾 205.4 mg·kg⁻¹,pH7.6,容重 1.2 g·cm⁻³。种植小麦为晋麦 47。

1.2 试验设计

试验设置4个处理,4次重复,采用随机区组设计,小区面积0.012 hm²。4个处理均为垄膜沟播种植模式,处理1(FP)为农户施肥,按照当地农户经验施肥;处理2(OF)为测控施化肥,即“1 m 土层硝态氮监控施氮肥,0—40 cm 土层磷、钾衡量施肥”技术;处理3(OFM)是以有机肥替代处理2部分化肥、处理4(OFB)是以生物有机肥替代处理2部分化肥。处理2、3、4遵循N、P、K等养分量施肥,偏差养分利用尿素、过磷酸钙、氯化钾补齐。各处理均设置空白对照。试验中所施氮肥为尿素(含N 46%),磷肥为过磷酸钙(含P₂O₅ 16%),钾肥为氯化钾(含K₂O 60%),处理3的有机肥为腐熟的鸡粪,养分含量(N 1.4%、P₂O₅ 2.7%、K₂O 1.6%),处理4的生物有机肥由山西农业大学资源环境学院微生物实验室提供,以处理3中鸡粪为基质,添加菌种培养制成有机肥,菌种包括:固氮菌、溶磷菌。每年于小麦播前测定土壤养分含量,根据养分含量确定施肥量,5年的各处理施肥量见表1。

所有肥料均作为底肥,在小麦播种前均匀撒入相应小区,小麦播量为150 kg·hm⁻²。5年的播种均在9月底至10月初进行,收获在6月初进行。每年6月中旬至9月中旬为夏闲期。

表 1 2013—2018 年试验区各处理养分用量
Table 1 Nutrient consumption of each treatment in the test area from 2013 to 2018 (N-P₂O₅-K₂O, kg·hm⁻²)

处理 Treatment	年度 Year				
	2013—2014	2014—2015	2015—2016	2016—2017	2017—2018
无机肥 FP	150.0-60.0-0.0	150.0-60.0-0.0	150.0-60.0-0.0	150.0-60.0-0.0	150.0-60.0-0
无机肥 OF	95.0-64.0-32.0	105.0-52.0-30.0	114.0-55.0-45.0	91.0-75.0-32.0	84.0-111.0-29.0
无机肥+有机肥	(52.0-0.0-0.0) +	(47.0-0.0-0.0) +	(76.0-0.0-14.0)+	(64.0-22.0-0.0) +	(60.0-62.0-0.0) +
OFM	(43.0-64.0-32.0)	(58.0-52.0-30.0)	(38.0-55.0-31.0)	(27.0-53.0-32.0)	(24.0-49.0-29.0)
无机肥+生物有机肥	(52.0-0.0-0.0) +	(47.0-0.0-0.0) +	(76.0-0.0-14.0)+	(64.0-22.0-0.0) +	(60.0-62.0-0.0) +
OFB	(43.0-64.0-32.0)	(58.0-52.0-30.0)	(38.0-55.0-31.0)	(27.0-53.0-32.0)	(24.0-49.0-29.0)

1.3 样品的采集及测定方法

1.3.1 样品采集 冬小麦播前、收获时采集0—2 m 土层的土样,每20 cm为一层。测定2 m 土层硝态氮,0—40 cm 土层有效磷、速效钾含量。

在冬小麦开花期、收获期采集植株样品,用于各

器官氮素含量测定;在收获期各小区收获3 m×20 m 样方,脱粒计产,并选取代表性3个1 m 长的小麦样段,调查穗数、穗粒数及千粒重。

1.3.2 样品测定方法

(1) 植株氮、磷、钾含量。统一用H₂SO₄-H₂O₂

法消煮, 植株的氮、磷、钾含量分别用半微量开氏法, 蒸馏定氮; 钒钼黄比色法; 火焰光度计法测定。

(2) 土壤硝态氮测定: CaCl_2 浸提, 流动分析仪测定。

(3) 土壤有效磷测定: $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 浸提-钼蓝比色法测定。

(4) 土壤速效钾测定: 采用 $1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NH}_4\text{OAc}$ 浸提-火焰光度法测定。

(5) 土壤全氮的测定: 开氏蒸馏法。

(6) 土壤有机质测定: 采用容量法重铬酸钾氧化-油浴外加热法。

(7) 土壤 pH 的测定: 水土比 1:1, pH 计测定。

1.3.3 计算方法

花前营养器官氮(磷、钾)素转移量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) = 花期地上部氮(磷、钾)素积累量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) - 成熟期地上部营养器官氮(磷、钾)素积累量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$);

花后土壤氮(磷、钾)素吸收量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) = 籽粒氮(磷、钾)素积累量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) - 花前营养器官氮(磷、钾)素转移量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$);

氮(磷、钾)肥表观回收率(%) = $[\text{施氮(磷、钾)区地上部吸氮量}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) - \text{对照区地上部吸氮(磷、钾)量}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})] / \text{施氮(磷、钾)量}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) \times 100$;

氮(磷、钾)肥农学效率($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) = $[\text{施氮(磷、钾)区产量} - \text{不施氮区产量}] / \text{施氮(磷、钾)量}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$;

氮(磷、钾)肥偏生产力($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) = $\text{施氮(磷、钾)区的籽粒产量}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) / \text{施氮(磷、钾)量}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ 。

1.4 统计分析

试验数据采用 Excel 2010 整理作图, SPSS 进行方差分析, 多重比较采用 LSD 法, 差异显著水平为 0.05。

2 结果

2.1 有机肥替代化肥对小麦产量构成及效益的影响

与 FP 处理相比, OFM、OFB 处理 5 年平均减施化肥氮素 35%, 年均籽粒产量显著提高 17.2%—21.4%, 年均生物产量显著提高 17.5%—19.9%。年均纯收入显著提高 44.3%—54.7%。与 OF 处理相比, OFM、OFB 处理在等养分投入的前提下, 5 年平均替代化肥氮素 40%, 年均籽粒产量显著提高 6.0%—9.8%, 年均生物产量提高 5.9%—8.1%; 年均纯收入显著提高 12.9%—21.0% (表 2)。

从产量构成看, 本试验籽粒产量与公顷穗数、穗

粒数及千粒重的相关性分别为 0.862**、0.309、0.672*, 表明冬小麦产量形成主要取决于公顷穗数, 其次是千粒重。OFM、OFB 处理的公顷穗数和千粒重的平均值均高于 OF 处理, 说明有机肥、生物有机肥替代化肥主要通过提高公顷穗数和千粒重提高小麦产量, 从而提高农民收入。

2.2 有机肥替代化肥对小麦籽粒氮磷钾含量的影响

OFM、OFB 处理与 FP 处理相比, 籽粒氮含量平均显著提高 9.6%—12.8%, 磷含量显著提高 15.4%—20.9%, 钾含量显著提高 13.2%—18.3% (表 3); OFM、OFB 处理与 OF 处理相比, 籽粒氮含量显著提高 9.6%—12.8%, 磷含量显著提高 12.5%—17.9%, 钾素提高 5.9%—10.7%, 但差异不显著。OFB 处理的籽粒氮、磷、钾含量虽高于 OFM 处理, 但差异不显著。说明有机肥、生物有机肥替代化肥可以促进籽粒对氮、磷、钾的吸收积累。

2.3 有机肥替代化肥对小麦养分转移利用的影响

4 个处理的籽粒氮、磷素花前营养器官转移量均高于花后土壤吸收量, 钾素花后土壤吸收量高于花前营养器官转移量 (表 4)。从氮素来看, OFM、OFB 处理与 FP 处理相比, 花前转移量平均显著提高 29.0%—39.5%, 花后吸收量显著提高 52.7%—54.4%; 与 OF 处理相比, 花前转移量平均提高 9.1%—18.0%, 花后吸收量显著提高 48.8%—50.5%。从磷素来看, OFM、OFB 处理的花前转移量比 FP 处理提高 19.8%—29.3%, 比 OF 处理提高 2.7%—10.8%, 花后吸收量比 FP 处理显著提高 72.9%—78.6%, 比 OF 处理显著提高 70.5%—76.2%。从钾素来看, OFM、OFB 处理比 FP 处理花前转移量平均提高 23.3%—45.9%, 花后吸收量提高 40.3%—42.9%; 比 OF 处理花前转移量平均提高 20.2%—42.4%, 花后吸收量提高 13.6%—15.8%, 差异均不显著。有机肥替代化肥后, 籽粒氮、磷、钾素的花前营养器官转移量、花后土壤吸收量均提高, 并且氮、磷素的花后土壤吸收为显著提高。说明有机肥、生物有机肥替代化肥处理可以提高籽粒氮、磷、钾整体的转移吸收量, 特别是促进了氮、磷素的花后土壤吸收量。

2.4 有机肥替代化肥对肥料利用效率的影响

OFM、OFB 处理与 FP 处理相比, 氮肥的平均表观回收率、农学效率、偏生产力分别显著提高 126.0%—163.7%、149.6%—186.0%、90.3%—97.1%, 磷肥的分别提高 47.5%—65.3%、50.0%—72.1%、12.9%—

表 2 2013—2018 年各处理小麦产量构成及效益

Table 2 Composition and benefits of wheat production from 2013 to 2018

年度 Year	处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield (kg·hm ⁻²)	生物产量 Biological yield (kg·hm ⁻²)	产量构成 Yield component			成本 Cost (yuan/hm ²)	产量收入 Income (yuan/hm ²)	纯收入 Net profit (yuan/hm ²)
				公顷穗数	穗粒数	千粒重			
				Spike number (×10 ⁴ ·hm ⁻²)	Kernel number per spike	1000-grain weight (g)			
2013—2014	FP	4562.7c	9948.3c	480.2c	19.5a	48.9a	5853.0	10950.4	5097.4d
	OF	5245.9b	12565.7b	533.6b	19.7a	47.7a	6162.3	12590.1	6427.9c
	OFM	5685.8a	12591.6ab	597.6a	19.0a	50.1a	5879.5	13645.9	7766.4b
	OFB	5893.9a	13235.2a	603.1a	20.6a	50.6a	5879.5	14145.3	8265.8a
2014—2015	FP	4716.0c	10222.8c	550.7c	23.8a	42.2b	5958.0	11318.5	5360.5d
	OF	5050.9b	11572.7b	641.3a	24.3a	42.1b	5632.3	12122.2	6489.9bc
	OFM	5236.3ab	12179.4a	557.0c	23.1a	43.6a	5705.0	12567.1	6862.1ab
	OFB	5400.0a	12559.0a	595.6b	23.6a	44.1a	5705.0	12960.0	7255.0a
2015—2016	FP	3334.1c	7367.2c	450.2bc	22.0b	41.7b	5958.0	8001.8	2043.8c
	OF	3825.4ab	8360.2ab	487.2b	21.6b	44.1a	5629.2	9180.9	3551.7ab
	OFM	3944.9ab	8152.9ab	447.3bc	25.2a	43.8a	5713.2	9467.8	3935.7ab
	OFB	4107.2a	8673.3a	513.7a	24.1a	44.2a	5713.2	9857.2	4325.1a
2016—2017	FP	5091.6c	11748.5c	507.4b	24.4ab	43.7ab	5958.0	12219.9	6261.9ab
	OF	5582.7b	12244.7b	550.2ab	24.8ab	43.2ab	5906.4	13398.4	7492.0ab
	OFM	5869.9a	13637.6a	567.4a	23.3b	43.3ab	6316.6	14087.8	7771.2a
	OFB	6062.6a	13356.4ab	571.2a	27.4a	44.5a	6316.6	14550.2	8233.6a
2017—2018	FP	2927.4c	9840.5ab	351.4ab	19.5a	37.9a	5958.0	7318.4	1360.4b
	OF	3100.4bc	9763.6ab	330.4b	19.7a	38.9a	5982.8	7751.1	1767.9b
	OFM	3440.3ab	11141.7a	395.9a	20.3a	39.9a	5896.8	8600.6	2703.6a
	OFB	3584.6a	11084.0a	416.6a	21.6a	41.0a	5896.8	8961.5	3064.4a
平均值 Mean	FP	4126.4c	9825.5c	467.8b	21.9b	42.8b	5937.0	9961.8	4024.8c
	OF	4561.1b	10901.4b	508.4b	22.0ab	43.2b	5862.7	11008.5	5145.9b
	OFM	4835.5a	11540.6ab	512.7ab	22.2ab	44.4a	5902.2	11673.9	5807.8a
	OFB	5009.6a	11781.6a	539.9a	23.5a	45.0a	5902.2	12094.8	6228.8a

同一年份同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同
Values followed by different small letters within a column in the same year indicate significant differences at the 0.05 level. The same as below

表 3 2013—2018 年各处理小麦籽粒氮、磷、钾含量

Table 3 The content of nitrogen, phosphorus and potassium in wheat grains from 2013 to 2018 (g·kg⁻¹)

含量 Content	处理 Treatment	年份 Year					平均值 Mean
		2013—2014	2014—2015	2015—2016	2016—2017	2017—2018	
氮 Nitrogen	FP	19.1c	21.4b	17.8a	15.2b	20.4b	18.8b
	OF	20.3b	21.1b	18.5a	16.8b	17.2c	18.8b
	OFM	20.9b	22.7a	19.9a	18.8a	21.0a	20.6a
	OFB	23.6a	22.5a	18.8a	19.7a	21.5a	21.2a
磷 Phosphorus	FP	4.4a	4.5a	6.0c	5.4d	5.2bc	5.1b
	OF	4.6a	4.4a	6.1bc	5.8c	5.2c	5.2b
	OFM	5.1a	4.6a	7.0ab	7.4b	5.7b	5.9a
	OFB	4.9a	4.9a	6.9a	7.7a	6.4a	6.1a
钾 Potassium	FP	3.7c	3.2a	3.7c	4.2b	5.8a	4.1b
	OF	4.8a	3.2a	4.6a	3.9b	5.3b	4.4ab
	OFM	4.2b	3.4a	4.6b	5.0a	6.1a	4.6a
	OFB	5.1a	3.6a	4.7a	4.8a	6.1a	4.9a

表 4 2013—2018 年各处理籽粒氮、磷、钾素转移吸收量
Table 4 The amount of nitrogen, phosphorus and potassium transferred and absorbed by each treatment from 2013 to 2018 (kg·hm⁻²)

年度 Year	处理 Treatment	氮 Nitrogen		磷 Phosphorus		钾 Potassium	
		转移量 Amount of translocation	吸收量 Amount of uptake	转移量 Amount of translocation	吸收量 Amount of uptake	转移量 Amount of translocation	吸收量 Amount of uptake
2013—2014	FP	76.9a	14.1d	16.0ab	4.0c	9.0b	7.9c
	OF	79.4a	18.5c	17.6a	6.6b	3.3c	18.9a
	OFM	71.5b	42.3b	11.0c	17.9a	6.0c	17.9a
	OFB	80.3a	53.7a	12.9c	15.7a	17.5a	12.4b
2014—2015	FP	59.2c	21.8b	11.6c	9.5b	4.4a	12.7ab
	OF	91.9ab	16.2bc	13.8a	8.5b	1.8a	15.1a
	OFM	95.9a	27.3b	12.7b	11.7a	7.8a	13.6ab
	OFB	87.6b	30.4a	13.7a	12.6a	6.7a	11.1b
2015—2016	FP	40.2b	13.4b	16.2b	3.6b	3.1b	9.4b
	OF	41.0b	13.2b	16.4b	7.0ab	4.1b	13.6a
	OFM	57.8a	20.5a	21.2a	6.2ab	8.9a	9.1b
	OFB	59.8a	17.2ab	20.0a	8.2a	10.1a	9.2b
2016—2017	FP	28.5d	48.8a	11.4a	9.7b	12.6a	8.6a
	OF	40.4c	53.3a	18.8b	4.6c	18.6a	3.2a
	OFM	51.5b	58.7a	20.5a	13.3a	17.1a	12.2a
	OFB	67.3a	52.2a	22.2a	10.2b	10.9a	18.0a
2017—2018	FP	46.7a	14.8b	13.4c	1.9a	6.7ab	9.9ab
	OF	44.8a	14.6b	13.4c	2.6a	8.8a	8.9b
	OFM	47.7a	23.6a	16.8b	2.8a	4.3b	16.5a
	OFB	56.1a	20.8ab	20.0a	2.9a	6.9ab	17.2a
平均值 Mean	FP	50.3b	22.6b	13.7a	5.8b	7.1a	9.7a
	OF	59.5ab	23.2b	16.0a	5.8b	7.3a	12.0a
	OFM	64.9a	34.5a	16.4a	10.3a	8.8a	13.9a
	OFB	70.2a	34.9a	17.7a	9.9a	10.4a	13.6a

16.9%，与 FP 处理相比，差异未达显著水平（表 5）。OFB 处理与 OF 处理相比，氮、磷肥的表观回收率显著提高 48.6%、65.5%，氮、钾肥的农学效率显著提高 71.3%、51.3%，偏生产力显著提高 20.3%、10.0%，磷肥的农学效率和偏生产力均有一定程度提高，但差异未达显著水平。OFM 处理与 OF 处理相比，氮、磷、钾肥料利用率也均有提高，其中钾肥的农学效率和偏生产力显著提高 33.9%和 6.2%。表明有机肥、生物有机肥替代化肥对肥料表观回收率，农学效率，偏生产力均有不同程度的提高作用，即提高了地上部及籽粒

对氮、磷、钾的吸收利用程度，从而促进了产量的增加。其中生物有机肥替代后的效果更优于有机肥。

2.5 有机肥替代化肥对土壤肥力及环境的影响

表 6 为 2018 年各处理收获后表层（0—20 cm）土壤肥力状况，OFB 处理的有机质含量比 FP、OF 处理显著提高 4.8%—6.3%，比 OFM 处理提高 1.3%，但差异不显著。有效磷含量与有机质规律一致，OFB 处理比 FP、OF 处理显著提高 41.3%—87.5%，比 OFM 处理提高 24.2%，但差异不显著。速效钾含量 OFB 处理比 FP、OF 处理显著提高 17.8%—37.2%，OFM 与 OFB

处理间差异不显著。表 6 可以看出, OFM、OFB 处理比 FP、OF 处理的 pH 降低 1.3%—2.5%, 但处理间差异不显著。说明长期施用有机肥和生物有机肥对土壤 pH 无改善调节作用。

同时由表 6 可以看出, 土壤表层硝态氮贮量, OFM、OFB 处理比 FP 处理显著降低 36.5%—45.8%, 比 OF 处理显著降低 9.6%—23.0%; 图 1 是 2013 年播前和 2018 年收获时不同处理 2 m 土层硝态氮累积状况。由图 1 可以看出, 2018 年收获时, 各处理硝态氮

在 0—40 cm 土层均有较高累积, 其中 FP 处理累积量最高。同时 FP 处理 2 m 土层硝态氮累积量也达到了 347.2 kg·hm⁻², 显著高于其他各处理, 比 2013 年播前提高了 123.0%, 并且在 1—2 m 土层有明显的淋溶累积。而 OFM、OFB 处理的 2 m 土层硝态氮累积量较 FP 处理降低 67.0%—69.1%, 较 OF 处理降低 2.5%—4.0%, 较 2013 年播前降低 21.7%—26.7%。表明通过有机肥、生物菌肥替代化肥能促进小麦对氮素的吸收, 减少了土壤硝态氮残留, 降低了土壤退化和环境影响的风险。

表 5 2013—2018 年各处理肥料利用效率

Table 5 Utilization efficiency of fertilizers processed from 2013 to 2018

年份 Year	处理 Treatment	表观回收率			农学效率			偏生产力		
		Apparent recovery (%)			Agronomic efficiency (kg·kg ⁻¹)			Partial productivity (kg·kg ⁻¹)		
		Nitrogen fertilizer	Phosphate fertilizer	Potassium fertilizer	Nitrogen fertilizer	Phosphate fertilizer	Potassium fertilizer	Nitrogen fertilizer	Phosphate fertilizer	Potassium fertilizer
2013—2014	FP	25.0a	18.0b	—	10.1a	25.2a	—	30.4b	76.0b	—
	OF	20.9b	16.3b	247.5a	8.1a	12.0b	24.0a	55.2ab	82.0b	163.9b
	OFM	22.1ab	27.0a	219.0b	7.5a	11.2b	22.4a	59.9a	88.8a	177.7a
	OFB	26.7a	26.6a	219.3b	8.3a	12.4b	24.7a	62.0a	92.1a	184.2a
2014—2015	FP	11.5c	17.2c	—	2.6b	6.4cd	—	31.4b	78.6b	—
	OF	20.6b	18.7c	40.2c	2.5b	5.1d	8.1b	48.1a	97.1a	168.4b
	OFM	24.8ab	36.2b	116.1ab	11.5a	10.3ab	18.6a	49.9a	100.7a	174.5a
	OFB	30.1a	48.8a	130.6a	13.1a	11.7a	21.4a	51.4a	103.9a	180.0a
2015—2016	FP	12.3b	14.7b	—	5.6b	9.7a	—	22.2b	55.6b	—
	OF	46.8a	29.1a	43.9b	20.7a	42.9a	52.4a	33.6a	69.6ab	85.0a
	OFM	51.5a	21.1ab	40.9b	21.6a	44.8a	54.8a	34.6a	71.7ab	87.7a
	OFB	58.2a	23.8ab	53.3a	25.2a	52.3a	63.9a	36.0a	74.7a	91.3a
2016—2017	FP	11.5c	27.2c	—	3.6b	3.6b	—	27.7c	69.2b	—
	OF	21.6b	28.7c	42.2c	5.5b	5.4b	8.1b	41.4b	50.2c	175.6b
	OFM	30.3a	48.8a	85.6a	12.0a	12.0a	21.4a	64.5a	78.3a	184.6a
	OFB	34.2a	48.6a	86.5a	13.1a	13.1a	20.6a	66.6a	80.8a	190.7a
2017—2018	FP	13.2b	33.0a	—	4.7b	11.8a	—	19.5c	48.8a	—
	OF	20.6b	10.4b	73.8b	7.4b	3.7b	14.2b	36.9b	27.9c	106.9b
	OFM	37.6a	19.0b	72.6b	13.4a	6.8b	25.9ab	41.0ab	31.0bc	118.6ab
	OFB	44.8a	22.6ab	86.5a	16.0a	8.1ab	30.9a	42.7a	32.3b	123.6a
平均值 Mean	FP	14.7c	22.0ab	—	5.3c	11.3a	—	26.3c	65.6a	—
	OF	26.1b	20.6b	89.5a	8.9bc	13.8a	21.4b	43.0b	65.4a	140.0c
	OFM	33.2ab	30.4ab	106.8a	13.2ab	17.0a	28.6a	50.0ab	74.1a	148.6b
	OFB	38.8a	34.1a	115.2a	15.2a	19.5a	32.3a	51.8a	76.8a	153.9a

FP 处理不施钾肥, 所以无钾肥利用效率
FP treatment didn't apply potassium fertilizer, so haven't potassium fertilizer utilization efficiency

表 6 2018 年各处理收获期表层土壤肥力及硝态氮残留状况

Table 6 Surface soil fertility and nitrate nitrogen residues during the harvest period of each treatment in 2018

处理	有机质	全氮	有效磷	速效钾	硝态氮	pH
Treatment	Organic matter	Total nitrogen	Available phosphorus	Available potassium	Nitrate nitrogen	
	(g·kg ⁻¹)	(g·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)	(kg·hm ⁻²)	
FP	14.3c	0.8a	27.6b	183b	69.4a	8.1a
OF	14.5bc	0.8a	20.8b	213b	48.8b	8.0a
OFM	15.0ab	0.8a	31.4ab	254a	37.6d	7.9a
OFB	15.2a	0.8a	39.0a	251a	44.1c	7.9a

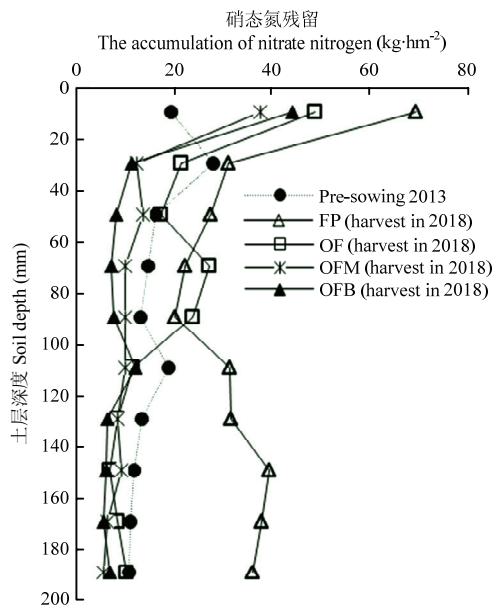


图 1 有机肥替代化肥下 2 m 土层硝态氮残留特征

Fig. 1 Residual characteristics of nitrate nitrogen in 2 m soil layer under organic fertilizer replacing chemical fertilizer

3 讨论

3.1 有机肥替代化肥对小麦产量的影响

有机肥替代化肥能提高作物产量。本试验中有机肥、生物有机肥 5 年平均替代化肥氮素 40%，籽粒产量显著提高 6.0%—9.8%；与前人研究结果基本一致。赵军等^[14]研究表明，猪粪替代无机肥提高了小麦产量；吕凤莲等^[9]研究表明，有机肥替代 75%化肥氮可以提高小麦-玉米轮作作物产量和经济效益。孟琳等^[15]研究表明，有机肥料氮替代化肥氮提高了稻谷产量。王斌等^[16]的研究也表明生物有机肥的配施与减量优化平衡施肥在稳产的同时进一步提高氮素利用率，能

节约成本，提高产量。有机肥替代化肥既发挥了化肥释放养分的速效性，也发挥了有机肥的缓释性^[17]，有机和无机养分能协调平衡供应^[18]，避免前期旺长和后期早衰，有机肥中丰富的有机质和微生物，能改善土壤结构^[19]，促进小麦整个生育期吸收养分^[20]，实现增产的目的。本试验中 FP 处理的施氮量最高，属于过量施肥，产量最低，说明过量施肥不会提高产量，与马臣等^[21]的研究结果一致，可能因为氮肥过量，但是磷、钾肥不平衡，不满足作物需求，导致籽粒产量最低。

本试验表明籽粒产量与公顷穗数相关性最大，其次是千粒重，本试验“有机替代”处理的公顷穗数和千粒重均提高。李廷亮等^[22]的研究也表明，公顷穗数和千粒重对小麦产量贡献最大。黄婷苗等^[23]和咎亚玲等^[24]的研究表明公顷穗数的增加是小麦增产的主要原因。因为有机肥替代化肥可以改善小麦生育中后期的营养条件，促进幼穗分化^[25]，促进灌浆期干物质向籽粒转移^[26]，提高成穗数和千粒重，为产量提高奠定基础。上述结果说明，有机肥、生物有机肥替代化肥可以通过提高公顷穗数和千粒重增加产量，增加收入，适合在旱地推广。

3.2 有机肥替代化肥对麦田籽粒养分吸收转移及肥料利用率的影响

本试验结果表明冬小麦籽粒中的氮、磷、钾一部分来源于花前营养器官转移，一部分来源于花后土壤吸收，与高洪军等^[27]和王德梅等^[28]研究结果一致。有机肥替代化肥后，籽粒氮、磷含量显著提高，与前人研究结果一致，谢军等^[29]与梁靖越^[30]研究均表明，有机肥替代化肥能促进氮素由茎叶向穗部积累，从而提高籽粒氮素积累量。刘彦伶等^[31]研究表明，施用有机肥有利于促进干物质和磷素的积累及其向籽粒的转运。从 5 年的试验结果来看，“有机替代”后籽粒氮、磷、钾素的花前转移、花后吸收均提高，主要促进了

氮、磷素的花后土壤吸收。因为化肥主要在作物前期发挥作用,而后期有机肥释放养分速率高于化肥^[32],所以“有机替代”有利于籽粒整个生育期的氮、磷、钾素积累。刘彦伶等^[31]研究表明有机无机配施可促进花后籽粒对磷素的吸收。杨宁等^[32]研究表明,花前累积在营养器官中的氮、磷养分是成熟期籽粒氮、磷的重要来源,花后的氮、磷养分累积才是造成成熟期籽粒氮、磷吸收差异的重要原因。本研究得出相似的结论,因为氮、磷肥的合理配施,适当延缓小麦后期衰老,促进氮、磷素的积累及其向籽粒的转运,并且有机肥在小麦生长后期发挥较大作用,促进花后有更多的氮、磷进入籽粒,这是氮、磷素花后吸收提高的重要原因。

本试验有机肥、生物有机肥替代化肥后的氮、磷、钾肥的表现回收率、农学效率、偏生产力均有所提高,生物有机肥替代后的肥料利用效率最高,FP处理施肥不平衡,且产量最低,从而导致其肥料利用效率均最低。周江明等^[33]和任科宇^[34]等研究均表明,施用有机肥可以显著提高作物的氮肥利用率,并且任科宇的研究表明,在有机质含量较低、降雨量较少的西北地区配施有机肥后氮肥利用率的提高幅度最大。谢勇等^[35]研究表明,有机无机配施的氮、磷肥料利用率最高。本试验结果与前人研究结果一致,有机肥替代化肥处理可以提高小麦养分吸收转移及产量,相应地提高了氮、磷、钾肥的表现回收率、农学效率和偏生产力。生物有机肥含有比有机肥更丰富的微生物,更能促进土壤活性,提高作物吸收养分,从而提高肥料利用效率,而本试验中生物有机肥替代后的养分转移量,产量均为最高。所以氮、磷、钾平衡施肥及有机替代,能促进养分花前、花后的转移吸收,从而提高籽粒养分含量,提高肥料利用效率。

3.3 有机肥替代化肥对土壤肥力及环境的影响

本试验中有机肥、生物有机肥替代化肥后,表层土壤有机质,全氮、有效磷、速效钾含量均有所提高。温延臣等^[36]研究表明,有机肥部分替代化肥能提高土壤有机碳和全氮含量。祝英等^[37]研究表明,有机肥替代化肥能改善土壤微生物数量,有利于土壤养分的储存和供应强度。本试验结果与前人研究结果一致。因为有机肥加入提高了土壤有机质含量,养分和碳氮比的提高增加了土壤微生物的活性,微生物作用于土壤释放的有机质也在土壤中积累^[38],使得土壤有机质含量得以提高。大量微生物和腐殖质进入土壤,降低无机磷的固定并促进无机磷的溶解,减少磷、钾固持^[39],

从而释放磷、钾养分。有机肥与化肥配施既能快速提高土壤中有效氮的含量,又能长久保存土壤氮素^[40],低温、少雨的地区有机肥可以更好地发挥其保温保水性,更利于激发土壤中微生物的活性,促进作物对养分的吸收^[41]。有机肥、生物有机肥替代后的pH略有降低。胡诚等^[42]研究发现,随着有机肥施用量的增加,土壤pH值降低,逐渐接近中性。柯蓓等^[43]研究表明有机肥替代部分化肥能稳定土壤pH。本研究结果与前人研究结果不太一致。可能是因为本试验时间较短,或者其他原因,有待进一步研究。

本试验中有机肥替代化肥后的土壤表层和2 m土层硝态氮储量均有显著降低,且2 m土层硝态氮无明显淋溶现象。吕凤莲等^[9]和马臣等^[21]研究均表明,有机肥替代化肥能减少硝态氮残留。有机替代后土壤硝态氮聚集在表层,降低了硝态氮向下层淋溶的风险。有机肥的添加改善了土壤理化性质,增加了土壤团聚化程度,提高微生物活性,更多的氮被利用,从而降低无机氮的残留^[44]。因此有机肥、生物有机肥替代化肥可以促进作物吸收养分,增加土壤养分含量,降低土壤硝态氮的残留,对降低环境污染具有重要意义。

4 结论

在测控施肥基础上,有机肥、生物有机肥替代化肥,促进了营养元素的转移、吸收量,特别是促进了氮、磷素的花后土壤吸收量,分别达到48.8%—50.5%,70.5%—76.2%,籽粒氮、磷含量平均分别显著提高11.5%、15.2%。由于公顷穗数和千粒重的提高,平均籽粒产量显著提高了6.0%—9.8%,平均纯收入提高12.9%—21.0%;使得氮、磷、钾肥料表现回收率,农学效率,偏生产力均有不同程度提高,同时促进了土壤肥力的提升,土壤表层硝态氮贮量显著降低了9.6%—23.0%,土壤pH降低1.3%—2.5%,获得了明显的经济和环境效益,因此有机替代是实现旱地麦田高效安全持续生产以及发展绿色农业的科学施肥技术。

References

- [1] 马清霞,王朝辉,惠晓丽,张翔,张悦悦,侯赛宾,黄宁,罗来超,张世君,党海燕. 基于产量和养分含量的旱地小麦施磷量和土壤有效磷优化. 中国农业科学, 2019, 52(1): 73-85.
MA Q X, WANG Z H, HUI X L, ZHANG X, ZHANG Y Y, HOU S B, HUANG N, LUO L C, ZHANG S J, DANG H Y. Optimization of phosphorus application and soil available phosphorus in dryland

- wheat based on yield and nutrient content. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(1): 73-85. (in Chinese)
- [2] LEI B, XU Y, TANG Y, HAUPTFLEISCH K. Shifts in carbon stocks through soil profiles following management change in intensive agricultural systems. *Agricultural Sciences*, 2015, 6(3): 304-314.
- [3] 杜春燕. 有机肥替代化肥对果实产量、品质及土壤肥力的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- DU C Y. Effects of replacing organic fertilizer with chemical fertilizer on fruit yield, quality and soil fertility[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese)
- [4] 黄兴成, 石孝均, 李渝, 张雅蓉, 刘彦伶, 张文安, 蒋太明. 基础地力对黄壤区粮油高产、稳产和可持续生产的影响. *中国农业科学*, 2017, 50(2): 300-312.
- HUANG X C, SHI X J, LI Y, ZHANG Y R, LIU Y L, ZHANG W A, JIANG T M. Inherent soil productivity effect on high, steady and sustainable yield of grain and oil crops in yellow soil region. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(2): 300-312. (in Chinese)
- [5] 刘金华, 熊丹莹. 有机肥部分替代化肥对小麦产量和氮肥利用率的影响. *安徽农学通报*, 2020, 26(Z1): 122-123, 144.
- LIU J H, XIONG D Y. Effects of partial substitution of organic fertilizer for chemical fertilizer on wheat yield and nitrogen use efficiency. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2020, 26(Z1): 122-123, 144. (in Chinese)
- [6] 杨修一, 耿计彪, 于起庆, 闫早发, 李慧, 崔园超, 杨皓. 有机肥替代化肥氮素对麦田土壤碳氮迁移特征的影响. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 230-236.
- YANG X Y, GENG J B, YU Q Q, YAN Z F, LI H, CUI Y C, YANG H. Effects of organic fertilizer replacing nitrogen of chemical fertilizer on transport characteristics of soil carbon and nitrogen in wheat field. *Journal of Soil and Water Conversion*, 2019, 33(5): 230-236. (in Chinese)
- [7] 沈冰涛, 张孝倩, 陈红, 江旭聪, 李孝良, 汪建飞, 肖新. 有机肥替代化肥对小麦产量及土壤养分和酶活性的影响. *长江大学学报(自然科学版)*, 2019, 16(5): 46-52, 7-8.
- SHEN B T, ZHANG X Q, CHEN H, JIANG X C, LI X L, WANG J F, XIAO X. Effect of substituting organic fertilizer for chemical fertilizer on wheat yield and soil nutrient and enzyme activity. *Journal of Yangtze University(Natural Science Edition)*, 2019, 16(5): 46-52, 7-8. (in Chinese)
- [8] 赵聪, 曹莹菲, 刘克, 杨学云, 吕家珑. 长期不同施肥对壤土氮素分布的影响. *农业环境科学学报*, 2013, 32(7): 1375-1381.
- ZHAO C, CAO Y F, LIU Y K, YANG X Y, LÜ J L. Effects of long-term different fertilization on the nitrogen distribution in manural loessial soil. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(7): 1375-1381. (in Chinese)
- [9] 吕凤莲, 侯苗苗, 张弘茂, 强久次仁, 周应田, 路国艳, 赵秉强, 杨学云, 张树兰. 壤土冬小麦-夏玉米轮作体系有机肥替代化肥比例研究. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(1): 22-32.
- LÜ F L, HOU M M, ZHANG H T, QIANGJIU C R, ZHOU Y T, LU G Y, ZHAO B Q, YANG X Y, ZHANG S L. Replacement ratio of chemical fertilizer nitrogen with manure under the winter wheatsummer maize rotation system in Lou soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1): 22-32. (in Chinese)
- [10] MARCOTE I, HERNÁNDEZ T, GARCÍA C, POLO A. Influence of one or two successive annual applications of organic fertilizers on the enzyme activity of a soil under barley cultivation. *Bioresource Technology*, 2001, 79(2): 147-154. (in Chinese)
- [11] 宋震震, 李絮花, 李娟, 林治安, 赵秉强. 有机肥和化肥长期施用对土壤活性有机氮组分及酶活性的影响. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(3): 525-533.
- SONG Z Z, LI X H, LI J, LIN Z A, ZHAO B Q. Long-term effects of mineral versus organic fertilizers on soil labile nitrogen fractions and soil enzyme activities in agricultural soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(3): 525-533. (in Chinese)
- [12] 宋松, 孙莉, 石俊雄. 连续施用生物有机肥对烟草青枯病的防治效果. *土壤*, 2013, 45(3): 451-458.
- SONG S, SUN L, SHI J X. Effects of successive application of bioorganic fertilizer on controlling tobacco wilt caused by *Ralstonia solanacearum*. *Soils*, 2013, 45(3): 451-458. (in Chinese)
- [13] 韩晓增, 王凤仙, 王凤菊, 邹文秀. 长期施用有机肥对黑土肥力及作物产量的影响. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(1): 66-71.
- HAN X Z, WANG F X, WANG F J, ZOU W X. Effects of long-term organic manure application on crop yield and fertility of black soil. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(1): 66-71. (in Chinese)
- [14] 赵军, 李勇, 冉炜, 张瑞福, 沈标, 沈其荣. 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. *南京农业大学学报*, 2016, 39(4): 594-602.
- ZHAO J, LI Y, RAN W, ZHANG R F, SHEN B, SHEN Q R. Effects of organic manure partial substitution for chemical fertilizer on crop yield and soil microbiome in a rice-wheat cropping system. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2016, 39(4): 594-602. (in Chinese)
- [15] 孟琳, 张小莉, 蒋小芳, 王秋君, 黄启为, 徐阳春, 杨兴明, 沈其荣. 有机肥料氮替代部分化肥氮对稻谷产量的影响及替代率. *中国农业科学*, 2009, 42(2): 532-542.
- MENG L, ZHANG X L, JIANG X F, WANG Q J, HUANG Q W, XU

- Y C, YANG X M, SHEN Q R. Effects of partial mineral nitrogen substitution by organic fertilizer nitrogen on the yields of rice grains and their proper substitution rate. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(2): 532-542. (in Chinese)
- [16] 王斌, 万运帆, 郭晨, 李玉娥, 秦晓波, 任涛, 赵婧. 控释尿素、稳定性尿素和配施菌剂尿素提高双季稻产量和氮素利用率的效应比较. *植物营养与肥科学报*, 2015, 21(5): 1104-1112.
- WANG B, WAN Y F, GUO C, LI Y E, QIN X B, REN T, ZHAO J. A comparison of the effects of controlled release urea, stable urea and microorganisms increasing double rice yield and nitrogen use efficiency. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(5): 1104-1112. (in Chinese)
- [17] 马凡凡, 邢素林, 甘曼琴, 刘佩诗, 黄瑜, 甘晓玉, 马友华. 有机肥替代化肥对水稻产量、土壤肥力及农田氮磷流失的影响. *作物杂志*, 2019(5): 89-96.
- MA F F, XING S L, GAN M Q, LIU P S, HUANG Y, GAN X Y, MA Y H. Effects of organic fertilizer substituting for chemical fertilizer on rice yield, soil fertility and nitrogen and phosphorus loss in farmland. *Crops*, 2019(5): 89-96. (in Chinese)
- [18] 刘宇辉, 田秀平, 张晴雯, 张爱平, 刘杏认, 杨正礼. 复合菌肥部分替代化肥对冬小麦氮素吸收的影响. *华北农学报*, 2019, 34(2): 178-186.
- LIU Y H, TIAN X P, ZHANG Q W, ZHANG A P, LIU X R, YANG Z L. Nitrogen absorption of winter wheat influenced by combined biofertilizer replace chemical fertilizer. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2019, 34(2): 178-186. (in Chinese)
- [19] 任伟, 赵鑫, 黄收兵, 周楠, 王若男, 陶洪斌, 王璞. 不同密度下增施有机肥对夏玉米物质生产及产量构成的影响. *中国生态农业学报*, 2014, 22(10): 1146-1155.
- REN W, ZHAO X, HUANG S B, ZHOU N, WNAG R N, TAO H B, WNAG P. Effects of application of organic fertilizer under different planting densities on dry matter production and yield formation of summer maize. *Chinese Journal of EcoAgriculture*, 2014, 22(10): 1146-1155. (in Chinese)
- [20] 李小萌, 陈效民, 曲成闯, 张志龙, 张俊, 黄春燕, 刘云梅. 生物有机肥与减量配施化肥对连作黄瓜养分利用率及产量的影响. *水土保持学报*, 2020, 34(2): 309-317.
- LI X M, CHEN X M, QU C C, ZHANG Z L, ZHANG J, HUANG C Y, LIU Y M. Effects of bio-organic fertilizer combined with reduced fertilizer on nutrient utilization and yield of continuous cropping cucumber. *Journal of Soil and Water Conversion*, 2020, 34(2): 309-317. (in Chinese)
- [21] 马臣, 刘艳妮, 梁路, 翟丙年, 张昊青, 王朝辉. 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. *应用生态学报*, 2018, 29(4): 1240-1248.
- MA C, LIU Y N, LIANG L, ZHAI B N, ZHANG H Q, WANG Z H. Effects of combined application of chemical fertilizer and organic manure on wheat yield and leaching of residual nitrate-N in dryland soil. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(4): 1240-1248. (in Chinese)
- [22] 李廷亮, 谢英荷, 高志强, 洪坚平, 孟丽霞, 马红梅, 孟会生, 贾俊香. 黄土高原旱地小麦覆膜增产与氮肥增效分析. *中国农业科学*, 2018, 51(14): 2735-2746.
- LI T L, XIE Y H, GAO Z Q, HONG J P, MENG L X, MA H M, MENG H S, JIA J X. Analysis on yield increasing and nitrogen efficiency enhancing of winter wheat under film mulching cultivation in the Loess Plateau. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(14): 2735-2746. (in Chinese)
- [23] 黄婷苗, 郑险峰, 侯仰毅, 李晓, 王朝辉. 秸秆还田对冬小麦产量和氮、磷、钾吸收利用的影响. *植物营养与肥科学报*, 2015, 21(4): 853-863.
- HUANG T M, ZHENG X F, HOU Y Y, LI X, WANG Z H. Yield and N, P and K uptake and utilization of winter wheat affected by straw return to soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(4): 853-863. (in Chinese)
- [24] 咎亚玲, 王朝辉, 周玲, 戴健. 不同养分投入的各品种小麦产量及养分效率差异研究. *农业机械学报*, 2012, 43(9): 91-98.
- ZAN Y L, WANG Z H, ZHOU L, DAI J. Use efficiency of different winter wheat cultivars response to different nutrient inputs. *Journal Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2012, 43(9): 91-98. (in Chinese)
- [25] 毛平平, 王丽, 张永清, 党建友, 裴雪霞, 武雪萍. 施用有机肥条件下氮肥不同底追比对冬小麦干物质运转和籽粒产量的影响. *中国土壤与肥料*, 2016(5): 50-54.
- MAO P P, WANG L, ZHANG Y Q, DANG J Y, PEI X X, WU X P. Effect of nitrogen fertilization ratio of base and topdressing with biological-organic fertilizers on the growth, yield and its constituent elements of winter wheat. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016(5): 50-54. (in Chinese)
- [26] 陆强, 王继琛, 李静, 王磊, 张丽, 哈丽哈什·依巴提, 王秋君, 张坚超, 黄启为, 沈其荣. 秸秆还田与有机无机肥配施在稻麦轮作体系下对籽粒产量及氮素利用的影响. *南京农业大学学报*, 2014, 37(6): 66-74.
- LU Q, WANG J C, LI J, WANG L, ZHANG L, HALIHASHI Y, WANG Q J, ZHANG J C, HUANG Q W, SHEN Q R. Effects of combined application of straw returning field and organic and

- inorganic fertilizer on rice grain yield and nitrogen utilization. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2014, 37(6): 66-74. (in Chinese)
- [27] 高洪军, 朱平, 彭畅, 张秀芝, 李强, 张卫建. 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. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(2): 318-325.
- GAO H J, ZHU P, PENG C, ZHANG X Z, LI Q, ZHANG W J. Effects of partially replacement of inorganic N with organic materials on nitrogen efficiency of spring maize and soil inorganic nitrogen content under the same N input. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(2): 318-325. (in Chinese)
- [28] 王德梅, 于振文, 张永丽, 许振柱. 不同灌水处理条件下不同小麦品种氮素积累、分配与转移的差异. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(5): 1041-1048.
- WANG D M, YU Z W, ZHANG Y L, XU Z Z. Changes in nitrogen accumulation, distribution, translocation and nitrogen use efficiency in different wheat cultivars under different irrigation condition. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(5): 1041-1048. (in Chinese)
- [29] 谢军, 赵亚南, 陈轩敬, 李丹萍, 徐春丽, 王珂, 张跃强, 石孝均. 有机肥氮替代化肥氮提高玉米产量和氮素吸收利用效率. *中国农业科学*, 2016, 49(20): 3934-3943.
- XIE J, ZHAO Y N, CHEN X J, LI D P, XU C L, WANG K, ZHANG Y Q, SHI X J. Nitrogen of organic manure replacing chemical nitrogenous fertilizer improve maize yield and nitrogen uptake and utilization efficiency. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(20): 3934-3943. (in Chinese)
- [30] 梁靖越, 王昌全, 李冰, 龙思帆, 陈兰. 猪粪配施化肥对稻-麦轮作系统籽粒产量和氮素利用率的影响. *应用生态学报*, 2019, 30(4): 1088-1096.
- LIANG J Y, WANG C Q, LI B, LONG S F, CHEN L. Effects of combined application of pig manure with urea on grain yield and nitrogen utilization efficiency in rice-wheat rotation system. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4): 1088-1096. (in Chinese)
- [31] 刘彦伶, 李渝, 白怡婧, 黄兴成, 张雅蓉, 张萌, 张文安, 蒋太明. 长期不同施肥对水稻干物质和磷素积累与转运的影响. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(7): 1146-1156.
- LIU Y L, LI Y, BAI Y J, HUANG X C, ZHANG Y R, ZHANG M, ZHANG W A, JIANG T M. Effects of long-term different fertilization on accumulation and transport of dry matter and phosphorus in rice. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(7): 1146-1156. (in Chinese)
- [32] 杨宁, 赵护兵, 王朝辉, 张达斌, 高亚军. 豆科作物-小麦轮作方式下旱地小麦花后干物质及养分累积、转移与产量的关系. *生态学报*, 2012, 32(15): 4827-4835.
- YANG N, ZHAO H B, WANG Z H, ZHANG D B, GAO Y J. Accumulation and translocation of dry matter and nutrients of wheat rotated with legumes and its relation to grain yield in a dryland area. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(15): 4827-4835. (in Chinese)
- [33] 周江明. 有机-无机肥配施对水稻产量、品质及氮素吸收的影响. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(1): 234-240.
- ZHOU J M. Effect of combined application of organic and mineral fertilizers on yield, quality and nitrogen uptake of rice. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(1): 234-240. (in Chinese)
- [34] 任科宇, 段英华, 徐明岗, 张旭博. 施用有机肥对我国作物氮肥利用率影响的整合分析. *中国农业科学*, 2019, 52(17): 2983-2996.
- REN K Y, DUAN Y H, XU M G, ZHANG X B. Effect of manure application on nitrogen use efficiency of crops in China: A meta-analysis. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(17): 2983-2996. (in Chinese)
- [35] 谢勇, 赵易艺, 张玉平, 唐丽, 何石福, 石敦杰, 刘强, 荣湘民. 南方丘陵区生物黑炭和有机肥配施化肥的应用研究. *水土保持学报*, 2018, 32(4): 197-203, 215.
- XIE Y, ZHAO Y Y, ZHANG Y P, TANG L, HE S F, SHI D J, LIU Q, RONG X M. Research on application of biochar and organic manure combined with chemical fertilizers in hilly area of southern China. *Journal of Soil and Water Conversion*, 2018, 32(4): 197-203, 215. (in Chinese)
- [36] 温延臣, 张曰东, 袁亮, 李伟, 李燕青, 林治安, 赵秉强. 商品有机肥替代化肥对作物产量和土壤肥力的影响. *中国农业科学*, 2018, 51(11): 2136-2142.
- WEN Y C, ZHANG Y D, YUAN L, LI W, LI Y Q, LIN Z A, ZHAO B Q. Crop yield and soil fertility response to commercial organic fertilizer substituting chemical fertilizer. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(11): 2136-2142. (in Chinese)
- [37] 祝英, 王治业, 彭铁楠, 巩晓芳, 晋小军, 周剑平. 有机肥替代部分化肥对土壤肥力和微生物特征的影响. *土壤通报*, 2015, 46(5): 1161-1167.
- ZHU Y, WANG Z Y, PENG Y N, GONG X F, JIN X J, ZHOU J P. Changes of soil nutrients and microbial communities under the condition of organic fertilizers replacing part of chemical fertilizers. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(5): 1161-1167. (in Chinese)
- [38] 张新建, 宁晓光, 郑桂亮, 孔凡涛, 赵秋. 有机肥替代化肥对土壤肥力及番茄产量和品质的影响. *中国农学通报*, 2020, 36(14): 59-63.
- ZHANG X J, NING X G, ZHENG G L, KONG F T, ZHAO Q. Replacing chemical fertilizer with organic manure effects on soil fertility and tomato yield and quality. *Chinese Agricultural Science*

- Bulletin*, 2020, 36(14): 59-63. (in Chinese)
- [39] 陶玥玥, 王海候, 金梅娟, 施林林, 董林林, 陆长婴, 沈明星. 小麦产量与土壤养分对水生植物源有机氮替代率的响应. *土壤学报*, 2019, 56(1): 156-164.
- TAO Y Y, WANG H H, JIN M J, SHI L L, DONG L L, LU C Y, SHEN M X. Response of wheat yield and soil nutrients to substitution of organic nitrogen with aquatic plant residue. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(1): 156-164. (in Chinese)
- [40] 高菊生, 黄晶, 董春华, 徐明岗, 曾希柏, 文石林. 长期有机无机肥配施对水稻产量及土壤有效养分影响. *土壤学报*, 2014, 51(2): 314-324.
- GAO J S, HUANG J, DONG C H, XU M G, ZENG X B. Effects of longterm combined application of organic and chemical fertilizers on rice yield and soil available nutrients. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(2): 314-324. (in Chinese)
- [41] KALLENBACH C, GRANDY A S. Controls over soil microbial biomass responses to carbon amendments in agricultural systems:A meta-analysis. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2011, 144(1): 241-252.
- [42] 胡诚, 曹志平, 罗艳蕊, 马永良. 长期施用生物有机肥对土壤肥力及微生物生物量碳的影响. *中国生态农业学报*, 2007, 15(3): 48-51.
- HU C, CAO Z P, LUO Y R, MA Y L. Effect of long-term application of microorganismic compost or vermicompost on soil fertility and microbial biomass carbon. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(3): 48-51. (in Chinese)
- [43] 柯蓓. 有机肥替代部分化肥对甘薯产量及土壤养分含量的影响. *福建农业科技*, 2019(9): 67-70.
- KE B. Effect of partial replacement of chemical fertilizers with organic fertilizers on yield and soil nutrient content of sweet potato. *Fujian Agricultural Science and Technology*, 2019(9): 67-70. (in Chinese)
- [44] 李超, 谢英荷, 李廷亮, 黄涛, 柳玉凤, 窦露. 施肥措施对旱地小麦产量与土壤硝态氮残留的影响. *山西农业科学*, 2018, 46(4): 583-587.
- LI C, XIE Y H, LI T L, HUANG T, LIU Y F, DOU L. Effects of fertilization on dryland wheat yield and soil nitrate-n residues. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2018, 46(4): 583-587. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)