

秸秆还田和有机肥配合替代 1/3 化肥对旱地玉—麦产量、蛋白质含量和化肥利用效率影响

吴金芝¹, 肖慧淑¹, 郭锦花¹, 黄明¹, 赵凯男¹, 侯园泉¹,
李俊红^{2,3}, 田文仲^{2,3}, 张洁^{2,3}, 李芳^{2,3}, 赵振欣⁴, 李友军¹

(1.河南科技大学农学院,河南 洛阳 471023;2.洛阳农林科学院,河南 洛阳 471023;

3.中国农业科学院洛阳旱农试验基地,河南 洛阳 471023;4.洛阳市孟津区农业技术推广服务中心,河南 孟津 471100)

摘要:为研究长期秸秆还田和有机肥配合替代部分化肥对玉—麦一年两熟种植下产量、品质和化肥效率的影响,2015—2020 年,依托中国农业科学院洛阳旱农试验基地始于 2007 年的长期定位试验,设置不施肥对照(CK)、玉米小麦季均常规施用氮磷钾化肥(NPK)、秸秆还田和有机肥配合替代小麦季 1/3 氮磷钾化肥(SORF)3 个处理,研究 2015—2020 年玉—麦一年两熟种植下作物产量、化肥利用效率,2019—2020 年玉米和小麦籽粒氮磷钾养分含量、蛋白质含量和蛋白质产量,以及 2020 年小麦籽粒蛋白质及其组分含量。结果表明:(1)SORF 处理玉米增产增效作用优于 NPK 处理,5 年平均产量提高 10.0%,但二者间小麦和周年产量差异未达显著水平($p>0.05$)。(2)施肥显著提高玉米和小麦籽粒氮磷钾含量,其中 SORF 较 NPK 处理又显著增加籽粒氮含量,从而使玉米籽粒蛋白质含量和蛋白质产量较 NPK 分别显著提高 6.7%和 17.8%,小麦籽粒蛋白质含量和蛋白质产量分别显著提高 8.0%和 6.3%,周年蛋白质产量显著增加 10.8%。(3)SORF 和 NPK 处理较 CK 均可显著提高小麦籽粒中各蛋白质组分含量及谷醇比,协同提高小麦籽粒蛋白质含量和籽粒品质。SORF 较 NPK 处理还可提高除球蛋白外的其他蛋白组分含量,但谷醇比的增幅不显著。(4)与 NPK 相比,SORF 处理下玉米、小麦和周年的氮肥农学效率分别显著提高 54.8%、31.2%和 37.3%,氮肥偏生产力分别显著提高 10.0%、45.6%和 20.7%,小麦、周年的磷(钾)肥农学效率和偏生产力分别提高 31.2%、77.3%和 45.6%、55.7%。综合来看,秸秆还田和有机肥配合替代 1/3 化肥(SORF)不仅有利于提高玉米产量,玉米、小麦的籽粒蛋白质含量和蛋白质产量,以及化肥农学效率和偏生产力,而且可提高小麦籽粒蛋白组分含量,是旱地玉—麦一年两熟区兼顾产量品质效率的施肥模式。

关键词: 秸秆覆盖; 有机肥替代; 玉—麦一年两熟; 产量; 蛋白质含量; 肥料利用效率

中图分类号: S147.34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2023)04-0319-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.04.039

Effects of Straw Returning Combined with Organic Fertilizer Replacing 1/3 Chemical Fertilizer on Grain Yield, Grain Protein and Chemical Fertilizer Use Efficiency in Dryland Maize-wheat Double Cropping System

WU Jinzhi¹, XIAO Huishu¹, GUO Jinhua¹, HUANG Ming¹, ZHAO Kainan¹, HOU Yuanquan¹,
LI Junhong^{2,3}, TIAN Wenzhong^{2,3}, ZHANG Jie^{2,3}, LI Fang^{2,3}, ZHAO Zhenxin⁴, LI Youjun¹

(1.Agricultural College, Henan University of Science and Technology, Luoyang,

Henan 471023; 2.Luoyang Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Luoyang, Henan 471023;

3.Luoyang Dryland Agriculture Test Site, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Luoyang,

Henan 471023; 4.Agricultural Technology Extension Center of Mengjin District in Luoyang, Mengjin, Henan 471100)

Abstract: To study the effects of combined straw returning with organic fertilizer replacing partly chemical fertilizer on grain yield, grain quality and chemical fertilizer use efficiency in dryland maize-wheat double cropping system, From 2015 to 2020, based on a long-term field experiment conducted at Luoyang Dry

收稿日期: 2023-02-01

资助项目: 河南省旱地绿色智慧农业特色骨干学科群建设项目(17100001); 河南省科技攻关项目(202102110087); 国家自然科学基金项目(31801297)

第一作者: 吴金芝(1978—),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事旱地农田水肥高效及生理生态研究。E-mail: ywujz@126.com

通信作者: 赵振欣(1966—),男,大专,高级农艺师,主要从事作物水肥高效研究及推广工作。E-mail: mjxnjzw@163.com

李友军(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事旱作节水高产栽培理论与技术研究。E-mail: lyj@haust.edu.cn

Farming Experimental Station of Chinese Academy of Agricultural Sciences, since 2007. There are three treatments, i.e., no fertilizer control (CK), conventional application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer in both maize and wheat season (NPK), straw mulching and organic fertilizer combined with replacing 1/3 of NPK input in wheat season (SORF). The grain yields and fertilizer use efficiencies in maize, wheat and all year from 2015 to 2020, and the grain nitrogen, phosphorus and potassium contents, grain protein contents, grain protein yields of maize and wheat from 2019 to 2020, and the contents of protein and its components in grain of wheat in 2020 were investigated. The results showed that: (1) Compared with the NPK treatment, the 5-year average yield of maize under SORF treatment were increased by 10.0%. However, there was no significant grain yield difference of wheat and all year between NPK and SORF treatments ($p > 0.05$). (2) The grain N, P, K content in maize and wheat was increased significantly with the application of fertilizer. Compared with NPK treatment, SORF significantly increased grain nitrogen content, which significantly increased in protein content and protein yield of maize grain and wheat grain by 6.7% and 17.8%, 8.0% and 6.3%, respectively, and annual protein yield increased by 10.8%. (3) SORF and NPK not only increased the contents of each protein component, but also increased the ratio of glutenin/gliadin in wheat grain, and synergistically improving the protein quantity and quality in grain. Compared with the NPK treatment, SORF significantly increased the content of different grain protein component except globulin, but the increase of glutenin/gliadin ratio was not significant. (4) Compared with NPK treatment, the nitrogen agronomic use efficiency under SORF treatment were significantly increased by 54.8%, 31.2% and 77.3% in maize, wheat and all year, as well as nitrogen partial productivity by 10.0%, 45.6% and 20.7%, respectively, and the phosphate (potassium) agronomic efficiency and partial productivity by 31.2%, 77.3% and 45.6%, 55.7% in wheat and all year. Above all, SORF could not only improve the grain yield in maize, and the grain protein content, protein yield, as well as agronomic efficiency and partial productivity in maize and wheat, but also improved the contents of different grain protein components in wheat. Therefore, straw mulching combined with organic fertilizers replacing 1/3 of NPK of wheat season was the suitable fertilization model for high yield, high quality and high efficiency in the maize-wheat double cropping system of dryland region.

Keywords: straw mulching; organic fertilizer substitution; maize-wheat double cropping system; grain yield; protein content; fertilizer use efficiency

玉米和小麦是人类主要的粮食作物,提高其产量、品质对保障粮食安全和优化人们膳食结构具有重要作用,特别是在人口的快速增长、人们生活水平越来越高的当今更为突出^[1]。众所周知,施用化肥是提高作物产量和品质的重要途径。然而,人们为了追求高产优质,长期过量和不合理使用化肥,使我国化肥利用效率低下,如玉米和小麦的氮、磷、钾肥农学效率分别为 10.1, 7.9, 5.6 kg/kg 和 11.1, 9.8, 8.1 kg/kg, 与世界平均水平相比低 20%~30%^[2],尤其是在降水与作物需水关键期错位、土壤肥力低且追肥困难的北方旱区更为突出^[3]。夏玉米—冬小麦(简称玉—麦)一年两熟是我国北方重要的种植制度之一,在保障国家粮食安全中具有重要地位,但该种植体系下过量施肥现象也非常普遍。因此,探索协同实现旱地玉—麦高产优质高效的施肥措施一直是广大旱地农业科技者关注的重要课题。

有机肥替代化肥是保障旱地作物可持续生产的

重要措施,具有改善土壤理化性质,促进土壤蓄水保墒和维持土壤养分持续供给等多种功能,且增产增效作用突出^[4]。裴雪霞等^[5]研究表明,化肥减量配施猪粪或羊粪可提高旱地小麦产量和水分利用率,改善小麦品质;丁维婷等^[6]研究表明,25%替代处理在改善土壤生物学活性、增加小麦产量和改善品质方面的效果良好,同时可以提高氮肥农学效率和氮肥偏生产力,增加经济效益;熊波等^[7]研究表明,有机肥替代化肥能够提高玉米植株粗蛋白含量,且以 30%有机肥替代化肥的效果最佳;聂胜委等^[8]研究却表明,小麦季牛粪秸秆堆肥替代 20%化肥第 1 季增产,第 2 季略有减产,籽粒蛋白质、湿面筋含量当季略有提高,第 2 季显著下降。秸秆还田特别是覆盖还田作为旱地作物生产中重要的节水培肥措施,具有提高作物产量和品质的作用。黄明等^[9]研究表明,秸秆覆盖较不覆盖使翻耕下小麦产量、蛋白质含量和蛋白质产量分别提高 11.5%, 7.4%, 21.3%, 旋耕下分别提高 23.0%,

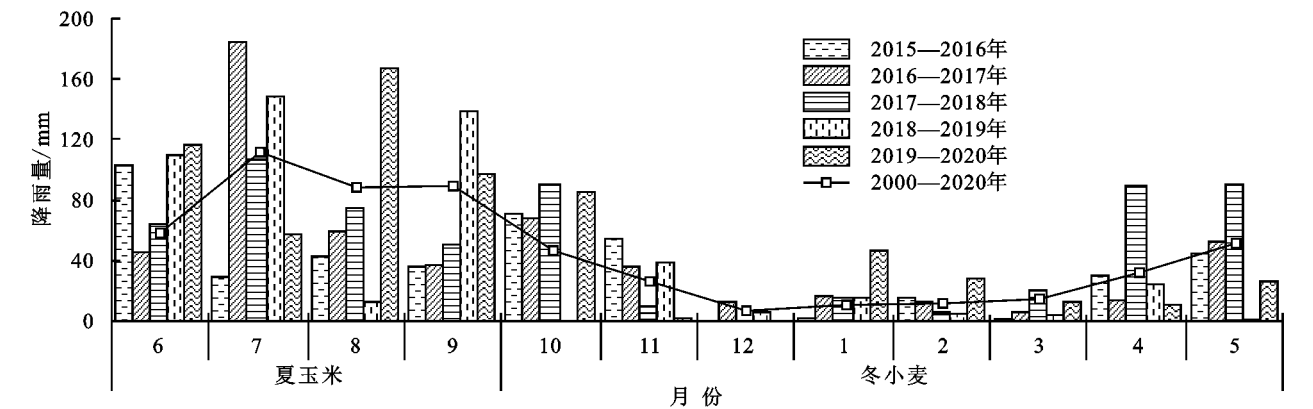
12.8%,38.5%;张礼军等^[10]研究表明,与无覆盖相比,秸秆覆盖可使小麦产量略有增加,籽粒蛋白质和湿面筋质量分数分别降低 2.5%和 6.1%。在有机肥替代和秸秆覆盖组合方面,王飞等^[11]研究表明,与单施化肥相比,等氮施肥下通过秸秆还田与有机肥替代配合可使水稻产量提高 8.4%~13.9%;赵凯男等^[3]研究表明,无论降雨多寡,秸秆还田和有机肥配合替代 1/3 氮磷钾肥均未降低冬小麦产量,但显著提高干旱年夏玉米及周年的产量和水分利用效率,并优化 0—60 cm 土层土壤有机质、全氮含量,0—20 cm 土层速效磷、钾含量,同时较常规氮磷钾处理显著降低 200—380 cm 土层硝态氮积累量。然而,以往的研究主要集中在秸秆还田或有机肥替代化肥对玉米或小麦单个生产体系的影响,有关二者配合对旱地玉—麦一年两熟系统的长期定位研究较少,特别是有关旱地玉—麦一年两熟种植下作物籽粒养分含量和品质的研究尚鲜有报道。因此,本研究依托中国农业科学院洛阳旱农试验基地始于 2007 年的田间定位试验,研究不施肥、施用氮磷钾肥和秸秆还田配合有机肥替代

化肥对旱地玉—麦产量、籽粒蛋白质含量和肥料利用效率的影响,旨为实现旱地玉—麦两熟体系高产优质高效生产提供理论和技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于中国农业科学院洛阳旱农试验基地(112°29′72″E,34°38′73″N),海拔 130 m,属典型的温带半湿润偏旱季风气候,年均气温 14.6 °C,平均干旱频率>40%,干燥度>1.3,无霜期 200~219 天。年平均降水量为 561.6 mm,年平均蒸发量 1 870 mm。玉—麦两熟是当地主要种植制度。供试土壤为黄棕色褐土,耕层土壤田间持水量、饱和水含量、容重和 pH 分别为 27%,33%,1.53 g/cm³和 7.3;0—20 cm 土层中>0.2 mm 的沙粒为 302 g/kg,0.2~0.002 mm 的粉粒为 416 g/kg,<0.002 mm 的黏粒为 282 g/kg。2007 年 6 月试验开始前 0—20 cm 土层中土壤有机质 15.8 g/kg,全氮 0.9 g/kg,有效磷 10.4 mg/kg,速效钾 166.0 mg/kg,阳离子交换量为 19.9 cmol/kg。本研究中逐月降雨量见图 1。



注:折线为 2000—2020 年度连续 20 年降水量的平均值。

图 1 试验期间逐月降雨量

1.2 试验设计与田间管理

试验在池栽条件下进行,设不施肥(CK)、玉米、小麦季均施常规氮磷钾化肥(NPK)、秸秆覆盖和有机肥配合替代1/3 氮磷钾化肥(SORF)。(1)CK 处理,全年不施入任何肥料,秸秆不还田;(2)NPK 处理,根据当地农户习惯,分别于玉米拔节期施纯 N 207 kg/hm²,小麦播前施纯 N 150 kg/hm²、P₂O₅ 120 kg/hm²和 K₂O 90

kg/hm²,秸秆不还田;(3)SORF 处理,玉米季将前茬小麦(留茬高度 40 cm)秸秆全部覆盖还田,并于拔节期施纯 N 207 kg/hm²;小麦季将前茬 50%的玉米秸秆粉碎(5.0 cm)后均匀还田于原小区,并施有机肥 1 250 kg/hm²以及 NPK 处理的 2/3 化肥用量。NPK 和 SORF 处理的年肥料用量和秸秆还田量见表 1,秸秆、有机肥和化肥管理均在当季作物播前整地时进行。

表 1 化肥和有机肥替代处理年肥料用量和秸秆还田量 单位:kg/hm²

处理	夏玉米					冬小麦				
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	有机肥	秸秆	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	有机肥	秸秆
NPK	207	0	0	0	0	150	120	90	0	0
SORF	207	0	0	0	100%小麦秸秆	100	80	60	1 250	50%玉米秸秆

采用随机区组设计,小区面积 16 m²,3 次重复。供试有机肥(河南豫宝肥业有限公司)中养分含量分别为N≥2.03%、P₂O₅≥2.8%、K₂O≥2.3%,有机

质≥30%,有机肥供试量相当于小麦季 NPK 处理的 17% N、34% P₂O₅和 28% K₂O。供试化肥分别为尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%)和氯化

钾(含 K_2O 60%)。玉米品种为“洛玉 114”,于 6 月上旬免耕播种,9 月下旬收获,种植密度 45 000 株/hm²;小麦品种为“洛旱 7 号”,于 10 月上中旬秸秆还田、施肥并人工翻耕整地后播种,行距 20 cm,播量为 120~135 kg/hm²,5 月下旬或 6 月初收获。整个试验期间无灌溉,病虫害防治等田间管理措施按照当地农民生产习惯进行。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 籽粒产量的测定 在玉米、小麦成熟期,各小区均全部收获,脱粒、风干后测定产量。

1.3.2 籽粒养分含量的测定 2019—2020 年,分别从玉米和小麦的测产样品中取籽粒 50 g,测定水分含量后烘干并粉碎待测。采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 法消解,连续流动分析仪(AA3,SEAL,德国)测定消解液中的氮磷浓度,火焰光度计(M410,SHERWOOD,英国)测定钾浓度^[12]。氮磷钾含量均以干重表示。

蛋白质含量(%) = 籽粒全氮含量 $\times 5.7$ ^[9]

蛋白质产量(kg/hm²) = 籽粒干物质质量 $\times$ 蛋白质含量^[9]

1.3.3 籽粒蛋白组分的测定 2019—2020 年,小麦收获季进行,参照何照范^[13]的方法测定蛋白质组分含量。称取 0.5 g 样品按照清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和麦谷蛋白的顺序提取,其中清蛋白的提取为:加 2 mL 蒸馏水,在研钵中充分研磨后移入离心管,振荡 30 min,离心 15 min 取上清液,连续提取 3 次后并入 50 mL 容量瓶待测;球蛋白、醇溶蛋白和麦谷蛋白分别用 10% NaCl、70% 乙醇和 0.2% 的 NaOH 进行提取,提取过程同清蛋白,提取液中的氮含量用凯氏定氮法测定。

1.3.4 肥料农学效率及偏生产力 肥料农学效率及偏生产力参考黄明等^[12]描述的方法进行计算。

氮(磷、钾)肥农学效率(kg/kg) = [施氮(磷、钾)区的籽粒产量 - 不施氮(磷、钾)区的籽粒产量] / 施氮(磷、钾)量(kg/hm²)

氮(磷、钾)肥偏生产力(kg/kg) = 施氮(磷、钾)区的籽粒产量(kg/hm²) / 施氮(磷、钾)量(kg/hm²)

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 23 软件数据整理,用 LSD 法进行显著性检验,用 Microsoft Excel 2019 软件制图。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田和有机肥配合替代化肥对旱地玉一麦一年两熟种植下作物产量的影响

由图 2 可知,与 CK 相比,NPK 和 SORF 处理均能增产,玉米和冬小麦分别提高 22.4%~34.7% 和 26.8%~30.7%,但 NPK 和 SORF 处理的增产效应因作物而异。玉米生长季,与 NPK 处理相比,SORF 在 2015—2016 年和 2019—2020 年度显著提高 67.0% 和

10.4%,5 年平均产量显著提高 10.0%;小麦生长季,NPK 和 SORF 处理间连续 5 年的产量差异均不显著。对玉一麦周年产量分析可知,NPK 和 SORF 处理 5 年均值分别达到 8 376,8 693 kg/hm²,二者差异不显著,但较 CK 分别显著提高 26.2% 和 31.0%。可见,SORF 处理对玉米增产能力高于 NPK,而两者间小麦和周年产量的差异并未达显著水平。

2.2 秸秆还田和有机肥配合替代化肥对玉一麦一年两熟种植下作物籽粒氮磷钾养分含量的影响

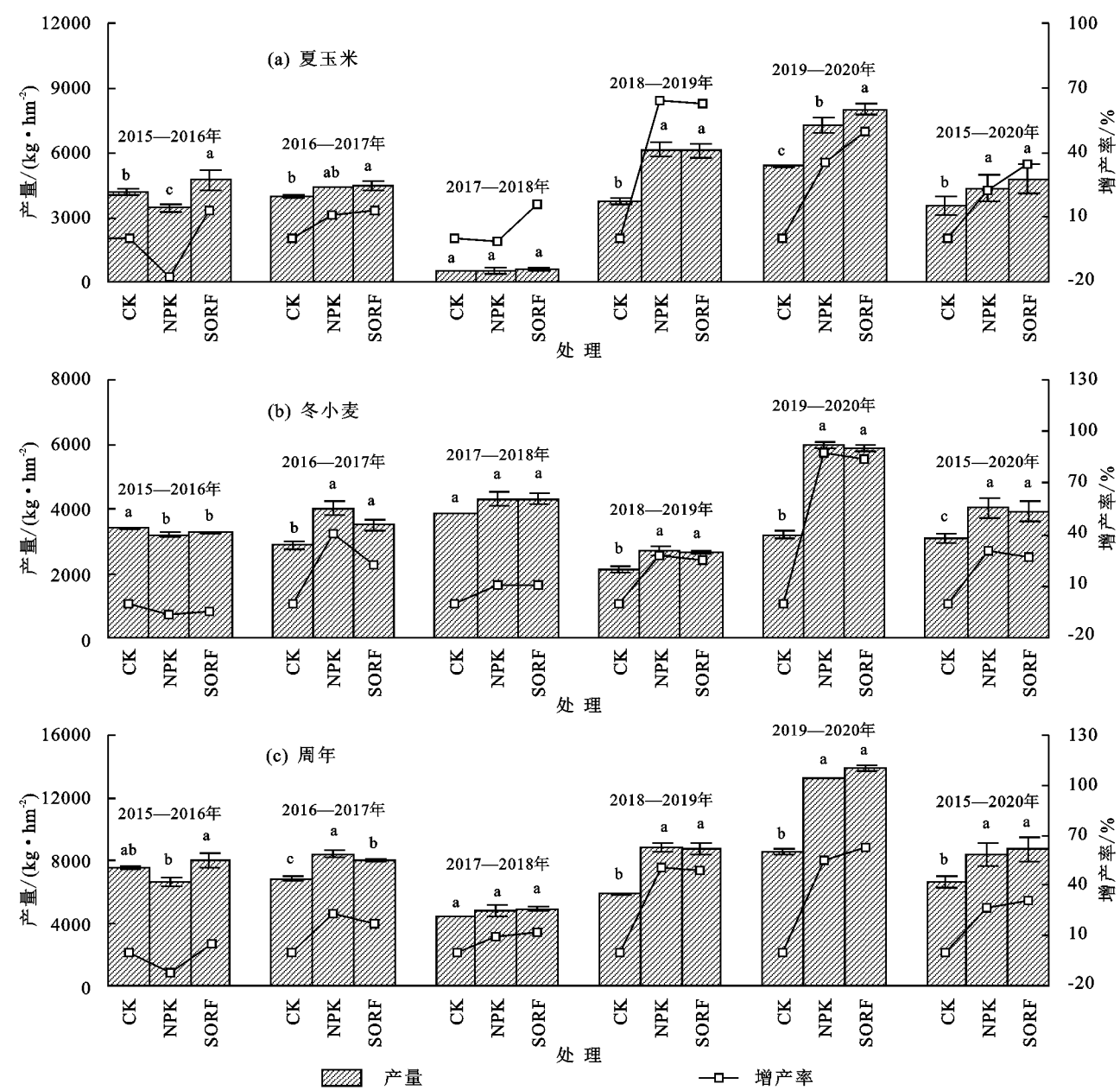
由表 2 可知,与 CK 相比,NPK 和 SORF 均可显著提高作物籽粒氮磷钾含量,其中玉米籽粒氮磷钾含量分别显著提高 5.7%,27.3%,11.6% 和 12.8%,34.7%,16.7%,小麦籽粒氮磷钾含量分别显著提高 31.9%,9.1%,29.0% 和 42.3%,13.8%,31.8%,表现为玉米籽粒磷含量提高幅度大,小麦籽粒氮钾含量提高幅度大。与 NPK 相比,SORF 使夏玉米和冬小麦籽粒氮含量分别显著提高 6.7% 和 7.9%,但对籽粒磷钾含量的提高效应均未达到显著水平。

2.3 秸秆还田和有机肥配合替代化肥对玉一麦一年两熟种植下作物籽粒蛋白质含量和蛋白质产量的影响

从表 3 可以看出,不同处理间玉米、小麦的籽粒蛋白质含量和蛋白质产量的差异均达到显著水平,且均表现为 SORF>NPK>CK。与 NPK 相比,SORF 下玉米籽粒蛋白质含量和蛋白质产量分别显著提高 6.7% 和 17.8%,小麦分别显著提高 8.0% 和 6.3%,周年的蛋白质产量显著提高 10.8%。说明秸秆还田配合有机肥替代部分化肥具有提高旱地玉一麦一年两熟种植下作物籽粒蛋白质含量和蛋白质产量的作用,且蛋白质含量表现为小麦增幅大于玉米,蛋白质产量表现为玉米大于小麦。

2.4 秸秆还田和有机肥配合替代化肥对玉一麦一年两熟种植下小麦籽粒蛋白质组分特征的影响

进一步分析小麦籽粒蛋白组分特征(表 4)发现,除 SORF 较 NPK 籽粒球蛋白和谷醇比增幅不显著外($p>0.05$),不同处理下籽粒各蛋白质组分含量、谷醇比、储藏蛋白含量均达到显著水平($p<0.05$)。其中,与 CK 相比,SORF 和 NPK 的上述蛋白含量的增幅达 14.1%~50.5%,且均以谷蛋白的增幅较大。与 NPK 相比,SORF 的清蛋白、醇溶蛋白、谷蛋白和贮藏蛋白含量分别显著提高 9.9%,3.8%,7.5%,3.2%。可见,施用氮磷钾肥、秸秆还田和有机肥配合替代 1/3 氮磷钾肥都有利于提高旱地玉一麦两熟体系中冬小麦籽粒蛋白质各组分含量,并显著增加谷醇比和贮藏蛋白含量,优化蛋白组成,改善籽粒品质,且秸秆还田和有机肥配合替代 1/3 氮磷钾肥处理效果更佳。



注:柱上方不同小写字母表示同一年度不同处理间差异达到5%显著水平;柱内的连续折线表示各处理相较于对照的增产率。

图 2 秸秆还田配合有机肥替代化肥对玉米、小麦和周年产量的影响

表 2 秸秆还田配合有机肥替代化肥对玉—麦一年两熟种植下作物籽粒氮磷钾养分含量的影响

单位:mg/g

处理	夏玉米			冬小麦		
	氮含量	磷含量	钾含量	氮含量	磷含量	钾含量
CK	12.36±0.34c	2.16±0.13b	3.29±0.15b	18.18±0.09c	2.97±0.10b	2.14±0.11b
NPK	13.06±0.54b	2.75±0.20a	3.67±0.19a	24.02±0.19b	3.24±0.02a	2.76±0.10a
SORF	13.94±0.09a	2.91±0.16a	3.84±0.60a	25.93±0.81a	3.38±0.07a	2.82±0.15a

注:同列数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同处理间差异达到5%显著水平。下同。

2.5 秸秆还田和有机肥配合替代化肥对玉—麦一年两熟种植下作物氮磷钾肥农学效率和偏生产力的影响

秸秆还田配合有机肥替代化肥对玉米、小麦以及周年氮、磷、钾肥农学效率和偏生产力具有显著的调节作用(图 3)。分析肥料农学效率可知,SORF 处理

玉米、小麦和周年的平均氮肥农学效率分别为 5.9, 8.3,6.7 kg/kg,较 NPK 处理分别提高 2.1,2.0,1.8 kg/kg,增幅分别为 54.8%,31.2%,37.3%;小麦和周年平均磷、钾肥农学效率分别为 10.4,25.7 kg/kg 和 13.8,34.3 kg/kg,较 NPK 处理的增幅均为 31.2%(小麦)和 77.3%(周年)。SORF 处理玉米、小麦和周

年的平均氮肥偏生产力分别为 23.1, 39.2, 28.3 kg/kg, 较 NPK 处理显著提高 2.1, 12.3, 4.9 kg/kg, 小麦和周年平均磷、钾肥偏生产力分别为 49.0, 65.3

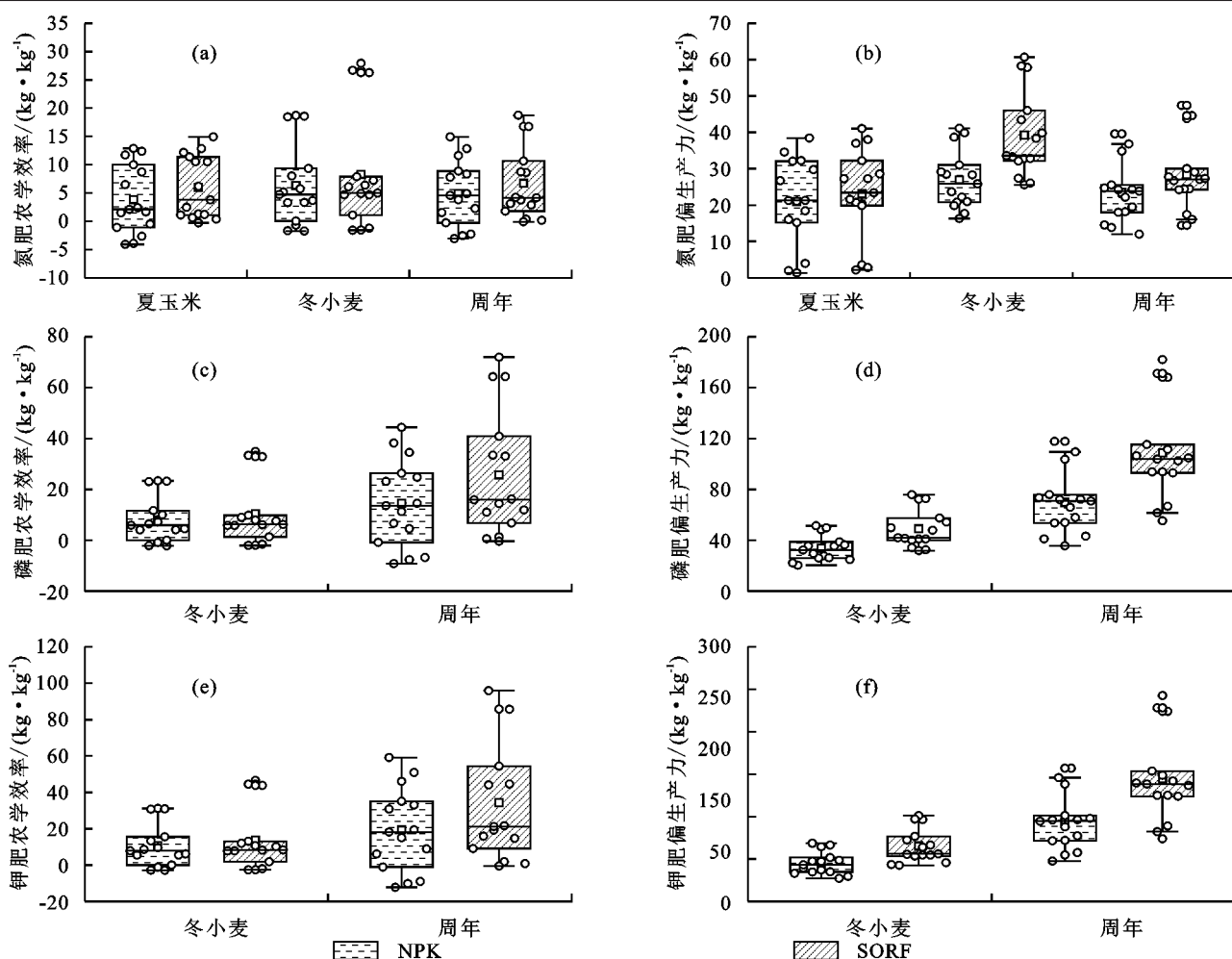
kg/kg 和 108.7, 144.9 kg/kg, 较 NPK 处理分别显著提高 15.3, 20.5 kg/kg 和 38.9, 51.8 kg/kg, 增幅均为 45.6% (小麦) 和 55.7% (周年)。

表 3 秸秆还田配合有机肥替代化肥对玉一麦一年两熟种植下作物籽粒蛋白质含量和蛋白质产量的影响

处理	夏玉米		冬小麦		周年蛋白质产量/ (kg · hm ⁻²)
	蛋白质 含量/%	蛋白质产量/ (kg · hm ⁻²)	蛋白质 含量/%	蛋白质产量/ (kg · hm ⁻²)	
CK	7.04±0.19c	377.1±22.6c	10.36±0.05c	331.3±6.7c	708.4±16.1c
NPK	7.45±0.31b	540.5±31.6b	13.69±0.11b	819.3±41.8b	1 359.9±56.4b
SORF	7.95±0.05a	636.5±5.2a	14.78±0.46a	870.7±3.5a	1 507.2±10.7a

表 4 秸秆还田配合有机肥替代化肥对玉一麦一年两熟种植下小麦籽粒蛋白质组分特征的影响

处理	清蛋白/%	球蛋白/%	醇溶蛋白/%	谷蛋白/%	谷/醇比	贮藏蛋白/%
CK	2.13±0.10c	1.35±0.04b	3.16±0.03c	3.23±0.15c	1.02±0.04b	6.39±0.10c
NPK	2.43±0.01b	1.82±0.02a	3.65±0.02b	4.52±0.10b	1.24±0.02a	8.17±0.12b
SORF	2.67±0.06a	1.87±0a	3.79±0.01a	4.86±0.24a	1.28±0.04a	8.65±0.19a



注:箱型框中实线和方框分别表示数据集中的中值和平均值;上下边界分别表示数据集的 25% 和 75% 位分数;上下水平短线表示数据集的 5% 和 95% 区间,箱外上下圆点分别表示数据集的最大值和最小值。

图 3 秸秆还田配合有机肥替代化肥对玉一麦一年两熟种植下作物氮磷钾肥农学效率和偏生产力的影响

3 讨论

3.1 秸秆还田配合有机肥替代化肥对玉一麦一年两熟种植下作物产量的影响

前人研究表明,有机肥替代 30% 化肥^[14]、替代

25% 化肥^[15]、替代量低于 43%^[16] 都可保障作物稳产。也有研究^[17]表明,与单施化肥相比,有机肥替代 25% 和 50% 化肥时小麦和玉米产量都无显著变化,但继续增加替代比例会导致减产。本研究中,SORF

与 NPK 处理相比显著提高夏玉米产量,5 年平均增产 10.0%,但小麦和周年产量无显著变化,说明秸秆还田配合有机肥替代麦季 1/3 化肥可稳定旱区玉—麦一年两熟种植下小麦产量,并且还可以显著提高玉米产量,这与前人^[14-17]研究结果相一致。究其原因,玉米生育期内(6—9 月)降雨量为 211.3~437.7 mm,占全年总量的 47.8%~81.4%(图 1),无秸秆覆盖条件下水分容易蒸发损失,从而造成干旱缺水,不利于产量形成和水分利用效率的提高,而秸秆还田配合有机肥替代化肥的处理,既具备秸秆覆盖减少水分无效蒸发的功能,又能发挥有机肥提高土壤中微生物数量和质量、活化土壤养分的作用,从而促进玉米对水肥的利用,进而提高产量,这与王道中等^[18]的研究结果一致。然而,小麦季秸秆还田,其减少蒸发增加土温的作用较秸秆覆盖差,且全生育期降雨量 93.7~322.7 mm(图 1),远低于 450 mm 的需水要求^[19],在需水关键期拔节至开花期(3—5 月)降水量 29.0~75.0 mm(图 1),水分胁迫使秸秆还田和有机肥的培肥保水作用无法得到充分发挥,最终导致小麦产量和水分利用效率较单施化肥并无显著优势。

3.2 秸秆还田配合有机肥替代化肥对玉—麦一年两熟种植下作物籽粒品质的影响

谷物籽粒中养分含量高低,直接决定人们膳食中营养摄入,而营养品质特别是蛋白营养一直以来备受关注,且近年来愈发突出。前人^[5]研究表明,谷物籽粒中营养品质同时受自身的遗传因素和外在环境条件影响,通过农艺措施调控外界环境条件,可以实现改善谷物营养品质的目的。已有学者^[5-9,20]围绕施用化肥、有机肥替代、秸秆还田对谷物籽粒养分或蛋白质含量的影响已经进行较为系统的研究。本研究进一步证实,NPK 和 SORF 较 CK 显著提高玉米、小麦籽粒氮磷钾含量,从而显著提高籽粒蛋白质含量、蛋白质产量。SORF 较 NPK 也可显著提高籽粒蛋白质含量和蛋白质产量。说明长期不施肥会导致作物品质降低,而施肥可改善籽粒品质,尤其是 SORF 处理效果突出,这与本试验中不同处理土壤中养分含量不同有关^[3],也与土壤秸秆和有机肥中富含作物生长所需的营养元素和有机物质,秸秆+有机肥替代部分化肥利于有机无机肥平衡,可改善耕层土壤质量,从而实现小麦产量品质协同提升有关^[21]。

小麦籽粒蛋白质组分与其加工品质关系密切。籽粒中具有较高的贮藏蛋白含量有利于提高强筋小麦的加工品质^[21]。其中,谷蛋白含量与沉降值和湿面筋含量正相关,谷蛋白和醇溶蛋白共同决定面团的

黏弹性,且籽粒蛋白质含量受环境条件特别是水分的影响很大^[22]。本研究表明,长期不施肥(CK)条件下,小麦籽粒中的蛋白组分含量显著降低,对馒头和面包加工品质不利。施肥可改善作物籽粒品质,且 SORF 较 NPK 除球蛋白增幅不显著外可显著提高小麦籽粒中各蛋白质组分含量。说明秸秆+有机肥替代部分化肥有利于改善小麦蛋白组分,进而改善加工品质。谷/醇比是影响面包烘焙品质和馒头品质的一项重要指标,与沉降值、和面时间、面团稳定时间、拉伸面积和最大抗延阻力及面包品质均呈显著正相关,较高的谷/醇比可获得较高的面包比容和面包评分^[21]。本试验条件下,SORF 和 NPK 较 CK 的谷/醇比显著提高,但 SORF 较 NPK 增幅不显著。说明施肥可调节小麦籽粒谷/醇比,但秸秆+有机肥替代 1/3 化肥改善小麦籽粒谷/醇比的效应并不显著。

3.3 秸秆还田配合有机肥替代化肥对玉—麦一年两熟种植下作物氮磷钾肥利用效率的影响

秸秆还田配合有机肥替代化肥是实现我国化肥零增长目标的重要措施,也是农业秸秆资源化以及协同提高化肥利用效率的有效途径。本研究中,与 NPK 处理相比,SORF 处理有利于提高玉—麦两熟种植体系氮、磷、钾肥农学效率和偏生产力,特别是小麦氮磷钾肥偏生产力分别显著提高 12.3,15.3,20.5 kg/kg,达到 39.2,49.0,65.3 kg/kg,已经接近国际平均水平^[2]。其主要原因可能是,秸秆还田和有机肥协同优化土壤水、肥等微环境,降低肥料径流及挥发损失,激发土壤中微生物活性,促进作物对养分的吸收利用,充分发挥其培肥保水、增产增效的功能^[23];既能在作物关键需肥期(小麦和玉米均为拔节—开花期)迅速提供速效养分以供其营养生长需要,又能在灌浆期持续释放缓效养分以避免花后脱肥造成的籽粒灌浆不足和籽粒养分积累量下降等风险,发挥其化肥减量增效的作用^[9]。前人的研究也得到类似的结果,如吕凤莲等^[24]研究表明,有机肥替代 25%化肥使玉—麦二熟体系的氮肥农学效率和偏生产力分别提高 2.5,2.1 kg/kg;张奇茹等^[25]研究表明,有机肥替代 35%化肥可使旱地小麦氮、钾肥农学效率和偏生产力分别显著提高 6.30,10.9 kg/kg 和 8.8,13.9 kg/kg。

4 结论

施肥可显著提高旱地玉—麦两熟种植体系的作物产量,籽粒蛋白质及其组分含量。与 NPK 相比,SORF 处理使旱地玉—麦一年两熟体系周年氮、磷、钾肥农学效率和偏生产力分别提高 1.8,11.2,15.0 kg/kg 和 4.9,38.9,51.8 kg/kg,从而在保证冬小麦和

周年产量稳定的同时,使夏玉米产量提高 10.0%,并且可显著提高籽粒蛋白质含量和蛋白质产量,以及小麦籽粒中除球蛋白外的各蛋白质组分含量。因此,秸秆还田和有机肥配合替代 1/3NPK 肥是适宜于旱地玉一麦一年两熟区增产提质增效的施肥模式。

参考文献:

- [1] Chen X P, Cui Z L, Zhang F S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature, 2014, 514:486-489.
- [2] 闫湘,金继运,梁鸣早.我国主要粮食作物化肥增产效应与肥料利用效率[J].土壤,2017,49(6):1067-1077.
- [3] 赵凯男,吴金芝,李俊红,等.秸秆和有机肥配合替代部分化肥提高作物水分利用率减少土壤硝态氮残留[J].植物营养与肥料学报,2022,28(10):1770-1781.
- [4] 季佳鹏,赵欣宇,吴景贵,等.有机肥替代 20%化肥提高黑钙土养分有效性及玉米产量[J].植物营养与肥料学报,2021,27(3):491-499.
- [5] 裴雪霞,党建友,张定一,等.化肥减量配施有机肥对旱地小麦产量、品质 and 水分利用率的影响[J].水土保持学报,2021,35(4):250-258.
- [6] 丁维婷,房静静,武雪萍,等.有机肥替代化肥不同比例对黑土土壤微生物学性质及春麦产量品质的影响[J].中国土壤与肥料,2021(2):44-52.
- [7] 熊波,王琛,张莉,等.有机肥替代化肥对京郊夏播青贮玉米生长与饲料品质的影响[J].中国土壤与肥料,2021(3):141-147.
- [8] 聂胜委,张巧萍,潘秀燕,等.牛粪秸秆堆肥替代 20%全量化肥对小麦产量及品质的影响[J].山西农业科学,2022,50(10):1408-1413.
- [9] 黄明,吴金芝,李友军,等.耕作方式和秸秆覆盖对旱地麦豆轮作下小麦籽粒产量、蛋白质含量和土壤硝态氮残留的影响[J].草业学报,2018,27(9):34-44.
- [10] 张礼军,鲁清林,汪恒兴,等.覆盖模式对不同类型旱地冬小麦土壤水温特征、籽粒品质和产量的影响[J].西北农业学报,2019,28(6):888-897.
- [11] 王飞,李清华,何春梅,等.稻秸—有机肥联合还田对黄泥田水稻产能与化肥替代的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(12):2024-2033.
- [12] 黄明,王朝辉,罗来超,等.垄覆沟波及施肥位置优化对旱地小麦氮磷钾吸收利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2018,24(5):1158-1168.
- [13] 何照范.粮油籽粒品质及其分析技术[M].北京:中国农业出版社,1985:87-92.
- [14] 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.
- [15] Subehia S K, Sepehya S, Rana S S, et al. Long-term effect of organic and inorganic fertilizers on rice (*Oryza sativa* L.) yield, and chemical properties of an acidic soil in the western Himalayas[J]. Experimental Agriculture, 2013, 49(3):382-394.
- [16] 李永华,武雪萍,何刚,等.我国麦田有机肥替代化学氮肥的产量及经济环境效应[J].中国农业科学,2020,53(23):4879-4890.
- [17] 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.
- [18] 王道中,花可可,郭志彬.长期施肥对砂姜黑土作物产量及土壤物理性质的影响[J].中国农业科学,2015,48(23):4781-4789.
- [19] 徐建文,居辉,刘勤,等.黄淮海平原冬小麦不同生育期干旱变化及气候趋势影响[J].生态学报,2014,34(10):2765-2774.
- [20] 李燕青,林治安,温延臣,等.不同类型有机肥与化肥配施对小麦品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(6):1513-1522.
- [21] Peng Y C, Zhao Y, Yu Z T, et al. Wheat quality formation and its regulatory mechanism[J]. Frontier in Plant Science, 2022, 13:e834654.
- [22] 孙敏,葛晓敏,高志强,等.不同降水年型休闲期耕作蓄水与旱地小麦籽粒蛋白质形成的关系[J].中国农业科学,2014,47(9):1692-1704.
- [23] 谢勇,赵易艺,张玉平,等.南方丘陵地区生物黑炭和有机肥配施化肥的应用研究[J].水土保持学报,2018,32(4):197-203,215.
- [24] 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.
- [25] 张奇茹,谢英荷,李廷亮,等.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[J].中国农业科学,2020,53(23):4866-4878.