

施用有机肥和秸秆还田对旱地玉-麦二熟体系作物产量、品质和化肥效率的影响

郭锦花¹,李梦瑶¹,张军¹,李爽¹,彭彦珉¹,肖慧淑¹,田文仲^{2,3},
李俊红^{2,3},张洁^{2,3},李芳^{2,3},黄明¹,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)

摘要:为探明施用商品有机肥和秸秆还田对旱地夏玉米-冬小麦二熟体系作物产量、品质和肥料利用效率的影响,于2015—2020年度设置不施肥+秸秆不还田(CK)、施氮磷肥+秸秆不还田(NP)、施氮磷肥+秸秆不还田+商品有机肥(NPO)和施氮磷肥+秸秆还田(NPS)4个处理进行田间试验,测定并分析作物产量、氮磷肥农学效率、籽粒养分含量、蛋白质含量以及冬小麦籽粒中蛋白质组分含量。结果表明:(1)与NP和NPO处理相比,NPS处理夏玉米5 a平均产量分别显著提高21.33%和20.77%,周年产量分别显著提高9.99%和13.43%,但3个施肥处理间小麦产量差异不显著。(2)施用商品有机肥和秸秆还田对夏玉米、冬小麦的籽粒品质均有显著影响。与NP处理相比,NPO处理冬小麦籽粒各蛋白质组分含量提高5.69%~8.28%;NPS处理冬小麦籽粒氮含量、钾含量和各蛋白质组分含量分别提高4.68%、3.96%和7.75%~11.38%。相较于NPO处理,NPS处理冬小麦籽粒钾含量、谷蛋白含量、贮藏蛋白含量和谷醇比分别显著提高14.41%、9.86%、5.39%和9.65%,夏玉米籽粒蛋白质含量、产量和籽粒氮、籽粒磷含量以及周年蛋白质产量分别显著提高6.45%、28.89%、6.40%、23.08%和10.43%。(3)相较于NP和NPO处理,NPS处理夏玉米氮肥的农学效率分别提高118.35%和113.25%,周年氮、磷肥农学效率分别提高42.83%和64.36%、42.86%和64.27%,但3个施肥处理间冬小麦氮肥、磷肥农学效率5 a均值无显著差异。综合来看,长期施用商品有机肥和秸秆还田可改善冬小麦籽粒中的蛋白质组分特性,秸秆还田还能增加夏玉米籽粒钾含量和冬小麦籽粒蛋白质含量和蛋白质产量,秸秆还田较施用商品有机肥更利于提高旱地玉-麦二熟区作物产量、品质和肥料利用效率。综上所述,施氮磷肥+秸秆还田的管理模式更适宜在旱地玉-麦二熟区进行推广。

关键词:有机肥;秸秆还田;玉-麦二熟;产量;蛋白质含量;蛋白质组分;肥料农学效率

中图分类号:S513; S512.1 **文献标志码:**A

Effects of organic fertilizer application and straw return on crop yield, quality, and fertilizer efficiency in summer maize-winter wheat double cropping system

GUO Jinhua¹, LI Mengyao¹, ZHANG Jun¹, LI Shuang¹, PENG Yanmin¹, XIAO Huishu¹,
TIAN Wenzhong^{2,3}, LI Junhong^{2,3}, ZHANG Jie^{2,3}, LI Fang^{2,3}, HUANG Ming¹, LI Youjun¹

(1. Agricultural College, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China;

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

3. Luoyang Dryland Agriculture Test Site, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Luoyang, Henan 471023, China)

Abstract: To investigate the effects of organic fertilizer application and straw return on crop yield, quality, and fertilizer use efficiency in a dryland maize-winter wheat double cropping system, field experiments were conducted from 2015 to 2020 with four treatments of no fertilizer application and no straw return (CK), nitrogen (N) and phosphorus (P) fertilizer application and no crop straw return (NP), NP plus commercial organic fertilizer

收稿日期:2023-09-13

修回日期:2024-01-04

基金项目:河南省科技攻关项目(202102110087);河南省旱地绿色智慧农业特色骨干学科群建设项目(17100001);国家重点研发计划重点专项(2018YFD0300707)

作者简介:郭锦花(2000-),女,河南汝阳人,硕士研究生,研究方向为旱作节水农业。E-mail: Guojinhua0723@163.com

通信作者:黄明(1980-),男,河南新县人,副教授,主要从事旱地节水农业和高产栽培技术研究。E-mail: huangming_2003@126.com

李友军(1962-),男,河南宜阳人,教授,主要从事旱地节水农业和高产栽培技术研究。E-mail: lyj@haust.edu.cn

(NPO) and NP plus crop straw return (NPS). The experiments measured and analyzed crop yield, agronomic efficiency of nitrogen and phosphorus fertilizers, nutrient content in grains, protein content, and the content of protein components in winter wheat grains. The results indicate that: (1) Compared with NP and NPO treatments, the NPS treatment significantly increased the 5-year average maize yield by 21.33% and 20.77%, as well as the annual yield by 9.99% and 13.43%, respectively. However, there was no significant difference in wheat yield among the three fertilizer treatments. (2) Both commercial organic fertilizer application and straw return significantly impacted the grain quality of summer maize and winter wheat. Compared with the NP treatment, the NPO treatment increased the content of various protein components in winter wheat grains by 5.69%~8.28%. The NPS treatment increased the nitrogen content, potassium content, and the content of various protein components in winter wheat grains by 4.68%, 3.96%, and 7.75%~11.38%, respectively. Compared with the NPO treatment, the NPS treatment significantly increased the potassium content, gliadin content, storage protein content, and gluten/gliadin ratio in winter wheat grains by 14.41%, 9.86%, 5.39%, and 9.65%, respectively, and the protein content, protein yield, grain nitrogen content, grain phosphorus content, and annual protein yield in summer maize grains by 6.45%, 28.89%, 6.40%, 23.08%, and 10.43%, respectively. (3) Compared with NP and NPO treatments, the NPS treatment increased the agronomic efficiency for nitrogen fertilizer of summer maize by 118.35% and 113.25%, respectively, as well as the annual agronomic efficiency for nitrogen and phosphorus fertilizers by 42.83% and 64.36%, 42.86% and 64.27%, respectively. However, there was no significant difference in the 5-year average agronomic efficiency for nitrogen and phosphorus fertilizers of winter wheat among the three fertilizer treatments. In summary, both commercial organic fertilizer application and straw return improved the protein component characteristics in winter wheat grains. Straw return also increased the K content in summer maize grains, as well as the protein content and protein yield in winter wheat grains. Straw return was more beneficial than the commercial organic fertilizer application in improving crop yield, quality, and efficiency in dryland maize-wheat double cropping areas. Therefore, applying nitrogen and phosphorus fertilizers with straw return (NPS) should be more suitable for promotion in dryland maize-wheat double cropping areas.

Keywords: organic fertilizer; straw return; maize-wheat double cropping system; grain yield; protein content; protein components; agronomic efficiency

小麦和玉米是我国重要的粮食作物,其产量高低和品质优劣直接关系国家粮食安全和人民的膳食健康^[1-2]。夏玉米-冬小麦(简称玉-麦)一年二熟是北方旱地主要的种植制度,但这一生产体系中普遍存在干旱少雨和施肥不科学的问题,影响作物产量、品质和水肥利用效率的提高^[3]。据报道,我国玉米季氮、磷投入量分别为 37~360 kg·hm⁻²和 45~180 kg·hm⁻²,小麦季氮、磷投入量分别为 60~383 kg·hm⁻²和 45~180 kg·hm⁻²,肥料投入多与作物需求量严重不匹配^[4]。过高和不科学的施肥量导致我国玉米和小麦的氮肥的农学效率分别为 9.8 kg·kg⁻¹和 8.0 kg·kg⁻¹,氮磷肥利用率仅分别为 26.10%和 28.20%,远低于发达国家的平均水平^[5]。这一现象在降水常与作物需水关键期错位、土壤肥力低且缺乏灌溉条件的旱作区更为突出^[6]。因此,探索协同提升旱地玉-麦体系籽粒产量、品质、肥料效率的养分管理措施,是当前农业生产中的重要课题。

众多研究表明,施用商品有机肥和秸秆还田是改善土壤质量、提高土壤水分养分供应能力的重要措施,在提高作物产量、品质和生产上效果明显^[7-16]。施用商品有机肥可通过改善土壤质量和养分供应能力,提高小麦^[7-10]、玉米^[11]的产量、品质和肥料利用率。Islam等^[12]通过Meta分析发现,与秸秆不还田相比,秸秆还田可以提高旱地土壤蓄水保墒能力,促进植株生长,使小麦产量提高 11.80%。张亚丽等^[13]研究表明,秸秆还田能够优化灌区土壤养分环境,促进作物对养分的吸收,使小麦产量和籽粒蛋白质含量分别提高 9.56%和 21.30%。隋鹏祥等^[14]研究发现,秸秆还田能够协同优化旱地夏玉米季土壤水分含量和地表温度,使玉米产量和养分利用效率分别提高 9.50%和 7.30%。王玉珑等^[15]研究表明,小麦秸秆还田能够提高灌区玉米叶面积指数,进而促进干物质积累,同时可增加玉米穗数,最终使玉米产量提高 21.90%。然而,也有研究表明,与无秸秆还田相比,秸秆还田虽然使小麦产量

略有增加,但其籽粒蛋白质和湿面筋含量分别降低 2.50% 和 6.10%^[16]。

前人研究多以旱地单作玉米、单作小麦或灌区玉-麦二熟体系为对象,且研究指标多关注作物产量和水分利用效率,而关于施用商品有机肥和秸秆还田对旱地玉-麦二熟体系作物品质调控效应的研究较为缺乏,特别是长期定位施用商品有机肥和秸秆还田对旱地玉-麦二熟作物籽粒养分含量和蛋白质含量及其组分特征的研究报道尚不多见。因此,本研究基于中国农业科学院洛阳旱农试验基地始于 2007 年的长期田间定位试验,研究不同秸秆还田和有机肥施用模式对作物籽粒产量、养分含量、蛋白质含量和肥料农学效率的影响,以期为旱地玉-麦二熟体系优质高效生产提供理论依据和技术支撑。

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(34.62°N,112.46°E),海拔 130 m,属典型温带半湿润偏旱季风气候,年均气温 14.6℃,平均干旱频率 >40%,干燥度 >1.3,无霜期 200~219 d。年均降水量为 549 mm,年均蒸发量 1 870 mm。当地主要的种植制度为玉-麦轮作。土壤类型为黄棕褐土,耕层土壤田间持水量为 27%,耕层土壤饱和水含量 33%,土壤容量为 1.53 g·cm⁻³,pH 值为 7.30;0~20 cm 土层中粒径 >0.2 mm 的沙粒为 302 g·kg⁻¹,粒径 0.2~0.002 mm 的粉粒为 416 g·kg⁻¹,粒径 <0.002 mm 的粘粒为 282 g·kg⁻¹。试验始于 2007 年 6 月,试验开始前 0~20 cm 土层中土壤有机质含量为 15.80 g·kg⁻¹,全氮 0.95 g·kg⁻¹,有效磷 10.39 mg·kg⁻¹,速效钾 166.0 mg·kg⁻¹,阳离子交换量为 19.90 cmol·kg⁻¹。2015—2020 年夏玉米和冬小麦

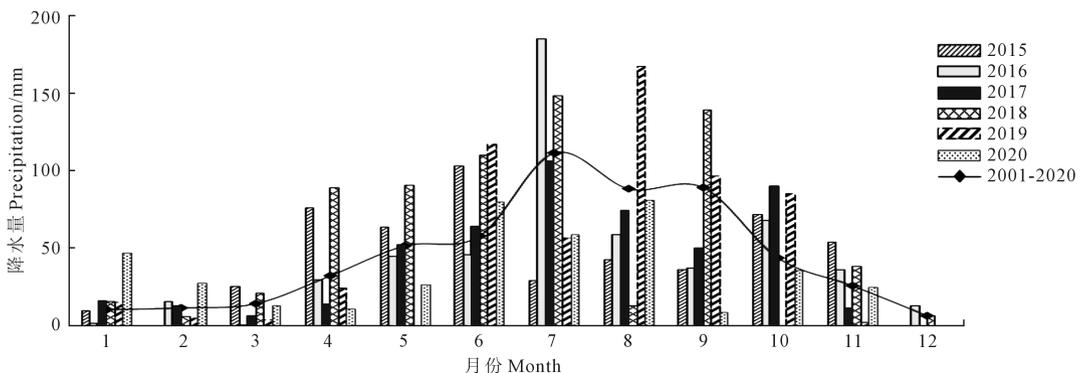
生长过程中逐月降水量如图 1 所示。

采用干燥指数 DI 进行降水年型的划分($DI < -0.35$ 为干旱年, $-0.35 \leq DI \leq 0.35$ 为平水年, $DI > 0.35$ 为丰水年)^[17]。 $DI = (P - M) / \sigma$,其中 P 为当季或当年降水量(mm), M 为当季或当年平均降水量(mm), σ 为当季或当年平均降水量均方差。2015—2020 年的周年降水量分别为 429.5、545.5、618.0、504.5、649.7 mm,其中,夏玉米生长季降水量分别为 211.3、327.3、295.3、410.3、437.7 mm,分别为干旱年、平水年、干旱年、丰水年和丰水年;冬小麦生长季降水量分别为 218.2、218.5、322.7、93.7、212.0 mm,分别为平水年、平水年、丰水年、干旱年和平水年。

1.2 试验设计

试验采用单因素随机区组设计,设不施肥+秸秆不还田(CK)、施氮磷肥+秸秆不还田(NP)、施氮磷肥+秸秆不还田+施用商品有机肥(NPO)和施氮磷肥+秸秆还田(NPS)共 4 个处理,3 次重复,小区面积 16 m²(4 m × 4 m),具体施肥和秸秆管理见表 1。供试化肥为尿素(含 N 46%)和过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%);供试商品有机肥由河南豫宝肥业有限公司提供,其养分含量分别为 N ≥ 2.03%、P₂O₅ ≥ 2.79%、K₂O ≥ 2.26%,有机质 ≥ 30%,施用量为 1 250 kg·hm⁻²,折算养分投入量分别为 N 25.4 kg·hm⁻²、P₂O₅ 35.0 kg·hm⁻²、K₂O 28.4 kg·hm⁻²、有机质 375 kg·hm⁻²,相当于 NP 处理的 17% N 和 34% P₂O₅。由于旱地土壤钾含量较高,所有处理均未施用钾肥。

供试玉米品种为‘洛玉 114’,2015—2020 年均于 6 月上旬播种,9 月下旬收获,种植密度为 45 000 株·hm⁻²;供试小麦品种为‘洛旱 7 号’,均于 10 月上旬播种,翌年 5 月下旬或 6 月初收获,播种量为 135 kg·hm⁻²。试验期间未进行灌溉,病虫害防治等田间管理按照当地常规方式进行。



注:2001—2020 表示 2001 年 6 月—2020 年 5 月降水量的逐月平均值。

Note: 2001–2020 indicates the mean monthly precipitation from June 2001 to May 2020.

图 1 2015—2020 年逐月降水量

Fig.1 Monthly precipitation during 2015–2020

表1 不同处理的田间管理

Table 1 Field management under different treatments

| 代码 Code | 处理 Treatment | 具体方案 Concrete proposal |
|---------|--|---|
| CK | 不施肥+秸秆不还田 No fertilizer application and no crop straw return | 全年不施用肥料,玉米和小麦秸秆均不还田。 No fertilizers and applied and both the maize and wheat straws were not returned to the fields in whole year |
| NP | 施氮磷肥+秸秆不还田 NP fertilizer application and no crop straw return | 按照当地农户习惯用量,玉米拔节期遇降水均匀撒施 N 207 kg · hm ⁻² ,小麦季在翻地前均匀撒施 N 150 kg · hm ⁻² 、P ₂ O ₅ 120 kg · hm ⁻² ;玉米和小麦秸秆均不还田。 According to the local farmers' customary dosage, N fertilizer at a rate of 207 kg · hm ⁻² was evenly applied when rainfall occurred around jointing stage of maize. And N at a rate of 150 kg · hm ⁻² and P ₂ O ₅ at a rate of 120 kg · hm ⁻² was evenly applied before ploughing at sowing of wheat. Both the maize and wheat straws were not returned to the fields. |
| NPO | 施氮磷肥+秸秆不还田+商品有机肥 NP plus commercial organic fertilizer | 小麦季施商品有机肥 1 250 kg · hm ⁻² ,其他管理同 NP 处理。 Commercial organic fertilizer at a rate of 1 250 kg · hm ⁻² was applied when the N and P fertilizers applied only in wheat season. Other managements were same as NP treatment. |
| NPS | 施氮磷肥+秸秆还田 NP plus crop straw return | 玉米季播种前将 100% 的前茬小麦秸秆(留茬高度 40 cm)覆盖还田;小麦季在施肥前将 50% 的前茬玉米秸秆粉碎(5 cm 小段)后均匀还田,随氮磷肥一起均匀翻入耕层土壤。施肥及其他管理同 NP 处理。 100% of the previous wheat straw (with a stubble height of 40 cm) was returned and covered evenly on the field, and 50% of the previous maize straw (5 cm pieces) was evenly returned to the field, and then uniformly concentrated into the soil along with the nitrogen and phosphorus fertilizers. The application of fertilizers and other managements were same as NP treatment. |

1.3 测定项目及方法

1.3.1 籽粒产量 在每季作物成熟期,将各小区作物全部收获,脱粒、风干后测定产量。

1.3.2 籽粒养分含量 2019—2020 年度,分别从夏玉米和冬小麦的测产样品中取籽粒 50 g,70℃ 烘至恒重^[18]。样品粉碎后采用 H₂SO₄-H₂O₂ 法消解,使用连续流动分析仪(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^[19],然后换算出籽粒氮、磷、钾含量。

1.3.3 籽粒蛋白质含量及蛋白质产量^[18]

蛋白质含量(%) = 小麦籽粒氮含量 × 5.7

蛋白质产量(kg · hm⁻²) = 小麦籽粒干物质质量 × 蛋白质含量

1.3.4 籽粒蛋白组分 2019—2020 年度,于小麦成熟期取样,参照何照范^[20]的方法,分别用 2 mL 蒸馏水、10% NaCl、70% 乙醇和 0.2% NaOH 提取液,采用连续振荡法顺序提取测定籽粒清蛋白、球蛋白、谷蛋白和醇溶蛋白含量。谷醇比为谷蛋白和醇溶蛋白的含量比值,贮藏蛋白为谷蛋白含量和醇溶蛋白含量之和。

1.3.5 化肥农学效率 氮(磷)肥农学效率参考赵亚南等^[19]方法进行计算,公式如下:

氮(磷)肥农学效率(kg · kg⁻¹) = [施氮(磷)区产量 - CK 区产量] / 施氮(磷)量。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 软件计算各处理的平均值、标准差,利用 SPSS 23.0 软件进行方差分析和

显著性检验(LSD)。利用 Microsoft Excel 2016 软件进行图表制作。

2 结果与分析

2.1 施用商品有机肥和秸秆还田对旱地玉-麦体系作物产量的影响

由表 2 可知,与 CK 相比,NP、NPO 和 NPS 处理夏玉米、冬小麦和周年产量多数年份表现为显著增加,施用商品有机肥的影响效应因年份和作物而异。对夏玉米而言,连续 5 a 均以 NPS 处理的夏玉米产量最高,较 NP、NPO 处理分别显著提高 21.33%、20.78%,但 NPO 与 NP 处理夏玉米籽粒产量 5 a 均值间并无显著差异,特别是在 2017—2018 年度 8 月份降水仅为 13 mm,NPS 处理较其他处理增产 2.5 倍~3.6 倍。长期施用商品有机肥或秸秆还田在不同年份间对小麦产量的影响存在差异,其中,2015—2016 年度以 NPS 处理产量最高,较 NPO 显著提高 10.66%;2019—2020 年度则以 NPO 处理产量最高,较 NP 显著提高 7.38%;2016—2019 年度,NP、NPS 和 NPO 处理的产量均无显著差异;上述 3 处理间的 5 a 平均产量差异亦不显著。周年产量的变化规律与夏玉米产量相同,5 a 均值以 NPS 处理最高,较 NP 和 NPO 分别显著提高 9.99% 和 13.43%,NPO 与 NP 处理间无显著差异。说明施用商品有机肥未能提高旱地玉-麦二熟体系的作物产量,而秸秆还田可显著提高夏玉米产量,进而显著增加周年产量。

表 2 不同处理对旱地玉-麦二熟体系作物产量的影响/(kg·hm⁻²)

Table 2 Effects of different treatments on crop yield in dryland maize-wheat double cropping system

| 年度 Year | 处理 Treatment | 夏玉米 Summer maize | 冬小麦 Winter wheat | 周年 Whole year |
|--------------------------|-----------------|------------------------|------------------------|------------------|
| 2015—2016 (2015) | CK | 4161.46ab | 3404.69a | 7566.15ab |
| | NP | 3473.960b | 3316.25ab | 6790.21b |
| | NPO | 3670.14b | 3156.25b | 6826.39b |
| | NPS | 4711.81a | 3492.71a | 8204.51a |
| 2016—2017 (2016) | CK | 3960.94d | 2868.75b | 6829.69b |
| | NP | 4265.63c | 4252.08a | 8517.71a |
| | NPO | 4605.90b | 3806.25a | 8412.15a |
| | NPS | 5088.54a | 4096.88a | 9185.42a |
| 2017—2018 (2017) | CK | 506.25c | 3876.75a | 4383.00b |
| | NP | 403.13c | 4791.50a | 5194.63ab |
| | NPO | 346.88c | 4206.00a | 4552.88b |
| | NPS | 1270.83a | 4813.50a | 6084.33a |
| 2018—2019 (2018) | CK | 3735.91b | 2108.25b | 5844.16c |
| | NP | 6041.82a | 3693.00a | 9734.82a |
| | NPO | 5715.83a | 3062.50a | 8778.33b |
| | NPS | 6238.30a | 3184.50a | 9422.80ab |
| 2019—2020 (2019) | CK | 5354.17c | 3196.88d | 8551.04c |
| | NP | 7423.61b | 5591.67b | 13015.28b |
| | NPO | 7368.06b | 6004.17a | 13372.22ab |
| | NPS | 8907.99a | 5768.75ab | 14676.74a |
| 5 a 均值 5-year average | CK | 3543.74c | 3091.06b | 6634.81c |
| | NP | 4321.63b | 4328.90a | 8650.53b |
| | NPO | 4341.36b | 4047.03a | 8388.39b |
| | NPS | 5243.49a | 4271.27a | 9514.76a |

注:同列数据后不同小写字母表示同一年份不同处理间产量差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters after the data in the same column indicate significant yield differences between treatments in the same year ($P<0.05$). The same below.

2.2 施用商品有机肥和秸秆还田对旱地玉-麦体系作物籽粒氮、磷、钾养分含量的影响

长期施氮磷肥、施有机肥和秸秆还田对夏玉米、冬小麦的籽粒氮、磷、钾养分含量存在不同程度的影响(表 3)。对夏玉米而言,与 CK 相比, NP 和 NPS 处理籽粒氮、磷含量分别显著提高 7.26%、27.78% 和 7.26%、25.93%, NPO 处理的籽粒氮、钾含量分别显著提高 0.8% 和 23.40%; 施肥处理间比较发现, NP 和 NPS 处理间的籽粒氮、磷含量差异不显著, 但较 NPO 氮含量分别显著提高 6.4% 和 5.6%, 磷含量分别显著提高 24.89% 和 23.08%; NP、NPS 和 NPO 处理间籽粒钾含量差异不显著。对冬小麦而言, 与 CK 相比, NP、NPS 和 NPO 处理的籽粒氮含量分别显著提高 29.12%、39.01% 和 35.16%, 各处理间籽粒磷含量差异不显著, NPS 和 NPO 处理的籽粒钾含量较 CK 分别显著提高 26.19% 和 10.28%; 施肥处

表 3 不同处理对 2019—2020 年度旱地玉-麦二熟体系作物籽粒氮、磷、钾含量的影响/(mg·kg⁻¹)

Table 3 Effects of different treatments on the content of nitrogen, phosphorus, and potassium in grains in dryland maize-wheat double cropping system in 2019–2020

| 处理 Treatment | 夏玉米 Summer maize | | | 冬小麦 Winter wheat | | |
|-----------------|------------------|-------|--------|------------------|-------|--------|
| | N | P | K | N | P | K |
| CK | 12.4c | 2.16b | 3.29b | 18.2c | 2.97a | 2.14c |
| NP | 13.3a | 2.76a | 3.78ab | 23.5b | 3.12a | 2.27bc |
| NPO | 12.5b | 2.21b | 4.06a | 24.6a | 3.22a | 2.36b |
| NPS | 13.3a | 2.72a | 3.61ab | 25.3a | 3.08a | 2.70a |

理间比较, NPS 和 NPO 处理间籽粒氮含量无显著差异, 但较 NP 分别显著提高 7.66% 和 4.68%, NPS 的籽粒钾含量较 NP 和 NPO 分别显著提高 8.94% 和 14.41%。综上所述, 施用商品有机肥有利于提高夏玉米籽粒钾含量和冬小麦籽粒氮含量, 但会降低夏玉米籽粒氮、磷含量; 而秸秆还田不影响夏玉米籽粒养分含量, 可显著增加冬小麦籽粒氮、钾含量。

2.3 施用商品有机肥和秸秆还田对旱地玉-麦体系作物籽粒蛋白质含量和蛋白质产量的影响

与 CK 相比, 长期施用氮磷肥、施用商品有机肥和秸秆还田均可显著提高夏玉米、冬小麦籽粒蛋白质含量和蛋白质产量, 但影响效应因作物而异(表 4)。对夏玉米而言, NP 和 NPS 处理间蛋白质含量差异不显著, 两处理较 NPO 分别显著提高 6.17% 和 6.45%; 蛋白质产量以 NPS 处理最高, 较 NP 和 NPO 分别显著提高 20.27% 和 28.89%。对冬小麦而言, NPS 和 NPO 处理间蛋白质含量无显著差异, 较 NP 分别显著提高 7.69% 和 4.48%; 蛋白质产量以 NPO 处理最高, NPS 次之, 二者间无显著差异, 但分别较 NP 显著提高 12.20% 和 11.13%。周年蛋白质产量以 NPS 处理最高, 较 NP 和 NPO 分别显著提高 14.22% 和 9.63%。说明与施用氮磷肥相比, 施用商品有机肥可显著提高冬小麦籽粒蛋白质含量和产量, 而秸秆还田可显著提高夏玉米蛋白质产量及冬小麦的蛋白质含量和产量, 最终显著提高周年蛋白质产量。

2.4 施用商品有机肥和秸秆还田对旱地玉-麦体系冬小麦籽粒蛋白质组分含量的影响

由表 5 可以看出, 与 CK 相比, 长期施氮磷肥、施有机肥和秸秆还田均可显著提高冬小麦籽粒蛋白质组分含量。各指标均以 NPS 处理最高, 其清蛋白含量较 NP 处理显著提高 8.24%; 谷蛋白含量和贮藏蛋白含量较 NP 处理分别显著提高 15.14% 和 10.95%, 较 NPO 处理分别显著提高 9.86% 和 5.39%; 谷醇比较 NPO 和 NP 处理分别显著提高 9.6% 和 7.76%。NPO 和 NPS 处理间球蛋白含量和醇溶蛋

白含量差异不显著,但两处理较 NP 处理蛋白含量分别显著提高 8.28% 和 10.06%,醇溶蛋白含量分别显著提高 6.42% 和 15.51%。可见秸秆还田和施肥有利于改善冬小麦蛋白质组分特征,且秸秆还田的效果最优;与施用商品有机肥相比,秸秆还田显著提高了谷蛋白含量、贮藏蛋白含量以及谷醇比。

2.5 施用商品有机肥和秸秆还田对旱地玉-麦体系作物化肥农学效率的影响

长期施氮磷肥施有机肥和秸秆还田对旱地玉-麦二熟体系作物氮肥、磷肥农学效率的影响因作物而异(表 6)。对夏玉米而言,连续 5 a 生产中,NPS 处理氮肥农学效率均最高,5 a 均值较 NP 和 NPO

分别显著提高 118.35% 和 113.25%。对冬小麦而言,与 NPO 处理相比,NPS 处理氮肥和磷肥农学效率在 2015—2016 年度分别显著下降 35.54% 和 35.26%;NP 处理 2018—2019 年度分别显著提高 66.19% 和 66.16%,而 2019—2020 年度分别降低 17.22% 和 17.18%;其余不同处理间的冬小麦氮肥、磷肥农学效率均无显著差异。周年氮肥、磷肥农学效率总体以 NPS 处理最高,较 NP 在 2015—2016 和 2019—2020 年度显著提高,较 NPO 除 2018—2019 年度外均显著提高,NPS 处理下氮肥、磷肥农学效率 5 a 均值较 NP 分别显著提高 42.83% 和 42.86%,较 NPO 分别显著提高 64.36% 和 64.27%。

表 4 不同处理对 2019—2020 年度旱地玉-麦体系作物籽粒蛋白质含量和蛋白质产量的影响

Table 4 Effects of different treatments on grain protein content and grain protein yield in dryland maize-wheat double cropping system in 2019—2020

| 处理 Treatment | 夏玉米 Summer maize | | 冬小麦 Winter wheat | | 周年蛋白质产量 Whole year protein yield /(kg·hm ⁻²) |
|-----------------|----------------------------|---|--------------------------------|---|--|
| | 蛋白质含量 Protein content/% | 蛋白质产量 Protein yield /(kg·hm ⁻²) | 蛋白质含量 Protein content /% | 蛋白质产量 Protein yield /(kg·hm ⁻²) | |
| CK | 7.04c | 377.1c | 10.36c | 331.3c | 708.4c |
| NP | 7.57a | 562.0b | 13.40b | 749.1b | 1311.0b |
| NPO | 7.13b | 524.4b | 14.00a | 840.5a | 1365.9b |
| NPS | 7.59a | 675.9a | 14.43a | 832.5a | 1508.4a |

表 5 不同处理对 2019—2020 年度旱地玉-麦体系冬小麦籽粒蛋白质组分特征的影响

Table 5 Effects of different treatments on the characteristics of protein components of winter wheat grains in dryland maize-wheat double cropping system in 2019—2020

| 处理 Treatment | 清蛋白/% Albumin | 球蛋白/% Globulin | 醇溶蛋白/% Gliadin | 谷蛋白/% Gluten | 谷醇比 Gluten/gliadin | 贮藏蛋白/% Store protein |
|-----------------|------------------|-------------------|-------------------|-----------------|-----------------------|-------------------------|
| CK | 2.13d | 1.35c | 3.16c | 3.23d | 1.02c | 6.39d |
| NP | 2.55c | 1.69b | 3.58b | 4.16c | 1.16b | 7.73c |
| NPO | 2.71ab | 1.83a | 3.81a | 4.36bc | 1.14b | 8.17b |
| NPS | 2.76a | 1.86a | 3.83a | 4.79a | 1.25a | 8.61a |

表 6 不同处理对旱地玉-麦二熟体系作物化肥农学效率的影响/(kg·kg⁻¹)

Table 6 Effects of different treatments on the agronomic efficiency in dryland maize-wheat double cropping system

| 年度 Year | 处理 Treatment | 夏玉米 Summer maize | | 冬小麦 Winter wheat | | 周年 Whole year | |
|--------------------------|-----------------|------------------|--|------------------|-------------------------------|---------------|-------------------------------|
| | | N | | N | P ₂ O ₅ | N | P ₂ O ₅ |
| 2015—2016 (2015) | NP | -3.32b | | -0.59ab | -0.74ab | -2.17b | -6.47cb |
| | NPO | -2.37b | | -1.66b | -2.07b | -2.07b | -6.16bc |
| | NPS | 2.66a | | 0.59a | 0.73a | 1.79a | 5.32a |
| 2016—2017 (2016) | NP | 1.47c | | 9.22a | 11.53a | 4.73ab | 14.07ab |
| | NPO | 3.12bc | | 6.25a | 7.81a | 4.43b | 13.19b |
| | NPS | 5.45a | | 8.19a | 10.23a | 6.60a | 19.63a |
| 2017—2018 (2017) | NP | -0.50c | | 6.10a | 7.62a | 2.27ab | 6.76ab |
| | NPO | -0.77c | | 2.20a | 2.74a | 0.48b | 1.42b |
| | NPS | 3.69a | | 6.25a | 7.81a | 4.77a | 14.18a |
| 2018—2019 (2018) | NP | 11.14a | | 10.57a | 13.21a | 10.90a | 32.42a |
| | NPO | 9.56a | | 6.36b | 7.95b | 8.22a | 24.45ab |
| | NPS | 12.09a | | 7.18ab | 8.97ab | 10.02a | 29.82a |
| 2019—2020 (2019) | NP | 10.00b | | 15.97b | 19.96b | 12.50c | 37.20c |
| | NPO | 9.73b | | 18.72a | 23.39a | 13.50bc | 40.18bc |
| | NPS | 17.17a | | 17.15ab | 21.43ab | 17.16a | 51.05a |
| 5 a 均值 5-year average | NP | 3.76b | | 8.25a | 8.60a | 5.65bc | 16.80b |
| | NPO | 3.85b | | 6.37a | 6.64a | 4.91c | 14.61b |
| | NPS | 8.21a | | 7.87a | 8.20a | 8.07a | 24.00a |

3 讨 论

3.1 施用商品有机肥和秸秆还田对玉-麦二熟体系作物产量的影响

科学施用有机肥和秸秆还田是培肥地力、提高作物产量的重要措施。研究表明,在施化肥的基础上适量增施有机肥可显著提高旱地玉米^[21]和小麦^[22]产量。还有研究表明,与秸秆不还田相比,秸秆还田后小麦产量提高 7.00%,尤其在缺水缺肥的旱地农田增产效果最佳^[11]。本研究表明,多数 NPO 处理较 NP 对夏玉米、冬小麦产量无显著影响,而 NPS 处理促进了夏玉米增产,最终使周年产量较 NP 和 NPO 分别显著提高 9.99% 和 13.43%。说明施用商品有机肥对旱地玉-麦二熟作物产量的影响不大,而秸秆还田可提高旱地玉-麦二熟体系中作物产量,且其影响主要表现在夏玉米季。一方面可能是因为旱地条件下作物产量形成的第一限制因素为土壤水分,夏玉米生育期的降水量较高,占全年的 47.8%~81.4%,而覆盖还田的小麦秸秆能够更好地减缓土壤水分蒸发,提高土壤水分含量^[23],进而影响作物产量;而冬小麦生育期降水量(93.7~322.7 mm)远低于 450 mm 的需水要求^[24],特别是在拔节期~开花期(3—5月)的关键需水阶段,降水量多保持在 29.0~75.0 mm,减弱了秸秆还田的培肥和保水效果,其增产能力也相应减弱。陈玉章等^[25]在西北旱地的研究也得到了类似结果。另一方面,本研究有机肥用量根据有机肥生产企业推荐,为 1 250 kg·hm⁻²,仅为前人能显著提高作物产量的有机肥用量(11 723~18 848 kg·hm⁻²)^[22]的 10%~15%,且仅在小麦季施用,较低的有机肥投入量改善土壤蓄水保墒能力的作用有限,因而未表现出明显的增产效果,这也在一定程度上说明在旱地玉-麦复种体系下较低的有机肥投入量对作物增产效果不佳,后续还有待进一步开展有机肥施用量和施用时期对作物产量的影响研究,以充分发挥有机肥改土培肥增产的作用。

3.2 施用商品有机肥和秸秆还田对玉-麦二熟体系作物籽粒品质的影响

籽粒养分含量和蛋白质含量的高低直接决定人类膳食营养元素和植物蛋白的摄入。姜东等^[26]研究表明,在施用氮磷肥的基础上增施有机肥,对于改善小麦营养品质和加工品质有重要作用;刘世平等^[27]研究发现,水稻秸秆覆盖还田可增加下茬小麦籽粒蛋白质和湿面筋含量,改善中强筋小麦品质。本研究进一步证实了上述前人的研究结果,即

施用氮磷肥基础上施有机肥可提高夏玉米籽粒钾含量和冬小麦籽粒氮含量,秸秆还田既增加了冬小麦籽粒氮、钾含量,同时提高了旱地玉-麦二熟体系作物籽粒蛋白质的含量和蛋白质产量。说明施用商品有机肥和秸秆还田均可改善籽粒的品质,但秸秆还田相较于施用商品有机肥效果更佳。秸秆还田在提高籽粒氮、磷、钾养分含量、蛋白质含量以及产量方面效果突出,可能是由于其显著提高了旱地玉-麦二熟体系土壤有机质和氮、磷、钾养分含量^[28],为籽粒养分累积和蛋白形成奠定了养分供应的基础。

籽粒蛋白质组分与其加工品质密切相关。籽粒中贮藏蛋白含量较高有利于改善小麦品质^[29-31]。裴雪霞等^[21]研究表明,在施用氮磷肥的基础上,增施有机肥可提高丘陵雨养旱地小麦籽粒的蛋白质含量。辛励等^[32]研究表明,秸秆还田可使玉米籽粒的清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白含量分别显著提高 5.43%、5.64%、9.74% 和 13.78%。本研究结果表明,与 CK 相比,长期施氮磷肥、施用商品有机肥、秸秆还田均有利于改善小麦籽粒蛋白质组分特征,且 NPS 处理的效果最佳,NPO 处理的效果次之。说明可以通过施用商品有机肥改善旱地玉-麦二熟体系小麦籽粒品质,但其效果不及秸秆还田,这可能与本研究中施用的有机肥为商品有机肥且用量偏低(按照有机肥生产厂家的推荐量执行)有关,因而还需进一步开展研究以明确不同有机肥施用量对玉-麦二熟体系作物品质的调控效应。

3.3 施用商品有机肥和秸秆还田对玉-麦二熟体系氮磷肥农学效率的影响

前人研究表明,施用有机肥可显著提高夏玉米、冬小麦的氮肥、磷肥农学效率^[22-33]。本研究中,由于施用商品有机肥后的产量无显著变化,因此施用商品有机肥后旱地玉-麦二熟体系的氮肥和磷肥农学效率也无显著变化,这可能与本研究中有有机肥施用量仅为 1 250 kg·hm⁻²有关。He 等^[34]研究也得出商品有机肥施用量偏低对小麦产量和肥料农学效率影响并不显著的结论。秸秆还田较施用商品有机肥和仅施用氮磷肥,显著提高了旱地玉-麦二熟体系夏玉米和周年的氮肥和磷肥农学效率,但并未显著提高冬小麦氮肥和磷肥农学效率,这可能是因为玉米季秸秆还田极大优化土壤水、肥等微环境,促进作物对肥料养分的吸收利用,最终增产而实现增效;而小麦季因降水量少且容易在需水关键期发生干旱胁迫,秸秆还田的保墒作用难以得到发挥。谢勇等^[35]在高温多雨的南方丘陵地区的研究也得出

了秸秆还田显著增加夏季作物养分利用效率,但对秋季作物肥料农学效率无显著影响的结论。

4 结 论

与仅施氮磷肥相比,施用氮磷肥结合有机肥处理的夏玉米籽粒氮、磷含量显著降低,而冬小麦籽粒各蛋白质组分含量以及蛋白质产量显著提高;两处理间周年产量、蛋白质产量和氮磷肥农学效率无显著差异。与施用氮磷肥结合有机肥处理相比,施用氮磷肥结合秸秆还田处理的夏玉米产量、籽粒氮磷含量、蛋白质含量、蛋白质产量和氮肥农学效率,冬小麦籽粒谷蛋白含量、谷醇比和贮藏蛋白含量均显著提高,从而使周年产量、蛋白质产量和氮肥、磷肥农学效率分别显著提高 13.43%、10.43%、64.36% 和 64.27%。

综合来看,施用氮磷肥的基础上长期施用商品有机肥 $1\ 250\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 对旱地玉-麦二熟区作物产量和氮肥和磷肥农学效率无显著影响,但可增加冬小麦籽粒蛋白质含量和蛋白质产量,优化小麦籽粒蛋白质组分特性;施用氮磷肥的基础上长期秸秆还田可提高作物产量、籽粒品质和肥料农学效率,是适宜旱地玉-麦二熟区增产提质增效的管理模式。

参 考 文 献:

[1] 吕广德,王瑞霞,牟秋焕,等.玉米小麦周年氮肥运筹对砂浆黑土区小麦干物质及氮素积累分配和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(8): 972-980.
LV G D, WANG R X, MU Q H, et al. Effect of annual nitrogen fertilization on dry matter and nitrogen accumulation and yield of winter wheat in mortar black soil[J]. Journal of Triticeae Crops, 2020, 40(8): 972-980.

[2] CHEN X P, CUI Z L, FAN M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature, 2014, 514(7523): 486-489.

[3] 麻坤,刁钢.化肥对中国粮食产量变化贡献率的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(4): 1113-1120.
MA K, DIAO G. Research on the contribution rate of fertilizer to grain yield in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2018, 24(4): 1113-1120.

[4] 巨晓棠,谷保静.我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783-795.
JU X T, GU B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2014, 20(4): 783-795.

[5] 张福锁,王激清,张卫峰,等.中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
ZHANG F S, WANG J Q, ZHANG W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915-924.

[6] ISLAM M R, HU Y G, MAO S S, et al. Effectiveness of a water-saving super-absorbent polymer in soil water conservation for corn (*Zea mays* L.) based on eco-physiological parameters[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2011, 91(11): 1998-2005.

[7] 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.
NIE S W, ZHANG Q P, PAN X Y, et al. Effects of cattle manure and wheat straw compost instead of 20% of total chemical fertilizer on yield and quality of wheat[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2022, 50(10): 1408-1413.

[8] 陆强,王继琛,李静,等.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[J]. 南京农业大学学报, 2014, 37(6): 66-74.
LU Q, WANG J C, LI J, et al. Effect of straw returning and combined applications of organic fertilizer and inorganic fertilizer on grain yield and nitrogen utilization under rice-wheat rotation system[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2014, 37(6): 66-74.

[9] 盖霞普,刘宏斌,翟丽梅,等.长期增施有机肥/秸秆还田对土壤氮素淋失风险的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(12): 2336-2347.
GE X P, LIU H B, ZHAI L M, et al. Effects of long-term additional application of organic manure or straw incorporation on soil nitrogen leaching risk[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(12): 2336-2347.

[10] 黄明,王朝辉,罗来超,等.垄覆沟播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.
HUANG M, WANG C H, LUO L C, et al. Effects of ridge mulching, furrow seeding, and optimized fertilizer placement on NPK uptake and utilization in dryland wheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2018, 24(5): 1158-1168.

[11] 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.
HUANG M, WU J Z, LI Y J, et al. Effects of tillage method and straw mulching on grain yield and protein content in wheat and soil nitrate residue under a winter wheat and summer soybean crop rotation in drylands[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(9): 34-44.

[12] ISLAM M U, GUO Z C, JIANG F H, et al. Does straw return increase crop yield in the wheat-maize cropping system in China? A meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2022, 279: 108447.

[13] 张亚丽,吕家珑,金继运,等.施肥和秸秆还田对土壤肥力质量及春小麦品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 307-314.
ZHANG Y L, LV J L, JIN J Y, et al. Effects of chemical fertilizer and straw return on soil fertility and spring wheat quality[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(2): 307-314.

[14] 隋鹏祥,张文可,梅楠,等.不同秸秆还田方式对春玉米产量、水分利用和根系生长的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 255-261.
SUI P X, ZHANG W K, MEI N, et al. Effects of different straw returning methods on spring maize yield, water use and root growth[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(4): 255-261.

[15] 王玉珑,于爱忠,吕汉强,等.绿洲灌区小麦秸秆还田与耕作措施对玉米产量的影响[J]. 作物学报, 2022, 48(10): 2671-2679.
WANG Y L, YU A Z, LV H Q, et al. Effects of wheat straw returning and tillage practices on corn yield in oasis irrigation area[J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(10): 2671-2679.

[16] 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.
- ZHANG L J, LU Q L, WANG H X, et al. Effect of mulching modes on soil water and temperature, grain quality and yield of different dryland winter wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2019, 28(6): 888-897.
- [17] 郭星宇, 王浩, 于琦, 等. 耕作对渭北旱塬小麦-玉米轮作田土壤水分和产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(14): 2977-2990.
- GUO X Y, WANG H, YU Q, et al. Effects of tillage on soil moisture and yield of wheat-maize rotation field in Weiwei Upland Plateau [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(14): 2977-2990.
- [18] 伊英杰, 韩坤, 赵斌, 等. 长期不同施肥措施冬小麦-夏玉米轮作体系周年氮挥发损失的差异[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(23): 4600-4613.
- YI Y J, HAN K, ZHAO B, et al. The comparison of ammonia volatilization loss in winter wheat- summer maize rotation system with long-term different fertilization measures [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(23): 4600-4613.
- [19] 赵亚南, 宿敏敏, 吕阳, 等. 减量施肥下小麦产量、肥料利用率和土壤养分平衡[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(4): 864-873.
- ZHAO Y N, SU M M, LV Y, et al. Wheat yield, nutrient use efficiencies and soil nutrient balance under reduced fertilizer rate [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(4): 864-873.
- [20] 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.
- HE Z F. Quality and analysis techniques of grain and oilseeds [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1985: 87-92.
- [21] 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、品质和水分利用率的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(4): 250-258.
- PEI X X, DANG J Y, ZHANG D Y, et al. Effects of chemical fertilizer reduction combined with organic fertilizer on the yield, quality, and water use efficiency of dryland wheat [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(4): 250-258.
- [22] 梁改梅, 李娜娜, 黄学芳, 等. 黄土旱塬区玉米产量最优的有机肥与化肥配施组合研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2022, (3): 29-38.
- LIANG G M, LI N N, HUANG X F, et al. Optimal combination of organic fertilizer and chemical fertilizer for maize yield in Loess Plateau dry land areas [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2022, (3): 29-38.
- [23] SU Y Z, WANG F, SUO D R, et al. Long-term effect of fertilizer and manure application on soil-carbon sequestration and soil fertility under the wheat-wheat-maize cropping system in northwest China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, 75(1): 285-295.
- [24] 徐建文, 居辉, 刘勤, 等. 黄淮海平原典型站点冬小麦生育阶段的干旱特征及气候趋势的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(10): 2765-2774.
- XU J W, JU H, LIU Q, et al. Drought variations of winter wheat in different growth stages and effects of climate trend in Huang-Huai-Hai Plain, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(10): 2765-2774.
- [25] 陈玉章, 柴守玺, 程宏波, 等. 秸秆还田结合秋覆膜对旱地冬小麦耗水特性和产量的影响[J]. *作物学报*, 2019, 45(2): 256-266.
- CHEN Y Z, CHAI S X, CHENG H B, et al. Effects of straw-incorporation combined with autumn plastic mulching on soil water consumption characteristics and winter wheat yield in arid farming areas [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(2): 256-266.
- [26] 姜东, 戴廷波, 荆奇, 等. 有机无机肥长期配合施用对冬小麦籽粒品质的影响[J]. *生态学报*, 2004, 24(7): 1548-1555.
- JIANG D, DAI T B, JING Q, et al. Effects of long-term application of manure and fertilizers on grain quality and yield of winter wheat [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(7): 1548-1555.
- [27] 刘世平, 陈后庆, 陈文林, 等. 稻麦两熟制不同耕作方式与秸秆还田对小麦产量和品质的影响[J]. *麦类作物学报*, 2007, 27(5): 859-863.
- LIU S P, CHEN H Q, CHEN W L, et al. Comprehensive evaluation of tillage and straw returning on wheat yield and quality in a wheat-rice double cropping system [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2007, 27(5): 859-863.
- [28] 殷文, 冯福学, 赵财, 等. 小麦秸秆还田方式对轮作玉米干物质累积分配及产量的影响[J]. *作物学报*, 2016, 42(5): 751-757.
- YIN W, FENG F X, ZHAO C, et al. Effects of wheat straw returning patterns on characteristics of dry matter accumulation, distribution and yield of rotation maize [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(5): 751-757.
- [29] 陈磊, 郝明德, 张少民, 等. 黄土高原旱地长期施肥对小麦养分吸收和土壤肥力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(2): 230-235.
- CHEN L, HAO M D, ZHANG S M, et al. Effects of long-term application of fertilizer on wheat nutrient uptake and soil fertility in Loess Plateau [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(2): 230-235.
- [30] 石玉, 张永丽, 于振文. 小麦籽粒蛋白质组分含量及其与加工品质的关系[J]. *作物学报*, 2009, 35(7): 1306-1312.
- SHI Y, ZHANG Y L, YU Z W. Contents of grain protein components and their relationships to processing quality in wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(7): 1306-1312.
- [31] 赵广才, 常旭虹, 刘利华, 等. 施氮量对不同强筋小麦产量和加工品质的影响[J]. *作物学报*, 2006, 32(5): 723-727.
- ZHAO G C, CHANG X H, LIU L H, et al. Effect of nitrogen application on grain yield and processing quality in different strong gluten wheats [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(5): 723-727.
- [32] 辛励, 刘锦涛, 刘树堂, 等. 小麦-玉米轮作体系下长期定位秸秆还田对籽粒产量及品质的影响[J]. *华北农学报*, 2016, 31(6): 164-170.
- XIN L, LIU J T, LIU S T, et al. Effects of combined application of straw and organic fertilizer on grain yield and quality under wheat maize rotation system [J]. *Acta Agriculturae Boreali-sinica*, 2016, 31(6): 164-170.
- [33] 马嵩科, 霍克, 张冬霞, 等. 玉米秸秆还田配施氮肥对豫西旱地小麦土壤酶活性和氮肥利用效率的影响[J]. *草业学报*, 2023, 32(6): 120-133.
- MA S K, HUO K, ZHANG D X, et al. Effects of maize straw return combined with nitrogen on soil enzyme activity and nitrogen fertilizer use efficiency in western dryland wheat fields of Henan Province [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(6): 120-133.
- [34] HE H, PENG M W, LU W D, et al. Commercial organic fertilizer substitution increases wheat yield by improving soil quality [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 851(Pt 1): 158132.
- [35] 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.
- XIE Y, ZHAO Y Y, ZHANG Y P, et al. Research on application of biochar and organic manure combined with chemical fertilizers in hilly area of Southern China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(4): 197-203, 215.