



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

有机无机肥配施对旱地冬小麦产量和氮素吸收利用的影响

王书停, 李文广, 蔡慧芳, 马龙, 王楷, 李紫燕, 翟丙年

引用本文:

王书停, 李文广, 蔡慧芳, 马龙, 王楷, 李紫燕, 翟丙年. 有机无机肥配施对旱地冬小麦产量和氮素吸收利用的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(2): 393–402.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0205>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

粪肥增施对水稻产量和氮素利用效率的影响

刘泰, 王洪媛, 杨波, 魏静, 贺鹏程, 王玉龙, 刘宏斌

农业资源与环境学报. 2022, 39(3): 545–555 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0096>

有机肥添加对不同磷肥用量新疆棉田磷素状况及棉花产量的影响

袁芳, 张凯, 马超, 张楠, 盛建东, 张文太

农业资源与环境学报. 2022, 39(1): 118–128 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0767>

长期有机无机肥配施对红壤性水稻土微生物生物量和有机质结构的影响

蓝贤瑾, 刘益仁, 侯红乾, 吕真真, 冀建华, 冯兆滨, 刘秀梅

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 810–819 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0584>

农艺深施及配施缓控释氮肥对水稻产量及氮素损失的影响

张富林, 刘冬碧, 范先鹏, 夏颖, 张志毅, 程子珍, 吴茂前, 高红兵, 毛波, 孔祥琼

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 858–866 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0171>

华北平原不同施氮量与施肥模式对作物产量与氮肥利用率的影响

蔡媛媛, 王瑞琪, 王丽丽, 刘惠芬, 杨殿林, 谭炳昌

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 503–510 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0254>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王书停, 李文广, 蔡慧芳, 等. 有机无机肥配施对旱地冬小麦产量和氮素吸收利用的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(2): 393–402.

WANG S T, LI W G, CAI H F, et al. Effects of the combined application of organic and inorganic fertilizers on yield and nitrogen uptake and utilization by winter wheat in drylands[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(2): 393–402.

有机无机肥配施对旱地冬小麦产量和氮素吸收利用的影响

王书停^{1,2}, 李文广^{1,2}, 蔡慧芳^{1,2}, 马龙^{1,2}, 王楷^{1,2}, 李紫燕^{1,2}, 翟丙年^{1,2*}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 农业农村部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:为探究有机无机肥配施对旱地冬小麦减肥增效的内在机制,依据7年长期定位试验,采用裂区设计,设5个氮水平(0、75、150、225、300 kg·hm⁻²)为主处理,配施有机肥(用量30 t·hm⁻²)和不施有机肥为副处理,单施化肥处理分别记为N0、N75、N150、N225、N300,配施有机肥处理分别记为MN0、MN75、MN150、MN225、MN300。在分蘖、拔节、开花、灌浆、成熟期采集植株地下(0~20 cm根系)和地上部分,对籽粒产量及其构成因素、氮素吸收利用状况进行研究。结果表明,随施氮量增加,冬小麦有效穗数、穗粒数先增加后减少,而千粒质量则逐渐下降。配施有机肥处理有效穗数较单施化肥处理整体提高7.1%。MN150处理籽粒产量最高,达到6 311 kg·hm⁻²。单施化肥处理籽粒对氮素的吸收主要通过花前氮素转运,而配施有机肥处理花前氮素转运和花后吸收对籽粒氮素积累作用同等重要。与单施化肥相比,有机无机肥配施花前氮素转运量、花后氮素积累量分别提高9.80%、33.10%。花前氮素转运以茎秆为主,花后氮素积累量在MN150处理最高。配施有机肥显著提高氮素利用率和农学效率,降低施氮量在增加氮素利用率与农学效率的同时提高了氮素收获指数。适量增施氮肥显著提高叶片硝酸还原酶活性,单施化肥和配施有机肥分别在N225、MN150处理达到最高,有机无机肥配施下,硝酸还原酶活性在分蘖、拔节、开花和灌浆期分别提高25.94%、12.88%、9.90%和12.35%。综合来看,有机无机肥配施下施氮量为150 kg·hm⁻²时既能促进冬小麦植株对氮素的吸收利用,又有利于保证西北旱地冬小麦稳产高产。

关键词:冬小麦;有机肥;化肥;配施;产量;氮素吸收利用;硝酸还原酶

中图分类号:S512.11

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2023)02-0393-10

doi: 10.13254/j.jare.2022.0205

Effects of the combined application of organic and inorganic fertilizers on yield and nitrogen uptake and utilization by winter wheat in drylands

WANG Shuting^{1,2}, LI Wenguang^{1,2}, CAI Huifang^{1,2}, MA Long^{1,2}, WANG Kai^{1,2}, LI Ziyang^{1,2}, ZHAI Bingnian^{1,2*}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-Environment in Northwest China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling 712100, China)

Abstract: To further explore the internal mechanism of organic and inorganic fertilizer application on the fertilizer reduction and efficiency of dryland winter wheat, a fissure zone design was set up according to a 7-year long-term positioning experiment. Five nitrogen levels (0, 75, 150, 225, 300 kg·hm⁻²) were set as the main treatments; a mixed and unapplied organic fertilizer (dosage of 30 t·hm⁻²) was used as a side treatment. The single fertilizer treatment was labeled N0, N75, N150, N225, N300, and the combined organic fertilizer treatment was labeled MN0, MN75, MN150, MN225, MN300. The underground (0~20 cm root system) and aboveground parts of the plant were collected

收稿日期: 2022-04-17 录用日期: 2022-06-10

作者简介: 王书停(1996—), 女, 山东聊城人, 硕士研究生, 从事植物营养与调控方面的研究。E-mail: 1753536874@qq.com

*通信作者: 翟丙年 E-mail: zhaibingnian@nwsuaf.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(31772389); 国家科技支撑计划项目(2015BAD23B04); 农业部公益性项目(201503124)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(31772389); The National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China(2015BAD23B04); The Ministry of Agriculture Public Welfare Industry Project(201503124)

during the tillering, jointing, flowering, filling, and mature stages, and the grain yield and its constituent factors, nitrogen uptake, and utilization were studied. The results showed that, with an increase in the nitrogen application rate, the number of effective panicles and grains per panicle increased first and then decreased, while the 1 000-grain weight decreased gradually. The effective number of panicles in the combined organic fertilizer treatment increased by 7.1% compared with the single application of chemical fertilizer. The MN150 treatment had the highest grain yield, which reached $6\,311\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. The absorption of nitrogen under the single fertilizer treatment was mainly through pre-anthesis nitrogen transport, while pre-anthesis nitrogen transport and post-anthesis nitrogen absorption played equally important roles in the accumulation of nitrogen under the combined fertilizer treatment. Compared with the single application of chemical fertilizer, the combined application of organic and inorganic fertilizers increased pre-anthesis nitrogen transshipment, and post-anthesis nitrogen accumulation, by 9.8% and 33.1%, respectively. Pre-anthesis nitrogen transport mainly occurred in the stems, and nitrogen accumulation reached the highest under the MN150 treatment. Nitrogen use efficiency and agricultural efficiency were significantly increased by organic fertilizer application. A decrease in the nitrogen application rate increased the nitrogen use efficiency, agricultural efficiency, and nitrogen harvest index. Nitrate reductase activity in leaves was significantly increased by nitrogen application, and the highest value was reached under the N225 and MN150 treatments. Nitrate reductase activity increased by 25.94%, 12.88%, 9.90%, and 12.35% during the tiller, jointing, flowering, and filling stages, respectively, under organic and inorganic fertilizer application. In summary, the combined application of organic and inorganic fertilizers at a nitrogen application rate of $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ could not only promote the absorption and utilization of nitrogen in winter wheat plants, but also ensured a stable and high yield of winter wheat in a dryland in northwest China.

Keywords: winter wheat; organic fertilizers; chemical fertilizers; combined application; yield; N uptake and utilization; nitrate reductase

小麦是世界三大粮食作物之一,占全球粮食产量的26%^[1]。土壤、水分及肥料条件是影响小麦高产稳产的三大因素^[2],化肥作为粮食增产最主要的途径,在农业生产中发挥着重要作用^[3]。黄土高原是典型的旱作小麦种植区,过量施氮是旱地小麦最突出的施肥问题,其中施氮过量农户占56%,施氮不足农户占7%^[4],农业生产中施肥结构不合理、重化肥、轻有机肥等问题较为突出^[5]。近年来,大量作物秸秆、工业菌渣、畜禽粪便等丰富有机肥源不能被妥善处理 and 充分利用,不仅浪费有机肥资源,而且污染环境。若将这些闲置资源肥料化使其成为有机肥,则能充分实现闲置资源最大化利用^[6-8]。然而,相比化肥来说,有机肥具有养分含量低、释放速率慢、当季养分释放不完全等缺点,不利于作物前期对养分的吸收而最终影响产量^[9],因此不建议单独施用。而有机肥和无机肥结合施用不仅能够优势互补,而且能增加产量、提高经济效益^[10]。因此,探索有机无机肥配施增产的内在机制,可为有机无机肥配施减氮增效提供充分理论依据,这也是我国农业实现绿色可持续发展的根本要求。

氮是小麦生长所必需的大量元素,施入土壤后的氮肥有三大去向:土壤残留、植物吸收和多途径损失^[11],其中植物吸收的氮对小麦产量具有重要影响。籽粒中的氮一方面来自根系吸收,另一方面来自其他营养器官再分配^[12-13]。营养阶段是氮素吸收的主要

阶段,籽粒中75%~90%的氮来源于花前氮素积累^[14]。提高花前氮素转运量及花后氮素积累量有利于增加小麦籽粒氮积累量,有研究者认为花前氮素转运量对产量的直接影响最大^[15-17]。适量氮肥投入能促进氮素由营养器官向籽粒的转运,但过量施氮会造成营养器官氮素转运效率降低^[18]。氮素效率可以用来反映施入土壤中氮肥的使用效果,表征小麦对氮肥的吸收利用状况。提高氮素效率有利于促进氮素积累和转运,进而提高籽粒产量,对小麦生长有促进作用^[19]。硝酸还原酶是植物体内氮代谢的关键酶,硝态氮是旱地植物从土壤中吸收氮素的主要形式,进入植物体内的硝酸盐需经过硝酸还原酶的还原作用才能转化为各种含氮有机物,叶片是发生还原作用的主要场所,硝酸还原酶活性的高低直接影响土壤中无机氮的利用效率,从而影响小麦产量^[20]。

目前对单施化肥、单施有机肥、有机肥等氮量替代方面的研究较多,但关于不同氮水平配施定量有机肥的研究设计较少。为进一步探究有机无机肥配施减氮增产的内在机制,本研究采用7年长期定位试验,设置不同氮水平配施定量有机肥处理,通过监测冬小麦全生育期内植株各部位养分吸收利用规律及叶片硝酸还原酶活性,分析单施化肥和有机无机肥配施对旱地冬小麦产量、植株氮素吸收利用的影响,以期对西北旱地冬小麦增产及氮肥合理运筹提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验地点位于陕西省杨凌示范区西北农林科技大学农作一站(34°18'N,108°05'E)。海拔525 m,年平均气温12.9℃,年均降雨量650 mm左右,且分布不均,60%左右集中在7—9月,年均蒸发量为1 400 mm。供试土壤为土垫旱耕人为土,本试验始于2014年,已持续定位7年。试验前基础土样的基本理化性质见表1。

1.2 试验设计

试验采用裂区设计,在无机肥施用的基础上配施有机肥。主处理为5个氮水平,副处理为不施有机肥和配施有机肥。5个氮水平施氮量分别为0、75、150、225、300 kg·hm⁻²,单施化肥处理标记为N0、N75、N150、N225、N300,配施有机肥处理标记为MN0、MN75、MN150、MN225、MN300,共10个处理,4次重复。有机肥为传统农家肥——腐熟牛粪,用量为30 t·hm⁻²,有机肥中有机质、全氮、全磷、全钾含量分别为394.57、16.89、15.19、14.44 g·kg⁻¹,pH为8.34。氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,施用量为90 kg·hm⁻²,钾肥为硫酸钾,施用量为60 kg·hm⁻²。有机肥和磷钾肥作基肥在每年播种前一次性施入土壤,氮肥每年分两次施用,在播种前施入70%作基肥,在拔节初期根据降雨情况追施剩余的30%。小麦品种为小偃22号,播种量为150 kg·hm⁻²,小区面积为28 m²(7 m×4 m),小麦全生育期雨养无灌溉,日常管理与当地农户一致,收获后将土地翻耕晾晒一个夏休闲期。拟合产量数据为2014年6月至2021年6月测定,其他均为2020年10月至2021年6月测定。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤和植物样品

试验开始前(2014年9月)在整个试验地按S形选取10个采样点,以20 cm为一层采集0~40 cm土样,将土样去除杂物后混匀,于4℃冰箱保存。取部分鲜土样测定土壤有效氮,剩余土样置于通风处风干,研磨过筛后测定土壤全氮、有机质、有效磷、速效

钾含量和pH。
在小麦分蘖期、拔节期、开花期和成熟期分别取0~20 cm根系和地上部分。采集植株样品时每个小区随机选取3个20 cm样段的采样点,用铁锹挖出一个深20 cm、长20 cm样方,装入塑料袋带回实验室。将小麦按照不同部位进行划分,其中分蘖期和拔节期将植株分为根系、茎秆和叶片;开花期分为根系、茎秆、叶片和穗;成熟期分为根系、茎秆、叶片、颖壳、籽粒;灌浆期只取叶片。根系从土壤中分离,清水洗净后与其他样品于105℃杀青30 min,65℃烘干至恒质量,测干质量。分别测定不同部位干质量后将样品粉碎测定全氮含量,全氮含量采用H₂SO₄-H₂O₂消煮、流动分析仪测定。

1.3.2 硝酸还原酶活性

取分蘖、拔节、开花和灌浆期鲜叶测定硝酸还原酶活性,具体参照高俊凤^[21]的方法。

1.3.3 产量

成熟期每个试验小区采集2 m×3 m的代表性样方,贴地表收割地上部分,自然风干后脱粒,取部分籽粒于105℃杀青30 min,65℃烘干至恒质量,称量计产。

1.4 数据计算与分析

采用Microsoft Excel 2007处理数据,SPSS、DPS 7.05版软件和LSD法进行数据分析,Origin Lab 2019进行绘图。各指标计算方法如下:

氮素积累量(kg·hm⁻²)=干物质质量×含氮量
花前氮素转运量(kg·hm⁻²)=开花期营养器官氮素积累量-成熟期营养器官氮素积累量
花后氮素积累量(kg·hm⁻²)=成熟期植株氮素积累量-开花期植株氮素积累量
花前氮素转运对籽粒氮的贡献率(%)=花前氮素转运量/籽粒氮素积累量×100
花后氮素吸收对籽粒氮的贡献率(%)=花后氮素积累量/籽粒氮素积累量×100
氮素收获指数(%)=籽粒氮素积累量/植株氮素积累量×100
氮素农学效率(kg·kg⁻¹)=(施氮区籽粒产量-不

表1 供试土壤基本理化性质
Table 1 Physical and chemical properties of the tested soil

土层 Soil layer/cm	有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	全氮 Total N/(g·kg ⁻¹)	有效氮 Available N/(mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available P/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/(mg·kg ⁻¹)	pH
0~20	13.88	0.83	9.00	9.17	155.66	8.14
20~40	12.91	0.64	7.82	9.11	133.85	8.21

施氮区籽粒产量)/施氮量

氮素生理效率($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)=(施氮区籽粒产量-不施氮区籽粒产量)/(施氮区植株氮素积累量-不施氮区植株氮素积累量)

氮素利用率(%)=(施氮区地上部氮素积累量-不施氮区地上部氮素积累量)/施氮量 $\times 100$

2 结果与分析

2.1 冬小麦籽粒产量及其构成因素

由表2可知,无论是否配施有机肥,小麦产量均随施氮量增加先升高后降低,单施化肥处理中N225产量最高,有机无机肥配施处理中MN150产量最高。与N150、N225、N300处理相比,MN150、MN225、MN300处理产量分别提高10.66%、3.76%、4.04%,因此,MN150处理不仅获得的产量最高而且有机肥的增产效果最显著。单施化肥对有效穗数的影响表现为N225>N150>N300>N75>N0,其中N225为最佳处理,每公顷有效穗数为 5.26×10^6 ;配施有机肥对有效穗数的影响表现为MN150>MN225>MN300>MN75>MN0,上述10个处理中MN150为最佳处理,其有效穗数较N225处理提高8.75%。穗粒数随施氮量增加而增加,N150、N225、N300处理显著高于N0、N75处理,有机无机肥配施MN0、MN75处理相比单施化肥N0、N75处理穗粒数显著增加。随施氮量增加,千粒质量有降低趋势,单施化肥与配施有机肥处理间千粒质量差异不显著。配施有机肥处理有效穗数较单施化肥

处理整体提高7.10%。

7年籽粒产量与施氮量的肥料效应方程(图1)显示,过量施用氮肥导致冬小麦呈现减产趋势;同一氮水平下,有机无机肥配施的籽粒产量均高于单施化肥,且两者之间的产量差随氮肥施用量的增加逐渐减小。通过拟合方程可知,单施化肥条件下施氮量为 $239 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,小麦产量最高,为 $5798 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;而在配施有机肥条件下,施氮量为 $192 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,小麦产量最高,为 $6166 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,因此在保证产量情况下,施用有机肥可节省19.7%的氮肥投入,同时增产6.35%。

2.2 冬小麦不同生育时期植株氮素积累量

由图2可知,随冬小麦生育进程推进,植株氮素积累量逐渐增加,成熟期达到最大。在不同生育时

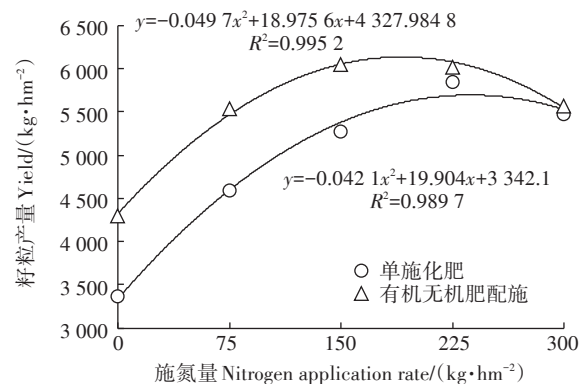


图1 7年不同施肥处理对冬小麦籽粒产量的影响

Figure 1 Effects of different fertilization treatments on winter wheat yield in seven years

表2 不同施肥处理下冬小麦籽粒产量及其构成因素

Table 2 Yield and yield components of winter wheat under different fertilization treatments

处理 Treatment	每公顷有效穗数 Spike number per hectare/ 10^4	千粒质量 1 000 grain weight/g	穗粒数 Grain number per spike	产量 Yield/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$
N0	368 $\pm$ 8.21Cb	44.87 $\pm$ 1.44Aa	22 $\pm$ 0.47Cb	3 561 $\pm$ 333Cb
N75	459 $\pm$ 4.15Bb	42.83 $\pm$ 1.52ABa	25 $\pm$ 1.64Bb	4 894 $\pm$ 150Bb
N150	514 $\pm$ 13.76Ab	40.49 $\pm$ 3.80BCa	28 $\pm$ 1.20Aa	5 703 $\pm$ 268Ab
N225	526 $\pm$ 7.32Ab	38.97 $\pm$ 1.98BCa	29 $\pm$ 0.99Aa	5 980 $\pm$ 378Aa
N300	511 $\pm$ 13.18Ab	37.36 $\pm$ 1.04Ca	30 $\pm$ 0.41Aa	5 648 $\pm$ 325Aa
MN0	391 $\pm$ 16.90Da	44.77 $\pm$ 0.81Aa	25 $\pm$ 0.88Ca	4 450 $\pm$ 210Ca
MN75	489 $\pm$ 15.40Ca	42.51 $\pm$ 5.40ABa	28 $\pm$ 1.48BCa	5 649 $\pm$ 288Ba
MN150	572 $\pm$ 8.99Aa	39.00 $\pm$ 3.65BCa	28 $\pm$ 1.42ABa	6 311 $\pm$ 165Aa
MN225	554 $\pm$ 9.14ABa	37.52 $\pm$ 3.01Ca	30 $\pm$ 1.78Aa	6 205 $\pm$ 302Aa
MN300	541 $\pm$ 10.87Ba	38.21 $\pm$ 3.48BCa	29 $\pm$ 0.79ABa	5 876 $\pm$ 142ABa

注:每列不同大写字母表示单施化肥或有机无机肥配施处理下,不同氮水平间差异显著($P<0.05$);每列不同小写字母表示同一氮水平下,单施化肥与有机无机肥配施处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different uppercase letters indicate that there is a significant difference among different nitrogen levels under the treatment of single application of chemical fertilizer or organic and inorganic fertilizer ($P<0.05$); Different lowercase letters indicate that there is a significant difference between single application of chemical fertilizer and organic and inorganic fertilizer under the same nitrogen level ($P<0.05$). The same below.

期,单施化肥处理植株氮素积累量总体表现为 $N225>N300>N150>N75>N0$,其中, $N150$ 处理与 $N300$ 处理间差异不显著;有机无机肥配施处理在拔节、开花、成熟期的植株氮素积累量总体表现为 $MN150>MN225>MN300>MN75>MN0$,其中, $MN150$ 处理与 $MN225$ 处理间差异不显著, $MN300$ 处理与 $MN150$ 处理相比其氮素积累量显著降低。与单施化肥处理相比,有机无机肥配施处理在分蘖期、拔节期、开花期、成熟期植株氮素积累量分别提高了7.73%、26.19%、19.67%、24.74%。因此,适量增施氮肥能显著提高植株氮素积累量,施氮量过高或过低均会造成植株氮素积累量下降,有机无机肥配施较单施化肥处理提升效果更显著。

2.3 冬小麦花前氮素转运量和花后氮素积累量

营养器官中氮素转运和积累是影响籽粒氮素积累的关键因素。由图3可知,茎秆的花前氮素转运量最高。不同器官氮素转运量、花前氮素总转运量均随施氮量增加先升高后降低,单施化肥处理中 $N225$ 最高,有机无机肥配施处理中 $MN150$ 最高,与单施化肥相比,有机无机肥配施根系、茎秆、叶片氮素转运量总体上分别提高24.70%、31.03%、20.35%,花前氮素总转运量提高9.80%。由图4可知,施氮量和配施有机肥均显著影响花后氮素积累量。单施化肥处理表现为 $N225>N300>N150>N75>N0$,其中, $N225$ 处理显著高于其他单施化肥处理,施氮量达到 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时对花后氮素积累起到抑制作用;配施有机肥处理中 $MN150$ 、 $MN225$ 、 $MN300$ 之间无显著差异,但显著高于 $MN0$ 和 $MN75$ 处理,与 $N150$ 处理相比, $MN150$ 处理花后氮素积累量提高33.81%,与单施化肥相比,有机无

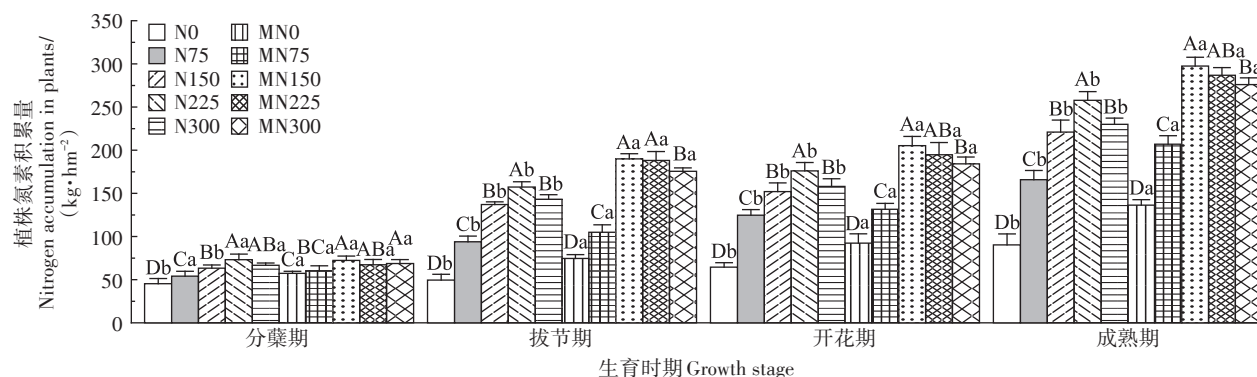
机肥配施花后氮素积累量整体提高33.10%。

2.4 冬小麦花前氮素转运和花后氮素吸收对籽粒氮素累积的贡献率

如表3所示,花前氮素转运对籽粒氮的贡献率在单施化肥 $N0$ 和 $N75$ 处理中均高于60%,在 $N150$ 、 $N225$ 和 $N300$ 处理中均低于60%,配施有机肥处理间差异不显著。花后氮素吸收对籽粒氮的贡献率在单施化肥中表现为 $N225>N300>N150>N75>N0$,配施有机肥处理间无显著差异($MN0$ 处理除外),但 $MN0$ 、 $MN75$ 处理花后氮素吸收对籽粒氮的贡献率显著高于 $N0$ 、 $N75$ 处理。总体来看,有机无机肥配施处理花后氮素吸收对籽粒氮素累积的贡献率较单施化肥处理提高15.70%。单施化肥主要是通过增加花前氮素转运来增加籽粒氮素积累量,而在有机无机肥配施中, $MN0$ 处理以花前氮素转运为主, $MN75$ 、 $MN150$ 、 $MN225$ 、 $MN300$ 处理花前氮素转运和花后氮素吸收对促进籽粒氮素的积累作用同等重要。

2.5 冬小麦氮素效率

由表4可知,随氮肥施用量的增加,氮素利用率与氮素农学效率均显著降低。在相同氮水平下,配施有机肥处理氮素利用率和氮素农学效率均高于单施化肥处理, $MN75$ 和 $MN150$ 处理氮素利用达到了较高水平。因此,适当降低氮肥用量有利于提高氮素利用率与氮素农学效率,配施有机肥在提高氮素利用率和氮素农学效率的同时能减少氮素损失。氮素收获指数随施氮量增加有降低趋势,不施氮处理($N0$ 、 $MN0$)氮素收获指数反而较高,因此,减施氮肥有利于提高冬小麦氮素收获指数。无论单施化肥还是配施有



不同大写字母表示单施化肥或有机无机肥配施处理下,不同氮水平间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示同一氮水平下,单施化肥与有机无机肥配施处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Different uppercase letters indicate that there is a significant difference among different nitrogen levels under the treatment of single application of chemical fertilizer or organic and inorganic fertilizer ($P<0.05$), and the different lowercase letters indicate that there is a significant difference between the single application of chemical fertilizer and combined application of organic and inorganic fertilizer under the same nitrogen level ($P<0.05$). The same below.

图2 不同施肥处理对植株氮素总积累量的影响

Figure 2 Effects of different fertilization treatments on total nitrogen accumulation of plants

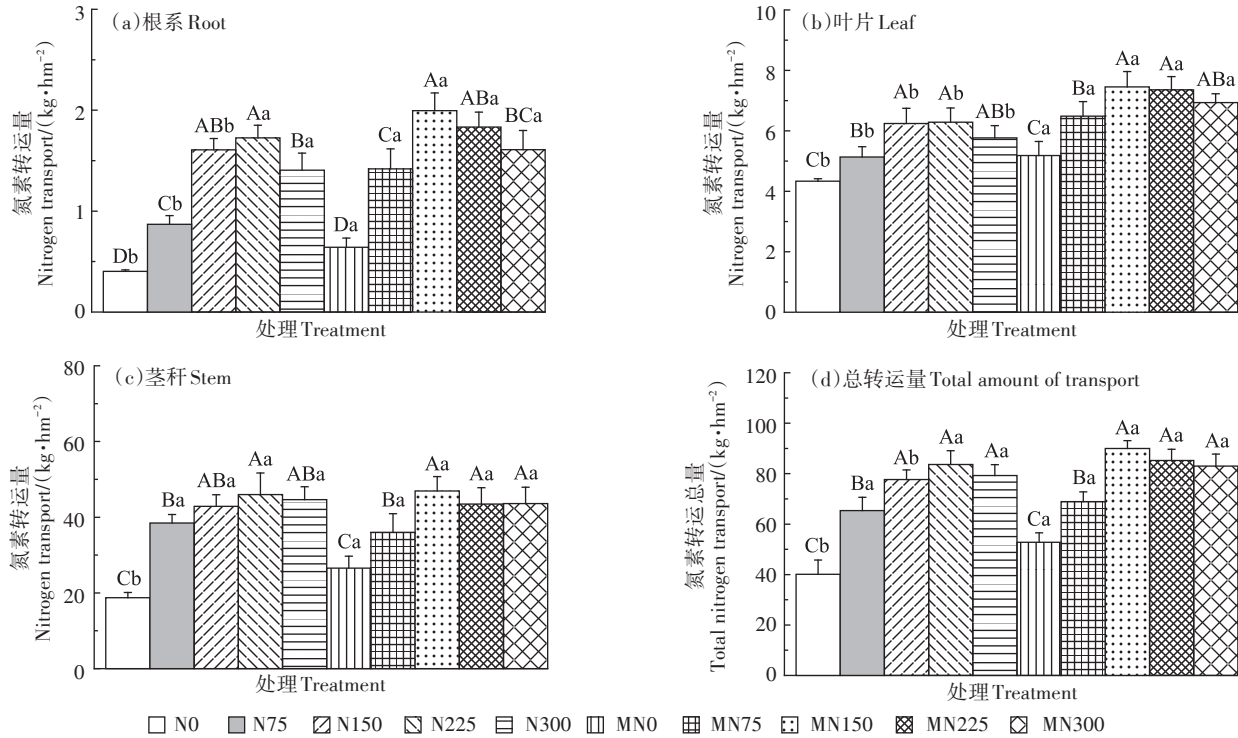


图3 不同施肥处理对花前氮素转运的影响

Figure 3 Effects of different fertilization treatments on pre-anthesis nitrogen transport

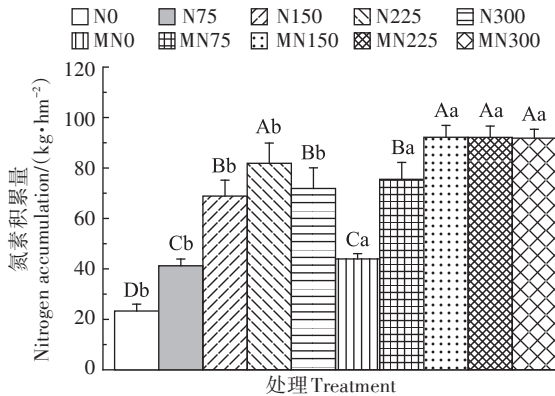


图4 不同施肥处理对花后氮素积累的影响

Figure 4 Effects of different fertilization treatments on post-anthesis nitrogen accumulation

机肥处理,氮素生理效率均随施氮量增加逐渐降低。

2.6 冬小麦叶片硝酸还原酶活性

由图5可知,冬小麦叶片硝酸还原酶活性在开花期最高、成熟期最低。适量增施氮肥显著提高硝酸还原酶活性,单施化肥处理中N225最高,与N0处理相比,N225处理在分蘖、拔节、开花、灌浆期分别提高74.7%、35.4%、42.9%、86.4%,N225、N300处理均高于N0、N75、N150处理;有机无机肥配施处理中MN150、MN225、MN300之间差异不显著,但均显著高于MN0、

表3 花前氮素转运和花后氮素吸收对籽粒氮素累积的贡献率(%)

Table 3 Contribution rates of pre-anthesis N transport and post-anthesis N accumulation to grains (%)

处理 Treatment	花前氮素转运 Pre-anthesis N transport	花后氮素吸收 Post-anthesis N uptake
N0	65.87±10.72ABa	38.35±5.45Bb
N75	66.54±8.07Aa	41.73±2.35Bb
N150	57.38±3.34BCa	50.76±3.19Aa
N225	54.49±3.60Ca	53.24±4.34Aa
N300	57.08±4.35BCa	51.65±5.06Aa
MN0	58.48±4.62Aa	48.66±3.07Ba
MN75	51.77±0.51Ab	54.33±2.39ABa
MN150	54.42±4.24Aa	55.63±3.15Aa
MN225	52.71±2.17Aa	57.07±3.53Aa
MN300	51.58±3.93Aa	57.06±3.81Aa

MN75处理,与MN0处理相比,MN150处理在分蘖、拔节、开花、灌浆期分别提高40.5%、30.8%、27.4%、73.7%。在相同氮水平下,有机无机肥配施处理硝酸还原酶活性均高于单施化肥处理。相比于单施化肥,配施有机肥处理硝酸还原酶活性在分蘖、拔节、开花、灌浆期分别提高25.94%、12.88%、9.90%、12.35%。

2.7 主要因子贡献率统计

不同因子氮肥和有机肥的贡献率如表5所示。

表4 不同施肥处理的氮素效率

Table 4 Nitrogen efficiency under different fertilization treatments

处理 Treatment	氮素收获指数 NHI/%	氮素利用率 NUE/%	氮素生理效率 NPE/(kg·kg ⁻¹)	氮素农学效率 NAE/(kg·kg ⁻¹)
N0	68.55±0.07Aa			
N75	59.64±0.07Bb	91.7±0.10Ab	17.87±3.06Aa	17.78±3.17Ab
N150	61.44±0.02Ba	84.71±0.15Bb	16.28±2.96ABa	14.28±3.89Bb
N225	59.54±0.02Ba	72.72±0.06Cb	14.4±2.80Ba	10.76±2.42Ca
N300	60.53±0.02Ba	45.48±0.06Db	15.01±0.85ABa	6.96±0.87Da
MN0	66.18±0.04Aa		20.02±1.74A	
MN75	66.92±0.04Aa	142.02±0.11Aa	18.09±2.64Aa	27.85±1.75Aa
MN150	55.76±0.01Ba	135.33±0.15Ba	14.48±0.97Ba	18.34±3.14Ba
MN225	56.32±0.03Ba	85.43±0.08Ca	14.22±1.32Ba	11.75±2.75Ca
MN300	58.46±0.02Ba	60.85±0.05Da	13.85±1.35Ba	7.72±1.27Da

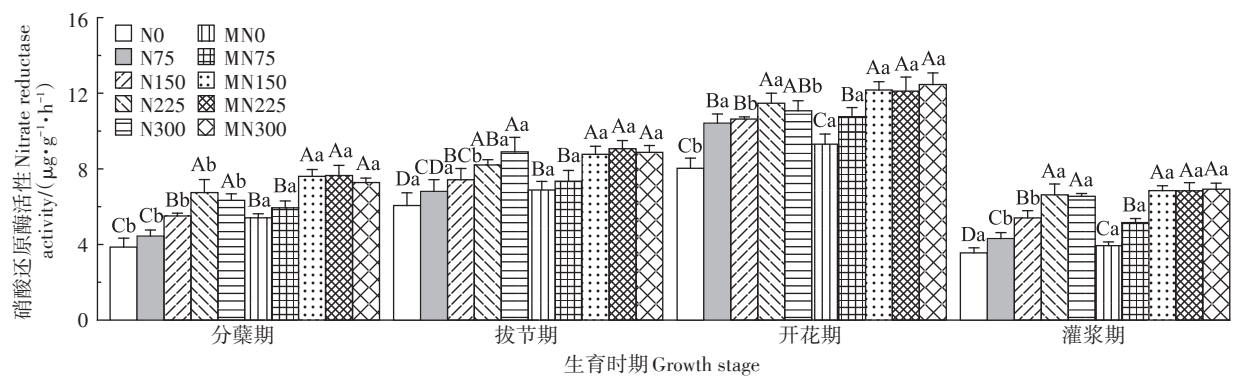


图5 不同施肥处理对叶片硝酸还原酶活性的影响

Figure 5 Effects of different fertilization treatments on nitrate reductase activity in leaves

其中,氮肥对籽粒产量的贡献率达到78.20%,是有机肥贡献率的8.0倍;有机肥对有效穗数的贡献率比氮肥高33.93%;而在花前氮素转运中氮肥和有机肥的贡献率基本持平。在成熟期,配施有机肥处理植株氮素积累和花后氮素积累的贡献率均大于氮肥,尤其在花后氮素积累中有机肥的贡献率高达21.06%,是氮肥贡献率的3.8倍,说明冬小麦籽粒产量主要受氮肥的影响,而配施有机肥相比单施化肥处理更能够保证花后植株对氮素的持续吸收能力,通过增加冬小麦有效穗数和植株对氮素的积累量,最终在一定程度上提高籽粒产量。

3 讨论

3.1 有机无机肥配施对冬小麦产量的影响

本研究发现,有机无机肥配施在减氮的同时能显著提高冬小麦籽粒产量,这与强久次仁^[22]的研究结果一致。有机无机肥配施较单施化肥可获得更高产量的主要原因:一是有机肥能够培肥改土,改善土壤理化性质、协调植物源库关系^[23];二是有机肥含有磷、钾以及微量元素,极大地满足了作物对养分的需求^[24-25]。从生理层面来说,有机肥能够延缓小麦根系和叶片衰老速度,延长小麦光合时长,并通过延长灌

表5 不同因子氮肥和有机肥贡献率(%)

Table 5 Statistics on the contribution rates of nitrogen fertilizers and organic fertilizers to different factors(%)

处理 Treatment	产量 Yield	有效穗数 Spike number	成熟期植株氮素积累量 N accumulation in plants at maturity	花前氮素总转运量 Total pre-anthesis N transport	花后氮素积累量 Post-anthesis N accumulation
氮肥	78.20	5.01	6.34	4.67	5.55
有机肥	9.74	6.71	13.27	4.64	21.06

浆时间增加穗粒质量,最终提高产量^[26-27]。本研究结果表明,氮肥对产量的贡献率远大于有机肥,而有机肥对植物花后氮素积累的贡献率大于氮肥(表5),说明有机肥在增强小麦生育后期氮素吸收利用能力中发挥着重要作用。依据7年籽粒产量与施氮量的肥料效应方程,配施有机肥处理最佳氮肥用量为 $192\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,籽粒产量为 $6\,166\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,此时配施有机肥在减少19.7%氮肥投入情况下增产6.35%,但在实际生产中有机无机肥配施氮肥用量为 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,所对应的籽粒产量为 $6\,311\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,产生该差异的原因可能与小麦年际间效应、降雨量、小麦个别年份的倒伏等有关。考虑到小麦的籽粒产量与经济效益,推荐配施 $30\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 有机肥下的最佳施氮量为 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

3.2 有机无机肥配施对氮素积累转运及氮效率的影响

本研究分析发现,有机无机肥配施在减少施氮量的同时显著提高了植株氮素积累量(图2),这是因为:一方面有机肥本身含有的氮素增加了土壤氮含量,促进了植株对氮素的吸收;另一方面有机肥能够增强土壤中微生物活性,增加细菌生物量,促进氮循环,从而加速土壤中有机氮的分解转化,提高土壤有效氮含量以供植物吸收利用^[28-29]。本研究表明花前氮素转运以茎秆为主,配施有机肥氮素转运量比单施化肥提高9.80%(图3)。这是因为开花期至成熟期茎秆氮素积累量显著大于叶片,所以茎秆氮素转运量高,而有机无机肥配施较单施化肥处理增加了营养器官氮含量和生物量,从而增加了氮素积累量,最终促进了花前氮素的转运,这与胡语妍等^[30]的研究结论相似。另外,本研究还发现适量增施氮肥能够提高花后氮素积累量,配施有机肥处理花后氮素积累量整体提高33.10%(图4);单施化肥处理花前氮素转运对籽粒氮素累积的贡献率高于花后氮素吸收,而配施有机肥处理花前氮素转运和花后氮素吸收对籽粒氮素累积贡献率同等重要(表3)。这说明单施化肥主要通过提高花前氮素转运来提高籽粒氮素累积量,而有机无机肥配施不仅依靠花前氮素转运而且通过显著增加花后氮素吸收促进小麦生长后期籽粒对氮素的积累。

本研究结果表明,施氮量过高反而会降低冬小麦氮素利用率与氮素农学效率,有机无机肥配施在提高氮素利用率和氮素农学效率的同时能够减少氮素损失(表4)。这主要是因为增加施氮量在提高营养器官氮素积累量的同时也增加了氮素损失量,使成熟期更多的氮素储存在茎秆、叶片等部位,导致氮的无效

利用增多^[31]。而适当降低氮肥用量能够提高植株花前氮素积累量、增强植株氮同化和再动员能力,最终提高氮素利用率^[32]。本研究中MN75、MN150处理氮素利用率均超过了100%(表4),这是因为长期有机无机肥配施下,配施有机肥处理的籽粒产量要显著高于N0处理,使得配施有机肥处理地上部氮素积累量远高于N0处理。除此之外,本研究还发现施氮较不施氮处理显著提高了氮素收获指数,而有机无机肥配施与单施化肥处理间氮素收获指数无显著差异(表4),原因是增施氮肥促进了籽粒氮素的积累,配施有机肥使籽粒氮素积累增加,同时多余的氮素在茎秆、叶片等部位储存,因此配施有机肥处理的氮素收获指数未显著提高。而李燕青等^[33]认为与单施化肥相比,有机肥能否提高氮素收获指数与有机肥的种类有关。

3.3 有机无机肥配施对硝酸还原酶活性的影响

硝酸还原酶活性能够衡量小麦需氮特性,提高硝酸还原酶活性有利于增强作物本身氮代谢能力、促进氮素吸收和利用。本研究发现有有机无机肥配施相比单施化肥处理对提高叶片硝酸还原酶活性效果更佳。这可能是由于硝酸还原酶本身能够促进作物吸收的无机氮转化为有机氮,在有机肥的作用下根系能够吸收更多的氮素向叶片部位转移,并使酶活性提高。另外,本研究发现施氮水平会影响硝酸还原酶活性,其中,N225、N300处理显著高于N0、N75、N150处理,MN150、MN225、MN300处理均高于MN0、MN75处理(图5)。赵吉平等^[34]研究发现,硝酸还原酶活性在施氮量为 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时显著高于不施氮肥和施氮 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理,说明合理的氮肥用量有利于提高小麦叶片硝酸还原酶活性,因为施氮量过低时硝酸还原酶活性降低,从而影响氮的代谢,最终不利于作物生长,但氮肥用量过高又会延缓氮代谢向碳代谢过度,导致作物贪青晚熟,影响作物的产量和品质^[35-36]。

4 结论

(1)相比于单施化肥处理,有机无机肥配施在提高植株氮素积累量的同时显著提高了花前氮素转运量和花后氮素吸收量,以及叶片硝酸还原酶活性、氮素利用率和农学效率。

(2)适当降低施氮量可在增加氮素利用率和农学效率的同时提高氮素收获指数。

(3)综合考虑产量和氮素吸收利用状况,推荐有机无机肥配施下最佳施氮量为 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

参考文献:

- [1] RUSTGI S, SHEWRY P, BROUNS F, et al. Wheat seed proteins: Factors influencing their content, composition, and technological properties, and strategies to reduce adverse reactions[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2019, 18(6):1751-1769.
- [2] 荣秀玉. 小麦高产稳产的影响因素及防治措施分析[J]. 中国农业文摘(农业工程), 2022, 34(1):77-79. RONG X Y. Analysis of influencing factors and prevention measures of high yield and stable yield of wheat[J]. *China Agricultural Digest: Agricultural Engineering*, 2022, 34(1):77-79.
- [3] MALCOLM J H. Reducing the reliance on nitrogen fertilizer for wheat production[J]. *Journal of Cereal Science*, 2014, 59(3):276-283.
- [4] 曹寒冰. 基于降水和产量的黄土高原旱地小麦施肥调控[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2017:5-6. CAO H B. Fertilization regulation of wheat in drylands of the Loess Plateau based on precipitation and yield [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017:5-6.
- [5] 武良, 高璐阳. 有机无机养分配施研究进展[J]. 肥料与健康, 2021, 48(5):1-4, 11. WU L, GAO L Y. Research progress on distributed application of organic and inorganic nutrients[J]. *Fertilizer and Health*, 2021, 48(5):1-4, 11.
- [6] 李群岭, 徐文兵, 齐永杰, 等. 生物有机肥与无机肥配施对烤烟生理特性和生长的影响[J]. 作物研究, 2017, 31(3):289-292. LI Q L, XU W B, QI Y J, et al. Effects of combining application of bioorganic fertilizers and chemical fertilizers on physiological characteristics and growth of fluecured tobacco[J]. *Crop Research*, 2017, 31(3):289-292.
- [7] 农传江, 汤利, 徐智, 等. 有机肥部分替代化肥对土壤有机碳库和烤烟经济性状的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(4):70-75. NONG C J, TANG L, XU Z, et al. Effects of organic fertilizer partial substituted for chemical fertilizers on soil organic carbon pools and economic characters of flue-cured tobacco[J]. *Soil and Fertilizers in China*, 2016(4):70-75.
- [8] 刘艳, 李波, 隗英华, 等. 生物有机肥对盐碱地玉米渗透调节物质及土壤微生物的影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(5):1013-1018. LIU Y, LI B, JUN Y H, et al. Effects of bio-organic fertilizer on osmotic adjustment and soil microorganisms of maize in saline-alkali soil[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31(5):1013-1018.
- [9] SHI S, WANG X, YE Z, et al. Effect of the combined application of fungal residue and chemical fertilizers on the mineralization of soil organic carbon in paddy fields[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(23):23292-23304.
- [10] 岳丽. 不同肥料配施对旱地小麦产量及水肥利用的影响[D]. 晋中:山西农业大学, 2016:9-10. YUE L. Effects of combined application of different fertilizers on yield of wheat and water fertilizer use in dryland[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2016:9-10.
- [11] 汪新颖, 彭亚静, 王玮, 等. 华北平原夏玉米季化肥氮去向及土壤氮库盈亏定量化探索[J]. 生态环境学报, 2014, 23(10):1610-1615. WANG X X, PENG Y J, WANG W, et al. Quantitative exploration on fertilizer nitrogen migration and soil nitrogen reservoir profit and loss in summer maize season in North China Plain[J]. *Journal of Ecology and Environment*, 2014, 23(10):1610-1615.
- [12] 石玉, 于振文, 王东, 等. 施氮量和底追比例对小麦氮素吸收转运及产量的影响[J]. 作物学报, 2006(12):1860-1866. SHI Y, YU Z W, WANG D, et al. Effects of nitrogen rate and ratio of base fertilizer and topdressing on uptake[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006(12):1860-1866.
- [13] 同延安, 赵营, 赵护兵, 等. 施氮量对冬小麦氮素吸收、转运及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007(1):64-69. TONG Y A, ZHAO Y, ZHAO H B, et al. Effect of N rates on N uptake transformation and the yield of winter wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007(1):64-69.
- [14] DORDAS C. Dry matter, nitrogen and phosphorus accumulation, partitioning and remobilization as affected by N and P fertilization and source-sink relations[J]. *European Journal of Agronomy*, 2009, 30(2):129-139.
- [15] PRZULJ N, MOMČILOVIĆ V. Dry matter and nitrogen accumulation and use in spring barley[J]. *Plant Soil and Environment*, 2003, 49(1):36-47.
- [16] 曹倩, 贺明荣, 代兴龙, 等. 密度、氮肥互作对小麦产量及氮素利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4):815-822. CAO Q, HE M R, DAI X L, et al. Effects of interaction between density and nitrogen on grain yield and nitrogen use efficiency of winter wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(4):815-822.
- [17] 代新俊, 杨珍平, 陆梅, 等. 不同形态氮肥及其用量对强筋小麦氮素转运、产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(5):710-720. DAI X J, YANG Z P, LU M, et al. Effects of nitrogen forms and amounts on nitrogen translocation, yield and quality of strong-gluten wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2019, 25(5):710-720.
- [18] 王林林. 不同氮素水平对小麦同化物积累与转运的调控[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2013:23-32. WANG L L. Effect of nitrogen on the assimilate accumulation and translocation in wheat[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013:23-32.
- [19] 宿顺顺. 有机无机肥配施与亏缺灌溉对夏玉米/冬小麦生长和水氮利用的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2020:17-18. SU S S. Effects of organic and inorganic fertilizer application and deficit irrigation on the growth and water and nitrogen utilization of summer maize/winter wheat[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020:17-18.
- [20] 郭战玲, 沈阿林, 寇长林, 等. 不同小麦品种开花后硝酸还原酶活性与氮效率的关系[J]. 中国农学通报, 2008(5):219-223. GUO Z L, SHEN A L, KOU C L, et al. The relationship between NRA and nitrogen efficiency of different wheat varieties after flowering[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008(5):219-223.
- [21] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社, 2006:61-63. GAO J F. Experimental guide to plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006:61-63.
- [22] 强久次仁. 不同比例有机无机肥配施对冬小麦产量及氮效率的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2016:22-22. QIANG J C R. Effects of different combination of organic and inorganic fertilizers on

- winter wheat yield and nitrogen use efficiency[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016:22-22.
- [23] 唐海明, 李超, 肖小平, 等. 不同有机无机肥氮投入比例对双季水稻生理特性与产量的影响[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(6): 149-160. TANG H M, LI C, XIAO X P, et al. Impacts of different manure and chemical fertilizer N input ratios on physiological characteristics of leaves and yield of rice under double-cropping rice field[J]. *China Agricultural Science and Technology Review*, 2020, 22(6): 149-160.
- [24] 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]. *Chinese Agricultural Sciences*, 2018, 51(11): 2136-2142.
- [25] YADAV R L, DWIVEDI B S, PRASAD K, et al. Yield trends, and changes in soil organic-C and available NPK in a long-term rice-wheat system under integrated use of manures and fertilisers[J]. *Field Crops Research*, 2000, 68(3): 219-246.
- [26] 张晶, 张定一, 王丽, 等. 不同有机肥和氮磷组合对旱地小麦的增产机理研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 238-243. ZHANG J, ZHANG D Y, WANG L, et al. The mechanism of different combinations of organic and NP fertilizers increasing yield of dryland wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(1): 238-243.
- [27] LI G, ZHANG Z S, GAO H Y, et al. Effects of nitrogen on photosynthetic characteristics of leaves from two different stay-green corn (*Zea mays* L.) varieties at the grain-filling stage[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2012, 92(4): 671-680.
- [28] 邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 等. 有机肥施用量对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(10): 4691-4699. SHAO H Y, LI Z Y, LIU D, et al. Effects of manure application rates on the soil carbon fractions and aggregate stability[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(10): 4691-4699.
- [29] KAI T, KUBO M. Chemical and biological properties of apple orchard soils under natural, organic, hybrid, and conventional farming methods[J]. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, 2020, 9(3): 134-146.
- [30] 胡语妍, 万文亮, 王江丽, 等. 不同水氮处理对滴灌春小麦氮素积累转运及产量的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2018, 36(4): 448-456. HU Y Y, WAN W L, WANG J L, et al. Effects of different water and nitrogen application rates on the accumulation and translocation of nitrogen and yield of spring wheat under drip irrigation[J]. *Journal of Shihezi University(Natural Science Edition)*, 2018, 36(4): 448-456.
- [31] 蔡瑞国, 李亚华, 张敏, 等. 雨养与灌溉条件下施氮对小麦花后氮素累积与转运的影响[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(3): 351-357. CAI R G, LI Y H, ZHANG M, et al. Effects of nitrogen fertilizer rates on nitrogen accumulation and transportation after anthesis wheat under rain-fed and irrigated conditions[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(3): 351-357.
- [32] SHI Z. Dry matter and nitrogen accumulation as affected by nitrogen fertilization and seeding rate in winter wheat[J]. *American Journal of Agriculture and Forestry*, 2018, 6(3): 50-59.
- [33] 李燕青, 温延臣, 林治安, 等. 不同有机肥与化肥配施对氮素利用率和土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(10): 1669-1678. LI Y Q, WEN Y C, LIN Z A, et al. Effect of different organic manures combined with chemical fertilizer on nitrogen use efficiency and soil fertility[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2019, 25(10): 1669-1678.
- [34] 赵吉平, 任杰成, 郭鹏燕, 等. 施氮量对小麦氮素代谢关键酶活性的影响[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(10): 1222-1225. ZHAO J P, REN J C, GUO P Y, et al. Effect of nitrogen rates on key enzymes activities related to nitrogen metabolism in wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(10): 1222-1225.
- [35] 李志, 史宏志, 刘国顺, 等. 施氮量对皖南砂壤土烤烟碳氮代谢动态变化的影响[J]. 土壤, 2010, 42(1): 8-13. LI Z, SHI H Z, LIU G S, et al. Effects of nitrogen application rate on the dynamics of carbon and nitrogen metabolism in flue-cured tobacco in sandy loam soil in southern Anhui Province[J]. *Soil*, 2010, 42(1): 8-13.
- [36] 欧阳雪莹. 氮肥运筹对滴灌春小麦籽粒碳氮代谢的调控效应研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2020: 3-4. OUYANG X Y. Regulation effect of nitrogen fertilizer management on carbon and nitrogen metabolism of spring wheat under drip irrigation[D]. Shihezi: Shihezi University, 2020: 3-4.