

砂姜黑土区氮硫配施对小麦产量及品质的影响

黄欣,豆红光,丁文金,张海鹏,马尚宇,张文静,黄正来

(安徽农业大学农学院/农业部黄淮南部小麦生物学与遗传育种重点实验室,安徽合肥 230036)

摘要:为探究不同氮素水平下基施硫肥对皖北砂姜黑土区小麦产量与品质的影响,于2022—2024年在安徽省宿州市通过大田裂区试验,以小麦品种安农大1216和华成麦1688为供试材料,主区在基施纯氮 $196\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的基础上设置 $0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N1)和 $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N2)两个拔节期追氮水平,副区设置 $0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (S1)和 $18.29\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (S2)两个施硫水平,比较分析了不同处理下小麦产量、品质、干物质积累和转运、光合特性的差异。结果表明,与N1S1处理相比,N2S2处理下小麦叶面积指数、穗数、穗粒数、籽粒产量及蛋白质含量的平均值分别增加13.43%、6.29%、2.82%、12.17%和1.07个百分点。相同施氮量下,S2的 P_n 、 G_s 和 T_r 均高于S1, C_i 低于S1,花后干物质积累量和成熟期籽粒干物质分配量比S1平均提高7.78%和5.60%,穗数、穗粒数和产量的平均值分别增加3.75%、1.70%和6.14%。在氮硫基施量相同条件下,N2的小麦茎蘖数和叶面积指数高于N1, P_n 、 G_s 和 T_r 较N1分别平均提高5.67%、16.62%和12.41%,花后干物质积累量和成熟期籽粒干物质分配量平均分别增加8.47%和6.23%,穗数、穗粒数、产量和蛋白质含量的平均值分别提高3.16%、1.39%、6.23%和2.05个百分点。综上所述,追施氮肥和基施硫肥可提高小麦叶面积指数和光合能力,促进花后干物质积累,最终增加小麦籽粒产量和蛋白质含量。

关键词:冬小麦;氮肥;硫肥;叶面积指数;干物质积累;光合特性;产量;品质

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)10-1422-10

Effects of Nitrogen and Sulfur Combined Application on Yield and Quality of Wheat in Lime Concretion Black Soil

HUANG Xin, DOU Hongguang, DING Wenjin, ZHANG Haipeng,
MA Shangyu, ZHANG Wenjing, HUANG Zhenglai

(College of Agriculture, Anhui Agricultural University/ Key Laboratory of Wheat Biology and Genetic Breeding in Southern Huanghuai, Ministry of Agriculture, Hefei, Anhui 230036, China)

Abstract: To investigate the effects of sulfur fertilization on wheat yield and quality under different nitrogen levels in the lime concretion black soil area of northern Anhui Province, a field split-plot experiment was conducted in Suzhou, Anhui Province, from 2022 to 2024. The wheat varieties tested were Annongda 1216 and Huachengmai 1688. The main plots were based on a basal nitrogen application of $196\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, with two top-dressed nitrogen levels of $0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N1) and $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N2) at the jointing stage. The sub-plot was set up with two sulfur levels of $0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (S1) and $18.29\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (S2). The study compared and analyzed the effects of different treatments on wheat yield, quality, dry matter accumulation and translocation, and photosynthetic characteristics. The results showed that compared to the N1S1 treatment, the N2S2 treatment increased the average values of leaf area index (LAI), spike number, grain number per spike, grain yield, and protein content by 13.43%, 6.29%, 2.82%, 12.17%, and 1.07 percentage points, respectively. Under the same nitrogen appli-

收稿日期:2024-10-08

修回日期:2024-11-12

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2023YFD230020203)

第一作者 E-mail:zn012800@outlook.com(黄欣)

通讯作者 E-mail:xdnyyjs@163.com(黄正来)

cation rate, P_n , G_s , and T_r in the S2 treatment were higher than those in S1, while C_i was lower. The post-flowering dry matter accumulation and grain dry matter distribution at maturity stage were on average 7.78% and 5.60% higher in S2, and the spike number, grain number per spike, and yield increased by 3.75%, 1.70%, and 6.14%, respectively. Under the same nitrogen-sulfur fertilization level, N2 resulted in higher tiller number and leaf area index than N1, with P_n , G_s , and T_r increasing by 5.67%, 16.62%, and 12.41%, respectively. The post-flowering dry matter accumulation and grain dry matter distribution at maturity stage were on average 8.47% and 6.23% higher, and the spike number, grain number per spike, yield, and protein content increased by 3.16%, 1.39%, 6.23%, and 2.05 percentage points, respectively. In conclusion, top-dressing nitrogen fertilizer and basal sulfur application can enhance wheat leaf area index, improve photosynthetic capacity, promote post-flowering dry matter accumulation, and ultimately increase wheat grain yield and protein content.

Keywords: Winter wheat, Nitrogen fertilizer; Sulfur fertilizer; Leaf area index; Dry matter accumulation; Photosynthetic characteristics; Yield, Quality

施用氮肥是提高小麦产量和品质的主要措施之一^[1]。肥料过多的投入不仅难以使小麦产量持续提高,而且会造成资源浪费和生产成本增大^[2],因而合理氮肥运筹对高产高效栽培非常重要^[3]。研究表明,小麦分蘖期和拔节期追施氮肥均可增产^[4,5]。通过追氮可促进小麦根系生长和氮素吸收^[6]。拔节期追氮可促进小麦前期分蘖^[7],有助于增加有效穗数。提高氮肥施用量可以增加小麦花后干物质积累量及其对籽粒产量的贡献率^[8]。硫素是植物生长必需的矿质营养元素之一^[9],其对小麦的增产和品质改善均有显著促进效应^[10]。黄淮海南部土壤有效硫缺乏,且缺硫面积以砂姜黑土区最大^[11]。目前,小麦生产中氮肥的施用水平较高,硫肥的施用水平较低,施硫对小麦增产的作用变得明显^[12]。施硫一方面可增加小麦有效分蘖,提高小麦旗叶的净光合速率,促进干物质积累^[13];另一方面能够延长小麦籽粒灌浆时间,提高千粒重^[14],最终实现增产。在植物体内,氮素和硫素有密切联系,氮肥适宜时植物对硫肥比较敏感^[15]。缺硫对小麦产量和品质均有影响^[16,17]。缺硫后小麦含硫氨基酸的含量会下降^[18]。施硫可增加小麦籽粒谷蛋白和醇溶蛋白含量,提高总蛋白含量^[19]。

皖北地处淮北平原,该地区的土壤大都属于砂姜黑土。小麦是皖北地区主要种植作物之一,年播种面积占安徽省小麦总播种面积的70%以上^[20],因而加强皖北地区尤其是砂姜黑土区的小麦研究对安徽省小麦高产稳产非常重要。随着小麦生产上氮肥作用的不断挖掘,继续通过增施氮肥来提高小麦产量和改善品质的潜力已微乎其

微,因而增施硫肥对小麦增产的效应受到十分的关注,但硫肥的增产效果存在区域差异,且在砂姜黑土区有关不同氮素水平下增施硫肥对小麦品质及产量影响的报道较少。本试验在砂姜黑土区以小麦品种安农大1216和华成麦1688为供试材料,分析氮硫肥配施对小麦产量、品质、干物质积累和转运、光合特性的影响,以期对砂姜黑土区小麦高产优质栽培提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地基本概况

本试验于2022年10月—2024年6月在宿州市安徽农业大学皖北综合试验站(117°5'8"E, 33°41'17"N)开展。该地地处暖温带半湿润季风气候区,土壤为砂姜黑土,年平均温度约15℃,年平均降水量830mm。试验地播前前茬玉米秸秆粉碎还田,旋耕两遍。2022—2023年播前0~20cm土壤pH值、有机质含量、全氮含量、有效磷含量和速效钾含量分别为7.64、10.72 g·kg⁻¹、1.13 g·kg⁻¹、18.25 mg·kg⁻¹和233.75 mg·kg⁻¹, 2023—2024年分别为7.59、10.76 g·kg⁻¹、1.21 g·kg⁻¹、18.50 mg·kg⁻¹和243.09 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验采用裂区设计:主区在基施纯氮196 kg·hm⁻²的基础上设置0 kg·hm⁻²(N1)和75 kg·hm⁻²(N2)两个追氮水平,追氮时期为拔节期;副区设置0 kg·hm⁻²(S1)和18.29 kg·hm⁻²(S2)两个施硫水平。基施肥料按照氮素180和16 kg·hm⁻²分成两部分,前者以稳定性复合肥(N、P₂O₅和K₂O含量分别为24%、12%和6%)为肥

源,后者在施硫和不施硫肥处理中分别选择农用硫酸铵(N、S含量分别为21%和24%)和尿素(N含量 $\geq 46\%$)作为肥源;拔节期追施氮肥为尿素。小区面积60 m²(12 m \times 5 m),3次重复。小麦供试品种为安农大1216和华成麦1688,基本苗均为290万株 \cdot hm⁻²。除施肥外,其他管理措施同当地大田。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 干物质积累量和转运参数的测定

于开花期和成熟期每个小区分别取10株小麦单茎,三次重复,将其分为叶片、茎秆和穗(成熟期分成穗轴+颖壳和籽粒),烘干称重。计算干物质转运参数^[21]:营养器官花前贮藏干物质转运量=开花期营养器官干重-成熟期营养器官干重;营养器官花前贮藏干物质对籽粒产量的贡献率=营养器官花前贮藏干物质转运量/成熟期籽粒干重 $\times 100\%$;花后干物质积累量=成熟期干物重-开花期干物重;花后干物质积累量对籽粒产量的贡献率=开花后干物质积累量/成熟期籽粒干重 $\times 100\%$ 。

1.3.2 茎蘖动态调查

在三叶期,每小区选取1个长势均匀的1 m 双行区域标记,三次重复,于越冬始期、返青期、拔节期和成熟期调查茎蘖数。

1.3.3 叶面积指数(LAI)测定

于拔节期、孕穗期、开花期、灌浆期(花后20 d)每个小区各取9个小麦植株,三次重复,测定绿色叶片长和宽,计算叶面积和LAI:叶面积=长 \times 宽 $\times 0.75$,LAI=单株叶面积 \times 每平方米基本苗数。

1.3.4 光合参数测定

在孕穗期、开花期和灌浆期(花后20 d),每个小区选择5片旗叶,三次重复,选择晴天的上午9:00—12:00,使用光合仪(CIRAS-3)测定旗叶净光合速率、饱间CO₂浓度、气孔导度和蒸腾速率。

1.3.5 产量与其构成因素测定

成熟期每个小区随机选取10个麦穗,三次重复,调查穗粒数,随机选取三个1 m 双行调查有效穗数。各处理人工收获3个1 m²代表性区域,籽粒风干后称重并测定含水量和千粒重,最后折算为13%水分含量的产量和千粒重。计算各指标平均值作为小区最终测定值。

1.3.6 籽粒品质测定

使用Perten Instruments DA7200型近红外谷物分析仪测定籽粒容重、出粉率、蛋白质含量和湿面筋含量。

1.4 数据处理

使用Excel 2019整理数据,运用IBM SPSS和DPS数据处理系统对试验数据进行统计分析,使用Origin 2021绘制图表。

2 结果与分析

2.1 氮硫配施对小麦产量与其构成因素的影响

在相同施硫量下,与不追氮(N1)相比,追氮(N2)后两个品种的穗数、穗粒数和产量平均值分别提高3.16%、1.39%和6.23%,安农大1216千粒重平均降低0.83%,第一年度华成麦1688的千粒重平均值提高2.06%。相同施氮量下,安农大1216和华成麦1688穗数、穗粒数和产量平均值均表现为S2高于S1,S2的增幅分别为3.75%、1.70%和6.14%。在所有处理中,两个品种的穗数、穗粒数和产量均以N2S2处理最高,以N1S1处理最低,N2S2处理的穗数、穗粒数和产量平均值较N1S1处理分别提高6.29%、2.82%和12.17%。其中,N2S2处理的产量与其他处理(华成麦1688的N2S1处理除外)间差异均显著(表1)。以上结果表明,基施硫肥和拔节期追施氮肥均可以增加穗数、穗粒数和产量,以二者配合的增产效果最佳。

2.2 氮硫配施对小麦籽粒品质的影响

从表2可以看出,在相同施硫量下,小麦出粉率、蛋白质含量、湿面筋含量和容重均表现为N2高于N1,其中小麦出粉率、湿面筋含量和容重差异不显著。N2条件下安农大1216和华成麦1688的蛋白质含量较N1分别高2.19和1.91个百分点。相同施氮量下,两个品种出粉率和容重均在S2下最高,但施硫水平间差异不显著。在所有处理中,两个品种的蛋白质含量均以N2S2处理最高,较N1S1处理平均提高1.07个百分点。由此可见,基施硫肥和拔节期追施氮肥均可以增加蛋白质含量,以二者配合的增产效果最佳。

2.3 氮硫配施对小麦成熟期干物质分配的影响

在相同施硫量下,N2条件下安农大1216的成熟期干物质在茎秆中的分配量大于N1(除第一年度S2水平下N1 $>$ N2外)(表3);N2条件下华成麦1688的成熟期干物质在茎秆中的分配量大于N1(除第一年度S1水平下、第二年度S2水平下N1 $>$ N2外)。N2条件下安农大1216的成熟期干物质在叶片中的分配量小于N1;N2条件下华成麦1688的成熟期干物质在叶片中的分配量

表 1 不同处理间小麦产量及其构成因素的差异
Table 1 Differences of grain yield and its components of wheat among different treatments

年度 Year	品种 Cultivar	氮肥 Nitrogen	硫肥 Sulfur	穗数 Spikes/ ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数 Grains per spike	千粒重 1 000-grain weight/g	产量 Grain yield/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
2022—2023	安农大 1216 Annongda 1216	N1	S1	619.31b	33.33a	42.03a	7 471.23d
			S2	663.67a	34.14a	42.93a	8 226.73b
		N2	S1	639.32b	33.50a	41.89a	7 921.29c
			S2	674.34a	34.33a	42.48a	8 632.65a
	华成麦 1688 Huachengmai 1688	N1	S1	595.30a	36.00a	43.51b	7 559.11b
			S2	597.30a	36.20a	44.53a	8 009.52ab
		N2	S1	611.31a	36.33a	44.53a	8 149.74ab
			S2	614.31a	36.33a	45.33a	8 499.91a
2023—2024	安农大 1216 Annongda 1216	N1	S1	609.00b	33.60b	42.11bc	7 272.47c
			S2	636.00ab	34.00b	43.23a	7 707.51b
		N2	S1	626.00ab	33.89b	41.83c	7 622.67b
			S2	654.00a	35.17a	42.69ab	8 122.67a
	华成麦 1688 Huachengmai 1688	N1	S1	572.00b	38.95a	41.75b	7 565.68c
			S2	576.00b	39.00a	42.31a	7 744.21b
		N2	S1	598.00a	39.67a	41.99ab	8 197.71a
			S2	604.50a	40.00a	41.67b	8 245.42a

相同年度同一品种同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下表同。

Different lowercase letters after the values within the same columns of same year and variety indicate significant differences among different treatments($P < 0.05$). The same in tables 2—4.

表 2 2022—2023 年不同处理间小麦籽粒品质的差异
Table 2 Differences of wheat grain quality among different treatments in 2022—2023

品种 Cultivar	氮肥 Nitrogen	硫肥 Sulfur	出粉率 Flour yield/%	蛋白质含量 Protein content/%	湿面筋含量 Wet gluten content/%	容重 Test weight/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)
安农大 1216 Annongda 1216	N1	S1	68.05c	12.91c	26.45a	813.00b
		S2	68.65bc	12.91c	26.74a	818.50ab
	N2	S1	69.05ab	13.96b	26.99a	816.50ab
		S2	69.30a	14.05a	26.87a	823.50a
华成麦 1688 Huachengmai 1688	N1	S1	68.55b	13.63b	27.59ab	802.50b
		S2	69.20ab	13.65b	27.42b	806.00ab
	N2	S1	69.15ab	14.57a	28.45a	808.50a
		S2	69.60a	14.62a	27.70ab	811.00a

大于 N1。N2 条件下两个品种的成熟期干物质在穗轴+颖壳中的分配量均大于 N1(除华成麦 1688 S1 水平下 $N1 > N2$ 外)。N2 水平下两个品种成熟期干物质在籽粒中的平均分配量较 N1 平均提高 6.23%。相同施氮量下, S2 条件下安农大 1216 的成熟期干物质在茎秆中的分配量大于 S1(除第一年度 N2 水平下 $S1 > S2$ 外); S2 条件下华成麦 1688 的成熟期干物质在茎秆中的分配量大于 S1(除第一年度 N1 水平下、第二年度 N2 水平下 $S1 > S2$ 外)。S2 条件下两个品种的成熟期干物质在叶片和穗轴+颖壳中的分配量均大于 S1(除华成麦 1688 N1 水平下 $S1 > S2$ 外)。S2 条

件下两个品种的成熟期干物质在籽粒中的平均分配量比 S1 平均高 5.60%。

安农大 1216 两个年度成熟期干物质分配比例均表现为籽粒>茎秆>穗轴+颖壳>叶片, 华成麦 1688 表现为茎秆>籽粒>穗轴+颖壳>叶片(除 N1S1 和 N2S2 处理下籽粒>茎秆外)。在所有处理中, N2S2 处理的成熟期干物质在籽粒中的分配量较 N1S1 处理平均提高了 12.16%。以上结果表明, 基施硫肥和拔节期追施氮肥均可以增加小麦成熟期干物质在籽粒中分配量, 以二者配合的增产效果最佳, 有利于获得高产。

表 3 不同处理间小麦成熟期干物质分配量及比例的差异

Table 3 Differences of dry matter distribution amount and proportion of wheat among different treatments at maturity stage

年度 Year	品种 Cultivar	氮肥 Nitrogen	硫肥 Sulfur	茎秆 Stem+sheath		叶片 Leaf		穗轴+颖壳 Axis+glume		籽粒 Grain	
				分配量 Distribution amount/ (kg·hm ⁻²)	比例 Proportion /%	分配量 Distribution amount/ (kg·hm ⁻²)	比例 Proportion /%	分配量 Distribution amount/ (kg·hm ⁻²)	比例 Proportion /%	分配量 Distribution amount/ (kg·hm ⁻²)	比例 Proportion /%
2022— 2023	安农大 1216 Annongda 1216	N1	S1	5 994.91a	35.35a	1 705.17bc	10.06b	2 757.99a	16.26a	6 499.97d	38.33b
			S2	6 765.03a	36.07a	1 991.02a	10.62a	2 840.52a	15.15a	7 157.25b	38.16b
		N2	S1	6 644.66a	36.67a	1 628.13c	8.99c	2 953.66a	16.30a	6 891.52c	38.04b
			S2	6 689.42a	35.12a	1 784.75b	9.37c	3 061.49a	16.07a	7 510.40a	39.43a
	华成麦 1688 Huachengmai 1688	N1	S1	8 290.51a	40.77a	1 964.48b	9.66ab	3 504.32a	17.23a	6 576.43b	32.34b
			S2	7 573.74b	38.77a	1 855.61c	9.50b	3 137.81b	16.06b	6 968.28ab	35.67a
		N2	S1	8 085.54ab	39.68a	1 972.48b	9.68ab	3 227.69b	15.84b	7 090.27ab	34.80ab
			S2	8 170.28a	38.94a	2 109.12a	10.05a	3 304.97ab	15.75b	7 394.93a	35.25a
2023— 2024	安农大 1216 Annongda 1216	N1	S1	4 709.60b	30.74c	1 594.23a	10.41a	2 686.91b	17.54a	6 327.04c	41.31b
			S2	4 859.04b	30.51c	1 662.08a	10.43a	2 700.88b	16.96a	6 705.53b	42.10a
		N2	S1	5 608.96a	34.19a	1 361.90b	8.30c	2 804.48ab	17.09a	6 631.72b	40.42c
			S2	5 502.32a	32.26b	1 571.05a	9.21b	2 913.79a	17.09a	7 066.72a	41.44ab
	华成麦 1688 Huachengmai 1688	N1	S1	6 494.11c	36.11b	1 708.37ab	9.50ab	3 199.39a	17.79a	6 582.14c	36.60b
			S2	6 973.44b	37.93a	1 637.12b	8.91b	3 037.44a	16.52b	6 737.46b	36.65b
		N2	S1	7 227.83a	37.26a	1 839.18a	9.48ab	3 200.89a	16.50b	7 132.01a	36.77b
			S2	6 290.83d	33.83c	1 868.58a	10.05a	3 260.27a	17.54ab	7 173.52a	38.58a

2.4 氮硫配施对小麦干物质积累与转运的影响

在相同施硫量下,小麦花前干物质转运量和花后干物质积累量均表现为 N2 高于 N1,花前干物质转运量在两个施氮水平间差异不显著(图 6)。N2 条件下安农大 1216 的花后干物质积累量在 2022—2023 和 2023—2024 年度较 N1 分别高 6.71% 和高 7.10%,华成麦 1688 的花后干物质积累量在两个年度较 N1 分别高 9.83% 和 10.22%。相同施氮量下,两个品种的花前干物质转运量和花后干物质积累量均表现为 S2 高于 S1,花前干物质转运量在两个施硫水平间差异不显著,S2 的平均花后干物质积累量在两个年度平均比 S1 高 7.78%。在所有处理中,小麦的平均花前干物质转运量和花后干物质积累量均以 N2S2 处理最高,较 N1S1 处理分别提高 3.46% 和 16.86%。此外,基施硫肥和拔节期追施氮肥均不同程度地提高了花后干物质积累对产量的贡献率。N2S2 处理的花后干物质积累量对产量的贡献率较 N1S1 处理平均提高 2.71 个百分点。这说明,基施硫肥和拔节期追施氮肥均可以促进小麦花前干物质转运和花后干物质积累,以二者配合效果最佳。

2.5 氮硫配施对小麦茎蘖数的影响

两个年度中,小麦茎蘖数均在拔节期达到最

大值(图 1)。氮硫配施对小麦越冬期和返青期的茎蘖数影响较小,其中仅 2022—2023 年度的安农大 1216 受影响显著。2022—2023 年度,在相同施硫量下,两个品种拔节期和成熟期的茎蘖数均表现为 N2 高于 N1,其中安农大 1216 的 N2 较 N1 分别增加 4.60% 和 2.39%,华成麦 1688 分别增加 8.28% 和 2.77%。相同施氮量下,两个品种的两个时期茎蘖数均表现为 S2 高于 S1,其中安农大 1216 的 S2 较 S1 分别增加 8.73% 和 6.32%,华成麦 1688 两个时期茎蘖数差异均不显著。2023—2024 年度趋势与 2022—2023 年度一致。在所有处理中,两个品种的茎蘖数均以 N2S2 处理最高,以 N1S1 处理最低。这表明,基施硫肥和拔节期追施氮肥均可促进小麦分蘖,增加群体数量,以二者配合的效果最佳。

2.6 氮硫配施对小麦叶面积指数(LAI)的影响

在相同施硫量下,追施氮肥可提高小麦 LAI(图 2)。N2 条件下安农大 1216 的平均 LAI 较 N1 在 2022—2023 和 2023—2024 年度分别提高 4.18% 和 7.52%,华成麦 1688 分别提高 8.78% 和 9.73%。相同施氮量下,两个品种 LAI 基本上表现为 S2>S1,两个年度趋势一致。S2 条件下安农大 1216 的平均 LAI 较 S1 在两个年度分别提高 14.70% 和 9.64%,华成麦 1688 的 LAI 在

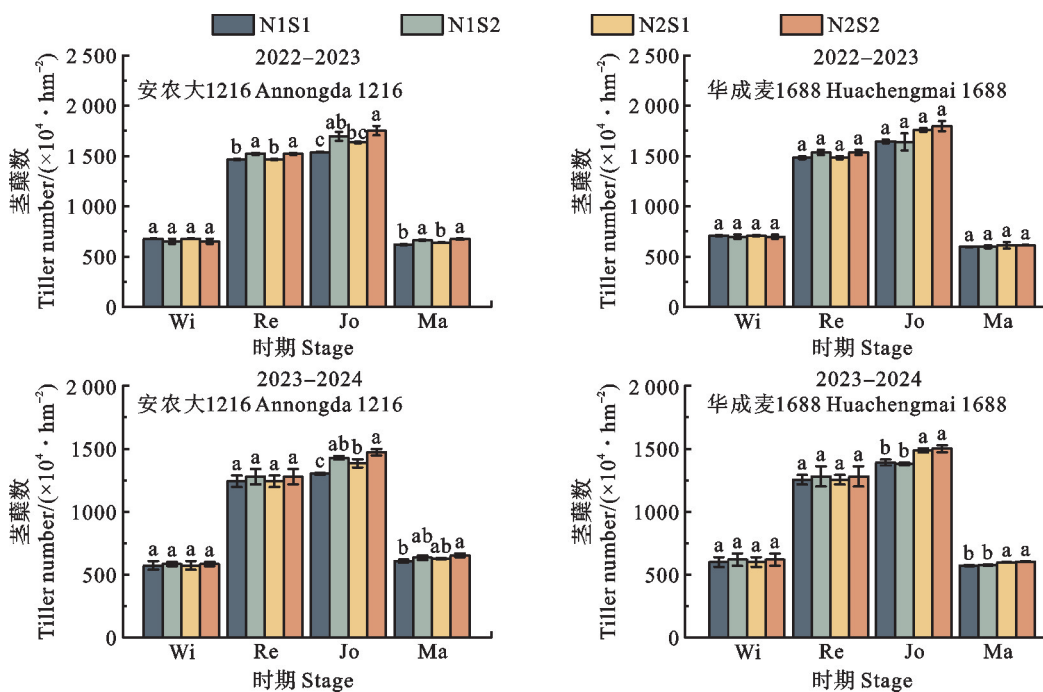
S2 和 S1 间无显著差异。在所有处理中,两个品种均以 N2S2 处理的 LAI 较好,较 N1S1 处理平

均提高 13.43%。以上结果表明,基施硫肥和拔节期追氮均可以提高小麦光合面积。

表 4 不同处理间小麦干物质积累与转运的差异

Table 4 Differences of wheat dry matter accumulation and translocation among different treatments

年份 Year	品种 Cultivar	氮肥 Nitrogen	硫肥 Sulfur	花前干物质 Pre-anthesis dry matter		花后干物质 Post-anthesis dry matter	
				转运量 Translocation amount/ (kg · hm ⁻²)	贡献率 Contribution rate/%	积累量 Accumulation amount/ (kg · hm ⁻²)	贡献率 Contribution rate/%
2022—2023	安农大 1216 Annongda 1216	N1	S1	2 205.94a	33.94a	4 294.04c	66.06a
			S2	2 289.32a	31.98a	4 867.94ab	68.02a
		N2	S1	2 293.32a	33.28a	4 598.20bc	66.72a
			S2	2 331.75a	31.05a	5 178.66a	68.95a
	华成麦 1688 Huachengmai 1688	N1	S1	2 316.64a	35.23a	4 259.79c	64.77b
			S2	2 353.41a	33.77ab	4 614.87b	66.23ab
		N2	S1	2 351.18a	33.16ab	4 739.10b	66.84ab
			S2	2 386.67a	32.27b	5 008.25a	67.73a
2023—2024	安农大 1216 Annongda 1216	N1	S1	2 267.40a	35.84a	4 059.65c	64.16c
			S2	2 285.36a	34.08bc	4 420.17b	65.92ab
		N2	S1	2 298.32a	34.66ab	4 333.40b	65.34bc
			S2	2 318.28a	32.80c	4 748.44a	67.20a
	华成麦 1688 Huachengmai 1688	N1	S1	2 323.17b	35.29a	4 258.97c	64.71c
			S2	2 331.73b	34.61b	4 405.73b	65.39b
		N2	S1	2 364.04ab	33.15c	4 767.97a	66.85a
			S2	2 391.33a	33.33c	4 782.19a	66.67a

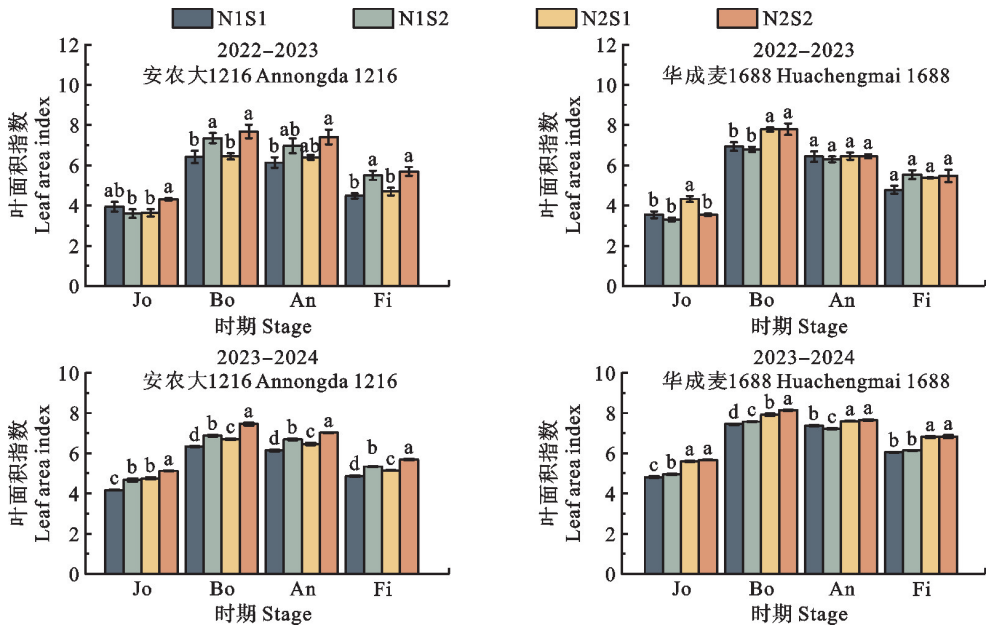


Wi:越冬始期;Re:返青期;Jo:拔节期;Ma:成熟期。同一时期图柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。下图同。

Wi: Over-wintering stage; Re: Regreening stage; Jo: Jointing stage; Ma: Maturity stage. Different lowercase letters above the columns at same stage indicate significant differences among different treatments(P<0.05). The same in figures 2 and 3.

图 1 不同处理间小麦茎蘖数的差异

Fig. 1 Differences of wheat tiller number among different treatments



Jo:拔节期; Bo:孕穗期; An:开花期; Fi:灌浆期(花后 20 d)。图 3 同。

Jo: Jointing stage; Bo: Booting stage; An: Anthesis stage; Fi: Grain-filling stage(20 d after flowering). The same in Fig. 3.

图 2 不同处理间小麦叶面积指数的差异

Fig. 2 Differences of wheat leaf area index among different treatments

2.7 氮硫配施对小麦光合特性的影响

在相同施硫量下,2022—2023 年度 N2 条件下小麦旗叶的平均 P_n 、 G_s 和 T_r 较 N1 分别提高 5.83%、17.99%和 12.70%, C_i 降低 5.02%; 2023—2024 年度 P_n 、 G_s 和 T_r 分别平均提高 5.50%、15.24%和 12.11%, C_i 降低 5.45%。相同施氮量下,两品种的 P_n 、 G_s 和 T_r 均表现为 S2 高于 S1, C_i 表现则相反。其中,两个年度 S2 条件

下安农大 1216 的平均 P_n 、 G_s 和 T_r 较 S1 分别提高 8.40%、13.05%和 18.71%;华成麦 1688 分别提高 2.36%、4.16%和 3.00%。在所有处理中,两个品种的 P_n 、 G_s 和 T_r 均以 N2S2 处理最高,较最低的 N1S1 处理分别提高 11.05%、26.35%和 23.79%。以上结果表明,基施硫肥和拔节期追施氮肥均可以提高 P_n 、 G_s 和 T_r ,以二者配合的增产效果最佳。

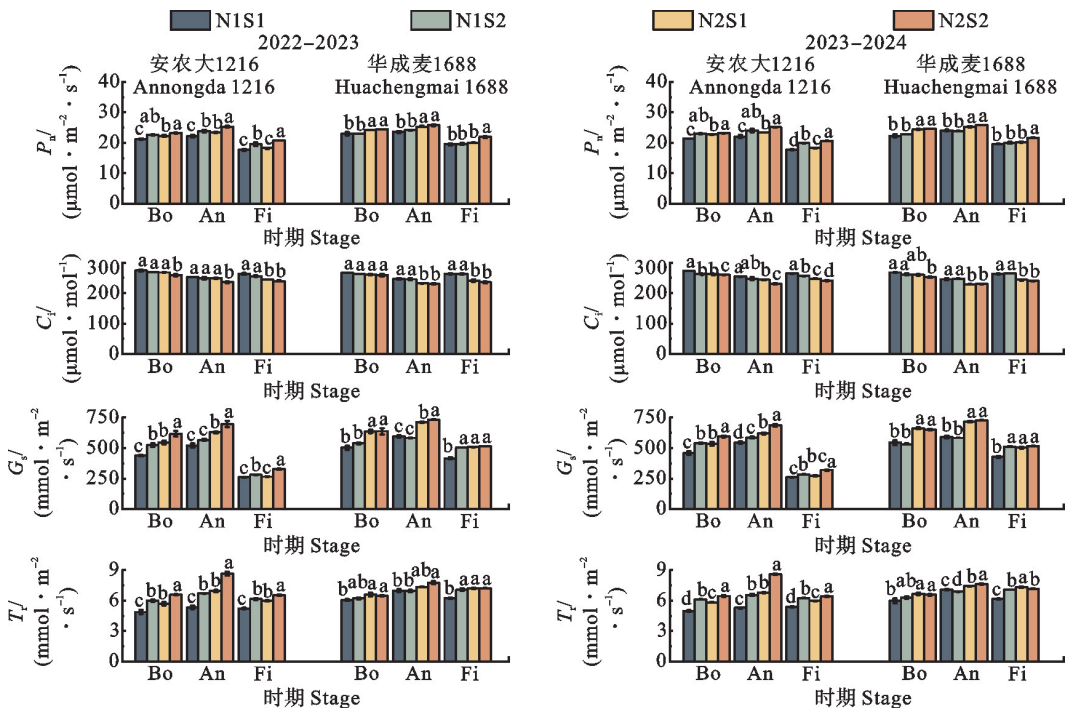


图 3 不同处理间小麦光合特性的差异

Fig. 3 Differences of wheat photosynthetic characteristics among different treatments

3 讨论

适宜的追氮量可以提高小麦穗数和粒重,从而增产^[22,23]。在本研究中,相同施硫量下,追施氮肥后小麦的平均穗数、穗粒数和产量较不追施氮肥分别提高 3.16%、1.39%和 6.23%,与 Salvaggiotti 等^[24]的研究结果一致。硫肥在缺硫的农业系统中具有提高产量的能力^[25]。施硫增产的原因可能是增加了土壤中可被小麦利用的硫^[26]。也有研究表明,施硫通常通过促进小麦的生长发育、叶片光合和干物质积累,提高穗数和穗粒数,从而增加产量^[27]。在本试验中,相同施氮量下,施硫后小麦的平均穗数、穗粒数和产量较不施硫分别提高了 3.75%、1.70%和 6.14%。由此说明施硫增产是因为提高了穗数和穗粒数,其中穗数占主导地位。这与 Järvan 等^[28]研究结论相同。在氮素充足的情况下配施硫肥,可以增加穗粒数,从而增产^[29]。在本研究中,N2S2 处理的小麦平均穗数、穗粒数和产量较 N1S1 处理分别提高 6.29%、2.82%和 12.17%。

前人研究认为,适当施用硫肥可以保证小麦籽粒含有适宜的含硫氨基酸,有利于小麦的高产和优质^[30]。杨光梅等^[31]研究发现,施硫能提高小麦蛋白质含量。Järvan 等^[32]的研究结果显示,施硫处理降低了小麦的湿面筋含量,提高了湿面筋指数。本试验中,相同施氮量下,S2 的蛋白质含量均高于 S1,但差异不显著;湿面筋含量表现为 S1>S2。在相同施硫量下,N2 条件下安农大 1216 蛋白质含量较 N1 高 2.19 个百分点,华成麦 1688 高 1.91 个百分点。这进一步表明,基施硫肥和追施氮肥可以提高小麦的穗数、穗粒数和蛋白质含量,在提高产量的同时改善品质。

干物质积累是影响小麦产量的因素之一^[33]。籽粒产量来自于花前干物质积累和花后干物质积累,其中花后干物质积累影响较大^[34,35]。追施氮肥可以促进小麦干物质积累和转运,从而提高产量^[36]。本试验中,在相同施硫量下,追氮后小麦花后干物质积累量在两个年度分别提高 8.27%和 8.66%。N2 的成熟期干物质在籽粒中的平均分配量较 N1 提高 6.23%。有研究表明,增施硫肥促进了小麦生育中后期干物质积累^[37]。也有研究认为,施硫可以提高小麦开花前干物质积累量^[38]。在本试验中,S2 条件下小麦花后干物质积累量较高。刘超等^[39]报道,施硫增大了小麦成

熟期茎+叶、穗轴+颖壳和籽粒分配量。在本试验中,施硫也提高了成熟期茎秆、叶片、穗轴+颖壳和籽粒干物质的分配量。相同施氮量下,施硫后成熟期干物质在籽粒中的平均分配量比不施硫高 5.60%。由此可见,基施硫肥和追施氮肥提高了小麦干物质积累量及其在籽粒中的分配量,有利于籽粒产量的提高。

硫是合成叶绿素所必需的矿质营养元素^[40],在缺硫的地区施硫可以提高小麦的叶绿素含量,进而促进光合作用^[41]。氮素供应不足会抑制小麦光合作用能力,从而影响小麦籽粒产量^[42-44]。本研究中,与 S1 对比,S2 条件下安农大 1216 的平均 P_n 、 G_s 和 T_r 分别高 8.40%、13.05%和 18.71%,华成麦 1688 分别高 2.36%、4.16%和 3.00%。追施氮肥可以增加小麦叶面积指数,提高小麦光合能力^[45,46]。本研究中,相同施硫量下,追氮后平均 P_n 、 G_s 和 T_r 较不追氮分别提高 5.67%、16.62%和 12.41%。随着施氮量的增加,硫素对叶面积指数的影响提高^[47]。本研究结果表明,与不施硫相比,施硫能显著提高小麦叶面积指数。N2S2 处理的叶面积指数较 N1S1 处理平均高 13.43%。这也表明基施硫肥和追施氮肥可以显著提高小麦光合面积、 P_n 、 G_s 和 T_r ,有利于小麦干物质积累,为小麦增产奠定基础。

4 结论

在本试验中,基施硫肥和追施氮肥处理较不基施硫肥和追施氮肥处理显著提高了小麦的叶面积指数、净光合速率、蒸腾速率和气孔导度,有利于小麦光合物质生产,显著增加了花后干物质积累量和成熟期干物质在籽粒中的分配量,提高了穗数和穗粒数,在实现增产的同时改善了小麦品质。

参考文献:

- [1]JIANG C Q,LU D J,ZU C L,*et al.* One-time root-zone N fertilization increases maize yield,NUE and reduces soil N losses in lime concretion black soil [J]. *Scientific Reports*,2018,8: 10258.
- [2]CHEN Z M,WANG H Y,LIU X W,*et al.* The effect of N fertilizer placement on the fate of urea-¹⁵N and yield of winter wheat in Southeast China [J]. *PLoS One*,2016,11(4): e0153701.
- [3]BARRACLOUGH P B,HOWARTH J R,JONES J,*et al.* Nitrogen efficiency of wheat:Genotypic and environmental variation and prospects for improvement [J]. *European Journal of Agronomy*,2010,33(1):1.

- [4] LI D X, MO S J, BATCHELOR W D, *et al.* Effects of nitrogen topdressing and paclobutrazol at different stages on spike differentiation and yield of winter wheat [J]. *PeerJ*, 2021, 9: e12473.
- [5] MELAJ M A, ECHEVERRÍA H E, LÓPEZ S C, *et al.* Timing of nitrogen fertilization in wheat under conventional and No-tillage system [J]. *Agronomy Journal*, 2003, 95(6): 1525.
- [6] SHI Z L, JING Q, CAI J, *et al.* The fates of ¹⁵N fertilizer in relation to root distributions of winter wheat under different N splits [J]. *European Journal of Agronomy*, 2012, 40: 86.
- [7] 丁彤彤, 李朴芳, 曹丽, 等. 干旱胁迫下不同基因型小麦干物质转运对产量形成的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(6): 62.
- DING T T, LI P F, CAO L, *et al.* Effects of dry matter translocation on yield formation of wheat with different genotypes under drought stress [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(6): 62.
- [8] 马冬云, 郭天财, 王晨阳, 等. 施氮量对冬小麦灌浆期光合产物积累、转运及分配的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(6): 1027.
- MA D Y, GUO T C, WANG C Y, *et al.* Effects of nitrogen application rates on accumulation, translocation, and partitioning of photosynthate in winter wheat at grain filling stage [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(6): 1027.
- [9] 刘洋, 石慧清, 龚月桦. 硫氮配施对持绿型小麦氮素运转及叶片衰老的影响[J]. 西北植物学报, 2012, 32(6): 1206.
- LIU Y, SHI H Q, GONG Y H. Effects of sulfur and nitrogen fertilizer combination on nitrogen transfer and leaf senescence in stay-green wheat [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2012, 32(6): 1206.
- [10] 赵首萍, 胡尚连, 李文雄, 等. 硫对春小麦不同品质类型籽粒蛋白质及贮藏蛋白含量的效应[J]. 作物学报, 2003, 29(6): 847.
- ZHAO S P, HU S L, LI W X, *et al.* Effects of sulphur on grain protein content and storage protein content in spring wheat with different quality [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2003, 29(6): 847.
- [11] 於忠祥, 张成林, 王士佳. 沿淮地区土壤有效硫状况及对硫的需求[J]. 应用生态学报, 2001, 12(2): 210.
- YU Z X, ZHANG C L, WANG S J. State of soil available sulphur and its requirement along Huaihe River region [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(2): 210.
- [12] KOPRIVA S, SUTER M, VON BALLMOOS P, *et al.* Interaction of sulfate assimilation with carbon and nitrogen metabolism in *Lemna minor* [J]. *Plant Physiology*, 2002, 130(3): 1406.
- [13] 李国强, 朱云集, 郭天财, 等. 硫氮配施对强筋小麦豫麦34籽粒灌浆特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(2): 98.
- LI G Q, ZHU Y J, GUO T C, *et al.* Effect of sulfur and nitrogen fertilizer combined application on grain filling characteristics of wheat Yumai 34 with high gluten [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2006, 26(2): 98.
- [14] HRIVNA L, KOTKOVÁ B, BUREŠOVÁ I. Effect of sulphur fertilization on yield and quality of wheat grain [J]. *Cereal Research Communications*, 2015, 43(2): 344.
- [15] 祝小捷, 朱云集, 郭天财, 等. 不同氮素水平下施硫对高产小麦碳氮运转和产量的影响[J]. 西北植物学报, 2007, 27(9): 1820.
- ZHU X J, ZHU Y J, GUO T C, *et al.* Effects of sulfur application on carbon and nitrogen transport and grain yield of high yield wheat cultivars in different nitrogen fertilizer levels [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, 27(9): 1820.
- [16] YU Z T, ANGELA J, SHAHIDUL I, *et al.* Impact of mid-season sulphur deficiency on wheat nitrogen metabolism and biosynthesis of grain protein [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 185.
- [17] ZHAO F J, HAWKESFORD M J, MCGRATH S P. Sulphur assimilation and effects on yield and quality of wheat—science direct [J]. *Journal of Cereal Science*, 1999, 30(1): 1.
- [18] BYERS M, MCGRATH S P, WEBSTER R. A survey of the sulphur content of wheat grown in Britain [J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 1987, 38: 151.
- [19] TAO Z, CHANG X, WANG D, *et al.* Effects of sulfur fertilization and short-term high temperature on wheat grain production and wheat flour proteins [J]. *The Crop Journal*, 2018, 6(4): 413.
- [20] 安徽省统计局. 安徽统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022: 231-233.
- Anhui Bureau of Statistics. Anhui statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistical Press, 2022: 231-233.
- [21] 张振, 何建宁, 石玉, 等. 行距和种植方式对小麦光合特性和产量的影响[J]. 作物学报, 2024, 50(9): 2396.
- ZHANG Z, HE J N, SHI Y, *et al.* Effects of row spacing and planting patterns on photosynthetic characteristics and yield of wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(9): 2396.
- [22] 温明星, 陈爱大, 李东升, 等. 追氮量和种植密度对镇麦168群体质量、产量和加工品质的调控效应[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(4): 528.
- WEN M X, CHEN D A, LI D S, *et al.* Regulating effect of nitrogen topdressing and planting density on population quality, yield and quality of Zhenmai 168 [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(4): 528.
- [23] 赵广才, 常旭虹, 杨玉双, 等. 追氮量对不同品质类型小麦产量和品质的调节效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 859.
- ZHAO G C, CHANG X H, YANG Y S, *et al.* Grain yield and quality responding to the nitrogen fertilizer operation in different quality type wheat [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(4): 859.
- [24] SALVAGIOTTI F, CASTELLARIN M J, MIRALLES J D, *et al.* Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake [J]. *Field Crops Research*, 2009, 113(2): 170.
- [25] ZITONG Y, MAOYUN S, TING Z, *et al.* Impact and mechanism of sulphur-deficiency on modern wheat farming nitrogen-related sustainability and gliadin content [J]. *Communications Biology*, 2021, 4(1): 945.
- [26] FITZGERALD M A, UGALDE T D, ANDERSON J W. Sulphur nutrition affects delivery and metabolism of S in develo-

- ping endosperms of wheat [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2001, 52: 1519.
- [27] 谢迎新, 朱云集, 郭天财. 施用硫肥对两种穗型冬小麦品种群体生理、产量和品质的影响[J]. *麦类作物学报*, 2003, 23(1): 44.
- XIE Y X, ZHU Y J, GUO T C. Effect of different sulphur application on yield and quality of two spike type winter wheat cultivars [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2003, 23(1): 44.
- [28] JÄRVAN M, EDESI L, ADAMSON A. Effect of sulphur fertilization on grain yield and yield components of winter wheat [J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science*, 2012, 62(5): 401.
- [29] 赵玉霞, 李娜, 周芳, 等. 氮硫配施对冬小麦籽粒灌浆特性及产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(5): 1366.
- ZHAO Y X, LI N, ZHOU F, *et al.* Effects of N and S application on grain filling characteristics and yield of winter wheat [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(5): 1366.
- [30] 马春英, 李雁鸣, 韩金玲. 不同施硫量对冬小麦光合特性和产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(2): 211.
- MA C Y, LI Y M, HAN J L. Effects of different dose of sulphur fertilizer on photosynthetic characteristics and grain yield in winter wheat [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2005, 11(2): 211.
- [31] 杨光梅, 赵广才, 刘利华, 等. 硫肥对小麦蛋白质组分及产量的影响[J]. *土壤通报*, 2007(1): 89.
- YANG G M, ZHAO G C, LIU L H, *et al.* Sulphur effect on protein components and grain yield of wheat [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007(1): 89.
- [32] JÄRVAN M, LUKME L, ADAMSON A, *et al.* Responses of wheat yield, quality and bread-making properties on the sulphur fertilization [J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science*, 2017, 67(5): 444.
- [33] CHEN L, QIAO Z, WANG J, *et al.* Effect of nitrogen fertilizer on the accumulation and distribution of dry matter in broomcorn millet [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2015, 16(7): 1425.
- [34] EHDAIE B, WAINES J. Sowing date and nitrogen rate effects on dry matter and nitrogen partitioning in bread and durum wheat [J]. *Field Crops Research*, 2001, 73(1): 47.
- [35] 周玲, 王朝辉, 李富翠, 等. 不同产量水平旱地冬小麦品种干物质累积和转移的差异分析[J]. *生态学报*, 2012, 32(13): 4123.
- ZHOU L, WANG Z H, LI F C, *et al.* Analysis of dry matter accumulation and translocation for winter wheat cultivars with different yields on dryland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(13): 4123.
- [36] KE X, QIANG C, FALONG H, *et al.* N-fertilizer postponing application improves dry matter translocation and increases system productivity of wheat/maize intercropping [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 22825.
- [37] 谢迎新, 刘超, 朱云集, 等. 氮、硫配施对冬小麦氮素利用效率及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(1): 64.
- XIE Y X, LIU C, ZHU Y J, *et al.* Effects of nitrogen and sulphur combined application on nitrogen use efficiency and grain yield of winter wheat [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(1): 64.
- [38] 沈学善, 朱云集, 李国强, 等. 施硫对不同筋力型品种小麦碳氮运转和产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(4): 134.
- SHEN X S, ZHU Y J, LI G Q, *et al.* Effects of sulphur application on carbon and nitrogen assimilate translocation and grain yield of winter wheat cultivars with different gluten [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(4): 134.
- [39] 刘超, 朱慧杰, 朱云集, 等. 灌水与施硫对冬小麦产量及水分利用效率的影响[J]. *核农学报*, 2014, 28(11): 2108.
- LIU C, ZHU H J, ZHU Y J, *et al.* Effects of irrigation and sulphur application on grain yield and water use efficiency in winter wheat [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2014, 28(11): 2108.
- [40] 王庆仁, 林葆. 植物硫营养研究的现状与展望[J]. *土壤肥料*, 1996(3): 16.
- WANG Q R, LIN B. The research status and prospects about plant sulfur nutrition [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 1996(3): 16.
- [41] 朱云集, 谢迎新, 郭天财, 等. 硫肥对两个不同穗型冬小麦品种光合特性及产量的影响[J]. *作物学报*, 2006, 32(3): 436.
- ZHU Y J, XIE Y X, GUO T C, *et al.* Effect of sulphur fertilizer on photosynthesis characteristics and grain yield of two winter wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars with different spike types [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(3): 436.
- [42] UHART S A, ANDRADE F H. Nitrogen deficiency in maize: I. Effects on crop growth, development, dry matter partitioning, and kernel set [J]. *Crop Science*, 1995, 35: 1376.
- [43] PRYSTUPA P, SLAFER A G, SAVIN R. Leaf appearance, tillering and their coordination in response to N×P fertilization in barley [J]. *Plant and Soil*, 2003, 255(2): 587.
- [44] YANG D, CAI T, LUO Y, *et al.* Optimizing plant density and nitrogen application to manipulate tiller growth and increase grain yield and nitrogen-use efficiency in winter wheat [J]. *PeerJ*, 2019, 26(7): e6484.
- [45] DINGKUHN M, DE DATTA S K, PAMPLONA R, *et al.* Effect of late-season N fertilization on photosynthesis and yield of transplanted and direct-seeded tropical flooded rice. II. A canopy stratification study [J]. *Field Crops Research*, 1992, 28: 235.
- [46] GAO P, ZUO Z, ZHANG R, *et al.* Optimum nitrogen fertilization for phyllostachys edulis productivity and photosynthetic response [J]. *Agronomy Journal*, 2016, 108(1): 448.
- [47] SALVAGIOTTI F, MIRALLES J D. Radiation interception, biomass production and grain yield as affected by the interaction of nitrogen and sulfur fertilization in wheat [J]. *European Journal of Agronomy*, 2007, 28(3): 282.