

氮硫互作对冬小麦干物质积累和籽粒产量的影响

董文楠, 兰会杰, 郝倩倩, 秦保平, 张敏, 蔡瑞国, 杨晴, 李昊昱, 杨敏

(河北科技师范学院农学与生物科技学院/河北省作物逆境生物学重点实验室, 河北秦皇岛 066600)

摘要:为探明冀东地区氮硫肥对冬小麦干物质积累和籽粒产量的互作效应, 选用冬小麦品种石农 952 为材料, 通过裂区试验, 以施氮量为主区[0 kg·hm⁻²(N0)、180 kg·hm⁻²(N1)、240 kg·hm⁻²(N2)和 300 kg·hm⁻²(N3)], 施硫量为副区[82.5 kg·hm⁻²(S1)、112.5 kg·hm⁻²(S2)、142.5 kg·hm⁻²(S3)和 172.5 kg·hm⁻²(S4)], 分析了不同处理下冬小麦旗叶叶绿素相对含量(SPAD)、叶面积指数(LAI)、干物质和氮素转运特性及籽粒产量的差异。结果表明, 施氮量和施硫量显著影响冬小麦 LAI 和旗叶 SPAD 值。N1S2 处理的开花期旗叶 SPAD 值最高, 与 N2S2 和 N3S2 以外的其他处理差异显著; 增施硫肥有利于冬小麦孕穗期 LAI 的提高, 在各施氮水平下均以 S2 最高。施用氮硫肥对小麦花前干物质和氮素转运以及花后干物质和氮素积累均有显著影响, 二者存在明显的互作效应。小麦籽粒产量为 7 364.71~10 078.20 kg·hm⁻², 且随施氮量增加而显著增加, 其中 N2S3 处理显著高于 N0 和 N1 水平下的各施硫处理, 但与 N2 和 N3 水平下的其他施硫处理无显著差异。施硫量对籽粒产量和千粒重均无显著影响。综合来看, 适量施用氮硫肥有利于冬小麦获得较高的旗叶 SPAD 值和 LAI, 增强叶片光合能力, 促进花后干物质积累和花前氮素转运, 最终增加冬小麦产量, 其中施氮 240 kg·hm⁻² 和施硫 82.5 kg·hm⁻² 是本试验条件下最适宜氮硫肥用量组合。

关键词: 冬小麦; 氮硫互作; 干物质; 籽粒产量

中图分类号: S512.1; S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2025)02-0194-10

Effects of Nitrogen and Sulfur Interaction on Dry Matter Accumulation and Grain Yield of Winter Wheat

DONG Wennan, LAN Huijie, HAO Qianqian, QIN Baoping, ZHANG Min,
CAI Ruiguo, YANG Qing, LI Haoyu, YANG Min

(College of Agronomy and Biotechnology, Hebei Normal University of Science and Technology/ Hebei Key Laboratory of Crop Stress Biology, Qinhuangdao, Hebei 066600, China)

Abstract: In order to investigate the interaction effect of nitrogen(N) and sulfur(S) fertilizer on dry matter accumulation and grain yield of winter wheat in eastern Hebei Province, a winter wheat Shi-nong 952 was used as material. A split plot design was adopted, with the N application as main plot: 0 kg·hm⁻²(N0), 180 kg·hm⁻²(N1), 240 kg·hm⁻²(N2) and 300 kg·hm⁻²(N3), and S application as the sub-plot: 82.5 kg·hm⁻²(S1), 112.5 kg·hm⁻²(S2), 142.5 kg·hm⁻²(S3) and 172.5 kg·hm⁻²(S4). The differences of chlorophyll relative content(SPAD), leaf area index(LAI), dry matter and nitrogen translocation, and grain yield of winter wheat under different treatments were analyzed. The results showed that N and S application significantly affected LAI and flag leaf SPAD of winter wheat. The SPAD value of N1S2 treatment was the highest at anthesis, which was significantly higher than the other treatments except N2S2 and N3S2. The N and S application had positive effects on

收稿日期: 2024-03-30 修回日期: 2024-11-22

基金项目: 河北省农业科技成果转化资金项目(21626409D); 河北省自然科学基金项目(C2020407038; C2022407015); “十三五”国家重点研发计划项目(2018YFD0300506-3)

第一作者 E-mail: 2587534314@qq.com(董文楠)

通讯作者 E-mail: 86553117@163.com(杨敏)

the translocation of dry matter and nitrogen restored before anthesis, and the accumulation of dry matter and nitrogen after anthesis, the interaction between N and S nutrition also was significant. Wheat grain yield ranged from 7 364.71 kg · hm⁻² to 10 078.20 kg · hm⁻² under different treatments, and increased significantly with the increase of N application amount. The grain yield of N2S3 treatment was significantly higher than the treatments under N0 and N1 levels, but was no significantly different from the other treatments under N2 and N3 levels. S application had no significant effect on grain yield and 1 000-grain weight of wheat. Overall, the application of nitrogen-sulfur fertilizer with right amounts is conducive to higher SPAD values and LAI in the flag leaves of winter wheat, can enhance the photosynthetic capacity of the leaves, promote post-anthesis dry matter accumulation and pre-anthesis nitrogen translocation, and ultimately increase winter wheat yield. 240 kg N · hm⁻² and 82.5 kg S · hm⁻² were the most suitable N and S fertilizer combinations for saving fertilizer and increasing efficiency in winter wheat production.

Keywords: Wheat; N and S interaction; Dry matter; Grain yield

氮素是小麦生长必需的大量元素之一,施用氮肥是作物增产的重要措施^[1]。冬小麦干物质和氮素积累和分配与籽粒产量密切相关,合理施用氮肥有利于冬小麦干物质和氮素积累,协调产量构成三因素,为小麦籽粒产量提升奠定基础^[2-4]。硫亦是作物生长发育必需的营养元素之一,也是小麦籽粒产量的限制性因素之一^[5-6]。基施硫肥有利于维持冬小麦生育后期较高的叶面积指数,提高叶片光合能力和干物质积累量,促进小麦花前营养器官贮存氮素向花后籽粒的转运,进而提高籽粒产量^[7-8]。

氮和硫养分之间存在相互作用,氮硫肥合理配施会显著影响小麦籽粒产量^[9]。氮硫合理配施能够通过增加冬小麦叶绿素含量和各器官氮素的吸收与利用,维持叶片功能期,促进冬小麦成熟期干物质积累,协同提高穗数和穗粒数,进而增加产量^[10-11]。在施氮 240 kg · hm⁻² 条件下,施用硫肥有利于冬小麦花前营养物质和氮素向籽粒的转运,进而增加籽粒产量^[12],施氮和施硫过多均不利于植株体内碳、氮代谢平衡,导致籽粒产量下降^[13]。高氮投入下,施用硫肥会抑制冬小麦的氮、硫吸收,降低氮素积累与叶片光合能力,不利于产量形成^[14-16]。此外,植物硫主要源于土壤,植物通过根系吸收来维持自身的需求,当土壤有效硫含量低于 10~16 mg · kg⁻¹ 时,植物可能会出现缺素症状^[17]。

当前有关氮硫施用量对冬小麦干物质积累、氮素积累和籽粒产量影响的研究较多,但对冀东地区有关氮硫对冬小麦干物质积累和籽粒产量的互作效应尚需更多证据说明。本试验条件下,选用石农 952 为试验材料,研究氮硫肥互作对冬小

麦花后旗叶 SPAD 值、叶面积指数、干物质积累、氮素积累和籽粒产量的影响,以期为冀东地区冬小麦合理施用氮硫肥提供部分科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验于 2022—2023 年在河北科技师范学院农学与生物科技学院农学实验站(39°44'N、119°13'E)进行。本地区为暖温带半湿润大陆性季风气候。试验地播种前 0~20 cm 土壤全氮含量 1.41 g · kg⁻¹,有机质含量 15.43 g · kg⁻¹,速效氮含量 115.09 mg · kg⁻¹,速效磷含量 18.13 mg · kg⁻¹,速效钾含量 136.79 mg · kg⁻¹,有效硫含量 22.02 mg · kg⁻¹,pH 值为 7.02。图 1 为小麦生育季试验地的降水量和气温。

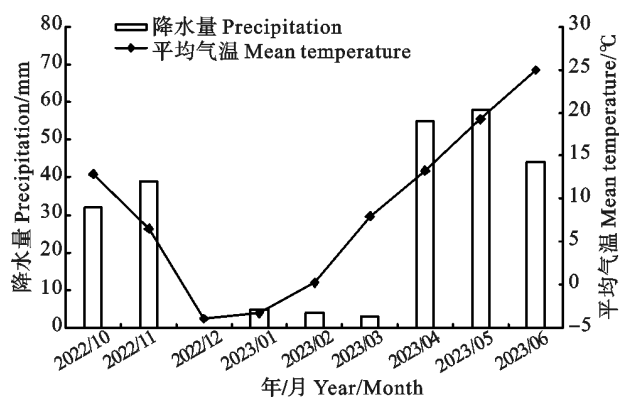


图 1 2022—2023 年小麦生育季试验地的降水量和平均气温
Fig. 1 Precipitation and temperature of experimental field in wheat growing season from 2022 to 2023

1.2 试验设计

供试小麦品种为石农 952。试验采用裂区设计,其中施氮量为主区,设置 0 kg · hm⁻² (N0)、

180 kg · hm⁻² (N1)、240 kg · hm⁻² (N2) 和 300 kg · hm⁻² (N3) 4 个施氮水平; 施硫量为副区, 设置 82.5 kg · hm⁻² (S1)、112.5 kg · hm⁻² (S2)、142.5 kg · hm⁻² (S3) 和 172.5 kg · hm⁻² (S4) 4 个施硫水平。氮肥种类为尿素(含 N 46%), 底肥和拔节肥施用量各占 50%; 磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%, 含 S 11%), 钾肥为氯化钾(含 K₂O 60%), P₂O₅ 和 K₂O 施用量均为 120 kg · hm⁻²; 硫肥为硫磺粉。磷、钾、硫三种肥料均全部底施, 并结合旋耕混拌入耕层土壤。2022 年 10 月 6 日适墒机播, 小麦行间距为 15 cm, 2023 年 6 月 19 日收获。小区面积为 16.25 m² (2.5 m × 6.5 m), 基本苗 600 万株 · hm⁻², 3 次重复。分别在越冬初期、拔节期和开花期灌水, 每次 600 m³ · hm⁻², 其他管理措施同一般大田。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 旗叶 SPAD 值和叶面积指数测定

于小麦花后 0、7、14、21 和 28 d, 选择晴天上午在各小区选取 10 个茎, 使用 SPAD-502 Plus 测定旗叶基部 1/3、1/2 和 2/3 处 SPAD 值, 以三者的平均值作为该叶片最终测定值。于小麦孕穗期和开花期取小麦植株, 测量已展开叶的长和宽, 叶面积 = 长 × 宽 × 0.83, 叶面积指数(LAI) = 单株叶面积/单株占地面积。

1.3.2 植株干物质积累和转运参数测定

于小麦开花期、成熟期分别取样, 剪除根部, 成熟期分为茎秆+叶鞘、叶片、穗轴+颖壳和籽粒四部分, 105 °C 杀青 0.5 h, 70 °C 烘至恒重后称重, 计算干物质转运参数:

花前干物质转运量 = 开花期单位面积植株干重 - 成熟期单位面积营养器官干重

花前干物质转运效率 = 花前干物质转运量 / 开花期植株干重 × 100%

花前干物质对籽粒产量的贡献率 = 花前干物质转运量 / 成熟期籽粒重 × 100%

花后干物质积累量 = 成熟期单位面积植株干物质积累量 - 开花期单位面积植株干物质积累量

花后干物质对籽粒产量的贡献率 = 花后干物质积累量 / 成熟期籽粒重 × 100%

1.3.3 植株氮素积累与转运参数测定

将烘干样品磨粉, 并过 60 目筛, 采用半微量凯氏定氮法测定各组织含氮量, 计算氮素转运参数:

花前氮积累量 = 开花期单位面积植株氮含量 × 开花期单位面积干物质积累量

花前氮转运量 = 花前单位面积氮积累量 - 成熟期单位面积营养器官氮积累量

花前氮转运效率 = 花前氮转运量 / 开花期植株氮积累量 × 100%

花前氮转运量对籽粒氮的贡献率 = 花前氮转运量 / 成熟期籽粒氮积累量

花后氮积累量 = 成熟期单位面积植株氮积累量 - 开花期单位面积植株氮积累量

花后氮积累量对籽粒氮的贡献率 = 花后氮积累量 / 成熟期籽粒氮积累量 × 100%

1.3.4 籽粒产量及其构成因素测定

成熟期在取样区内随机选取具代表性的 1 m 2 行进行有效穗数调查并换算为单位面积穗数; 成熟期随机连续抓取 20 个具代表性的完整穗, 调查穗粒数; 各小区收取 1 m 6 行内麦穗, 人工脱粒, 实打实收实测(13% 籽粒含水量), 折算籽粒产量, 采用百粒法测定千粒重, 3 次重复。

1.4 数据处理和统计分析

采用 Excel 2003 进行数据处理和作图, 用 SPSS 25.0 统计分析软件对数据进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 氮硫互作对开花后冬小麦旗叶 SPAD 值的影响

由表 1 可知, 各处理小麦旗叶 SPAD 值随生育时期的推进而整体下降。在 S1 条件下, 花后 7~28 d 旗叶 SPAD 值均以 N0 最低, 且其他施氮水平差异显著。在 S3 条件下, 花后 7~21 d 旗叶 SPAD 值以 N1 最高, 与 N0 间差异显著, 但与 N2 和 N3 间无显著差异。

在相同施氮水平下, 开花期 S2 的冬小麦旗叶 SPAD 值比 S1 分别增加了 3.13%、9.52%、9.98% 和 6.00%; 花后 14 和 21 d, S1 和 S2 的旗叶 SPAD 值显著高于 S4, 而 S1 和 S2 间无显著差异。在 N3 条件下, 花后 7~21 d 范围内, 小麦旗叶 SPAD 值以 S2 最高, 与 S1 间无显著差异, S4 显著低于 S1 和 S2。以上结果显示, 施氮量和施硫量均显著影响冬小麦花后旗叶 SPAD 值, 适量氮肥和硫肥的施用有利于维持冬小麦旗叶 SPAD 值, 延长叶片功能期。

表 1 氮硫配施对冬小麦开花后旗叶 SPAD 值的影响

Table 1 Effects of nitrogen and sulfur combined application on SPAD value of flag leaves of winter wheat after anthesis

施氮水平 Nitrogen level	施硫水平 Sulfur level	花后天数 Days after anthesis/d				
		0	7	14	21	28
N0	S1	55.33cde	52.73f	51.20cd	48.23cd	41.93fg
	S2	57.07cde	55.00def	52.10c	51.30bcd	43.07efg
	S3	56.27cde	55.10def	47.73de	46.83de	41.73fg
	S4	53.37e	52.43f	45.00e	42.97e	38.90g
N1	S1	59.20bc	58.90abcd	59.87a	57.57a	49.03bcd
	S2	64.83a	62.37a	60.33a	58.73a	50.47abc
	S3	59.17bc	60.00abc	58.83a	56.40a	48.40bcde
	S4	54.50de	53.90ef	53.67bc	51.57bc	44.07defg
N2	S1	57.13cde	58.40abcde	58.17a	56.53a	48.67bcde
	S2	62.83ab	60.20abc	59.33a	57.43a	50.00abc
	S3	59.87bc	57.20bcdef	56.90ab	55.53ab	46.80bcdef
	S4	56.57cde	55.97cdef	53.03bc	51.57bc	44.83cdef
N3	S1	59.47bc	60.07abc	59.03a	57.10a	48.23bcde
	S2	63.03ab	61.57ab	60.43a	58.20a	55.10a
	S3	58.67bcd	58.17abcde	56.83ab	54.50ab	52.20ab
	S4	56.63cde	53.97ef	50.87cd	46.97cde	44.80cdef
F 值 F value	施氮量 N application amount(N)	8.65**	11.13**	44.65**	30.11**	18.48**
	施硫量 S application amount(S)	17.88**	11.61**	27.57**	23.54**	9.60**
	N×S	1.08	1.13	0.47	0.66	0.79

同列数据后不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著; * : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$ 。下同。

Different lowercase letters after the values same columns of the same variety indicate significant difference among different treatments at 0.05 level; * : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$. The same in tables 1–6.

2.2 氮硫互作对冬小麦叶面积指数的影响

由表 2 可知,施氮量和施硫量显著影响冬小麦两个生育时期的 LAI,其中孕穗期 LAI > 开花期 LAI。在 S1 条件下,N3 的冬小麦孕穗期 LAI 显著高于 N0,但 N3 与 N1 和 N2 间均无显著差异。S2~S4 条件下,孕穗期 LAI 以 N1 最高,与 N0 间差异显著,但与 N2 和 N3 间均无显著差异;S3 和 S4 条件下,N1 的开花期 LAI 较 N0 分别提高 14.22% 和 14.97%。在 N0 和 N1 条件下,S2 的孕穗期 LAI 显著高于 S1,但与 S3 和 S4 间均无显著差异。在 N2 条件下,S2 的开花期 LAI 最高,较 S1、S3 和 S4 分别增加 20.59%、14.83% 和 19.26%。这表明,施用过高或过低的氮硫肥均不利于小麦叶面积指数的增加。

2.3 氮硫互作对冬小麦成熟期干物质积累与分配的影响

施氮量、施硫量和两者互作均显著影响成熟期

各器官干物质积累量和分配比例(表 3)。在 S1~S3 条件下茎秆+叶鞘的积累量随施氮量的增加呈先升后降的趋势;S2 和 S3 条件下,N1 的茎秆+叶鞘积累量较 N0 分别提高 24.80% 和 13.27%,且与 N0 间差异显著。在 S1 和 S2 条件下,N0 的叶片干物质积累量显著低于其他施氮水平,分别在 N1 和 N2 下达到最大值;N3 的叶片干物质积累量的分配比例显著高于 N0 和 N1。

随施硫量的增加,在 N0 条件下茎秆+叶鞘的干物质积累量呈上升趋势,S3 和 S4 显著高于 S1 和 S2。在 N1 条件下,S3 的叶片干物质积累量最高,显著高于 S1,但 S3 与 S2 和 S4 间无显著差异。在 N2 和 N3 条件下,叶片和茎秆+叶鞘的干物质积累量以 S2 最高,与 S1 间差异显著,当施硫量从 S2 增加到 S4 时,叶片和茎秆+叶鞘的干物质积累量则表现出下降的趋势。氮硫配施条件下各处理干物质分配比例趋势相同,均表现为籽

表 2 氮硫配施对冬小麦叶面积指数的影响

Table 2 Effects of nitrogen and sulfur combined application on leaf area index of winter wheat

施氮水平 Nitrogen level	施硫水平 Sulfur level	孕穗期 Booting stage	开花期 Anthesis
N0	S1	5.14f	4.83e
	S2	6.29cde	5.38cde
	S3	6.07cdef	5.21cde
	S4	5.42ef	5.18de
N1	S1	6.09cdef	5.30cde
	S2	8.05a	6.36ab
	S3	7.88a	5.95abc
	S4	7.07abc	5.96abc
N2	S1	5.72def	5.36cde
	S2	7.45ab	6.46a
	S3	7.07abc	5.63bcd
	S4	7.04abc	5.42cde
N3	S1	6.52bcde	5.92abcd
	S2	7.51ab	6.29ab
	S3	7.20abc	5.78abcd
	S4	6.60bcd	5.23cde
F 值 F value	施氮量 N application amount(N)	16.96**	9.70**
	施硫量 S application amount (S)	15.50**	10.13**
	N×S	0.76	1.64

表 3 氮硫配施对冬小麦成熟期干物质积累与分配的影响

Table 3 Effects of nitrogen and sulfur combined application on dry matter accumulation and distribution in winter wheat at maturity

施氮水平 Nitrogen level	施硫水平 Sulfur level	成熟期 Maturity/(×10 ³ kg·hm ⁻²)				分配比例 Distribution ratio/%			
		叶片 Leaf	茎秆+叶鞘 Stem+sheath	穗轴+颖壳 Spike axis+glume	籽粒 Grain	叶片 Leaf	茎秆+叶鞘 Stem+sheath	穗轴+颖壳 Spike axis+glume	籽粒 Grain
N0	S1	0.92h	3.49h	2.54e	7.80h	6.24e	23.65abc	17.21b	52.90f
	S2	0.98h	3.96fg	2.75cd	10.45bcde	5.43f	21.83e	15.17c	57.57a
	S3	1.23f	4.33cd	3.13b	11.23ab	6.21e	21.75e	15.69c	56.35abc
	S4	1.30ef	4.38c	3.11b	10.00def	6.93d	23.34bcd	16.54b	53.19ef
N1	S1	1.48cd	3.96fg	3.80a	10.77bcd	7.41bcd	19.80f	19.02a	53.78ef
	S2	1.60b	4.95a	2.78cd	11.79a	7.58bc	23.44bcd	13.15fg	55.83bcd
	S3	1.62b	4.90a	2.82c	11.23ab	7.87b	23.85ab	13.69defg	54.59cdef
	S4	1.52bc	4.53b	2.75cd	11.10ab	7.62bc	22.78d	13.81defg	55.79bcd
N2	S1	1.43cd	4.20de	2.55e	10.26cde	7.73b	22.80cd	13.83def	55.64cd
	S2	1.88a	4.91a	3.11b	11.77a	8.66a	22.66d	14.37d	54.31def
	S3	1.41cd	4.17de	2.66de	11.12ab	7.29bcd	21.55e	13.71defg	57.44ab
	S4	1.39de	4.09ef	2.56e	11.01abc	7.28bcd	21.49e	13.43efg	57.80a
N3	S1	1.46cd	3.86g	2.34f	9.26fg	8.62a	22.81cd	13.84def	54.72cde
	S2	1.84a	4.62b	2.87c	10.69bcd	9.20a	23.06bcd	14.32de	53.41ef
	S3	1.61b	4.20de	2.54e	9.75ef	8.90a	23.24bcd	14.06de	53.80ef
	S4	1.12g	3.88g	2.06g	8.88g	7.00cd	24.38a	12.93g	55.69cd
F 值 F value	施氮量 N application amount (N)	139.89**	87.80**	99.95**	40.68**	91.81**	16.57**	67.19**	8.86**
	施硫量 S application amount (S)	46.13**	144.16**	19.19**	33.30**	4.84**	5.59**	40.74**	5.46**
	N×S	33.69**	33.29**	64.56**	6.57**	14.12**	24.51**	26.48**	9.77**

粒最高,茎秆+叶鞘次之,叶片最低。综上分析可知,氮肥和硫肥的施用影响小麦成熟期干物质积累和分配,肥料施用量过低或过高均不利于冬小麦成熟期干物质的积累。

2.4 氮硫互作对冬小麦干物质转运特征的影响

由表 4 可知,氮肥显著影响花前干物质转运量、转运效率、对籽粒产量的贡献率和花后干物质积累,氮硫互作显著影响花前干物质转运量和花后干物质积累量。在 S1 条件下,N1 的花后干物质积累量显著高于其他施氮水平,N2 的花前干物质转运量最高。在 S2 和 S3 条件下,花后干物质积累量以 N2 最高,均与 N0 间差异显著;花后干物质积累量对籽粒产量的贡献率分别以 N3 和 N2 的最高,且均显著高于 N0。

在 N0 条件下,S3 的花前干物质转运量和转运效率显著高于 S2,花后干物质积累量在 S3 下最高,显著高于 S1,但 S2 和 S4 间无显著差异。在 N2 条件下,花前干物质转运效率和对籽粒产量的贡献率以 S1 最高,分别为 18.22%和 17.77%,

显著高于 S4。N3 条件下,S2 的花后干物质积累量显著高于其他施硫水平。各处理下花后干物质对籽粒产量的贡献率大于花前干物质的贡献率,花后干物质对籽粒产量的贡献率为 77.42%~88.66%。这说明小麦籽粒产量一半以上源于花后干物质的积累,适宜的施氮量和施硫量对花前、花后干物质积累与转运有显著影响。

2.5 氮硫互作对冬小麦氮素积累与转运的影响

施氮量、施硫量和氮硫互作显著影响开花前、后氮素积累、转运及其对籽粒氮素的贡献率(表 5)。在 S1 条件下,花前氮素转运量、转运效率和对籽粒氮素的贡献率均以 N2 最高,分别为 169.34 kg·hm⁻²、73.51%和 69.37%。在 S2 和 S3 条件下,花前氮素转运量以 N1 最高,较 N0 提高 66.95%和 35.91%,且显著高于 N2。在 S4 条件下,花后氮素积累量及其对籽粒氮素的贡献率均以 N1 最高,显著高于 N0 和 N3;N2 的花前氮素转运量最高,显著高于其他施氮水平。

表 4 氮硫配施对冬小麦干物质转运特征的影响

Table 4 Effects of nitrogen and sulfur combined application on dry matter transport characteristics of winter wheat

施氮水平 Nitrogen level	施硫水平 Sulfur level	花前干物质 Dry matter before anthesis			花后干物质 Dry matter after anthesis	
		转运量 Translocation amount/ (×10 ³ kg·hm ⁻²)	转运效率 Translocation rate/%	贡献率 Contribution rate/%	积累量 Accumulation amount/ (×10 ³ kg·hm ⁻²)	贡献率 Contribution rate/%
N0	S1	1.76de	20.21ab	22.58a	6.03g	77.42h
	S2	1.89cd	19.67b	18.07bcde	8.57cde	81.93defg
	S3	2.53a	22.54a	22.51a	8.70bcde	77.49h
	S4	2.11bc	19.34b	21.12ab	7.89e	78.88gh
N1	S1	1.40fg	13.13f	13.01gh	9.37abc	86.99ab
	S2	2.24b	19.31b	18.95bcd	9.55ab	81.05efg
	S3	1.71def	15.48def	15.33efg	9.52ab	84.67bcd
	S4	1.69def	16.10cde	15.21efg	9.42abc	84.79bcd
N2	S1	1.82cde	18.22bc	17.77cde	8.44de	82.23def
	S2	1.81cde	15.44def	15.39efg	9.96a	84.61bcd
	S3	1.52efg	15.54def	13.66fgh	9.60a	86.34abc
	S4	1.25g	13.42ef	11.34h	9.76a	88.66a
N3	S1	1.40fg	15.44def	15.13efg	7.86e	84.87bcd
	S2	1.49efg	13.80def	13.99fgh	9.20abcd	86.01abc
	S3	1.64def	16.46cd	17.01def	8.11e	82.99cde
	S4	1.81cde	20.38ab	20.37abc	7.07f	79.63fgh
F 值 F value	施氮量 N application amount (N)	20.01**	9.31**	7.87**	44.32**	7.87**
	施硫量 S application amount (S)	6.09**	0.61	30.48**	20.56**	30.48**
	N×S	9.13**	9.31**	0.23	6.16**	0.23

表 5 氮硫配施对冬小麦氮素转运特征的影响

Table 5 Effects of combined application of nitrogen and sulfur on nitrogen transport characteristics of winter wheat

施氮水平 Nitrogen level	施硫水平 Sulfur level	花前氮素 N accumulation before anthesis			花后氮素 N accumulation after anthesis	
		转运量 Translocation amount/ (kg · hm ⁻²)	转运效率 Translocation rate/%	贡献率 Contribution rate/%	积累量 Accumulation amount/ (kg · hm ⁻²)	贡献率 Contribution rate/%
N0	S1	86.85g	72.59cd	49.05e	90.17def	50.95b
	S2	107.46f	74.24b	43.43f	139.66a	56.57a
	S3	127.62e	72.03cde	47.92ef	138.54a	52.08ab
	S4	162.16bc	75.88a	69.02a	72.90fg	30.98f
N1	S1	161.96bc	68.18g	64.17abc	91.15def	35.83def
	S2	179.41a	70.32f	64.17abc	100.38cd	35.83def
	S3	173.44ab	71.26def	64.85ab	94.67cdef	35.15ef
	S4	158.98c	70.60ef	60.24bcd	104.95cd	39.76cde
N2	S1	169.34abc	73.51bc	69.37a	74.81fg	30.63f
	S2	167.26bc	64.65h	56.37d	129.60ab	43.63c
	S3	159.86c	70.28f	58.41cd	113.75bc	41.59cd
	S4	179.72a	77.39a	66.64a	90.00def	33.36f
N3	S1	136.27de	62.06i	63.65abc	77.90efg	36.35def
	S2	170.38abc	65.52h	67.19a	83.51defg	32.81f
	S3	142.73d	60.66i	59.65abc	98.07cde	40.35cde
	S4	139.12de	69.95f	67.45a	67.31g	32.55f
F 值 F value	施氮量 N application amount (N)	183.96*	34.13**	13.39**	15.28**	13.39**
	施硫量 S application amount (S)	31.02**	214.97**	39.99**	28.93**	39.99**
	N×S	32.46**	78.39**	78.77**	7.53**	18.77**

在 N0 条件下, S4 的花前氮素转运量显著高于其他施硫水平。在 N1 条件下, S2 的花前氮素转运量显著高于 S1 和 S4; S2 的花前氮素转运效率为 70.32%, 显著高于 S1, 但与 S2 和 S4 间差异不显著。在 N3 条件下, S3 的花后氮素对籽粒氮素的贡献率最高, 较 S1 增加 11.00%。除 N0 外, 其他施氮水平下花前氮素对籽粒氮素的贡献率均高于花后氮素的贡献率。综上表明, 氮硫互作能显著提高花前氮素转运量和花后氮素积累量, 籽粒氮素的提高主要源于花前氮素的贡献。

2.6 氮硫互作对冬小麦籽粒产量及其构成因素的影响

施氮量显著影响籽粒产量, 施氮量和施硫量均显著影响千粒重和穗数, 氮硫交互作用对穗粒数和千粒重影响显著(表 6)。在相同施硫水平下,

籽粒产量均以 N2 最高, 较 N0 分别增加 31.20%、27.05%、36.14% 和 25.73%, 但 N2 的籽粒产量与 N3 间无显著差异; S1 条件下穗粒数以 N1 最高, 显著高于 N0, 但与其他施氮水平下差异不显著; 在 S2 条件下, N0 的穗数显著低于 N2 和 N3, N1~N3 间穗数无显著差异。

在 N0 条件下, S4 的籽粒产量最高, 较 S1 提高 7.88%; S4 的穗粒数显著高于 S1 和 S2。在 N1~N3 条件下, S3 的籽粒产量均最高, 与其他施硫水平间无显著差异。N3 条件下, S2 的穗数显著高于 S1, 但与 S3 和 S4 间无显著差异。在 N0~N3 条件下, S1 的千粒重较 S4 分别增加 0.32%、4.89%、1.66% 和 12.46%。由此说明, 适宜的氮肥和硫肥用量有利于冬小麦籽粒产量的提高, 施肥量继续提高时无显著提升效应。

表 6 氮硫配施对冬小麦籽粒产量及其构成因素的影响

Table 6 Effects of nitrogen and sulfur combined application on grain yield and its components of winter wheat

施氮水平 Nitrogen level	施硫水平 Sulfur level	籽粒产量 Grain yield/(kg·hm ⁻²)	穗数 Spike/(×10 ⁴ ·hm ⁻²)	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 1 000-grain weight/g
N0	S1	7 364. 71f	603. 34d	31. 58e	44. 28a
	S2	7 728. 43f	612. 22cd	34. 62bcde	44. 20a
	S3	7 402. 67f	635. 56abcd	37. 07abcd	42. 43ab
	S4	7 945. 27ef	618. 89bcd	39. 47a	44. 14a
N1	S1	8 847. 84cde	643. 33abcd	38. 96ab	43. 57a
	S2	8 657. 97de	678. 89abcd	34. 91abcde	43. 48a
	S3	8 910. 92bcde	654. 45abcd	33. 91cde	43. 89a
	S4	8 859. 20cde	675. 56abcd	34. 42bcde	41. 54ab
N2	S1	9 662. 41abcd	647. 78abcd	37. 76abc	42. 89ab
	S2	9 818. 74abc	707. 78a	38. 44abc	41. 41ab
	S3	10 078. 20a	658. 89abcd	33. 82cde	41. 72ab
	S4	9 989. 36a	653. 33abcd	33. 96cde	42. 19ab
N3	S1	9 572. 87abcd	607. 78d	37. 22abcd	42. 23ab
	S2	9 564. 14abcd	696. 67ab	32. 80de	40. 40bc
	S3	9 905. 07ab	688. 89abc	34. 42bcde	40. 30bc
	S4	9 267. 36abcd	648. 89abc	37. 47abcd	37. 55c
F 值 F value	施氮量 N application amount (N)	90. 98**	3. 99*	0. 15	40. 70**
	施硫量 S application amount (S)	0. 75	3. 08*	1. 54	9. 72**
	N×S	1. 16	0. 78	4. 84**	4. 86**

3 讨论

氮肥显著影响冬小麦籽粒产量,在一定范围内,籽粒产量随施氮量增加而提高^[18-19]。小麦干物质积累是产量形成的重要基础,干物质积累量的增加是冬小麦籽粒产量提高的重要因素^[20]。氮肥合理施用能提高小麦叶片 SPAD 值和 LAI,进而调节群体生长,使小麦冠层结构合理构建,促进小麦干物质和籽粒氮素的积累,进而产量增加^[2,21],过量施用氮肥会导致小麦籽粒产量和氮素利用效率降低^[22]。张永强等^[23]研究表明,小麦 LAI 随生育进程推进呈先升后降的趋势,在孕穗期达到最大值,且 LAI 随施氮量的增加而提高。在本试验条件下,随施氮量的增加,两个生育时期的小麦 LAI 均呈上升趋势(N1、N2 和 N3 间无显著差异),施氮处理获得较大的旗叶 SPAD 值,增加了叶片功能期,为籽粒产量的增加奠定基础,在本试验中,籽粒产量以 N2 最高。

此外,硫肥的施用能够提高小麦旗叶叶绿素含量,在施硫量 0 ~ 60 kg·hm⁻² 范围内对提高光合产物总量具有积极的作用^[24]。硫肥的施用

能够显著提高小麦干物质总积累量、花前氮素积累量和籽粒产量^[25-26],且较无硫处理,施硫处理使籽粒产量显著增加^[27]。施用硫肥能够促使许多参与脂质代谢和氨基酸代谢的差异表达基因上调表达,其中氨基酸代谢,尤其是半胱氨酸、蛋氨酸和谷胱甘肽代谢对籽粒产量的增加发挥了重要作用^[26]。在本试验中,冬小麦旗叶 SPAD 值和 LAI 随施硫量的增加呈先升后降的趋势,以 S2 最高,籽粒产量在不同供氮条件下(除 N0 外)均以 S3 最高,与 S1 和 S2 间无显著差异。这与前人研究不同,可能是由于施硫量增加到一定程度时,诱导参与脂质代谢和氨基酸代谢的差异表达基因数量及表达量上调达到上限,对产量形成的影响也就不明显了。过多地增大硫素投入量对产量无显著提升效应。

氮、硫肥施用显著影响小麦籽粒产量形成。在中、高施氮水平下,施硫能显著提高小麦花前营养物质的积累、氮素转运量和籽粒氮素含量^[12]。适量施氮结合施硫有利于冬小麦旗叶 SPAD 值的增加,协调植物体内碳氮代谢的平衡,促进小麦生物量、氮素转运量及其对籽粒氮素贡献率的提

高,提高冬小麦籽粒产量,而不施氮肥和高氮时,籽粒产量随施硫量的增加而减少^[28-29]。在本试验条件下,在氮硫互作条件下,N2S3 处理的籽粒产量最高,但与 N2S1 和 N2S2 处理间无显著差异,综合考虑在冬小麦生产中节肥增效的目的,施氮量为 240 kg·hm⁻² 配合施硫量 82.5 kg·hm⁻² 能够获得较高的籽粒产量,是冀东地区适宜的施肥组合。穗数、穗粒数和千粒重决定小麦籽粒产量^[30],氮硫搭配施用对冬小麦穗粒数、千粒重、穗数和籽粒产量影响显著^[11]。本试验中,氮硫互作对穗粒数和千粒重有显著影响,穗数随施氮量和施硫量的增加而提高,而千粒重随施氮量的增加而降低,这可能与穗数的增加有关,有关氮硫互作影响冬小麦籽粒产量的深层机理有待进一步研究。

4 结论

氮硫施用量显著影响冬小麦花前干物质积累、转运与籽粒产量,两者交互作用显著影响其花后干物质积累、开花前后氮素积累与转运、穗粒数和千粒重。合理的施氮量和施硫量能减缓冬小麦叶面积指数和 SPAD 值的下降,维持叶片功能期,最终提高籽粒产量。在本试验条件下施氮量为 240 kg·hm⁻² 配合施硫量 82.5 kg·hm⁻² 时,有利于协同提高冬小麦干物质积累、氮素积累和转运、籽粒产量,是本地区小麦种植的最佳组合。

参考文献:

- [1] CUI Z L, CHEN X P, ZHANG F S. Current nitrogen management status and measures to improve the intensive wheat-maize system in China [J]. *Ambio*, 2010, 39(5-6): 376.
- [2] 史辛凯, 于振文, 赵俊晔, 等. 施氮量对高产小麦光合特性、干物质积累分配与产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(6): 719.
- SHI X K, YU Z W, ZHAO J Y, *et al.* Effect of nitrogen application rate on photosynthetic characteristics, dry matter accumulation and distribution and yield of high-yielding winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(6): 719.
- [3] YAN D, ZHU Y, WANG S, *et al.* A quantitative knowledge-based model for designing suitable growth dynamics in rice [J]. *Plant Production Science*, 2006, 9(2): 93.
- [4] 张娟. 种植密度和氮肥水平互作对冬小麦产量和氮素利用率的调控效应研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
- ZHANG J. Combined effect of plant density and nitrogen level on grain yield and nitrogen use efficiency in winter wheat [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2014.
- [5] 牟文燕, 褚宏欣, 黄宁, 等. 中国主要麦区小麦品种(系)产量与需硫特征关系分析[J]. 作物学报, 2022, 48(12): 3193.
- MOU W Y, CHU H X, HUANG N, *et al.* Relationship between grain yield and sulfur requirement characteristics of wheat cultivars (lines) in main wheat production regions of China [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(12): 3193.
- [6] 陈吉, 蔡柏岩. 植物对硫素的吸收、转运及利用的研究进展[J]. 中国农学通报, 2021, 37(29): 43.
- CHEN J, CAI B Y. Absorption, Transport and utilization of sulfur in plants: A review [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(29): 43.
- [7] 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): 46.
- 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): 46.
- [8] 赵玉霞, 李娜, 王文岩, 等. 施用硫肥对陕西关中地区冬小麦氮、硫吸收与转运及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1327.
- ZHAO Y X, LI N, WANG W Y, *et al.* Effects of sulfur application rate on the absorption and translocation of nitrogen and sulfur and grain yield of winter wheat in Guanzhong area of Shanxi [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(6): 1327.
- [9] 王丽, 王东, 周杰, 等. 氮硫互作对冬小麦旗叶衰老、产量和氮素利用效率的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(6): 1485.
- WANG L, WANG D, ZHOU J, *et al.* Interactive effects of nitrogen and sulfur on flag leaf senescence, Yield and nitrogen use efficiency of winter wheat [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(6): 1485.
- [10] 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): 1212.
- 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): 1212.
- [11] 申丹丹, 牛铁男, 朱敏, 等. 氮、硫肥配施对稻茬麦氮素利用及籽粒产量和品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(2): 191.
- SHEN D D, NIU Y N, ZHU M, *et al.* Effects of combined application of nitrogen and sulfur on N use efficiency, grain yield and quality of wheat following rice [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(2): 191.
- [12] 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): 1822.
- 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): 1822.
- [13] 朱云集, 沈学善, 李国强, 等. 硫氮配施对弱筋小麦品种豫麦 50 籽粒产量和淀粉性状的影响[J]. 麦类作物学报, 2007, 27(2): 275.

- ZHU Y J, SHEN X S, LI G Q, *et al.* Effect of the combined application of sulfur and nitrogen fertilizers on yield and starch quality traits of soft-gluten wheat cultivar Yumai 50 [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2007, 27(2): 275.
- [14] SALVAGIOTTI F, CASTELLARÍN J M, MIRALLES D J, *et al.* Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake [J]. *Field Crops Research*, 2009, 113(2): 170.
- [15] SALVAGIOTTI F, MIRALLES D J. 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.
- [16] 周杰, 王东, 满建国, 等. 高氮条件下硫氮互作对冬小麦幼苗生长及氮、硫吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(1): 50.
- ZHOU J, WANG D, MAN J G, *et al.* Effects of interaction of nitrogen and sulfur on seedling growth, uptake and utilization of nitrogen and sulfur of winter wheat under high nitrogen conditions [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2012, 18(1): 50.
- [17] 王利, 高祥照, 马文奇, 等. 中国农业中硫的消费现状、问题与发展趋势[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(6): 1220.
- WANG L, GAO X Z, MA W Q, *et al.* Sulphur consumption in Chinese agriculture: Situation and outlook [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2008, 14(6): 1220.
- [18] ZHANG Y, DAI X, JIA D, *et al.* Effects of plant density on grain yield, protein size distribution, and breadmaking quality of winter wheat grown under two nitrogen fertilisation rates [J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 73: 1.
- [19] 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): 70.
- XIE Y X, LIU C, ZHU Y J, *et al.* Effects of nitrogen and sulfur combined application on nitrogen use efficiency and grain yield of winter wheat [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(1): 70.
- [20] 李雪萌. 氮肥减施对强筋小麦籽粒产量与品质的影响[D]. 秦皇岛: 河北科技师范学院, 2023.
- LI X M. Effects of nitrogen fertilizer reduction on grain yield and quality of strong gluten wheat [D]. Qinhuangdao: Hebei Normal University of Science and Technology, 2023.
- [21] 李鹏, 贾永红, 张金油, 等. 氮肥追施比例对匀播冬小麦光合特性及产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2021, 41(8): 1018.
- LI P, JIA Y H, ZHANG J S, *et al.* Effects of nitrogen top-dressing ratio on photosynthetic traits and yield of winter wheat under uniform sowing [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(8): 1018.
- [22] 刘慧婷, 李瑞奇, 王红光, 等. 密度和施氮量对强筋小麦藜优2018产量和抗倒性的影响[J]. *麦类作物学报*, 2017, 37(12): 1624.
- LIU H T, LI R Q, WANG H G, *et al.* Effect of planting den-
- sity and nitrogen fertilization rate on lodging resistance and grain yield of strong gluten wheat Gaoyou 2018 [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(12): 1624.
- [23] 张永强, 张璐, 陈传信, 等. 拔节期氮肥运筹对不同滴灌量下冬小麦光合特性及产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(16): 4.
- ZHANG Y Q, ZHANG L, CHEN C X, *et al.* Nitrogen application at jointing stage under different drip irrigation amount: Effects on photosynthetic characteristics and yield of winter wheat [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(16): 4.
- [24] 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): 216.
- MA C Y, LI Y M, HAN J L. Effects of different dose of sulfur fertilizer on photosynthetic characteristics and grain yield in winter wheat [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2005, 11(2): 216.
- [25] ZHAO F J, SALMON S E, WITHERS P J A, *et al.* Variation in the bread making quality and rheological properties of wheat in relation to sulphur nutrition under field conditions [J]. *Journal of Cereal Science*, 1999, 30(1): 29.
- [26] LIU Z L, LIU D C, FU X Y, *et al.* Integrated transcriptomic and metabolomic analyses revealed the regulatory mechanism of sulfur application in grain yield and protein content in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 935516.
- [27] WIESER H, GUTSER R, TUCHER S V. Influence of sulphur fertilisation on quantities and proportions of gluten protein types in wheat flour [J]. *Journal of Cereal Science*, 2004, 40(3): 239.
- [28] 朱云集. 硫及硫氮交互对冬小麦产量形成和品质性状的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2007: 58.
- ZHU Y J. Studies on effects of sulphur and sulphur-nitrogen interaction on gain yield formation and grain quality traits in winter wheat [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007: 58.
- [29] 赵玉霞, 周芳, 李雪芳, 等. 氮硫配施对冬小麦氮硫吸收转运及利用效率的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(9): 1024.
- ZHAO Y X, ZHOU F, LI X F, *et al.* Effects of nitrogen and sulfur interaction on their accumulation, translocation and use efficiency in winter wheat [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(9): 1024.
- [30] 赵玉霞. 氮硫配施对关中地区冬小麦氮硫吸收转运及产量影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- ZHAO Y X. Interactive effects of nitrogen and sulfur on nutrients absorption, translocation and grain yield of winter wheat in Guanzhong plain [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2014.