

施氮量对冬小麦氮素分配利用和茎秆维管束结构的影响

卢素豪,吕天宇,韩潇杰,田培培,李双静,王晨阳,马冬云,康国章,马耕,王丽芳

(河南农业大学农学院/国家小麦工程技术研究中心,河南郑州 450046)

摘要:为探究适宜施氮量对冬小麦产量和氮素利用效率协同提高的作用机制,以强筋小麦品种丰德存麦5号为试验材料,设置施氮量 $0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N0)、 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N180)和 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N300)3个处理,分析了施氮量对冬小麦茎秆节间形态特征、节间维管束结构、干物质和氮素积累转运及产量和氮利用效率的影响。结果表明,施氮增加了小麦茎秆节间直径、大维管束数目(NBV)(倒三节间除外)、大维管束平均面积(MABV)、大维管束总面积(TABV)、小维管束数目(NSV)、小维管束平均面积(MASV)和小维管束总面积(TASV)。与N0处理相比,N180和N300处理下节间直径增幅分别为 $14.80\%\sim 29.95\%$ 和 $10.80\%\sim 29.41\%$,NBV增幅分别为 $3.35\%\sim 28.39\%$ 和 $1.05\%\sim 17.91\%$,NSV增幅分别为 $17.32\%\sim 41.69\%$ 和 $13.25\%\sim 33.31\%$,MABV增幅分别为 $4.49\%\sim 20.10\%$ 和 $3.75\%\sim 9.91\%$,TABV增幅分别为 $8.19\%\sim 48.87\%$ 和 $5.10\%\sim 27.58\%$,MASV增幅分别为 $1.94\%\sim 20.47\%$ 和 $0.49\%\sim 15.53\%$,TASV增幅分别为 $41.50\%\sim 59.79\%$ 和 $19.76\%\sim 50.67\%$ 。施氮提高了开花期营养器官干物质和氮素积累量,显著增加了花前干物质转运量、花后干物质积累量、花前氮素转运量及其对籽粒氮素的贡献率,且均以N180处理最高。与N0处理相比,N180和N300处理的产量分别提高 271.95% 和 215.81% ,穗数分别增加 195.29% 和 147.38% ,穗粒数分别增加 40.87% 和 34.42% 。与N300处理相比,N180处理的氮素利用效率、氮素吸收效率、氮肥农学效率和氮肥偏生产力均增加。综合来看,本试验条件下,施氮量 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 有利于冬小麦节间增粗和维管束发育,可促进花前干物质和氮素在花后向籽粒的转运,从而实现产量和氮素利用效率协同提高。

关键词:施氮量;冬小麦;茎秆维管束结构;产量;氮素利用效率

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)08-1049-12

Effects of Nitrogen Application Rate on Nitrogen Allocation and Utilization and Stem Vascular Bundle Structure of Winter Wheat

LU Suhao, LÜ Tianyu, HAN Xiaojie, TIAN Peipei, LI Shuangjing, WANG Chenyang,
MA Dongyun, KANG Guozhang, MA Geng, WANG Lifang

(College of Agronomy, Henan Agricultural University/National Engineering Research Center for Wheat, Zhengzhou, Henan 450046, China)

Abstract: To investigate the mechanism behind the synergistic improvement of yield and nitrogen use efficiency in winter wheat under appropriate nitrogen application rate, a strong gluten wheat cultivar Fengdecun 5 was used as the experimental material and three nitrogen fertilization treatments [$0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N0), $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N180) and $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N300)] were set up. The study analyzed the effects of nitrogen application rate on internode morphological characteristics, vascular bundle structure, dry matter and nitrogen accumulation and translocation, as well as yield and nitrogen use efficiency in winter wheat. The results showed that nitrogen application increased internode diameter, number of big vascular bundles(NBV)(except for the 3rd top internode below the spike), mean area

收稿日期:2024-08-26 修回日期:2024-12-03

基金项目:国家重点研发计划资助(2024YFD2301200,2022YFD2300801);国家自然科学基金项目(32001475);河南省作物学流动站博士后研究人员资助(HN2022099)

第一作者 E-mail:lsh5878426@163.com(卢素豪)

通讯作者 E-mail:lfwang8866@henau.edu.cn(王丽芳)

of big vascular bundles(MABV), total area of big vascular bundles(TABV), number of small vascular bundles(NSV), mean area of small vascular bundles(MASV), and total area of small vascular bundles(TASV). Compared with N0, the internode diameter of N180 and N300 treatments increased by 14.80%–29.95% and 10.80%–29.41%, NBV increased by 3.35%–28.39% and 1.05%–17.91%, NSV increased by 17.32%–41.69% and 13.25%–33.31%, MABV increased by 4.49%–20.10% and 3.75%–9.91%, TABV increased by 8.19%–48.87% and 5.10%–27.58%, MASV increased by 1.94%–20.47% and 0.49%–15.53%, TASV increased by 41.50%–59.79% and 19.76%–50.67% respectively. Nitrogen application increased dry matter and nitrogen accumulation in vegetative organs at anthesis, and also increased the pre-anthesis dry matter translocation, post-anthesis dry matter accumulation, pre-anthesis nitrogen translocation and its contribution rate to grain nitrogen, and N180 treatment was the highest. Compared with N0, the grain yield of N180 and N300 treatments increased by 271.95% and 215.81%, spike number increased by 195.29% and 147.38%, and grain number per spike increased by 40.87% and 34.42%, respectively. Compared with N300, nitrogen use efficiency, nitrogen uptake efficiency, agronomic use efficiency of nitrogen fertilizer and partial factor productivity of N180 treatments were increased. Collectively, under the experimental conditions, 180 kg · hm⁻² nitrogen application was conducive to increase the diameter of internode and promote the development of internode vascular, facilitates the post-anthesis translocation of pre-anthesis dry matter and nitrogen to grains, and thereby achieves synergistic improvement in yield and nitrogen use efficiency.

Keywords: Nitrogen application rate; Winter wheat; Stem vascular bundle structure; Yield; Nitrogen use efficiency

冬小麦作为中国主要的粮食作物之一,在保障国家粮食安全与稳定中发挥着重要作用。随着农业生产集约化发展和人口的快速增长,生产上普遍采用增施氮肥来提高粮食产量^[1-2]。氮素是作物生长发育和器官建成的关键营养元素,氮素供应不足会影响植株对养分的吸收,降低光合作用、物质积累和籽粒产量^[3]。适量施氮可有效促进植株对氮素的吸收和积累,促进花前贮存氮素向籽粒的转运,从而实现增产增效^[4];然而,过量施氮不仅不利于增产,还会造成土壤富营养化、温室气体排放、土壤酸化等问题^[5-7]。因此,研究不同氮肥处理下小麦植株体内氮素积累转运对实现农业高产高效具有重要意义。

维管束是由木质部和韧皮部共同组成的束状结构,分布于植物的茎秆和叶片中,是植物水分、矿质营养等的运输通道,在植物的“源-库-流”系统中扮演“流”的角色^[8-9]。“流”作为“源”和“库”之间重要的纽带,其结构对光合产物、矿质营养等的运输具有直接的影响,进而影响“库”的形成,最终影响产量^[10]。禾本科作物茎秆中的维管束由内层的大维管束和外层的小维管束组成^[11]。维管束数目和面积是影响水稻茎秆抗折强度和物质

运输的主要结构特征^[12]。维管束数目和面积不仅受作物品种遗传特性影响,还与茎秆节间、温度、光照、水分、肥料及种植密度等因素有关^[8,11]。研究表明,氮肥可促进水稻茎秆维管束的发育和形成,正常施氮处理水稻茎秆的大、小维管束数量均高于低氮处理^[13]。数量多、面积大的维管束有利于养分和营养物质的运输^[3,14]。因此,研究小麦茎秆维管束结构及其与产量和氮肥利用效率之间的关系尤为重要。

小麦产量形成的两个重要来源是花前积累储存在源器官的干物质的转移以及花后源器官通过光合作用所积累的干物质^[15]。小麦在开花期和成熟期的氮积累量以及花前贮存氮素的转运量均是决定产量的关键因素^[16]。适量施氮能促进小麦花前营养器官贮藏氮素在花后向籽粒转运,有利于小麦增产^[17-18];而过量施氮则会延缓作物衰老,不但无法增产,还会显著降低氮肥利用效率^[19-21]。现有研究多集中于施氮量对小麦干物质和氮素积累转运的影响,而在不同施氮条件下小麦茎秆各节间形态特征、内部维管束结构与氮素积累转运和氮素利用效率的关系研究较少。基于此,本研究分析了不同施氮水平下小麦干物质和

氮素积累转运、产量及氮利用效率以及茎秆节间形态和维管束结构特征,以期为合理施氮条件下小麦产量和氮素利用效率的协同提高提供理论支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验于 2022 年 10 月—2023 年 6 月在河南省许昌市建安区张潘镇(33°59'N, 113°58'E)进行。该地区属黄淮区域典型冬小麦种植区,年均气温 15.5 °C,年均降水量 769.9 mm。冬小麦生育期平均月气温和降水量分布情况见图 1。试验地 0~20 cm 耕层土壤有机质含量 13.04 g·kg⁻¹,全氮含量 0.72 g·kg⁻¹,全磷含量 0.79 g·kg⁻¹,全钾含量 6.58 g·kg⁻¹,pH 值 7.11。

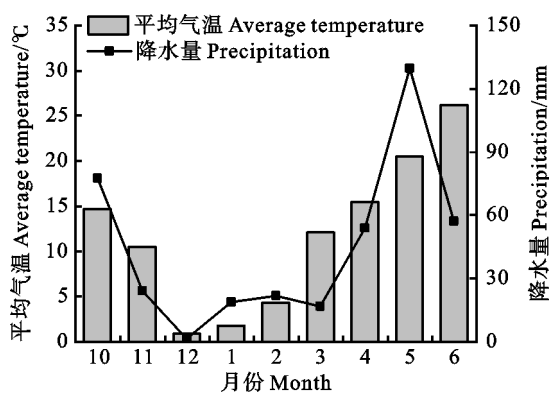


图 1 2022—2023 年冬小麦生长季试验区月均气温与降水量
Fig. 1 Monthly average air temperature and precipitation during the winter wheat growing season from 2022 to 2023

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,以强筋小麦品种丰德存麦 5 号为材料,设置施氮量 0 kg·hm⁻² (N0)、180 kg·hm⁻² (N180) 和 300 kg·hm⁻² (N300) 3 个处理,每个处理 3 次重复,小区面积为 110 m² (10 m×11 m),所施氮、磷、钾肥分别为尿素(含 N 46%)、重过磷酸钙(含 P₂O₅ 46%)和氯化钾(含 K₂O 60%)。P₂O₅ 和 K₂O 施用量分别为 120 kg·hm⁻² 和 75 kg·hm⁻²。所有肥料均于播种前一次性施入。小麦于 2022 年 10 月 16 日播种,播种量为 165 kg·hm⁻²,于拔节期灌水,灌水量为 22.5 t·hm⁻²,其他管理措施同当地实际生产方法一致。于 2023 年 6 月 1 日收获。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 干物质和氮素积累转运相关指标测定

于开花期和成熟期从各小区随机取小麦单茎 30 个,并按照叶、茎、穗轴+颖壳和籽粒(仅成熟

期取样)进行分离,于 105 °C 杀青 30 min,随后于 80 °C 烘干至恒重,称重后粉碎,采用凯氏定氮法测定各器官氮含量。相关指标计算方法参照孔丽婷等^[4]、刘世洁等^[23]的方法进行。

花前干物质转运量=开花期植株干物质积累量-成熟期营养器官干物质积累量

花前干物质对籽粒干物质贡献率=花前干物质转运量/成熟期籽粒干物质积累量×100%

花后干物质积累量=成熟期植株干物质积累量-开花期植株干物质积累量

花后干物质对籽粒干物质贡献率=花后干物质积累量/成熟期籽粒干物质积累量×100%

花前氮素转运量=开花期植株氮素积累量-成熟期营养器官氮素积累量

花前氮素对籽粒氮素贡献率=花前氮素转运量/成熟期籽粒氮素积累量×100%

花后氮素积累量=成熟期植株氮素积累量-开花期植株氮素积累量

花后氮素对籽粒氮素贡献率=花后氮素积累量/成熟期籽粒氮素积累量×100%

干物质在某器官中的分配比率=某器官的干物质质量/整株干物质质量×100%

氮素在某器官中的分配比率=某器官的氮素积累量/整株氮素积累量×100%

氮素利用效率=籽粒产量/成熟期植株氮素积累量

氮素吸收效率=植株氮素积累量/施氮量

氮肥农学效率=(施氮处理产量-不施氮处理产量)/施氮量

氮肥偏生产力=籽粒产量/施氮量

1.3.2 各节间直径和壁厚的测定

于开花期每小区随机选取 10 个小麦单茎,参照倪军等^[22]方法测定小麦茎秆各节间直径(ID)和壁厚(IWT)。

1.3.3 各节间维管束结构的测定

于开花期每小区选取生长一致的小麦单茎 9 个,以茎秆的穗下节间(SX)、倒二节间(D2)、倒三节间(D3)和倒四节间(D4)为样本,切取各节间中部 0.5~1 cm,每个节间取两节备用。用 FAA 固定液(50%)将切取段固定。制好的切片用切片扫描仪进行图像采集,利用 CaseViewer 切片扫描分析软件统计大维管束数目(NBV)、大维管束平均面积(MABV)和大维管束总面积(TABV)以及小维管束数目(NSV)、小维管束平均面积(MASV)

和小维管束总面积(TASV)。

1.3.4 产量及其构成因素的测定

于成熟期调查每小区内 1 m 双行穗数和穗粒数;各小区随机收割 4 m² 的小麦样品,测定千粒重和含水量,计算产量。

1.4 数据分析

采用 Excel 2016 和 Origin 2021 软件进行数据整理和制图,用 SPSS 26.0 进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 施氮量对冬小麦产量及氮素利用效率的影响

施氮量显著影响小麦产量及其构成(表 1)。与 N0 处理相比,N180 和 N300 处理下产量分别增加 271.95%和 215.81%,穗数分别增加 195.29%和 147.38%,穗粒数分别增加 40.87%和 34.42%,但千粒重分别降低 8.90%和 12.08%,这表明施氮可通过增加穗数和穗粒数显著提高小麦产量。

施氮显著促进小麦地上部氮素积累,但显著降低氮素利用效率(表 2)。随施氮量的增加,

NUE、UPE、NAE、NFPF 均呈下降趋势。与 N300 处理相比,N180 处理下小麦地上部氮素积累量略有增加,但 NUE、UPE、NAE 和 NFPF 分别显著提高了 14.78%、71.88%、110.02%和 96.32%,表明适量施氮(N180)在提高小麦产量的同时,可促进氮素高效利用。

表 1 不同施氮量下冬小麦产量及其构成因素表现
Table 1 Yield and its components of winter wheat under different nitrogen application rates

处理 Treatment	穗数 Spike number/ (×10 ⁴ ·hm ⁻²)	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 1 000-grain weight/g	产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)
N0	213.35c	31.00b	47.20a	2 761.78c
N180	630.00a	43.67a	43.00b	10 272.37a
N300	527.78b	41.67a	41.50b	8 722.10b

同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。

Different letters after the values within the same columns indicate significant differences among treatments at 0.05 level. The same in tables 2-4.

表 2 不同施氮量下冬小麦氮素利用情况

Table 2 Nitrogen utilization of winter wheat under different nitrogen application rates

处理 Treatment	地上部氮素积累量 Above-ground nitrogen accumulation/ (kg·hm ⁻²)	NUE/ (kg·kg ⁻¹)	UPE/ (kg·kg ⁻¹)	NAE/ (kg·kg ⁻¹)	NFPF/ (kg·kg ⁻¹)
N0	54.27b	50.91a	—	—	—
N180	296.83a	34.63b	1.65a	41.73a	57.07a
N300	289.05a	30.17c	0.96b	19.87b	29.07b

NUE:氮素利用效率;UPE:氮素吸收效率;NAE:氮肥农学效率;NFPF:氮肥偏生产力。下同。

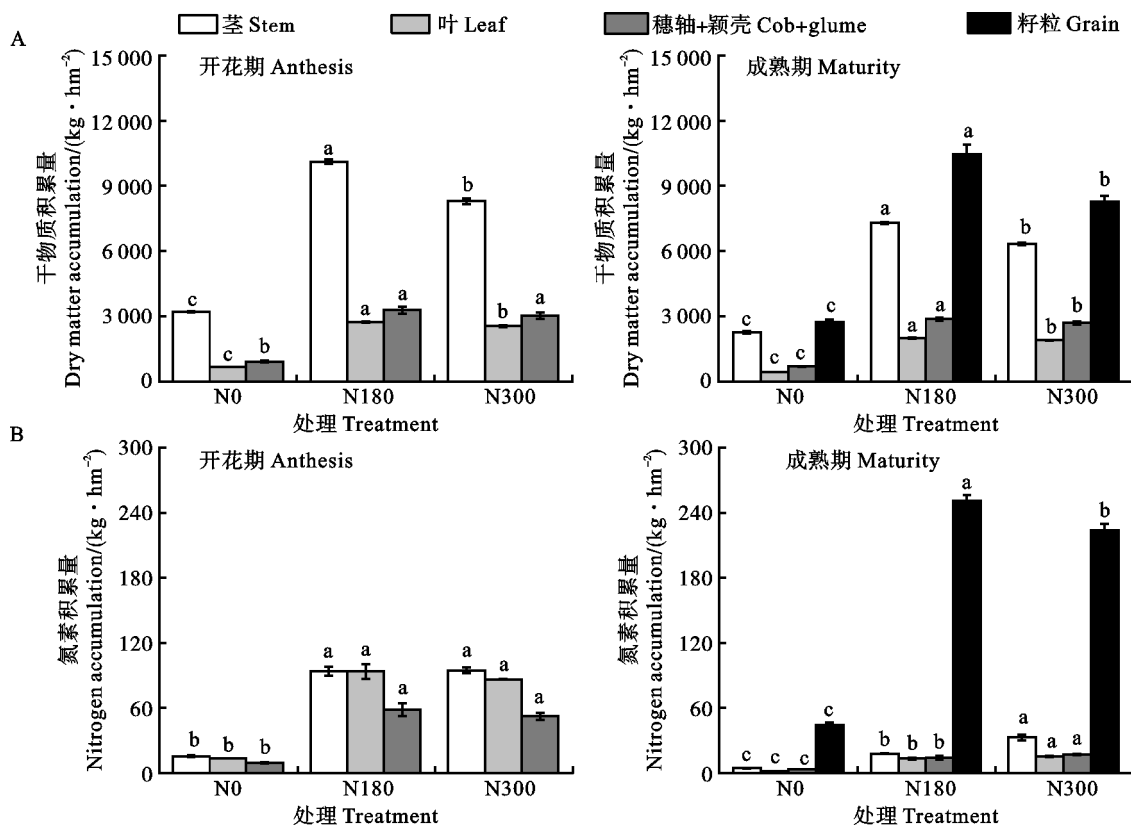
NUE: Nitrogen use efficiency; UPE: Nitrogen uptake efficiency; NAE: Agronomic use efficiency of nitrogen fertilizer; NFPF: Partial factor productivity of nitrogen fertilizer. The same in table 6.

2.2 施氮量对冬小麦干物质和氮素在不同器官中积累与分配的影响

小麦开花期和成熟期各营养器官及籽粒的干物质积累量均随施氮量的增加呈单峰曲线变化(图 2A)。除开花期穗轴+颖壳外,N180 处理在开花期和成熟期各营养器官干物质质量均显著高于 N300 处理。施氮处理各器官氮素积累量显著增加(图 2B)。开花期各器官氮素积累量在 N180、N300 处理间无显著差异,但成熟期,N180 处理的籽粒氮素积累较 N300 处理显著增加,而各营养器官的氮素积累均显著降低。

在小麦开花期,干物质含量最高的器官为茎(59.79%~66.84%),其次是穗轴+颖壳(19.21%~21.86%)和叶(13.95%~21.86%)(图 3A)。与

N300 处理相比,N180 处理显著提高了干物质在茎中的分配比例,增幅 4.82 个百分点,而叶和穗轴+颖壳的分配比例分别降低 7.52 和 6.83 个百分点。在成熟期,与 N0 处理相比,N180 处理显著增加了籽粒的干物质分配比例,而 N300 处理籽粒干物质的比例则减少,各营养器官干物质的比例增加。开花期,茎和叶中氮素均约占整株的 40%,穗轴+颖壳中的氮素约占 20%,不同处理间差异不显著(图 3B)。成熟期,与 N0 处理相比,N180 处理籽粒中的氮素比例(84.49%)显著提高,茎和叶中显著降低;N300 处理籽粒中氮素的比(77.34%)显著减少,而其他器官中氮素比例显著增加。



图柱上不同小写字母表示同一器官不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Different letters above the columns indicate significant differences among treatments for the same organs at 0.05 level. The same in figure 3-6.

图 2 不同施氮量下冬小麦各器官干物质、氮素素的积累情况

Fig. 2 Dry matter and nitrogen accumulation in winter wheat organs under different nitrogen application rates

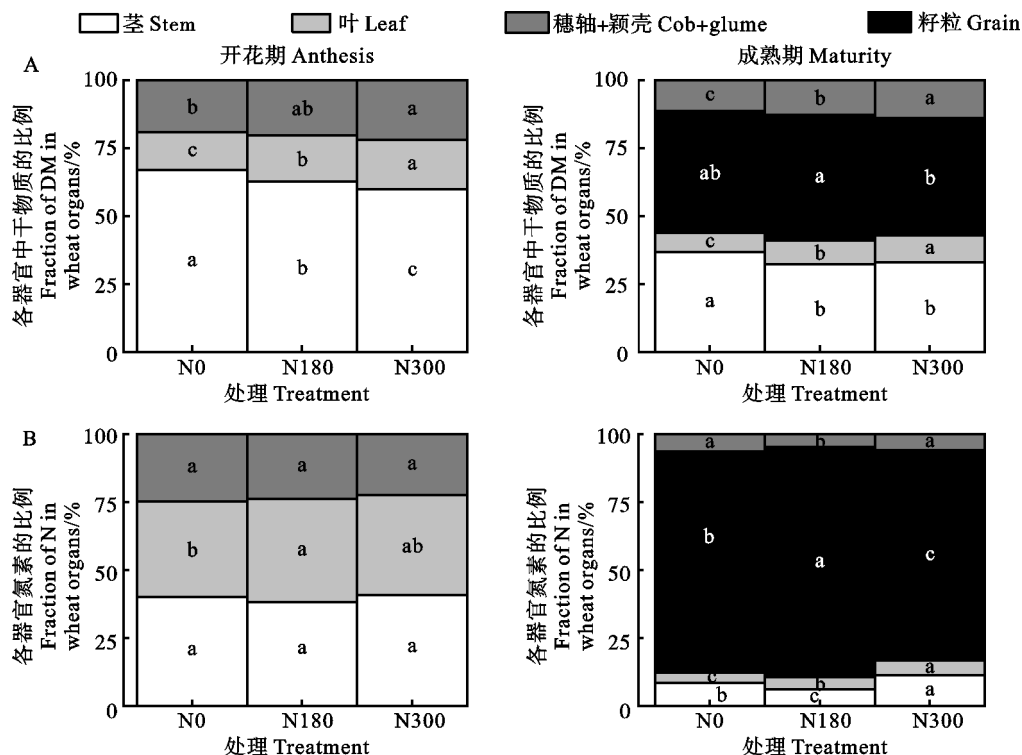


图 3 不同施氮量下冬小麦开花期和成熟期各器官干物质和氮素比例

Fig. 3 Proportion of dry matter and nitrogen in winter wheat organs at anthesis and maturity under different nitrogen application rates

总体而言,施氮处理显著增加了小麦开花期各器官干物质和氮素积累量,但减少了茎的干物质分配比例,而对氮素在器官之间的分配影响不显著。而在成熟期,N180 处理能显著增加干物质和氮素在籽粒中的积累和分配比例,并显著减少氮素在营养器官中的积累和分配比例。

2.3 施氮量对冬小麦干物质和氮素积累转运的影响

随施氮量的增加,冬小麦花前干物质转运量和花后干物质积累量均呈先增后减趋势(表 3)。与 N0 和 N300 处理相比,N180 处理的花前干物质转运量分别提高 182.44%和 34.29%,花后干物质积累量分别增加 385.68%和 22.27%。与 N0 处理相比,N180 和 N300 显著增加了花后干物质对籽粒产量的贡献率,增幅分别为 27.08 和 31.69 个百分点,但显著降低了花前干物质对籽粒产量的贡献率,表明适量施氮可显著促进花前干物质转运和花后干物质积累,且 N0 处理主要通过花前干物质转运来提高籽粒产量;N180 和 N300 处理主要通过增加花后干物质积累来提高籽粒产量。

花前、花后氮素对籽粒氮素的贡献率范围分别为 65.07%~79.83%、20.17%~34.93%。随施氮量的增加,花前氮素转运量及对籽粒氮素的贡献率均呈先增后减趋势,均在 N180 处理最高,分别为 200.05 kg·hm⁻²,79.83%。这表明,适量施用氮肥不仅能显著增加花前氮素的转运量,还能提高其对籽粒氮素的贡献率。

2.4 施氮量对冬小麦茎秆节间直径和壁厚的影响

施氮量显著影响小麦茎秆各节间直径(图 4)。节间直径随节间自下而上减小,且各节间直径均表现为 N180>N300>N0。与 N0 处理相比,N180 和 N300 处理的穗下节间直径分别增加 14.80%和 10.80%,倒二节间直径分别增加 18.31%和 15.12%,倒三节间直径分别增加 24.05%和 20.81%,倒四节间直径分别增加 29.95%和 29.41%。施氮量对穗下节间、倒三节间和倒四节间壁厚无显著影响,但显著影响倒二节间壁厚,且随施氮量的增加呈现先增后减趋势。适量施氮有助于促进小麦茎秆节间的生长发育,提高穗部支撑力和养分运输能力。

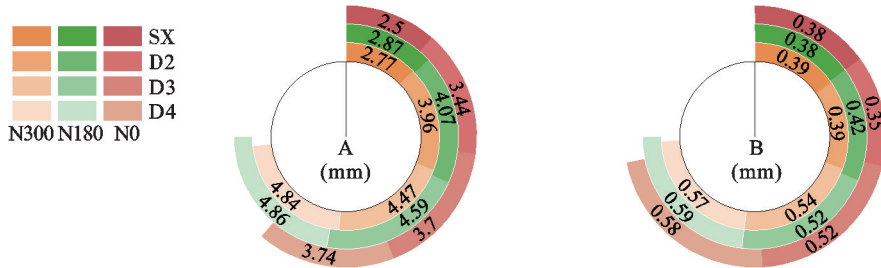
表 3 不同施氮量下冬小麦花前、花后干物质和氮素积累转运量及其贡献率

Table 3 Dry matter and nitrogen accumulation and transport of winter wheat before and after anthesis and their contributions under different nitrogen application rates

处理 Treatment	干物质 Dry matter				氮素 Nitrogen			
	花前 Pre-anthesis		花后 Post-anthesis		花前 Pre-anthesis		花后 Post-anthesis	
	DMT/ (kg·hm ⁻²)	对籽粒的贡献率 Contribution rate to grain/%	DMA/ (kg·hm ⁻²)	对籽粒的贡献率 Contribution rate to grain/%	NT/ (kg·hm ⁻²)	对籽粒的贡献率 Contribution rate to grain/%	NA/ (kg·hm ⁻²)	对籽粒的贡献率 Contribution rate to grain/%
N0	1 402.86c	51.19a	1 333.84c	48.81b	28.74c	65.07b	15.43b	34.93a
N180	3 962.26a	37.97b	6 495.84a	62.03a	200.05a	79.83a	50.73a	20.17b
N300	2 950.50b	35.72b	5 312.76b	64.28a	167.80b	75.10a	55.72a	24.90b

DMT:花前干物质转运量;DMA:花后干物质积累量;NT:花前氮素转运量;NA:花后氮素积累量。下同。

DMT: Pre-anthesis dry matter translocation; DMA: Post-anthesis dry matter accumulation; NT: Pre-anthesis nitrogen translocation; NA: Post-anthesis nitrogen accumulation. The same in tables 5 and 6.



A: 节间直径;B: 节间壁厚;SX: 穗下节间;D2: 倒二节间;D3: 倒三节间;D4: 倒四节间。下同。

A: Internode diameter; B: Internode wall thickness; SX: Peduncle; D2: 2nd top internode below the spike; D3: 3rd top internode below the spike; D4: 4th top internode below the spike. The same in figure 5.

图 4 不同施氮量下冬小麦茎秆各节间直径和壁厚

Fig. 4 Internode diameter and wall thickness of stem internode under different nitrogen application rates

2.5 施氮量对冬小麦茎秆节间维管束特征的影响

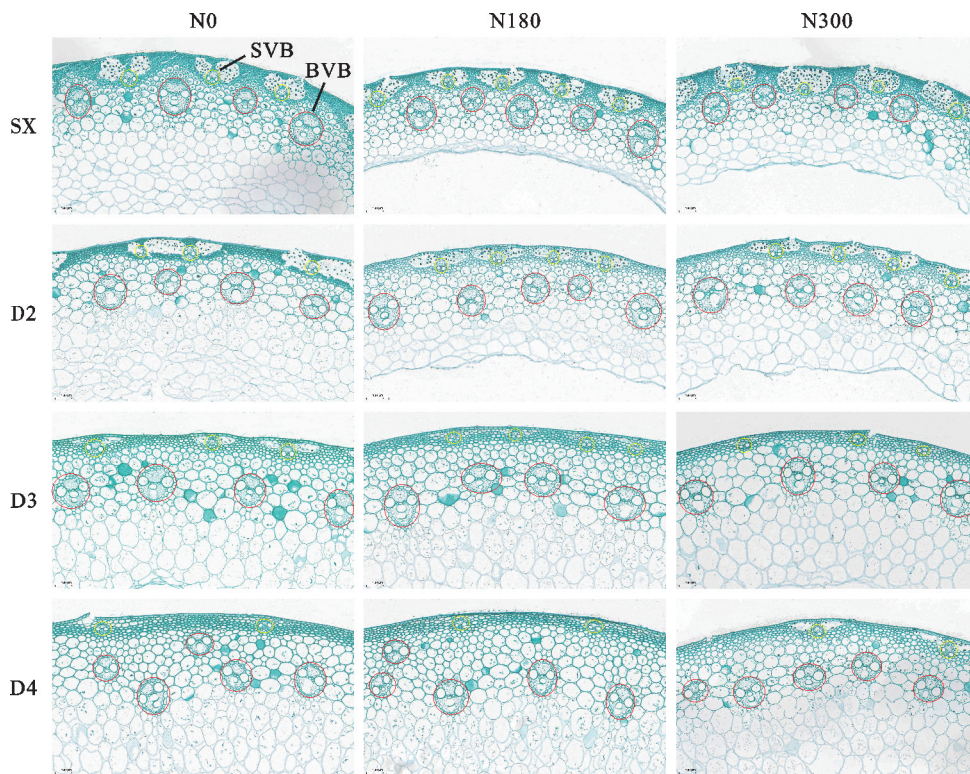
不同施氮量对小麦茎秆节间维管束结构影响不同(图 5)。NBV 随节间自上至下增加,NSV 随节间自上至下先增后减,其中 NSV 在倒二节间达最大。与 N0 相比,N180 和 N300 处理增加了小麦各节间 NBV(倒三节间除外),其中穗下节间增幅分别为 28.39%和 17.91%,倒二节间增幅分别为 14.44%和 1.05%,倒四节间增幅分别为 3.35%和 2.52%(图 6)。与 N0 相比,N180 和 N300 处理均显著增加了各节间 NSV,其中穗下节间增幅分别为 29.87%和 26.87%,倒二节间增幅分别为 17.32%和 13.25%,倒三节间增幅分别为 38.20%和 30.88%,倒四节间增幅分别为 41.69%和 33.31%。这说明,适量施氮有利于增加节间 NBV 和 NSV。

施氮后茎秆各节间 CSA、MABV、MASV、TABV、TASV 均有所增加(表 4)。与 N0 相比,N180 和 N300 处理各节间 CSA 分别增加 29.46%~63.19%和 26.00%~61.10%,MABV 分别增加 4.49%~20.10%和 3.75%~9.91%,MASV 分别增加 1.94%~20.47%和 0.49%~15.53%,TABV 分别增加 8.19%~48.87%和 5.10%~27.58%,TASV 分别增加 41.50%~59.79%和

19.76%~50.67%。与 N300 处理相比,N180 处理显著增加了穗下节间和倒二节间的 MABV、MASV、TABV、TASV、TABV/CSA 和 TASV/CSA,增幅分别为 7.22%、14.63%、16.68%、17.07%、13.76%、13.75%(穗下节间)和 9.27%、14.10%、23.74%、18.16%、22.53%、18.52%(倒二节间),两处理在倒三节间和倒四节间无显著差异。适量施氮有利于增加 NBV 和 NSV,提高茎秆维管束的发育水平,增强养分运输能力。

2.6 产量和氮利用效率相关参数与茎节间维管束性状的相关性

由表 5 可知,小麦穗下节间的 NBV、NSV、MABV 均与节间直径、DMT、DMA、穗数、穗粒数、产量呈显著或极显著正相关。在倒二节间也存在相似的相关性,但倒二节间 NBV 与节间直径、DMA、穗数、穗粒数、产量之间的相关性均不显著。倒三和倒四节间的 NSV 与节间直径、DMT、DMA、穗数、穗粒数、产量均呈显著或极显著正相关,NBV 和 MABV 与产量性状之间相关性不显著。由表 6 可知,穗下节间的 NBV、MABV、MASV 与 NT、UPE、NAE、NPPF 均呈显著或极显著正相关。在倒二节间也存在相似的相关性,



BVB:大维管束;SVB:小维管束。比例尺为 100 μm。

BVB: Big vascular bundle; SVB: Small vascular bundle. Scale bars is 100 μm.

图 5 不同施氮量下冬小麦茎秆节间的显微学观察

Fig. 5 Microscopic observation of winter wheat stem internode under different nitrogen application rates

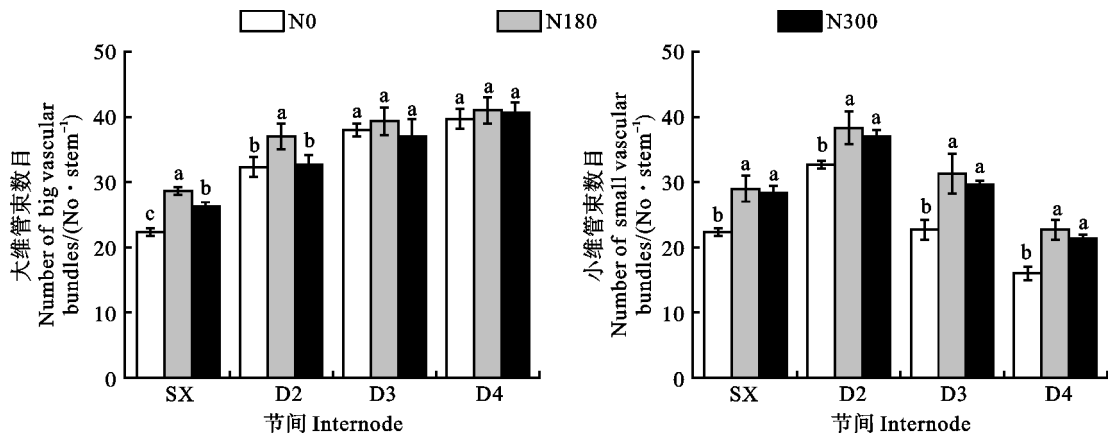


图 6 不同施氮量下冬小麦茎秆各节间大、小维管束数目

Fig. 6 Numbers of big and small vascular bundles in internodes of winter wheat stem under different nitrogen application rates

表 4 不同施氮量下冬小麦茎秆各节间维管束面积

Table 4 The area of vascular bundles in internodes of winter wheat stem under different nitrogen application rates

节间 Internode	处理 Treatment	CSA/ (mm ² · stem ⁻¹)	MABV/ (×10 ⁻³ mm ² · bundle ⁻¹)	MASV/ (×10 ⁻³ mm ² · bundle ⁻¹)	TABV/ (×10 ⁻³ mm ² · stem ⁻¹)	TASV/ (×10 ⁻³ mm ² · stem ⁻¹)	TABV/ CSA/%	TASV/ CSA/%
穗下节间 SX	N0	5.77b	14.47c	2.04b	323.07c	45.48c	5.60b	0.79a
	N180	7.47a	16.78a	2.35a	480.94a	68.18a	6.45a	0.91a
	N300	7.27a	15.65b	2.05b	412.17b	58.24b	5.67b	0.80a
倒二节间 D2	N0	11.62b	13.93c	2.15b	451.09b	70.09c	3.89ab	0.60a
	N180	15.25a	16.73a	2.59a	618.76a	99.18a	3.97a	0.64a
	N300	15.43a	15.31b	2.27b	500.04b	83.94b	3.24b	0.54b
倒三节间 D3	N0	12.93b	17.58b	2.06b	668.14b	46.83b	5.19a	0.36a
	N180	21.10a	18.37ab	2.39a	722.86a	74.83a	3.43b	0.35a
	N300	20.83a	19.01a	2.38a	702.20a	70.56a	3.38b	0.34a
倒四节间 D4	N0	15.61b	17.62a	2.58b	698.49a	41.28b	4.48a	0.26a
	N180	24.37a	18.76a	2.63b	768.11a	59.68a	3.15b	0.24a
	N300	23.18a	18.28a	2.77a	743.52a	59.20a	3.21b	0.26a

CSA:截面积;MABV、MASV 表示大、小维管束平均面积;TABV、TASV 表示大、小维管束总面积;TABV/CSA、TASV/CSA 分别表示单位横截面积大、小维管束总面积。下同。

CSA:Cross sectional area; MABV: Mean area of big vascular bundle; MASV: Mean area of small vascular bundle; TABV: Total area of big vascular bundle; TASV: Total area of small vascular bundle; TABV/CSA, TASV/CSA: Specific area of big and small vascular bundle per unit cross sectional area. The same in belows.

但倒二节间 NBV 与 NT 的相关性不显著。倒三和倒四节间的维管束性状与各指标之间相关性均不显著(倒四节间 MASV 除外)。由此可见,茎秆穗下节间和倒二节间维管束数目和面积与物质运输、产量和氮素利用效率密切相关,增加两节间维管束数目和面积可有效促进干物质和氮素向籽粒转移,进而实现小麦高产和氮肥的高效利用。

3 讨论

3.1 施氮量对小麦干物质积累转运和产量的影响

干物质积累与转运是小麦产量形成的重要决

定因素,而氮素是其关键的调控因子之一。史力超等^[24]研究表明,小麦整个生育期的干物质积累量随施氮量的增加呈单峰曲线变化,本研究结果与此一致,开花期、成熟期各营养器官和籽粒的干物质积累量均随施氮量的增加呈先增后减趋势。适量施氮可通过增加花前营养器官贮藏干物质的转运来提高籽粒产量^[25]。小麦花前、花后干物质对籽粒产量的贡献率分别为 26.40%~37.85% 和 62.15%~73.60%,因此花后光合作用生产的干物质对籽粒产量至关重要^[26]。本研究发现,施氮量 180 kg · hm⁻² 显著提升了花前干物质的转

表 5 茎秆维管束性状与干物质积累、转运和产量性状的相关性

Table 5 Correlation between stem internode vascular bundle traits and dry matter accumulation, translocation and yield traits

节间 Internode	性状 Trait	节间直径 Internode diameter	DMT	DMA	穗数 Spike number	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 1 000-grain weight	产量 Yield
穗下节间 SX	NBV	0.802**	0.968**	0.972**	0.971**	0.955**	-0.728*	0.968**
	NSV	0.787*	0.889**	0.905**	0.922**	0.919**	-0.769*	0.912**
	MABV	0.772*	0.966**	0.900**	0.930**	0.887**	-0.708*	0.920**
	MASV	0.647	0.752*	0.646	0.669*	0.586	-0.360	0.641
倒二节间 D2	NBV	0.455	0.744*	0.561	0.621	0.625	-0.303	0.599
	NSV	0.722*	0.893**	0.817**	0.872**	0.891**	-0.807**	0.881**
	MABV	0.717*	0.872**	0.806**	0.817**	0.780*	-0.472	0.805**
	MASV	0.628	0.785*	0.792*	0.767*	0.659	-0.421	0.749*
倒三节间 D3	NBV	-0.052	0.267	0.110	0.147	0.187	-0.041	0.171
	NSV	0.856**	0.917**	0.892**	0.920**	0.898**	-0.890**	0.932**
	MABV	0.707*	0.542	0.675*	0.656	0.628	-0.806**	0.657
	MASV	0.879**	0.912**	0.936**	0.949**	0.984**	-0.889**	0.962**
倒四节间 D4	NBV	0.262	0.456	0.309	0.392	0.508	-0.390	0.393
	NSV	0.903**	0.938**	0.918**	0.949**	0.928**	-0.837**	0.949**
	MABV	0.421	0.443	0.527	0.482	0.356	-0.399	0.480
	MASV	0.681*	0.319	0.452	0.456	0.467	-0.729*	0.474

* : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$.

表 6 茎秆维管束性状与氮素积累、转运和氮素利用效率的相关性

Table 6 Correlation between stem internode vascular traits and nitrogen accumulation, translocation and nitrogen use efficiency

节间 Internode	性状 Trait	节间直径 Internode diameter	NT	NA	UPE	NAE	NPPF	NUE
穗下节间 SX	NBV	0.571	0.949**	-0.275	0.949**	0.917*	0.924**	0.771
	NSV	0.349	0.120	0.290	0.251	0.148	0.170	-0.043
	MABV	0.646	0.903*	-0.439	0.922**	0.950**	0.946**	0.935**
	MASV	0.844*	0.869*	-0.299	0.881*	0.904*	0.901*	0.878*
倒二节间 D2	NBV	0.146	0.766	-0.132	0.826*	0.833*	0.832*	0.787
	NSV	-0.039	0.292	0.056	0.374	0.399	0.394	0.432
	MABV	0.274	0.929**	-0.528	0.924**	0.912*	0.917*	0.818*
	MASV	0.163	0.948**	-0.364	0.931**	0.903*	0.910*	0.769
倒三节间 D3	NBV	-0.283	0.548	-0.408	0.500	0.572	0.558	0.658
	NSV	0.055	0.433	-0.620	0.369	0.509	0.483	0.744
	MABV	0.106	-0.506	-0.151	-0.578	-0.517	-0.529	-0.356
	MASV	-0.531	0.168	0.306	0.207	0.223	0.217	0.229
倒四节间 D4	NBV	-0.162	0.014	0.378	0.111	0.127	0.122	0.160
	NSV	0.250	0.457	0.020	0.561	0.553	0.556	0.514
	MABV	-0.140	0.444	-0.478	0.343	0.396	0.387	0.455
	MASV	0.310	-0.935**	0.463	-0.894*	-0.911*	-0.909*	-0.859*

* : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$.

运量及花后干物质的积累量,这与李传梁等^[27]的研究结果一致。N0 处理的小麦花前、花后干物质对籽粒的贡献率分别为 51.19%、48.81%,N180 和 N300 处理的小麦花前干物质对籽粒的贡献率

分别为 37.97%、35.72%;花后干物质对籽粒的贡献率分别为 62.03%、64.28%。由此可见,不施氮处理的小麦产量以花前干物质转运为主,施氮处理则以花后干物质积累为主,这与前人研究

结果不尽相同,其原因可能是在缺氮条件下,花前贮藏在茎叶等营养器官的干物质会尽可能多地向生殖器官籽粒转移,从而提高了花前干物质对籽粒的贡献率。

施氮量对小麦产量及其构成因素均具有显著影响,适量增施氮肥是作物产效协同提高的关键^[28]。研究表明,适量施氮条件下对小麦穗的生长发育具有促进作用,有利于穗数、穗粒数的增加,从而实现增产增效^[29]。本研究发现,产量、穗数和穗粒数均在 N180 处理下最高,这与前人研究结果基本一致。合理施用氮肥对小麦穗数和穗粒数具有显著的提升,从而实现增产。粒重变化与前人研究略有差异,施氮反而显著降低了小麦的千粒重,其原因可能是缺氮条件下,造成小麦穗部发育受阻,使其库容量变小,而 N0 处理虽然源小,但其库相对较小,所以千粒重较高^[30]。

3.2 施氮量对小麦氮素积累转运和氮素利用效率的影响

在一定范围内,小麦的氮素积累量随着氮肥用量的增加而提高,但施氮过量时反而会降低氮素利用效率^[31]。小麦花前茎叶等营养器官贮存氮素的转运对籽粒至关重要,其占籽粒氮素的 50%~95%^[32-33]。本研究中,施氮可显著提高花前氮素转移量及对籽粒氮的贡献率,N180 处理的花前氮素对籽粒氮的贡献率最高(79.83%),而 N300 处理花前氮素转移量及其对籽粒的贡献率不增反降,这与前人研究结果一致,说明适量施氮有利于小麦营养器官中贮存的氮素有效地转移到籽粒中,进而提高籽粒的氮素积累,然而,当氮肥过量时,营养器官中的氮代谢旺盛,反而减少了氮素向籽粒的转移。

氮素利用效率常用的评价指标有氮肥偏生产力、氮肥吸收效率、氮肥农学效率等,这些指标能从不同方面评估作物对氮肥的吸收和利用能力^[34]。李枫等^[35]研究表明,氮肥偏生产力、氮肥农学效率随氮肥用量的增加呈下降趋势。本研究中,随施氮量的增加,氮肥农学效率、氮素吸收效率和氮肥偏生产力均显著降低,这与曲文凯等^[36]研究结果一致,这可能是由于过量施氮导致小麦对氮素的过量吸收,同时造成了对养分的过度消耗,增加了氮素在植株体内的滞留,进而减少了其向籽粒的转移。

3.3 施氮量对节间维管束在干物质和氮素分配转运中的影响

维管束作为作物物质运输管道,其运输能力

和效率影响着营养器官和生殖器官之间的养分交换。发达的茎秆维管束结构,不仅能提高水分和无机盐的运输,还能使营养物质在营养生长期贮积,并能在生殖生长期向籽粒输送更多的营养物质^[10]。研究表明,增施氮肥对小维管束数目和面积无显著影响^[11],而减施氮肥可增加大维管束面积^[37]。有研究认为,适宜的施氮量有利于茎秆维管束数量的增多及面积的增大,而过量施氮则使维管束数量减少^[38]。在本研究中,随施氮量的增加,节间大小维管束数目、面积及总面积均呈先增后减趋势,这与王留行等^[39]研究结果基本一致。研究发现,大维管束的数目、面积与植株体内氮素的分配和籽粒产量均呈正相关,而小维管束的数目、面积与其籽粒产量均呈负相关^[40];维管束的相关性状与物质运输、收获指数和籽粒产量均呈显著正相关^[41]。裘昭峰等^[42]的研究结果显示,节间维管束的数目、面积均与穗粒数呈显著正相关。本研究发现,茎秆穗下节间和倒二节间维管束数目和面积与物质运输、产量和氮素利用效率密切相关,这与前人研究结果基本一致。适量增施氮肥,茎秆穗下节间和倒二节间维管束数目和面积的显著增加可能是其产效协同提升的重要原因。本试验仅对一个小麦品种进行了研究,但缺少对其他品种的研究,在下一步研究中可增加与其他品种的比较试验,以提高结论的准确性和代表性。

4 结论

施氮量显著影响冬小麦茎秆维管束的结构。本试验条件下,施氮量 180 kg·hm⁻² 下有利于小麦各节间直径增大、维管束数目增多、面积增大,促进茎秆节间维管束的发育,能显著提升小麦花前干物质转运量及花后干物质积累量,增加干物质和氮素积累并促进其向籽粒转运,从而实现产量和氮素利用效率协同提升。

参考文献:

- [1] LU J, BAI Z H, VELTHOF G L, *et al.* Accumulation and leaching of nitrate in soils in wheat-maize production in China [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 212: 407.
- [2] CHEN L, XIE H, WANG G L, *et al.* Reducing environmental risk by improving crop management practices at high crop yield levels [J]. *Field Crops Research*, 2021, 265: 108123.
- [3] REN H, JIANG Y, ZHAO M, *et al.* Nitrogen supply regulates vascular bundle structure and matter transport characteristics of spring maize under high plant density [J]. *Frontiers in*

- Plant Science*, 2021, 11: 602739.
- [4]孔丽婷,蒋桂英,杨灵威. 减量施氮对滴灌春小麦干物质和氮素积累转运特征的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(3): 326. KONG L T, JIANG G Y, YANG L W. Effect of reduced nitrogen application on dry matter and nitrogen accumulation and transportation characteristics of spring wheat under drip irrigation [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(3): 326.
- [5]BACENETTI J, LOVARELLI D, FIALA M. Mechanisation of organic fertiliser spreading, choice of fertiliser and crop residue management as solutions for maize environmental impact mitigation [J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 79: 108.
- [6]RAZA S, MIAO N, WANG P Z, *et al.* Dramatic loss of inorganic carbon by nitrogen-induced soil acidification in Chinese croplands [J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(6): 3747.
- [7]HAO T X, LIU X J, ZHU Q C, *et al.* Quantifying drivers of soil acidification in three Chinese cropping systems [J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 215: 105230.
- [8]冯金凤. 肥料运筹对小麦产量品质及茎秆维管束的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2013: 2. FENG J F. Influence of fertilizer application on the yield quality and stem vascular bundle of wheat [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2013: 2.
- [9]DU J J, ZHANG Y, LU X J, *et al.* A deep learning-integrated phenotyping pipeline for vascular bundle phenotypes and its application in evaluating sap flow in the maize stem [J]. *The Crop Journal*, 2022, 10(5): 1424.
- [10]宋杰,任昊,赵斌,等. 施钾量对夏玉米维管组织结构与物质运输性能的影响[J]. 作物学报, 2022, 48(11): 2909. SONG J, REN H, ZHAO B, *et al.* Effect of potassium application on vascular tissue structure and material transport properties in summer maize (*Zea mays* L.) [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(11): 2909.
- [11]张国. 不同施氮量下水稻茎鞘非结构性碳水化合物积累转运及与维管束的关系[D]. 武汉:华中农业大学, 2023: 10. ZHANG G. Effects of different nitrogen application rates on accumulations and translocation of rice stem non-structural carbohydrates and its relationship with vascular bundles [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023: 10.
- [12]TIAN B H, LIU L Y, ZHANG L X, *et al.* Characterization of culm morphology, anatomy and chemical composition of foxtail millet cultivars differing in lodging resistance [J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2015, 153(8): 1446.
- [13]PAN J F, CUI K H, WEI D, *et al.* Relationships of non-structural carbohydrates accumulation and translocation with yield formation in rice recombinant inbred lines under two nitrogen levels [J]. *Physiologia Plantarum*, 2011, 141(4): 325.
- [14]TRAVAGLIA C, BALBOA G, ESPÓBITO G, *et al.* ABA action on the production and redistribution of field-grown maize carbohydrates in semiarid regions [J]. *Plant Growth Regulation*, 2012, 67(1): 32.
- [15]郑成岩,于振文,马兴华,等. 高产小麦耗水特性及干物质的积累与分配[J]. 作物学报, 2008, 34(8): 1457. ZHENG C Y, YU Z W, MA X H, *et al.* Water consumption characteristic and dry matter accumulation and distribution in high-yielding wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(8): 1457.
- [16]柏慧. 不同氮效率类型冬小麦品种产量构成、氮素积累与转运特征的比较分析[D]. 泰安:山东农业大学, 2022: 3. BAI H. Comparative analysis on the characteristic of yield components, nitrogen accumulation and translocation among winter wheat varieties [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022: 3.
- [17]DUAN J Z, SHAO Y H, HE L, *et al.* Optimizing nitrogen management to achieve high yield, high nitrogen efficiency and low nitrogen emission in winter wheat [J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 697: 134088.
- [18]吕广德,亓晓蕾,张继波,等. 中、高产型小麦干物质和氮素积累转运对水氮的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(9): 1542. LÜ G D, QI X L, ZHANG J B, *et al.* Response of nitrogen and dry matter accumulation in middle and high yield wheat cultivars to water and nitrogen supply [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(9): 1542.
- [19]ABEDI T, ALEMZADEH A, KAZEMEINI S A. Wheat yield and grain protein response to nitrogen amount and timing [J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2011, 5(3): 331.
- [20]赵俊晔,于振文. 高产条件下施氮量对冬小麦氮素吸收分配利用的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(4): 489. ZHAO J Y, YU Z W. Effects of nitrogen fertilizer rate on uptake, distribution and utilization of nitrogen in winter wheat under high yielding cultivated condition [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(4): 489.
- [21]康娟. 冬小麦优化栽培技术模式的产效协同效应和机制研究[D]. 郑州:河南农业大学, 2024: 53. KANG J. Studies on synergistic effect and mechanisms of yield and efficiency in optimized cultivation technology of winter wheat [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2024: 53.
- [22]倪军. 氮肥和密度对小麦茎秆抗倒伏性能及木质素积累的影响[D]. 泰安:山东农业大学, 2018: 8. NI J. Effects of nitrogen fertilizer and planting density on the lignin accumulation in the culm in relation to lodging resistance of wheat [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018: 8.
- [23]刘世洁,杨习文,马耕,等. 灌水和施氮对冬小麦根系特征及氮素利用的影响[J]. 作物学报, 2023, 49(8): 2299. LIU S J, YANG X W, MA G, *et al.* Effects of water and nitrogen application on root characteristics and nitrogen utilization in winter wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(8): 2299.
- [24]史力超,朱云,翟勇,等. 施氮对滴灌春小麦干物质积累、转运及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(6): 845. SHI L C, ZHU Y, ZHAI Y, *et al.* Effect of nitrogen application on dry matter accumulation, translocation and yield of

- drip irrigation spring wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(6): 845.
- [25] 姜丽娜, 马静丽, 方保停, 等. 限水减氮对豫北冬小麦产量和植株不同层次器官干物质运转的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(6): 964.
- JIANG L N, MA J L, FANG B T, *et al.* Effect of lower water and nitrogen supply on grain yield and dry matter remobilization of organs in different layers of winter wheat plant in northern Henan province [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(6): 964.
- [26] 雷钧杰, 张永强, 赛力汗·赛, 等. 施氮量对滴灌冬小麦干物质积累、分配与转运的影响[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(8): 1085.
- LEI J J, ZHANG Y Q, SAILIHAN · S, *et al.* Effect of nitrogen application rate on dry matter accumulation, distribution and translocation of winter wheat under drip irrigation [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(8): 1085.
- [27] 李传梁, 于振文, 张娟, 等. 测墒补灌条件下施氮量对小麦干物质积累转运和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(8): 1042.
- LI C L, YU Z W, ZHANG J, *et al.* Effect of nitrogen application rates on dry matter accumulation, transportation and yield of wheat under the conditions of soil moisture measurement and supplementary irrigation [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(8): 1042.
- [28] LU X S, YU D S, CHEN Y, *et al.* Yield and nitrogen use efficiency of winter wheat with different soil fertility [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2020, 116(2): 173.
- [29] 张礼军, 鲁清林, 张文涛, 等. 耕作方式和施氮量对旱地冬小麦开花后干物质转运特征、糖含量及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(12): 1462.
- ZHANG L J, LU Q L, ZHANG W T, *et al.* Effects of tillage regime and nitrogen application rate on post-anthesis dry matter remobilization, sugar content and grain yield of winter wheat in dryland [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(12): 1462.
- [30] 张文静, 江东国, 黄正来, 等. 氮肥施用对稻茬小麦冠层结构及产量、品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(2): 172.
- ZHANG W J, JIANG D G, HUANG Z L, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer application on canopy structure traits, grain yield and quality of wheat after rice [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(2): 172.
- [31] KHAN S, ANWAR S, YU S B, *et al.* Soil water consumption, water use efficiency and winter wheat production in response to nitrogen fertilizer and tillage [J]. *Peer J*, 2020, 8: e8892.
- [32] SCHIERENBECK M, FLEITAS M C, CORTESE F, *et al.* Nitrogen accumulation in grains, remobilization and post-anthesis uptake under tan spot and leaf rust infections on wheat [J]. *Field Crops Research*, 2019, 235: 27.
- [33] NEHE A S, MISRA S, MURCHIE E H, *et al.* Nitrogen partitioning and remobilization in relation to leaf senescence, grain yield and protein concentration in Indian wheat cultivars [J]. *Field Crops Research*, 2020, 251: 107778.
- [34] 李雪萌, 杨梅, 秦保平, 等. 施氮量对强筋小麦物质积累与籽粒产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(5): 609.
- LI X M, YANG M, QIN B P, *et al.* Effect of nitrogen application rate on matter accumulation and grain yield of strong gluten wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(5): 609.
- [35] 李枫, 周杨, 尹鹏, 等. 长江中游不同品质类型小麦产量形成及氮素吸收利用对氮肥的响应[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(3): 376.
- LI F, ZHOU Y, YIN P, *et al.* Response of yield formation and nitrogen absorption and utilization of wheat with different quality types to nitrogen fertilizer in the middle reaches of the Yangtze River [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(3): 376.
- [36] 曲文凯, 徐学欣, 郝天佳, 等. 施氮量对滴灌冬小麦-夏玉米周年产量及氮素利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(7): 1279.
- QU W K, XU X X, HAO T J, *et al.* Effects of nitrogen application rate on annual yield and N-use efficiency of winter wheat-summer maize rotation under drip irrigation [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(7): 1279.
- [37] 程艳双, 胡美艳, 杜志敏, 等. 减氮对辽粳5号/秋田小町 RIL 群体茎秆维管束、穗部和产量性状的影响及其相互关系[J]. 作物学报, 2021, 47(5): 972.
- CHENG Y S, HU M Y, DU Z M, *et al.* Effects of nitrogen reduction on stem vascular bundles, panicle and yield characters of RIL populations in Liaojing 5/Akitakaomaqi and their correlation [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(5): 972.
- [38] YANG D Q, CAI T, LUO Y L, *et al.* Optimizing plant density and nitrogen application to manipulate tiller growth and increase grain yield and nitrogen-use efficiency in winter wheat [J]. *Peer J*, 2019, 7: e6484.
- [39] 王留行, 彭廷, 熊加豹, 等. 氮肥对超级杂交稻穗颈节间维管束结构的影响[J]. 河南农业科学, 2019, 48(9): 14.
- WANG L H, PENG T, XIONG J B, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer on vascular bundle structure in first internode of super hybrid rice [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2019, 48(9): 14.
- [40] LIU Z, SHA Y, HUANG Y W, *et al.* Efficient nitrogen allocation and reallocation into the ear in relation to the superior vascular system in low-nitrogen tolerant maize hybrid [J]. *Field Crops Research*, 2022, 284: 108580.
- [41] LI G H, CHEN X, ZHOU C Y, *et al.* Vascular bundle characteristics of different rice variety treated with nitrogen fertilizers and its relation to stem assimilates allocation and grain yield [J]. *Agriculture*, 2022, 12(6): 779.
- [42] 裘昭峰, 方陈, 陈洪俭. 小麦节间的维管组织及其与单穗粒数的关系[J]. 作物学报, 1987, 13(2): 102.
- QIU Z F, FANG C, CHEN H J. On the vascular tissue of wheat internodal and its relationship to the grain number per spike [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1987, 13(2): 102.