

网络出版时间:2026-01-13

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260112.1655.008

播种方式和施氮量对小麦群体干物质和氮素积累及垂直分布的调控效应

叶杨春¹, 李乔^{1,2}, 马瑞琦¹, 徐哲莉³, 刘希伟¹, 李辉利³, 王艳杰¹,
邱红伟³, 王德梅¹, 雷钧杰⁴, 张永强⁴, 杨玉双¹, 赵广才¹, 常旭虹¹

(1. 中国农业科学院作物科学研究所/农业农村部作物生理生态重点实验室, 北京 100081; 2. 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, 河北昌黎 066004; 3. 石家庄市农林科学研究院赵县实验基地, 河北石家庄 051530; 4. 新疆农业科学院粮食作物研究所, 新疆乌鲁木齐 830091)

摘要:为明确播种方式与施氮量对小麦群体干物质、氮素积累与再分配及其垂直分布的影响,于2022—2024年在石家庄市农林科学研究院赵县实验基地开展裂区试验,以冬小麦品种轮选103为材料,主区设立立体匀播和常规条播,副区设0、180、240和300 kg·hm⁻² 4个施氮量,开花期与成熟期对植株地上部按冠层自上而下每隔20 cm分层(H1~H4),测定不同器官干物质与氮素积累、花前转运量及其效率,并分析对籽粒贡献特征。结果表明,与常规条播相比,立体匀播显著提高小麦开花期植株干重、花前干物质和氮素转运量、转运效率及其对籽粒产量和氮素的贡献率,而花后干物质和氮素积累量及其贡献率有所降低;开花期茎秆+叶鞘、叶片的干物质和氮素分配比例增加,成熟期穗轴+颖壳的干物质和氮素的分配比例有所降低。与常规条播相比,立体匀播下茎秆+叶鞘的花前干物质转运量在H1~H4层下分别提高14.84%、24.19%、16.85%和11.31%,氮素转运量分别提高21.97%、16.89%、28.27%和24.27%;叶片花前干物质转运量分别提高33.65%、16.17%、28.16%和23.81%,氮素转运量分别提高17.63%、10.63%、8.20%和22.57%。立体匀播下小麦群体垂直各层的茎秆+叶鞘花前干物质转运效率较常规条播增幅大小表现为H2>H4>H1>H3,氮素转运效率增幅大小表现为H3>H2>H1>H4;各层叶片的花前干物质增幅大小表现为H3>H1>H4>H2。随施氮量的增加,两种播种方式下粒重、干物质转运量、干物质和氮素转运效率均呈先增加后降低的趋势,均在240 kg·hm⁻² 施氮量下最高;花后干物质积累量、籽粒氮素积累量和氮素转运量整体均呈上升趋势。综合分析,立体匀播主要是通过提高中上层(H2和H3层)茎秆+叶鞘及中下层(H3和H4层)叶片干物质与氮素的再分配能力,促进籽粒干重和氮素积累量的增加,本试验条件下240 kg·hm⁻² 为最适施氮量。

关键词:小麦;立体匀播;施氮量;干物质;氮素

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2026)03-0343-13

Regulation Effect of Sowing Method and Nitrogen Application Rate on Dry Matter and Nitrogen Accumulation and Vertical Distribution in Wheat Population

YE Yangchun¹, LI Qiao^{1,2}, MA Ruiqi¹, XU Zheli³, LIU Xiwei¹, LI Huili³, WANG Yanjie¹,
QIU Hongwei³, WANG Demei¹, LEI Junjie⁴, ZHANG Yongqiang⁴, YANG Yushuang¹,
ZHAO Guangcai¹, CHANG Xuhong¹

(1. Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China; 2. College of Agronomy and Biotechnology, Hebei Normal University of Science and Technology/Hebei Key Laboratory of Crop Stress Biology, Changli, Hebei 066004, China; 3. Shijiazhuang Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang Hebei 051530, China; 4. Research Institute of Grain Crops, Xinjiang Academy of Agricultural Science, Urumqi, Xinjiang 830091, China)

收稿日期:2025-04-25

修回日期:2025-07-01

基金项目:国家自然科学基金项目(32071952);财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-03-16);国家重点研发计划项目(2023YFD2300202)

第一作者 E-mail:yeyangchun1393@163.com(叶杨春)

通讯作者 E-mail:changxuhong@caas.cn(常旭虹)

Abstract: To clarify how sowing method and nitrogen(N) rate regulate dry matter(DM) and nitrogen accumulation, remobilization, and their vertical distribution within a wheat canopy, a split-plot field experiment was conducted in Zhaoxian Experimental Base of Shijiazhuang Academy of Agriculture and Forestry Sciences from 2022 to 2024. A winter wheat cultivar Lunxuan 103 was used as the test material. Two planting methods of uniform tridimensional sowing and conventional strip sowing were set up in the main plot, and four nitrogen application rates of 0, 180, 240 and 300 kg · hm⁻² were set up in the subplot. At anthesis and maturity, aboveground organs were sampled by canopy layers at 20 cm intervals from top to bottom(H1—H4) to quantify DM and N accumulation, pre-anthesis remobilization amount and efficiency, and their contributions to grain. The results indicate that compared with conventional row planting, tridimensional uniform sowing significantly increased plant dry weight at anthesis, pre-anthesis DM and nitrogen transport, transport efficiency, and contribution to grain yield, while post-flowering DM, nitrogen accumulation, and contribution to grain yield were somewhat reduced. The allocation ratio of DM and nitrogen to stem and leaf sheath and leaves increased at anthesis, whereas the allocation ratio to spike rachis and glume decreased at maturity. Compared with conventional strip sowing, under uniform tridimensional sowing, the pre-flowering DM and nitrogen transport in stem and leaf sheath of layers H1 to H4 increased by 14.84% and 21.97%, 24.19% and 16.89%, 16.85% and 28.27%, 11.31% and 24.27%, respectively; for leaves, pre-flowering DM and nitrogen transport increased by 33.65% and 17.63%, 16.17% and 10.63%, 28.16% and 8.20%, and 23.81% and 22.57%, respectively. The increase in pre-flowering DM and nitrogen transport efficiency of stem and leaf sheath in different vertical layers under tridimensional uniform sowing compared to conventional strip sowing followed the order H2>H4>H1>H3 and H3>H2>H1>H4, respectively; for leaves, the increase in pre-flowering DM ranked as H3>H1>H4>H2. As nitrogen application increased, grain weight, dry matter transport, and dry matter and nitrogen transport efficiency in both planting methods first increased and then decreased, with the maximum observed under the 240 kg · hm⁻² nitrogen application; post-flowering DM accumulation, grain nitrogen accumulation, and nitrogen transport generally showed an upward trend. In summary, uniform tridimensional sowing mainly promotes increases in grain dry weight and nitrogen accumulation by enhancing the redistribution capacity of dry matter and nitrogen in the middle and upper layers(stem and leaf sheath of H2 and H3) and the middle and lower layers(leaves of H3 and H4). Under the conditions of this experiment, 240 kg · hm⁻² was the optimal nitrogen application rate.

Keywords: Wheat; Tridimensional uniform sowing; Nitrogen application rate; Dry matter; Nitrogen

小麦作为重要粮食作物之一,其产量提升对保障粮食安全起着重要作用^[1]。小麦干物质和氮素的积累、转运及分配特性决定产量与品质的形成^[2-4],探究干物质和氮素的积累、转运和再分配过程对小麦高产优质高效生产至关重要。干物质和氮素在群体中的分布特征受品种、气候条件、田间栽培管理措施等因素的影响,其中栽培措施在影响干物质和氮素分布及花后转运方面较为明显^[5-8]。籽粒干物质一部分来自直接分配给籽粒的开花后光合同化物,一部分来自开花前暂时储存在营养器官中干物质的重新分配^[9]。光合同化物和重新分配的干物质以及对籽粒产量的相对贡

献可能因栽培措施的不同而有所差异,例如播种方式和施氮量。有研究表明,穴播小麦全生育期地上部平均干物质质量高于条播和撒播;与宽幅条播相比,窄幅条播开花后营养器官干物质积累量及干物质在籽粒中的积累量分别增加 45.59%和 19.44%;窄幅条播的花后干物质同化量及其对籽粒产量的贡献率高于穴播和撒播^[10];此外,适宜施氮量能够延缓叶片衰老,延长有效光合期,从而增加开花后同化物积累^[11]。氮素作为小麦生长过程中需求量最大的营养元素,其供应水平通过影响叶片光合效率而直接影响干物质的积累、氮素吸收同化及转运分配。籽粒氮素积累量来源于

花后植株对土壤中氮的吸收和营养器官中氮素的再分配^[12-13]。尽管较高的再分配比例有助于提升籽粒氮素含量,但也可能造成叶片氮素含量下降,加速衰老^[14]。这种平衡过程是由小麦植株从土壤中吸收的氮量调节,因此植株的氮素积累和再分配与施氮量存在一定的关系。适宜施氮量能增强土壤氮供应,减少对再分配的依赖,维持功能叶片的光合能力,从而实现氮素再分配与干物质积累之间的协调^[15]。立体匀播作为一种新型播种方式,可使小麦植株呈现均匀的分布状态,优化个体生长环境,改善中下部叶片的遮光问题,从而增强植株干物质积累并促进营养器官向籽粒的物质转运^[16-17]。然而,由于小麦冠层分布本身具有明显的垂直异质性,且立体匀播在群体结构上具有特定优势,不同层次器官干物质及氮素积累与转运的响应特征仍缺乏系统研究。目前大多数研究主要集中在传统条播下小麦整株干物质与氮素的积累与再分配,关于干物质和氮素在不同器官中的垂直分布和再分配模式以及施氮量和播种方式对其调控机制

的研究较少。因此,本研究旨在从植株和器官两个不同的角度定量揭示小麦干物质和氮素的积累、分配和再分配特征,同时解析小麦不同空间层次营养器官干物质和氮素垂直再分配对不同施氮量和播种方式的动态响应及两种播种方式间的具体差异,从而阐明不同栽培措施下小麦干物质及氮素积累与转运的规律,为构建小麦高产优质高效栽培模式提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于 2022—2024 年在石家庄市农林科学研究院赵县实验基地(37°27'N, 113°30'E)进行。试验地属于黄淮冬麦区,土壤类型为壤土,0~20 cm 土壤有机质含量 19.9 g·kg⁻¹,全氮含量 1.2 g·kg⁻¹,碱解氮含量 103.2·mg·kg⁻¹,有效磷含量 33.4 mg·kg⁻¹,速效钾含量 248.2 mg·kg⁻¹,土壤 pH 值 7.4。小麦生育期内试验点平均温度与降水量变化见图 1。

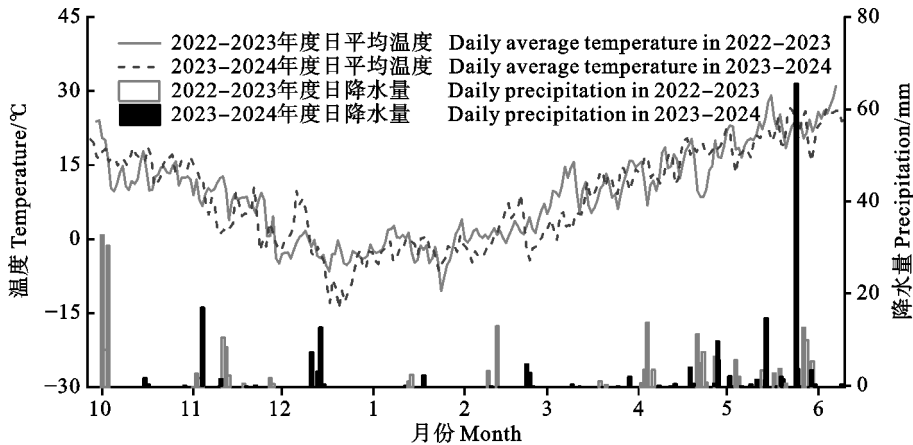


图 1 2022—2024 年试验点平均温度与降水量
Fig. 1 Average temperature and precipitation of the experimental site during 2022—2024

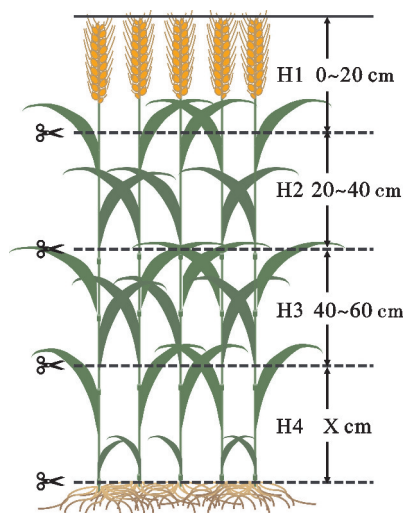
1.2 试验设计

试验采用裂区设计,供试小麦品种为轮选 103。主区为播种方式:立体匀播(B1)和常规条播(B2);副区为施氮量,设置 4 个水平:0 kg·hm⁻²(N0)、180 kg·hm⁻²(N1)、240 kg·hm⁻²(N2)和 300 kg·hm⁻²(N3)。氮肥采用基施与拔节期追施各 50%,追肥随灌水进行,灌水量为 750 m³·hm⁻²。每处理 3 次重复,小区面积 70 m²,基本苗 300 万株·hm⁻²,统一基施 P₂O₅ 135 kg·hm⁻² 和 K₂O 112.5 kg·hm⁻²,其他管理措施同

一般高产田。两个年度播种时间分别为 2022 年 10 月 14 日和 2023 年 10 月 15 日,收获时间分别为 2023 年 6 月 10 日和 2024 年 6 月 5 日。

1.3 测定方法

于小麦开花期和成熟期,各小区选取长势均匀且具有代表性地段的 0.5 m² 全部植株,采用大田切片法将小麦植株地上部分由顶端往下按每 20 cm 分层(详见图 2),开花期 H1 层按照茎秆+叶鞘、叶片和穗轴+颖壳部位分开,其他各层按照茎秆+叶鞘和叶片部位分开,成熟期 H1 层按照



从上至下分别为 H1、H2、H3 和 H4，其中 H1、H2 和 H3 层高度均为 20 cm，H4 层实际高度由取样样点平均株高减去 H1、H2 和 H3 的高度。

From top to bottom are H1, H2, H3, and H4, respectively, where the height of H1, H2, and H3 layers is 20 cm, and the actual height of H4 layer is determined by subtracting the height of H1, H2, and H3 from the average plant height of sampling points.

图2 小麦田间分层示意图

Fig. 2 Field layered schematic diagram of wheat

茎秆+叶鞘、叶片、穗轴+颖壳和籽粒部位分开，其他各层按照茎秆+叶鞘和叶片部位分开。样品于 105 °C 下杀青 30 min，再于 80 °C 下烘干至恒重称重，计算干物质质量。样品粉碎过 80 目筛，采用凯氏定氮法测定样品全氮含量。计算公式如下：

花前营养器官干物质转运量=开花期营养器官干物质积累量-成熟期营养器官干物质积累量

花前营养器官干物质转运效率=花前营养器官干物质转运量÷开花期营养器官干物质积累量

花前营养器官干物质转运量对籽粒产量贡献率=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=成熟期籽粒干物质积累量-花前营养器官干物质转运量

花后干物质积累对籽粒产量贡献率=花后干物质积累量÷成熟期籽粒干物质积累量×100%

干物质分配比率=不同器官干物质积累量÷整株干物质积累量×100%

某器官(或全株)氮素积累量=该器官(或全株)氮素含量×该器官(或全株)干物质积累量

氮素分配比例=不同器官氮素积累量÷整株

氮素积累量×100%

花前营养器官氮素转运量=开花期营养器官氮素积累量-成熟期营养器官氮素积累量

花前营养器官氮素转运率=花前营养器官氮素转运量÷开花期营养器官氮素积累量

花前营养器官氮素转运量对籽粒氮素贡献率=花前营养器官氮素转运量÷籽粒氮素积累量×100%

花后氮素积累量=籽粒氮素积累量-花前营养器官氮素转运量

花后氮素积累对籽粒氮素贡献率=花后氮素积累量÷籽粒氮素积累量×100%

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2021 和 Origin 2021 Pro 进行数据整理与作图，使用 DPS 20.05 统计软件进行方差分析，并采用新复极差法 (Duncan) 进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同处理对冬小麦干物质积累与转运的影响

由表 1 可知，与 B2 相比，B1 条件下两年度小麦开花期干物质积累量、成熟期营养器官干物质积累量、籽粒产量、花前营养器官干物质转运量 (Pre-DT)、转运效率 (Pre-DTE) 及对籽粒产量贡献率 (Pre-DCR) 平均值分别提高 6.73%、4.02%、4.89%、14.65%、7.00% 和 9.89%，而花后干物质积累量 (Post-DA) 及其对籽粒产量贡献率 (Post-DCR) 平均值分别降低 1.83% 和 5.86%。相同施氮量下，B1 条件下开花期干物质积累量、Pre-DT、Pre-DTE 及 Pre-DCR 平均值均显著高于 B2，其中开花期干物质积累量显著提高 5.21%~8.42%。相同播种方式下，随施氮量的增加，开花期和成熟期植株干物质积累量均呈上升趋势，其中 N1、N2 和 N3 的开花期植株干物质积累量平均值较 N0 分别提高 45.34%、51.88% 和 47.00%；籽粒产量、Pre-DTE、Pre-DCR 和 Post-DA 均呈先升后降趋势，多数情况下在 N2 条件下最高，但 2023—2024 年 Post-DA 在 N1 条件下最高；Pre-DCR 在 B1 条件下呈上升趋势，而在 B2 条件下呈先升后降趋势；Post-DCR 在 B1、B2 条件下均呈下降趋势。表明 B1N2 处理可显著增强冬小麦花前同化物的积累及其在开花后向籽粒的转运效率，有利于籽粒产量的形成。

表 1 不同处理对冬小麦干物质积累与转运的影响

Table 1 Effect of different treatments on dry matter accumulation and translocation of winter wheat

年份 Year	处理 Treatment	开花期干物质 积累量 Dry matter accumulation during the flowering period/ (kg·hm ⁻²)	成熟期营养器官 干物质积累量 Dry matter accumulation of mature vegetative organs/ (kg·hm ⁻²)	籽粒产量 Grain yield/ (kg·hm ⁻²)	Pre-DT/ (kg·hm ⁻²)	Pre-DTE/%	Pre- DCR/%	Post-DA/ (kg·hm ⁻²)	Post- DCR/%
2022—2023	B1N0	9 518.55g	7 052.64g	7 359.40f	2 465.91e	25.91bc	33.51f	4 893.49c	66.49b
	B1N1	13 237.94e	9 713.61e	9 078.40d	3 524.33c	26.62b	38.84d	5 554.07a	61.16d
	B1N2	15 478.33c	11 180.44c	9 856.36a	4 297.89a	27.77a	43.61b	5 558.47a	56.39f
	B1N3	16 075.51a	11 661.23b	9 623.44b	4 414.28a	27.46a	45.88a	5 209.16b	54.12g
	B2N0	8 712.70h	6 617.62h	6 958.73g	2 095.08f	24.05d	30.12g	4 863.65c	69.88a
	B2N1	12 581.00f	9 493.84f	8 460.13e	3 087.16d	24.53d	36.51e	5 372.97b	63.49c
	B2N2	14 444.59d	10 616.68d	9 348.37c	3 827.91b	26.50b	40.95c	5 520.46a	59.05e
	B2N3	15 884.19b	11 893.12a	9 296.20c	3 991.07b	25.13cd	42.95b	5 305.13b	57.05f
2023—2024	B1N0	8 248.00f	6 253.54f	7 397.70d	1 994.46f	24.18e	26.97e	5 403.24c	73.03a
	B1N1	12 202.52d	8 680.78e	9 132.86bc	3 521.74d	28.86a	38.57c	5 611.12b	61.43c
	B1N2	15 689.75b	11 134.11b	9 533.09a	4 555.64a	29.04a	47.81a	4 977.45d	52.19e
	B1N3	15 894.82a	11 514.60a	9 481.12a	4 380.21b	27.56c	46.21a	5 100.91c	53.79e
	B2N0	7 681.89g	5 785.36g	7 152.61d	1 896.54f	24.69e	26.51e	5 256.07c	73.49a
	B2N1	11 600.42e	8 609.48e	8 959.08c	2 990.94e	25.78d	33.40d	5 968.14a	66.60b
	B2N2	14 303.08c	10 329.03d	9 222.75b	3 974.05c	27.78bc	43.09b	5 248.70c	56.91d
	B2N3	14 428.60c	10 863.38c	9 154.05b	3 565.21d	24.71e	38.95c	5 588.84b	61.05c

同列数值后不同字母代表同一年份不同处理间差异显著($P<0.05$)。Pre-DT、Pre-DTE 和 Pre-DCR 分别指花前营养器官干物质转运量、转运效率及其对籽粒产量的贡献率。Post-DA 和 Post-DCR 分别指花后干物质积累量及其对籽粒产量的贡献率。下同。

Different letters after the values within same column indicate significant differences among different treatments in the same year($P<0.05$). Pre-DT, Pre-DTE and Pre-DCR refer to the pre-anthesis dry matter translocation amount, translocation efficiency and its contribution rate to grain yield from vegetative organs, respectively. Post-DA and Post-DCR refer to the post-anthesis dry matter accumulation amount and its contribution rate to grain yield, respectively. The same in table 2.

2.2 不同处理对小麦氮素积累、转运及对籽粒氮素贡献率的影响

与 B2 相比,B1 条件下两年度小麦花前氮素转运量(Pre-NT)、籽粒氮素积累量和花前氮素对籽粒氮素的贡献率(Pre-NCR)平均值分别提高 16.52%、8.01%和 7.79%,而 Post-NA 和 Post-NCR 平均值分别降低 4.60%和 2.65%(表 2)。各施氮水平下,B1 的花前氮素的转运效率(Pre-NTE)均显著高于 B2,但增幅随施氮量增加整体上呈下降趋势。与 B2 相比,2022—2023 年 B1 条件下 N0、N1、N2、N3 的 Pre-NTE 增幅分别为 13.90%、11.27%、2.28%和 2.55%,2023—2024 年增幅分别为 1.28%、4.08%、7.62%和 4.18%。相同播种方式下,随施氮量的增加,籽粒氮素积累量和 Pre-NT 均显著增加,且 N2 与 N3 间差异不显著,但均显著高于 N0 和 N1;Pre-NTE 和 Pre-NCR 均呈先增后降趋势,在 N2 下达到最大值;Post-NA 和 Post-NCR 均呈下降趋势。表明合适施氮量下立体匀播较常规条播可以增强冬小麦花前氮素的再分配效率,提高氮素向籽粒的贡献比

例,增加籽粒氮素积累量。

2.3 不同处理对小麦主要器官干物质及氮素分配的影响

由图 3 可知,与 B2 相比,B1 条件下开花期茎秆+叶鞘和叶片干物质分配比例两年度平均值分别提高 2.04%和 4.73%,其中叶片差异显著,而穗轴+颖壳干物质分配比例显著降低 13.13%;成熟期茎秆+叶鞘和叶片干物质分配比例分别提高 2.17%和 1.88%,而穗轴+颖壳干物质分配比例显著降低 8.87%,籽粒干物质分配比例在两种播种方式间差异不显著。随着施氮量的增加,两种播种方式下开花期茎秆+叶鞘和穗轴+颖壳的干物质分配比例呈下降趋势,而叶片分配比例呈上升趋势;成熟期茎秆+叶鞘和叶片干物质分配比例呈增加趋势,而籽粒分配比例呈降低趋势。这表明立体匀播下开花期茎秆+叶鞘和叶片干物质分配比例较高,有利于增强光合作用,促进干物质的积累,同时降低成熟期干物质在穗轴+颖壳的分配比例,促进植株花后干物质从穗轴+颖壳向籽粒中转移。

表 2 不同处理对冬小麦氮素积累、转运及对籽粒氮素贡献的影响

Table 2 Effect of different treatments on nitrogen accumulation, transport, and contribution rate to grain N in wheat							
年份 Year	处理 Treatment	籽粒氮素积累量 Grain nitrogen accumulation/ (kg·hm ⁻²)	Pre-NT/ (kg·hm ⁻²)	Pre-NTE/%	Pre-NCR/%	Post-NA/ (kg·hm ⁻²)	Post-NCR/%
2022—2023	B1N0	150.75f	68.69f	76.65a	45.62e	82.06a	54.38b
	B1N1	212.34d	138.92d	76.13a	65.43c	73.43c	34.57d
	B1N2	253.22a	188.80a	70.44b	74.68a	64.42f	25.32f
	B1N3	242.07b	169.88b	67.71c	70.20b	72.19d	29.80e
	B2N0	139.41g	57.72g	67.30d	41.41f	81.69a	58.59a
	B2N1	191.16e	114.14e	68.41c	59.70d	77.02b	40.30c
	B2N2	225.19c	157.00c	68.87c	69.72b	68.19e	30.28e
	B2N3	229.85c	158.67c	66.02a	69.03b	71.18d	30.97de
2023—2024	B1N0	155.87f	55.80f	71.21c	35.81f	100.07a	64.19b
	B1N1	213.08d	118.91d	72.43b	55.80d	94.18a	44.20d
	B1N2	248.50a	195.32a	74.18a	78.60a	53.18d	21.40g
	B1N3	255.54a	191.07a	69.63de	74.77b	64.47c	25.23f
	B2N0	147.88g	47.72g	70.31cd	32.31g	100.16a	67.69a
	B2N1	200.67e	105.09e	69.59de	52.39e	95.58a	47.61c
	B2N2	226.97c	162.52c	68.92e	71.60c	64.45c	28.40e
	B2N3	240.56b	168.90b	66.87f	70.24c	71.67b	29.76e

Pre-NT、Pre-NTE 和 Pre-NCR 分别指花前营养器官氮素转运量、转运效率及其对籽粒氮素的贡献率。Post-NA 和 Post-NCR 分别指花后氮素积累量及其对籽粒氮素的贡献率。

Pre-NT, Pre-NTE and Pre-NCR refer to the pre-anthesis nitrogen translocation amount, translocation efficiency and its contribution rate to grain nitrogen from vegetative organs, respectively. Post-NA and Post-NCR refer to the post-anthesis nitrogen accumulation amount and its contribution rate to grain nitrogen, respectively.

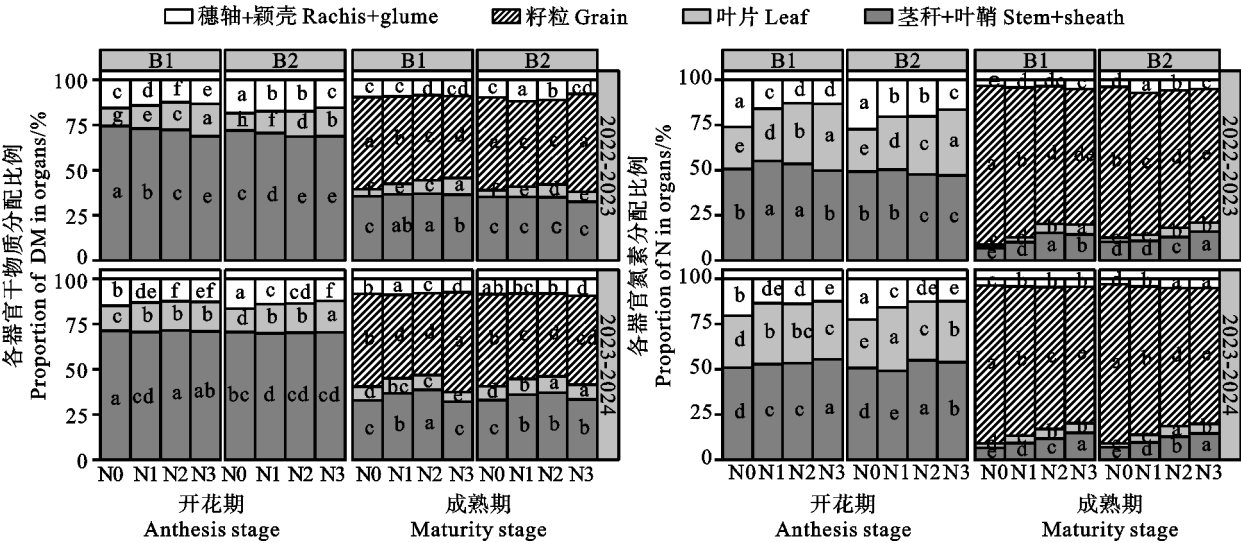


图 3 小麦开花期和成熟期不同处理下植株不同器官干物质及氮素分配比例

Fig. 3 The proportion of DM and N in different plant organs to total DM and total N of the whole plant under different treatments at anthesis and maturity stages

图柱上不同字母代表同一年份不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。图 4~图 9 同。

Different letters above the bars indicate significant differences among different treatments in the same year ($P < 0.05$). The same in figure 4—figure 9.

氮素吸收与分配规律与干物质变化基本一致。与 B2 相比,B1 条件下开花期茎秆+叶鞘和叶片氮素分配比例两年平均值分别提高 4.56% 和 0.56%,前者差异显著;而穗轴+颖壳氮素分配比例显著降低 13.60%。成熟期的茎秆+叶鞘、叶片和穗轴+颖壳的氮素分配比例分别降低 6.55%、4.21%和 15.26%,籽粒氮素分配比例显著提高 2.02%。随着施氮量的增加,两种播种方式下开花期茎秆+叶鞘和穗轴+颖壳氮素分配比例呈降低的趋势,而叶片则逐渐增加;成熟期的茎

秆+叶鞘和叶片氮素分配比例呈增加的趋势,籽粒所占比例则降低。这说明立体匀播降低了小麦茎秆+叶鞘、叶片和穗轴+颖壳的氮素分配比例,提高了籽粒氮素的分配比例,促进了植株氮素从茎秆+叶鞘、叶片和穗轴+颖壳向籽粒中转移。

2.4 不同处理对小麦群体内干物质垂直分布的影响

由图 4 可知,两年度各处理下茎秆+叶鞘花前干物质转运量在群体内垂直分布大小均表现为 H4>H3>H2>H1。与 B2 相比,B1 条件下花前群体内各冠层高度干物质转运量均有不同程度增加,两年度平均值增幅表现为 H2>H3>H1>H4,分别为 24.19%、16.85%、14.84%和 11.31%。其中,B1 条件下 H2 和 H3 层在 N1、N2 和 N3 时增

加均显著。各处理叶片花前干物质转运量在群体内垂直分布大小总体表现为 H3>H4>H2>H1 (除 2023—2024 年常规条播 N0 处理外)。与 B2 相比,B1 条件下群体各叶片干物质层转运量两年度平均增幅大小表现为 H1>H3>H4>H2,分别为 33.65%、28.16%、23.81%和 16.17%。相同施氮量下,各冠层高度的叶片干物质转运量整体上表现为立体匀播显著高于常规条播。随施氮量的增加,两种播种方式下群体内 H1、H2 和 H3 层茎秆+叶鞘花前干物质转运量呈现先增后降趋势,均在 N2 条件下最大;各层叶片干物质转运量呈增加趋势,在 N2 或 N3 条件下达到最大。由此可见,立体匀播主要通过提高 H2 和 H3 层茎秆+叶鞘及 H1 和 H3 层叶片干物质转运量来实现总转运量的增加。

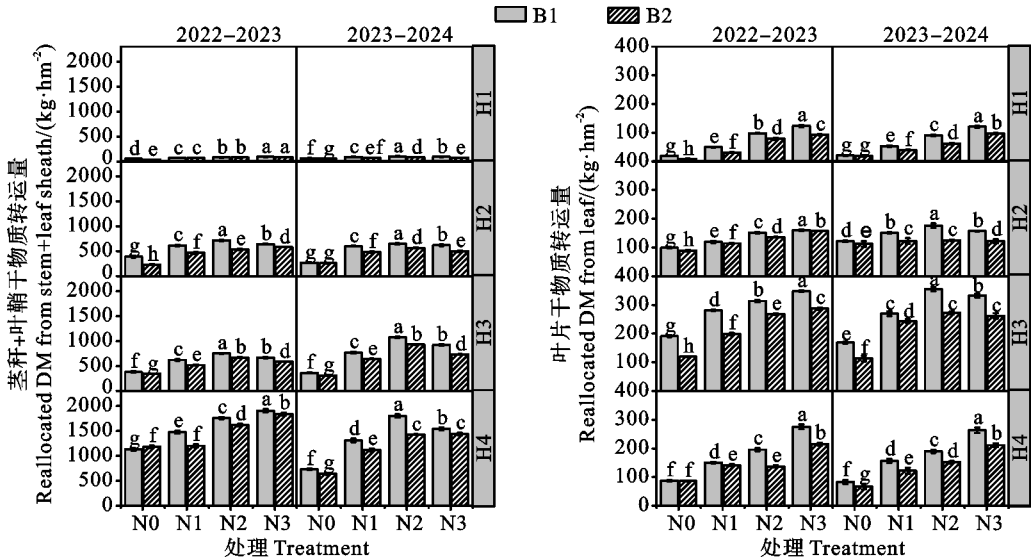


图 4 不同处理不同冠层高度茎秆+叶鞘及叶片干物质转运量

Fig. 4 Amount of stem and leaf sheath and leaf DM reallocated from individual canopy height under different treatments

由图 5 可知,除 2022—2023 年 B1N0 处理及 2023—2024 年度 B1N2、B2N2、B1N3 和 B2N3 处理外,其他处理茎秆+叶鞘花前干物质转运效率在群体内垂直分布大小均表现为 H4>H2>H3>H1。2022—2023 年,与 B2 相比,B1 处理群体 H2 和 H4 层茎秆+叶鞘的花前干物质转运效率分别增加 3.12 和 3.15 个百分点,H1 和 H3 层叶片花前干物质转运效率分别提高 5.74 和 9.11 个百分点;2023—2024 年度,各层茎秆+叶鞘花前干物质转运效率增幅大小均表现为 H3>H2>H4>H1,增幅分别为 2.24、2.11、2.01 和 1.17 个百分点,叶片的开花前干物质转运效率的增幅

大小均表现为 H3>H4>H2>H1,增幅分别为 5.79、3.80、3.76 和 2.26 个百分点。其中,B1 条件下 H3 层开花前叶片干物质转运效率在各施氮量处理下均显著高于 B2。随施氮量的增加,两种播种方式下 H1 层茎秆+叶鞘干物质转运效率均呈下降趋势,H3 和 H4 层均呈先增后降趋势,均在 N2 处理下达到最高;H4 层叶片干物质转运效率均呈上升趋势,H2 层均呈下降趋势。综合来看,合适的施氮量能够提高 H3 和 H4 层茎秆+叶鞘及 H4 层叶片干物质转运效率,立体匀播主要通过提高 H2 和 H4 层茎秆+叶鞘及 H3 层叶片干物质转运效率来实现总转运量的增加。

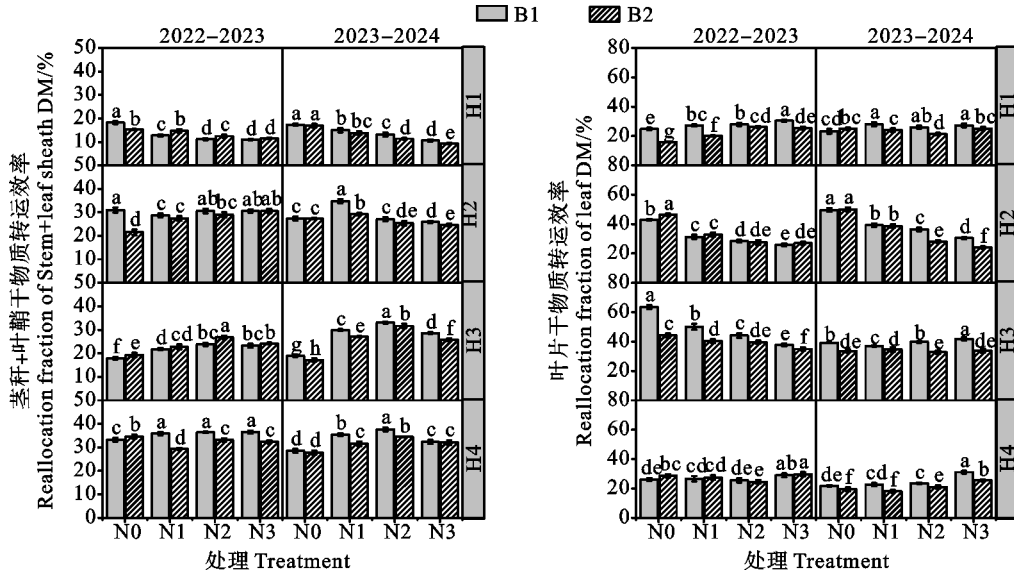


图 5 不同处理下不同冠层高度茎秆+叶鞘及叶片干物质转运效率

Fig. 5 Reallocation fraction of stem and leaf sheath and leaf DM from individual canopy height under different treatments

由图 6 可知,各处理茎秆+叶鞘干物质转运对籽粒产量贡献率在群体内垂直分布大小均表现为 $H4 > H3 > H2 > H1$ 。与 B2 相比,B1 条件下群体 H1~H4 层茎秆+叶鞘花前干物质转运对籽粒产量贡献率两年度平均值分别提高 0.09、0.99、0.79 和 0.90 个百分点,其中 H2 层在 N1、N2 和 N3 处理下均显著增加。除 N0 之外,其他施氮水平下叶片干物质转运对籽粒产量贡献率在群体内垂直分布大小均表现为 $H3 > H4 > H2 > H1$ 。与 B2 相比,B1 条件下群体 H1~H4 层叶片的花前干物质转运对籽粒产量贡献率两年度平均

值分别提高 0.17、0.15、0.59 和 0.29 个百分点,其中 H1、H3 和 H4 层在 N2 和 N3 时增加均显著。随施氮量的增加,两播种方式下群体 H2 和 H3 层茎秆+叶鞘干物质转运对籽粒产量贡献率均呈现先增后降趋势,均在 N2 条件下最高;各层叶片的干物质转运对籽粒产量贡献率均呈上升趋势,在 N2 或 N3 条件下最高。总之,适宜的施氮量主要提高了 H3 和 H2 层茎秆+叶鞘干物质转运对籽粒产量贡献率,立体匀播主要提高 H2 层茎秆+叶鞘和 H3 及 H4 层叶片干物质转运对籽粒产量贡献率。

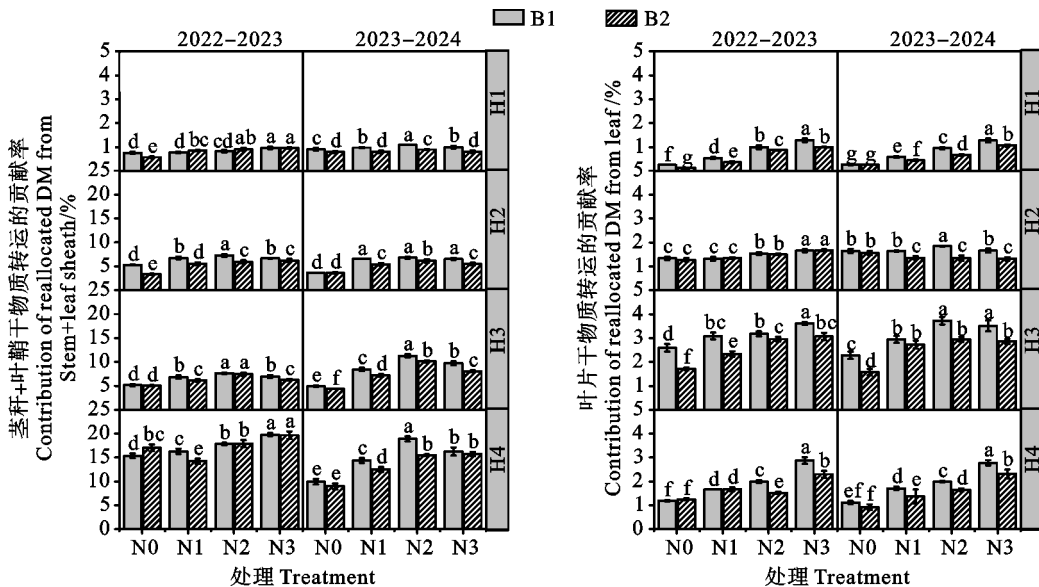


图 6 不同处理下不同冠层高度茎秆+叶鞘及叶片干物质转运对籽粒产量贡献率

Fig. 6 Contribution of reallocated stem and leaf sheath and leaf dry matter from individual canopy height under different treatments

2.5 不同处理对小麦群体内氮素垂直分布的影响

由图 7 可知,2022—2023 年各处理下小麦群体各层茎秆+叶鞘花前氮素转运量的垂直分布表现不一致;而 2023—2024 年各处理大小均表现为 H3>H2>H4>H1。B1 条件下两年群体各层茎秆+叶鞘氮素转运量较 B2 的增幅分别为 28.87%、24.27%、21.97%和 16.89%。其中,立体匀播 H3 和 H4 层在 N1、N2 和 N3 条件下增加均显著。不同处理下群体各层叶片花前氮素转运量在年度间存在差异,2022—2023 年均表现为 H3>

H2>H4>H1,2023—2024 年均表现为 H3>H2>H1>H4。B1 条件下群体各层叶片的氮素转运量较 B2 增幅分别为 22.57%、17.63%、10.63%和 8.20%。B1 条件下各层叶片的氮素转运量在 N2 处理下均显著高于 B2。随施氮量的增加,各层茎秆+叶鞘和叶片氮素转运量呈增加的趋势,N2 和 N3 的转运量均显著高于 N0 和 N1。这说明立体匀播主要通过提高 H3 和 H4 层茎秆+叶鞘及 H4 层叶片的氮素转运能力,显著增加了群体氮素向籽粒转运的总量。

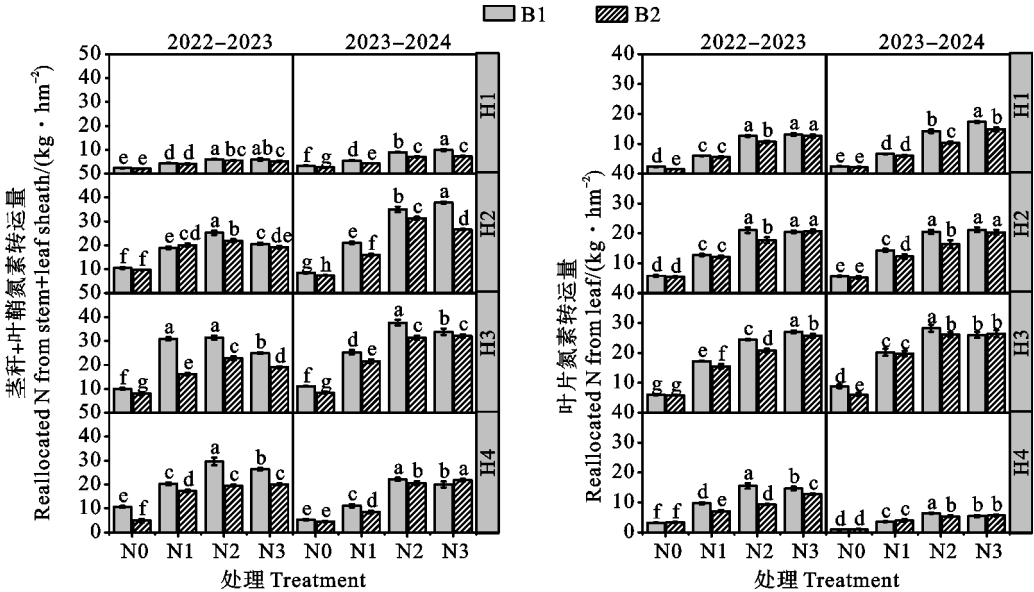


图 7 不同处理下不同冠层高度茎秆+叶鞘及叶片氮素转运量

Fig. 7 Amount of stem and leaf sheath and leaf N reallocated from individual canopy height under different treatments

由图 8 可知,各处理群体各层茎秆+叶鞘和叶片花前氮素转运效率均表现为 H2 和 H3 层高于 H1 和 H4 层。与 B2 相比,B1 条件下 H1~H4 层茎秆+叶鞘的氮素转运效率两年平均值增幅分别为 1.41、1.61、3.12 和 10.07 个百分点;叶片的氮素转运效率增幅分别为 1.47、1.02、3.05 和 0.64 个百分点。B1 条件下 H3 层叶片花前氮素转运量在 N0、N1 和 N2 时均显著高于 B2。随施氮量的增加,两播种方式下 H1 层茎秆+叶鞘氮素转运效率均呈下降趋势,H2、H3 和 H4 层氮素转运效率均呈先增后降趋势,在 N1 或 N2 条件下达到最高;H1 和 H2 层叶片氮素转运效率随施氮量的增加均呈降低趋势,H3 和 H4 层的变化趋势在播种方式和年度间存在差异。表明立体匀播提高了 H3 和 H4 层茎秆+叶鞘及 H3 层叶片的氮素转运效率。

由图 9 可知,2022—2023 年群体各层茎秆+

叶鞘的花前氮素转运对籽粒氮素贡献率在播种方式和施氮量间存在差异。2023—2024 年度,各处理茎秆+叶鞘和叶片花前氮素转运对籽粒氮素贡献率均表现为 H2 和 H3 大于 H1 和 H4。B1 条件下 H1~H4 层茎秆+叶鞘氮素转运对籽粒氮素贡献率两年度平均值较 B2 的增幅分别为 0.73、0.31、2.05 和 1.27 个百分点,叶片的氮素转运对籽粒氮素贡献率增幅分别为 0.34、0.14、0.07 和 0.35 个百分点。B1 条件下 H3 层氮素转运对籽粒氮素贡献率在 N0、N1 和 N2 时均显著高于 B2。随施氮量的增加,两播种方式下各层茎秆+叶鞘和叶片的氮素转运对籽粒氮素贡献率整体上均呈增加的趋势,在 N2 或 N3 条件下达到最高,N2 和 N3 显著高于 N0 和 N1。这表明适宜的施氮量主要增强了 H2 和 H3 的茎秆+叶鞘对籽粒的氮素供给能力,立体匀播主要提高了 H3 茎秆+叶鞘氮素转运对籽粒氮素贡献率。

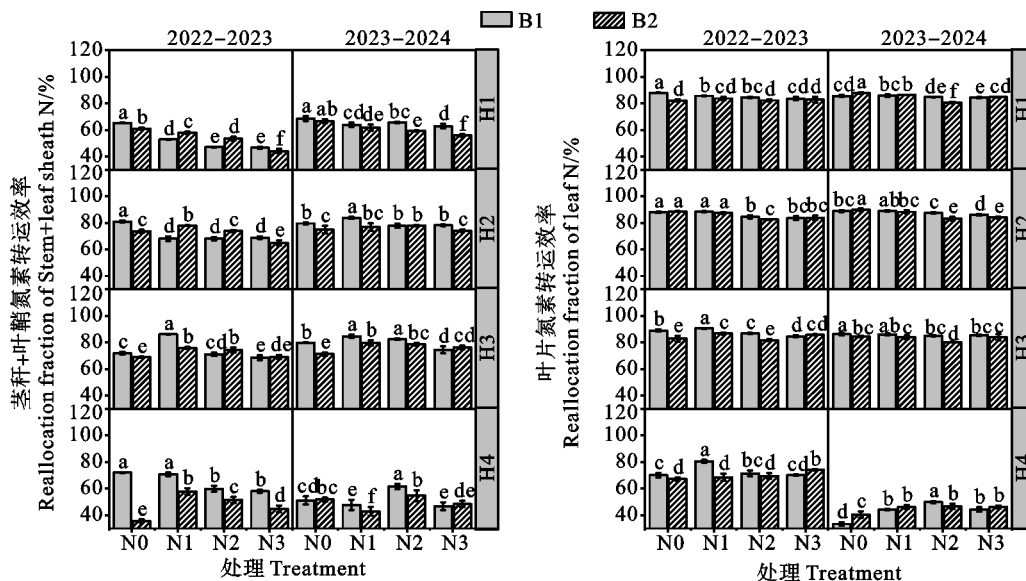


图 8 不同处理下不同冠层高度茎秆+叶鞘及叶片氮素转运效率

Fig. 8 Reallocation fraction of stem and leaf sheath and leaf N from individual canopy height under different treatments

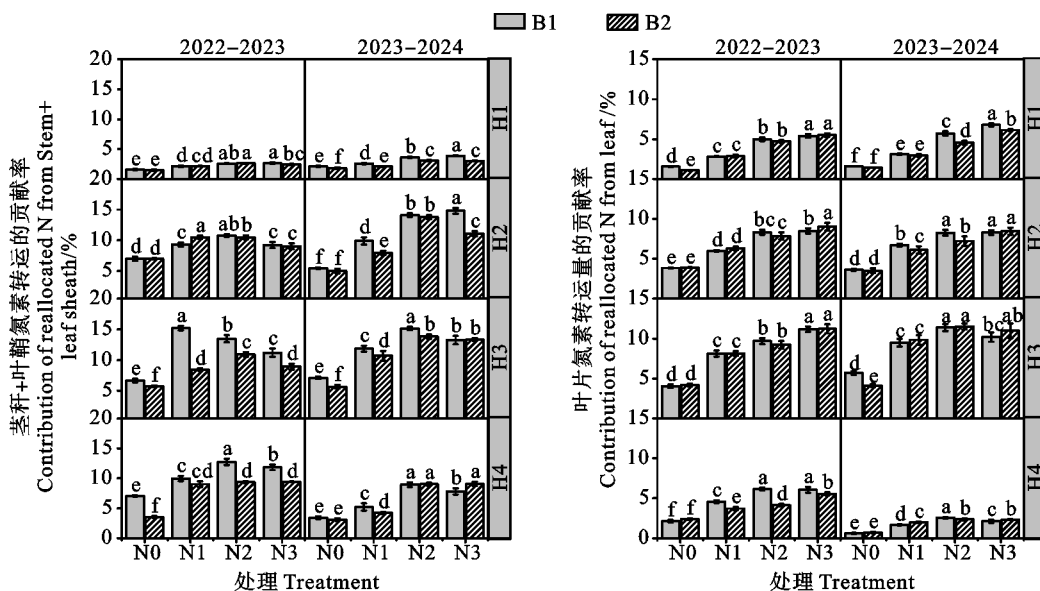


图 9 不同处理下不同冠层高度茎秆+叶鞘及叶片氮素转运量对籽粒贡献率

Fig. 9 Contribution of reallocated stem and leaf sheath and leaf N from individual canopy height under different treatments

3 讨论

3.1 播种方式与施氮量对冬小麦干物质积累与转运的影响

小麦产量的形成与源、库特征及干物质分配规律有密切关系,播种方式通过改变群体空间布局与冠层结构,影响光合产物的形成与转运^[17]。干物质生产与作物产量形成密切相关,优化干物质积累与合理分配有利于产量的提高^[18]。已有研究表明,立体匀播可增加小麦营养器官干物质

积累,降低成熟期营养器官分配比例,并促进同化物向籽粒转运,从而提高籽粒产量^[19]。本研究中,相同施氮量下,立体匀播下小麦植株开花期营养器官干物质积累量较常规条播提高(各施氮水平增幅约为 5.21%~8.42%),花前营养器官干物质转运量提高 11.74%~16.39%,且干物质转运效率及其对籽粒产量贡献率均高于常规条播,说明立体匀播有利于花前贮藏同化物在花后向籽粒的再分配。这可能是由于立体匀播小麦群体分布更均匀,个体生长和群体构建协调发展,能够均

衡高效利用光热等资源,在干物质积累和转运方面较常规条播更有优势。需要指出的是,立体匀播下 Post-DA 与 Post-DCR 并未同步提高,其增产效应更可能主要来自花前贮藏同化物转运的增强。施氮水平是影响小麦干物质生产与转运的关键因素^[20]。适量施氮可延缓叶片衰老,提高光合持续期,并增强营养器官贮藏同化物向籽粒的转运,从而促进籽粒灌浆与增产^[21-22]。有研究认为,适量增施氮肥能够促进开花前营养器官贮存的干物质在花后向籽粒的转运,在施氮量为 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,小麦籽粒产量和花后干物质积累量达到最大值^[23-24]。本研究结果显示,施氮量 $0 \sim 240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 范围内,增加施氮量显著提高开花期与成熟期干物质积累,当施氮量超过 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,干物质积累量无显著变化。这与人研究结论相似。综合两年结果,适量增施氮肥利于小麦花前营养器官贮存的干物质在开花后向籽粒的转运,从而提高籽粒产量。

3.2 播种方式和施氮量对小麦氮素积累、转运及对籽粒氮素贡献的影响

播种方式对小麦植株氮素吸收具有显著影响。有研究表明,宽幅播种较于传统条播,显著增加氮素总吸收量,其中对开花前营养器官氮素向籽粒的转运量及转运效率无显著影响,但其对籽粒氮素的贡献率相应降低,而显著提高花后氮素积累量及其对籽粒氮素的贡献率^[25-26]。开花前营养器官氮素转运是籽粒氮素积累的主要来源^[27]。王培如等^[28]研究认为,与常规条播相比,宽幅播种能提高开花前植株氮素转运量、开花后植株氮素吸收量及其对籽粒的贡献率。在本研究中,相较于常规条播,立体匀播显著提高花前营养器官氮素向籽粒的转运量及转运效率,使开花后氮素吸收量及其对籽粒氮素的贡献率有所降低,但增加籽粒氮素积累量。从成熟期各器官氮素分配比例来看,立体匀播下成熟期营养器官氮素分配比例降低,而籽粒氮素比例提高,从而满足了小麦籽粒对氮素的需求,最终实现小麦增产。施用适量氮肥有利于提高小麦氮素的积累和转运,促进植株对氮肥的吸收与利用。多数研究指出,增施氮肥可提高小麦植株整体的氮素积累总量,但会降低氮素的转运效率和对籽粒的贡献率,进而导致小麦的氮素吸收效率和利用效率下降^[29-30]。本研究中,施氮量在 $0 \sim 240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 范围内,随施氮量的增加,籽粒氮素积累量、开花前营养器官氮

素向籽粒转运量和对籽粒氮素贡献率呈现上升的趋势,而氮素的转运效率则逐渐降低。超过 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施氮量,氮素转运量及转运效率和对籽粒氮素贡献率降低,说明适宜的施氮量利于小麦植株高效吸收和利用氮素,过低或过多的施氮量均不利于小麦的正常生长和氮素的高效利用。

3.3 播种方式和施氮量对小麦主要器官干物质及氮素在群体内垂直分布的影响

不同冠层高度的营养器官由于位置的差异导致其光合速率不同,引起干物质和氮素转运和分配存在差异。本研究结果表明,不同冠层高度的营养器官的干物质和氮素转运量和转运效率存在差异,如茎秆+叶鞘的干物质转运量总体表现为 $H4 > H3 > H2 > H1$,其转运效率表现为 $H4 > H2 > H3 > H1$,氮素转运量和氮素转运效率为 $H2$ 和 $H3$ 层高于 $H1$ 和 $H4$ 层。随施氮量的增加,不同冠层的干物质和氮素转运量也并不是按比例提高。不同冠层高度的叶片干物质和氮素的转运量表现为 $H2$ 和 $H3$ 层高于 $H1$ 和 $H4$ 层。此外,干物质和氮素在冠层内叶片间的垂直再分配格局受播种方式的影响。播种方式的不同会改变植株冠层结构,比如叶片形状和叶片角度。冠层结构的差异影响光合能力,植物体内氮素的转运和再动员能力,受冠层光分布和冠层截留能力的影响;有效光照分布和冠层截留能力由冠层叶片和植物的结构特征决定^[31]。植株叶片紧凑且窄而直立时,尤其是在中、下层,可以改善株间冠层的光、气条件,提高作物的透光率和固定二氧化碳能力,有利于干物质和氮素的转运^[32]。本研究中,立体匀播下 $H2$ 层茎秆+叶鞘和 $H3$ 层叶片的干物质转运量和转运效率均高于常规条播,同时立体匀播下 $H3$ 和 $H4$ 层茎秆+叶鞘及叶片的氮素转运量和转运效率均高于常规条播。这可能是立体匀播优化了小麦植株中下部的结构,改善了内部微环境,导致干物质和氮素转运量显著高于常规条播。花后光合积累的干物质或氮吸收量不能满足籽粒需要时,叶和茎是干物质或氮素向籽粒转运的主要器官。然而,小麦叶片中的氮并不是均匀分布的,冠层中上部叶片的氮素转运减少,叶片含氮量较高。上部叶片具有较高的光合速率和氮利用效率。冠层中光和氮动态之间的高效匹配有利于改善 C 和 N 代谢之间的平衡^[33-34]。施氮量同样影响冠层不同层次的再分配格局。本研究中,在 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施氮水平下,干物质与氮素的转运

量及其对籽粒氮素的相对贡献多表现为较高水平,而当施氮量过低或过高时,营养器官氮素向籽粒的再分配受到抑制,表明适宜施氮有利于形成冠层内“光—氮”较优匹配并维持源库供给,从而促进籽粒物质与氮素积累。

4 结论

在本试验条件下,施氮量在 $0 \sim 240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 范围内可显著提高冬小麦干物质与氮素积累量,并促进花前贮藏同化物与氮素在花后向籽粒再分配;当施氮量由 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-1}$ 提高至 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,干物质积累及氮素转运、贡献率提升不明显甚至下降,综合表现以 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 较为适宜。与常规条播相比,立体匀播能提高小麦植株开花前营养器官干物质和氮素积累量、向籽粒的转运量及转运效率,主要是提高 H2 和 H3 层茎秆+叶鞘、H3 和 H4 层叶片干物质及氮素的转运量和转运效率,增加对籽粒产量和氮素的贡献率,实现籽粒干重和氮素积累量的增加,立体匀播通过优化了冠层结构,改善中下层叶片的遮光问题,提高了中下层茎秆和叶片的干物质和氮素的积累量和转运量,最终提高粒重和籽粒氮素积累量。

参考文献:

- [1] 赵广才,常旭虹,王德梅,等. 小麦生产概况及其发展[J]. 作物杂志,2018(4):1.
ZHAO G C, CHANG X H, WANG D M, *et al.* General situation and development of wheat production [J]. *Crops*, 2018 (4):1.
- [2] 王林林,陈炜,徐莹,等. 氮素营养对小麦干物质积累与转运的影响[J]. 西北农业学报,2013,22(10):86.
WANG L L, CHEN W, XU Y, *et al.* Nitrogen nutrition affects dry matter accumulation and transportation in winter wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2013, 22 (10):86.
- [3] 张军,胡川,周起晖,等. 减氮及有机肥替代对旱地冬小麦干物质积累、转运、分配和产量的影响[J]. 作物学报,2025,51(1):217.
ZHANG J, HU C, ZHOU Q H, *et al.* Effects of nitrogen reduction and organic fertilizer substitution on dry matter accumulation, translocation, distribution, and yield of dryland winter wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2025, 51(1):217.
- [4] 张子豪,李想成,吴昊天,等. 氮肥运筹对弱筋小麦产量、品质及氮素利用的影响[J]. 华北农学报,2022,37(S1):219.
ZHANG Z H, LI X C, WU H T, *et al.* Effects of nitrogen application on yield, quality and nitrogen utilization of weak gluten wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2022, 37 (S1):219.
- [5] 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):713.
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):713.
- [6] 李丽,杨德龙,栗孟飞,等. 不同水分条件下源库调节对小麦营养器官可溶性碳水化合物和籽粒千粒重的影响[J]. 应用生态学报,2013,24(7):1888.
LI L, YANG D L, LI M F, *et al.* Effects of source-sink regulation on water soluble carbohydrates of vegetative organs and thousand-grain mass of wheat under different water conditions [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(7):1888.
- [7] 王晨,唐江华,徐文修,等. 宽窄行播种对滴灌冬小麦干物质积累及产量的影响[J]. 麦类作物学报,2024,44(10):1292.
WANG C, TANG J H, XU W X, *et al.* Effect of row width on dry matter accumulation and yield of winter wheat under drip irrigation [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44 (10):1292.
- [8] 周文银,李文阳,李浩杰,等. 追氮量与密度互作对弱筋小麦产量、品质及氮素利用的影响[J]. 麦类作物学报,2024,44(11):1459.
ZHOU W Y, LI W Y, LI H J, *et al.* Effects of nitrogen top-dressing and density interaction on yield, quality and nitrogen utilization of weak gluten wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(11):1459.
- [9] 王月福,于振文,李尚霞,等. 氮素营养水平对小麦开花后碳素同化、运转和产量的影响[J]. 麦类作物学报,2002,22(2):55.
WANG Y F, YU Z W, LI S X, *et al.* Effect of nitrogen nutrition on carbon assimilation and transfer and yield after wheat anthesis [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2002, 22(2):55.
- [10] 吴祯,张保军,海江波,等. 不同种植方式对冬小麦花后干物质积累与分配特征及产量的影响[J]. 麦类作物学报,2017,37(10):1381.
WU Z, ZHANG B J, HAI J B, *et al.* Effect of different planting patterns on dry matter accumulation and distribution post-anthesis and yield of winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(10):1381.
- [11] 张宏芝,陈兴武,雷钧杰,等. 核麦间作模式下氮肥运筹对小麦光合速率、光合物质积累及产量的影响[J]. 新疆农业科学,2015,52(10):1947.
ZHANG H Z, CHEN X W, LEI J J, *et al.* Effect of nitrogen application on the photosynthetic rate and photosynthetic matter accumulation and yield in walnut-wheat intercropping [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2015, 52(10):1947.
- [12] 岳寿松,于振文,余松烈. 不同生育时期施氮对冬小麦氮素分配及叶片代谢的影响[J]. 作物学报,1998,24(6):813.
YUE S S, YU Z W, YU S L. Effects of nitrogen applied at different growth stages on nitrogen distribution and leaf metabolisms in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1998, 24(6):813.
- [13] 丁永刚,陈欢,曹承富,等. 高光效小麦群体提高氮素吸收利用和产量的机理[J]. 植物营养与肥料学报,2024,30(1):32.
DING Y G, CHEN H, CAO C F, *et al.* Mechanisms of improving nitrogen uptake, utilization and grain yield of wheat population with high radiation use efficiency [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(1):32.
- [14] DING Y G, ZHANG X B, MA Q, *et al.* Tiller fertility is critical for improving grain yield, photosynthesis, and nitrogen efficiency in wheat [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2023, 22(7):2055.
- [15] 江东国,黄正来,张文静,等. 晚播条件下施氮量对稻茬小麦氮素吸收及产量的影响[J]. 麦类作物学报,2019,39(10):1213.

- JIANG D G, HUANG Z L, ZHANG W J, *et al.* Effects of nitrogen application on nitrogen uptake and yield of wheat under late sowing conditions after rice [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(10): 1213.
- [16] 陶志强, 王艳杰, 王德梅, 等. 冬小麦不同茎蘖生产力对立体匀播技术的响应[J]. 作物杂志, 2019(2): 113.
- TAO Z Q, WANG Y J, WANG D M, *et al.* Response of productive capacity among tillers in winter wheat to tridimensional uniform sowing [J]. *Crops*, 2019(2): 113.
- [17] 李升东, 王法宏, 司纪升, 等. 不同种植模式下小麦干物质积累及分配对源库关系的影响[J]. 华北农学报, 2008, 23(1): 90.
- LI S D, WANG F H, SI J S, *et al.* Effects of dry matter accumulation and distribution on source-sink relationships in wheat under different planting patterns [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2008, 23(1): 90.
- [18] 于慧玲, 阙茗溪, 徐哲莉, 等. 匀播和条播小麦产量及干物质积累对春季灌水量的响应[J]. 作物学报, 2023, 49(10): 2837.
- YU H L, KAN M X, XU Z L, *et al.* Yield and dry matter accumulation of wheat in response to spring irrigation water in uniform sowing and strip sowing [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(10): 2837.
- [19] 张金油, 贾永红, 李 鹏, 等. 立体匀播和密度对冬小麦光合、干物质积累分配及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(4): 443.
- ZHANG J S, JIA Y H, LI P, *et al.* Effect of uniforming sowing pattern and planting density on photosynthesis, dry matter accumulation and distribution and yield of winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(4): 443.
- [20] 张小涛, 黄玉芳, 马晓晶, 等. 播种量和施氮量对不同基因型冬小麦干物质积累、转运及产量的影响[J]. 植物生理学报, 2017, 53(6): 1068.
- ZHANG X T, HUANG Y F, MA X J, *et al.* Effects of seeding rate and nitrogen level on dry matter accumulation, translocation and grain yield in two genotypes of winter wheat (*Triticum aestivum*) [J]. *Plant Physiology Journal*, 2017, 53(6): 1068.
- [21] 崔振坤, 于振文, 石 玉, 等. 水氮运筹对小麦光合物质生产和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2024, 35(6): 1570.
- CUI Z K, YU Z W, SHI Y, *et al.* Effects of water and nitrogen management on photosynthetic matter production and yield of wheat [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(6): 1570.
- [22] 谢迎新, 谢旭东, 白雪莹, 等. 氮肥施用对豫南稻茬小麦群体质量指标及产量的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(1): 168.
- XIE Y X, XIE X D, BAI X Y, *et al.* Effects of nitrogen application on population quality index and grain yield of wheat planted on the paddy field in southern Henan Province [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2017, 32(1): 168.
- [23] 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, ZHANG Y Q, *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.
- [24] 陆增根, 戴廷波, 姜 东, 等. 氮肥运筹对弱筋小麦群体指标与产量和品质形成的影响[J]. 作物学报, 2007, 33(4): 593.
- LU Z G, DAI T B, JIANG D, *et al.* Effects of nitrogen strategies on population quality index and grain yield & quality in weak-gluten wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(4): 593.
- [25] 刘运景, 郑飞娜, 张 秀, 等. 宽幅播种对强筋小麦籽粒产量、品质和氮素吸收利用的影响[J]. 作物学报, 2022, 48(3): 721.
- LIU Y J, ZHENG F N, ZHANG X, *et al.* Effects of wide range sowing on grain yield, quality, and nitrogen use of strong gluten wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(3): 721.
- [26] ZHOU B W, SERRET M D, ELAZAB A, *et al.* Wheat ear carbon assimilation and nitrogen remobilization contribute significantly to grain yield [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2016, 58(11): 923.
- [27] 吕广德, 王 超, 靳雪梅, 等. 水氮组合对冬小麦干物质及氮素积累和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2597.
- LYU G D, WANG C, JIN X M, *et al.* Effects of water-nitrogen combination on dry matter, nitrogen accumulation and yield of winter wheat [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(8): 2597.
- [28] 王培如, 尹雪斌, 钟 融, 等. 春季灌水次数对灌区宽幅条播冬小麦植株氮素运转及产量的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(11): 3644.
- WANG P R, YIN X B, ZHONG R, *et al.* Effects of spring irrigation frequency on plant nitrogen translocation and yield of winter wheat under wide-space sowing [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(11): 3644.
- [29] 王茂堂, 贺明荣, 李 玉, 等. 施氮量对不同小麦品种产量及氮素吸收利用的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 245.
- WANG M Y, HE M R, LI Y, *et al.* Effects of nitrogen application rate on yield and nitrogen uptake and utilization of different wheat varieties [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(4): 245.
- [30] 王 慧, 刘大同, 朱冬梅, 等. 氮肥调控对稻茬晚播小麦产量、品质及氮素利用的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(7): 878.
- WANG H, LIU D T, ZHU D M, *et al.* Effects of nitrogen regulation on yield, quality and nitrogen use of late-sowing wheat after rice stubble [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(7): 878.
- [31] 赵夕冉, 张 玉, 张嘉豪, 等. 密度和行距对直立株型小麦产量、群体冠层特征和抗倒伏性的影响[J]. 中国农学通报, 2024, 40(14): 21.
- ZHAO X R, ZHANG Y, ZHANG J H, *et al.* Effects of density and row spacing on yield, canopy characteristics and lodging resistance of upright plant type wheat [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, 40(14): 21.
- [32] SIELING K, BÖTTCHER U, KAGE H. Dry matter partitioning and canopy traits in wheat and barley under varying N supply [J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 74: 2.
- [33] ZHANG Z Y, XU S J, WEI Q R, *et al.* Variation in leaf type, canopy architecture, and light and nitrogen distribution characteristics of two winter wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties with high nitrogen-use efficiency [J]. *Agronomy*, 2022, 12(10): 2411.
- [34] MANTILLA-PEREZ M B, SALAS FERNANDEZ M G. Differential manipulation of leaf angle throughout the canopy: Current status and prospects [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2017, 68(21-22): 5700.