

# 同化物积累与分配对冬小麦小花发育成粒的影响及密度调控效应

柳东亮<sup>1</sup> 王雅群<sup>1</sup> 黄琴<sup>2</sup> 王鹏月<sup>1</sup> 张鸿雁<sup>1</sup> 房琴<sup>1</sup> 李瑞奇<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>河北农业大学农学院/省部共建华北作物改良与调控国家重点实验室/河北省作物生长调控实验室, 071001, 河北保定;

<sup>2</sup>保定市农业科学院, 071000, 河北保定)

**摘要** 为明确同化物积累与分配对冬小麦小花发育成粒的影响及密度调控效应,于2023-2024年以冬小麦品种衡观35为试验材料,设置4个密度水平,分别为基本苗180万(D180)、300万(D300)、420万(D420)和540万株/hm<sup>2</sup>(D540),比较主茎、I分蘖和II分蘖的最大分化小花数、可孕小花数、小花结实率和结实粒数的差异,结合穗和茎的干物质积累量与穗的可溶性糖含量,分析同化物积累与分配对小花发育成粒的影响。结果表明,同一密度下主茎的分化小花数和结实粒数均高于分蘖。随着密度增加,最大分化小花数、可孕小花数和小花结实率均呈下降趋势,D180与D420、D540处理间的差异均达显著水平。穗、茎的干物质积累量和穗茎比均表现为低密度高于高密度处理,D180与D540处理差异达显著水平。相关分析表明,最大分化小花数、可孕小花数、穗干物质积累量、穗茎比、穗可溶性糖含量与穗粒数均呈极显著正相关。本试验条件下,主茎、I分蘖和II分蘖的穗粒数均表现为D180>D300>D420>D540,同化物在穗部积累量以及分配比例的增加为促进小花发育成粒和提高穗粒数奠定了良好的物质基础。综上,D300处理的产量构成要素更加协调,是本试验的最优密度处理。

**关键词** 冬小麦; 种植密度; 可孕小花数; 穗干物质积累量; 可溶性糖含量; 穗粒数

河北省光热资源丰富,是我国冬小麦主要种植区域之一,该地区小麦产量占全国总产量的10.7%,居全国第4位<sup>[1]</sup>,河北省小麦稳产对于保障国家粮食安全至关重要。研究<sup>[2]</sup>显示,在已实现高产的形势下,增加穗粒数是进一步提高小麦产量的关键。小麦穗粒数的形成是小花发育、退化和结实等一系列复杂生理过程的最终体现<sup>[3]</sup>,明确小花发育成粒特征及其与同化物积累和分配的关系,对于提高穗粒数具有重要意义。

研究<sup>[4]</sup>显示,穗粒数很大程度上取决于开花期的可孕小花数。拔节期至开花期既是小麦幼穗发育的关键时期,又是茎秆快速伸长的时期,二者对有限的营养物质存在激烈竞争。开花前较多的光合产物向穗器官分配,有利于减少小花退化与败育,增加可孕小花数<sup>[5]</sup>。朱元刚等<sup>[6]</sup>研究表明,开花期穗干物质积累量与可孕小花数和小花存活率均呈极显著正相关。种植密度是影响冬小麦小花发育和籽粒结实的重要栽培措施之一,谢琰<sup>[7]</sup>

研究发现,密度由基本苗150万增至300万株/hm<sup>2</sup>后,最大分化小花数降低了7.81%。于振文<sup>[8]</sup>研究表明,降低密度增加了穗部同化物供应,促进了小花发育,为提高穗粒数奠定基础。也有研究<sup>[9]</sup>认为,穗粒数不仅与穗干物质积累量相关,也与干物质在穗部和茎秆的分配比例密切相关。

前期研究<sup>[10]</sup>表明,冬小麦在适期播种条件下,基本苗在150万~540万株/hm<sup>2</sup>时,产量均能达到9000 kg/hm<sup>2</sup>,适当降低密度时冬小麦也能取得较高产量的原因之一在于其穗粒数增加。然而,不同蘖位小花发育成粒的特征及其与同化物积累和分配的关系并未深入研究。因此,本试验以冬小麦品种衡观35为试验材料,重点分析了不同密度下主茎、I分蘖和II分蘖的最大分化小花数、可孕小花数以及结实粒数差异,探讨了干物质积累与分配和可溶性糖含量对小花发育成粒的影响,旨在为提高穗粒数以及丰富小麦高产栽培理论提供依据。

作者简介:柳东亮,主要从事作物高产优质理论与技术研究,E-mail:1665919681@qq.com

房琴为通信作者,主要从事作物高产优质高效的生态生理研究,E-mail:fangqinhebei@163.com;李瑞奇为共同

通信作者,主要从事作物高产优质理论与技术研究,E-mail:nxylrq@hebau.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划(2023YFD2301500)

收稿日期:2025-03-03;修回日期:2025-05-08;网络出版日期:2025-09-30

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2023–2024 年在河北省石家庄市藁城区张家庄镇赵庄村 (38°09' N, 114°45' E) 进行。该地属于华北平原北部, 气候类型为温带季风气候。冬小麦生育期内日均温度 9.7 °C, 降水量 109.9 mm。土壤类型为砂质壤土, 0~200 cm 土层土壤容重为 1.4 g/cm<sup>3</sup>。0~40 cm 土层土壤有机质、全氮、碱解氮、速效钾和速效磷含量分别为 18.2 g/kg、1.3 g/kg、113.5 mg/kg、155.9 mg/kg 和 18.3 mg/kg。

### 1.2 试验设计

供试冬小麦品种为衡观 35 (HG35)。本试验采用随机区组设计, 设置 4 个种植密度处理, 分别为基本苗 180 万 (D180)、300 万 (D300)、420 万 (D420) 和 540 万株/hm<sup>2</sup> (D540)。每个处理 3 次重复, 共 12 个小区, 每个小区面积 50 m<sup>2</sup> (5 m×10 m)。

前茬作物为玉米, 玉米收获后秸秆粉碎 2 遍还田。全生育期施用肥料为尿素 (含纯 N 46.0%) 521.7 kg/hm<sup>2</sup>、重过磷酸钙 (含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 45.0%) 293.5 kg/hm<sup>2</sup> 和氯化钾 (含 K<sub>2</sub>O 60.0%) 250.0 kg/hm<sup>2</sup>。其中, 磷肥和钾肥作为底肥一次性施入, 氮肥 50% 底施, 50% 于拔节期随灌溉追施。冬小麦于 2023 年 10 月 15 日 15 cm 等行距播种, 次年 6 月 14 日收获。三叶期进行疏苗, 使各小区种植密度与试验设计一致。各处理于拔节期和开花期分别进行灌溉, 每次灌溉水量为 60.0 mm。病虫草害等防治措施与高产田一致。

### 1.3 测定项目与方法

**1.3.1 主茎和各级分蘖标记** 自返青期开始, 每处理选取生长均匀一致的冬小麦植株 150 株, 将主茎和各级分蘖用不同颜色的皮筋标记。O 代表主茎, I 分蘖 (I) 和 II 分蘖 (II) 分别代表由主茎的第 1 叶和第 2 叶的叶腋中长出的分蘖。

**1.3.2 幼穗分化时期和分化小花数** 自冬小麦返青期开始, 每隔 5~7 d, 每个小区选取标记的小麦植株 5~8 株, 在 SZX7 解剖镜 (日本, Olympus 公司) 下, 参照 Waddington 等<sup>[1]</sup>的标准观察记录主茎、I 分蘖和 II 分蘖的幼穗分化时期。其中, W6.5 时期指花柱开始伸长; W7.5 时期指柱头上分化出柱头分枝, 柱头羽毛突起形成; W8.5 时期指柱头分枝和子房壁上羽毛伸长, 柱头分枝缠绕无序; W9.5 时期指花柱和柱头分枝向外展开, 羽状柱头

发育完全; W10 时期指花柱向外弯曲, 柱头分枝伸展, 花粉落在羽状柱头上。小花原基分化期以后, 观察并记录分化小花数和可孕小花数 (具有完整绿色花药和羽状柱头的小花数)。小花结实率 (%) = 结实粒数/最大分化小花数×100。

**1.3.3 穗、茎干物质积累量和穗茎比** 于 W6.5、W7.5、W8.5、W9.5 和 W10 时期, 每个小区选取标记的小麦植株 15 株, 将主茎、I 分蘖和 II 分蘖分别按照茎、叶、穗分开, 之后置于烘箱中, 于 105 °C 杀青 30 min, 后在 80 °C 鼓风干燥条件下烘干至恒量, 测定单株各器官平均干物质积累量, 计算穗茎比 (穗干物质积累量与茎干物质积累量的比值)。

**1.3.4 可溶性糖含量** 采用蒽酮比色法<sup>[2]</sup>测定小麦植株的可溶性糖含量。称量干粉末样品 0.05 g, 放入 10 mL 的离心管中, 加入 6~8 mL 的蒸馏水, 沸水浴中煮沸 30 min, 取出冷却后离心, 收集 2 次上清液, 用蒸馏水定容至 50 mL 的容量瓶中, 作为待测样品。吸取稀释后的待测液 300 μL, 加入 800 μL 蒽酮, 在沸水浴中保温 6 min, 冷却后使用酶标仪在 625 nm 下比色测定吸光度, 计算可溶性糖含量。

**1.3.5 产量及其构成因素** 于冬小麦成熟期在各小区内选取 2 m<sup>2</sup> 长势均匀的小麦收获, 用小型脱粒机脱粒后, 风干晾晒后称重, 同时测定籽粒含水量, 按照 13.0% 的籽粒标准含水量计算每公顷籽粒产量。每个小区选取返青期标记的小麦植株 20 株, 按照主茎和各级分蘖分开, 调查并计算主茎、I 分蘖和 II 分蘖的穗粒数和成穗率。根据不同蘖位调查的穗粒数和成穗率计算各密度处理的穗粒数。在定点处调查各处理的穗数, 每处理 3 次重复, 计算每公顷穗数。在风干晾晒后的小麦籽粒中随机选择 3 组, 各组取 1000 粒, 分别进行称重, 3 组重量相差不大于平均值的 5.0% 时即为千粒重。

### 1.4 数据处理

利用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析, 在  $P < 0.05$  显著水平上采用邓肯多重检验法比较密度处理间的差异, 并进行显著性差异检验 (LSD 法)。利用 Microsoft Excel 2019 软件作图。

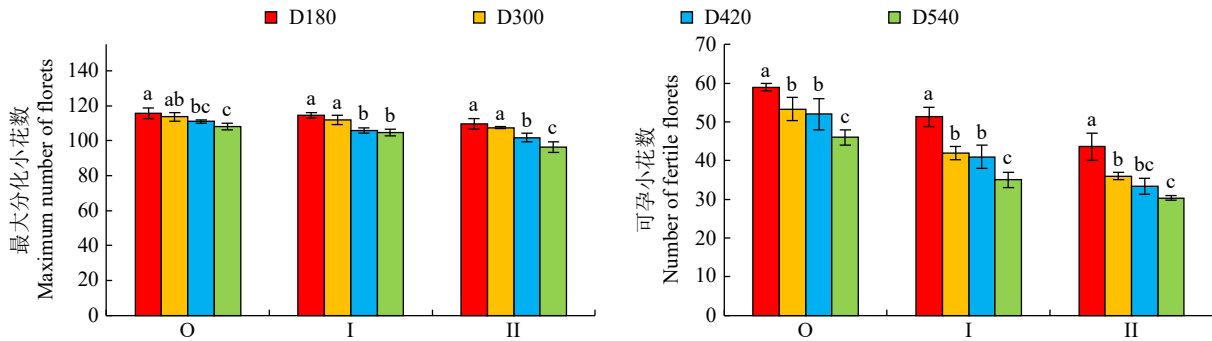
## 2 结果与分析

### 2.1 密度对冬小麦茎蘖最大分化小花数和可孕小花数的影响

如图 1 所示, 各密度处理的最大分化小花数和可孕小花数均表现为主茎 > I 分蘖 > II 分蘖, D180、

D300、D420 和 D540 处理下, 主茎的最大分化小花数分别比 II 分蘖高 5.47%、5.90%、9.18% 和 12.11%; 可孕小花数分别高 35.11%、48.15%、56.00% 和 51.65%。随着密度增加, 最大分化小花数和可孕小花数均呈下降趋势。密度由 D180 增至 D540 后, 主茎、I 分蘖和 II 分蘖的最大分化小花数降幅分别为 6.63%、8.72% 和 12.16%, 可孕小花数

降幅分别为 22.03%、31.82% 和 30.53%。可见, 密度对可孕小花数的影响程度大于最大分化小花数。同一蘖位各密度间比较, 主茎、I 分蘖和 II 分蘖在 D180 处理下的最大分化小花数与 D300 差异均不显著, 但与 D420 和 D540 处理的差异均达显著水平; 在 D300 和 D420 处理下的可孕小花数差异均不显著, 但与 D180 处理的差异均达显著水平。



同一蘖位不同小写字母表示不同密度处理间在  $P < 0.05$  水平上差异显著。下同。

Different lowercase letters in the same tiller position indicate significant difference at  $P < 0.05$  level among different density treatments. The same below.

图1 不同密度处理下主茎、I分蘖和II分蘖的最大分化小花数和可孕小花数

Fig.1 Maximum number of florets and number of fertile florets of main stem, tiller I and tiller II under different density treatments

## 2.2 密度对冬小麦穗粒数和小花结实率的影响

由图2可见, 各密度处理的穗粒数均表现为主茎>I分蘖>II分蘖。随着密度增加, 主茎和分蘖的穗粒数均呈下降趋势, 密度由 D180 增至 D540 后, 主茎、I分蘖和II分蘖穗粒数的降幅分别为

19.66%、30.75% 和 33.01%。同一蘖位各密度间比较, 主茎在 D300 处理下的穗粒数与 D420 差异不显著, 但与 D180 和 D540 处理的差异均达显著水平; I分蘖在除 D420 和 D540 处理外其余各处理下的穗粒数差异均达显著水平; II分蘖在 4 个密度处

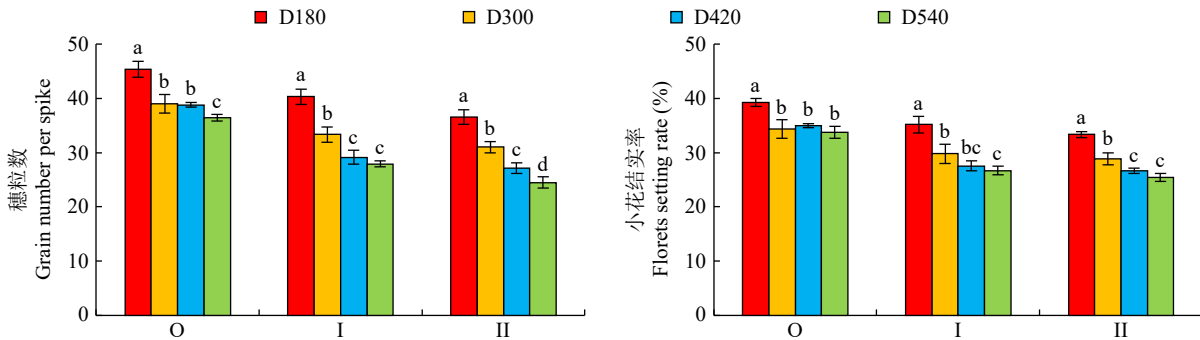


图2 不同密度处理下主茎、I分蘖和II分蘖穗粒数和小花结实率

Fig.2 Grain number per spike and florets setting rate of main stem, tiller I and tiller II under different density treatments

理下的穗粒数差异均达显著水平。

各密度处理的小花结实率均表现为主茎>I分蘖>II分蘖, 主茎、I分蘖和II分蘖的小花结实率分别在 33.77%~39.24%、26.70%~35.19% 和 25.43%~33.34%。随着密度增加, 小花结实率均呈下降趋势。密度由 D180 增至 D540 后, 主茎、I分蘖和II分蘖的小花结实率降幅分别为 13.93%、24.13% 和 23.72%。同一蘖位各密度间比较, 主茎在 D300、D420 和 D540 处理下的小花结实率差异均不显著,

但与 D180 处理的差异均达显著水平; I分蘖在 D300 处理下的小花结实率与 D420 差异不显著, 但与 D180 和 D540 处理的差异均达显著水平; 除 D420 与 D540 处理间, II分蘖在各处理下的小花结实率差异均达显著水平。

## 2.3 密度对冬小麦茎蘖穗、茎干物质积累量及穗茎比的影响

由表1可知, 各密度处理下穗、茎干物质积累量均表现为主茎>I分蘖>II分蘖。随着密度增加,

穗干物质积累量均呈下降趋势。密度由 D180 增至 D540, 在 W6.5、W7.5、W8.5、W9.5 和 W10 时期, 主茎穗干物质积累量的降幅分别为 40.19%、52.79%、35.14%、39.53%和 29.20%; I 分蘖的降幅分别为 67.61%、72.09%、55.23%、47.83%和 33.97%; II 分蘖的降幅分别为 87.88%、64.62%、54.66%、46.40%和 39.75%。不同密度处理间, W7.5~W10 时期主茎、I 分蘖和 II 分蘖在 D180 处理下的穗干物质积累量与 D300、D420、D540 的差异均达显著水平; 在 D300 处理下的穗干物质积累量与 D540 的差异也均达显著水平。W9.5 和 W10 时期, 主茎在 D420 处理下穗干物质积累量与 D540 的差异均达显著水平; 仅 W10 时期 I 分蘖在 D420 处理下的穗干物质积累量与 D540 存在显著差异; II 分蘖在 D420 处理下的穗干物质积累量与 D540 在各时期均无显著差异。

表 1 不同密度处理下冬小麦的单株穗干物质积累量

Table 1 Spike dry matter accumulation per plant of winter wheat under different density treatments mg

蘖位 Tiller position	处理 Treatment	生长时期 Growth period				
		W6.5	W7.5	W8.5	W9.5	W10
O	D180	16.62a	102.90a	140.00a	273.70a	334.70a
	D300	14.33ab	76.20b	102.33b	238.30b	292.93b
	D420	10.33b	51.00c	93.52b	225.50b	283.73b
	D540	9.94b	48.58c	90.80b	165.50c	236.97c
	D180	10.56a	75.77a	95.50a	211.97a	299.60a
I	D300	10.32a	35.55b	57.37b	183.20b	231.88b
	D420	4.58b	22.25c	43.77c	124.81c	227.13b
	D540	3.42b	21.15c	42.76c	110.59c	197.82c
	D180	9.16a	49.77a	83.66a	203.58a	276.76a
II	D300	6.77b	32.94b	46.10b	156.38b	208.43b
	D420	3.10c	19.33c	39.17c	116.33c	184.81bc
	D540	1.11d	17.61c	37.93c	109.12c	166.75c

同一蘖位不同小写字母表示不同密度处理间在  $P < 0.05$  水平上差异显著。下同。

Different lowercase letters in the same tiller position indicate significant difference at  $P < 0.05$  level among different density treatments. The same below.

由表 2 可知, 随着密度增加, 各时期茎干物质积累量均呈下降趋势。密度由 D180 增至 D540, 在 W6.5、W7.5、W8.5、W9.5 和 W10 时期, 主茎茎干物质积累量的降幅分别为 21.31%、28.28%、15.26%、29.07%和 22.50%; I 分蘖的降幅分别为 41.40%、43.32%、24.49%、31.14%和 21.93%; II 分蘖的降幅分别为 53.41%、44.59%、22.41%、32.39%和 24.07%。不同密度处理间, W7.5~W10 时期主茎、I 分蘖和 II 分蘖在 D180 处理下的茎干物质积累量与 D300、D420、D540 处理的差异均

达显著水平(除蘖位 II 的 W7.5 时期)。W8.5~W10 时期, 主茎在 D300 处理下的茎干物质积累量与 D420 的差异均不显著, 但均显著高于 D540 处理(除 W8.5 时期); W9.5 和 W10 时期, I 分蘖在 D300 处理下茎干物质积累量与 D540 的差异均达显著水平; W8.5~W10 时期, II 分蘖在 D300、D420 和 D540 处理间茎干物质积累量的差异均不显著。

表 2 不同密度处理下冬小麦的单株茎干物质积累量

Table 2 Stem dry matter accumulation per plant of winter wheat under different density treatments mg

蘖位 Tiller position	处理 Treatment	生长时期 Growth period				
		W6.5	W7.5	W8.5	W9.5	W10
O	D180	480.58a	747.47a	787.47a	999.83a	1054.00a
	D300	449.76a	625.00b	700.40b	870.70b	923.30b
	D420	368.58b	520.20c	688.56b	857.13b	927.90b
	D540	378.16b	536.06c	667.30b	709.20c	816.87c
	D180	346.24a	552.33a	625.21a	797.30a	937.63a
I	D300	353.15a	440.60b	491.97b	693.30b	812.59b
	D420	246.00b	341.67c	476.78b	583.86c	798.26b
	D540	202.89b	313.04c	472.11b	549.05c	732.00c
	D180	353.69a	483.63a	574.98a	769.06a	911.97a
II	D300	309.67b	414.52a	474.14b	597.63b	731.18b
	D420	187.81c	286.50b	453.00b	548.58b	715.17b
	D540	164.77c	267.98b	446.13b	519.93b	692.50b

图 3 表示各密度处理下的穗茎比, 随着密度的增加, 各时期穗茎比均呈下降趋势。不同密度处理间, W7.5~W10 时期(除主茎的 W9.5 和 W10 时期), 主茎、I 分蘖和 II 分蘖在 D180 处理下的穗茎比与 D420、D540 的差异均达显著水平, 在 D420 处理下的穗茎比与 D540 差异均不显著。

#### 2.4 密度对冬小麦茎蘖穗可溶性糖含量的影响

图 4 表示各密度处理下的穗可溶性糖含量, 随着蘖位升高, 各时期可溶性糖含量均呈下降趋势。除个别处理外, 随着密度的增加, 各时期穗可溶性糖含量均呈下降趋势。密度由 D180 增至 D540, 在 W6.5、W7.5、W8.5、W9.5 和 W10 时期, 可溶性糖含量的降幅分别为 30.79%、9.77%、17.44%、17.30%和 20.89%; I 分蘖的降幅分别为 40.80%、9.04%、7.13%、17.61%和 38.09%; II 分蘖的降幅分别为 44.56%、8.05%、13.72%、25.67%和 32.58%。密度间比较, W6.5~W10 时期的主茎和 I 分蘖(除 W7.5 时期的 I 分蘖)、W6.5~W8.5 时期的 II 分蘖, 在 D180 处理下的穗可溶性糖含量与 D300 处理差异均不显著, 但均显著高于 D540 处理; W9.5 和 W10 时期的 II 分蘖, 在 D300 处理下的穗可溶性糖含量与 D420 处理均无显著差异, 但

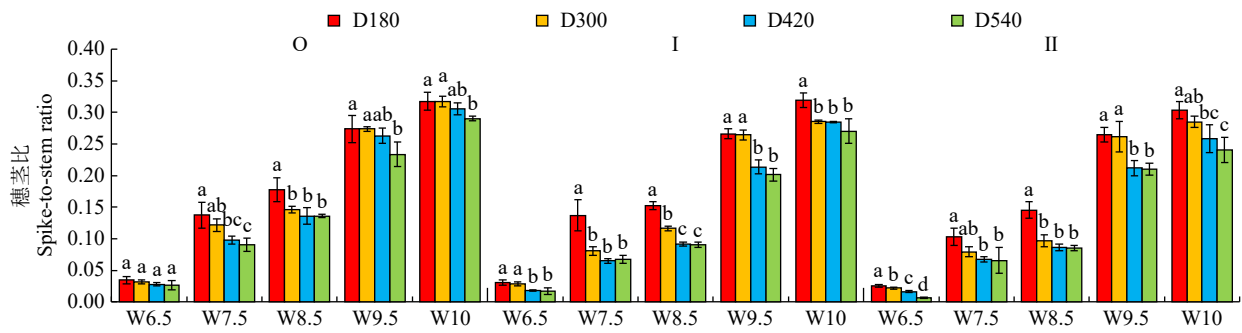


图3 不同密度处理下冬小麦各生育时期的穗茎比  
Fig.3 Spike-to-stem ratio of winter wheat at different growth stages under different densities

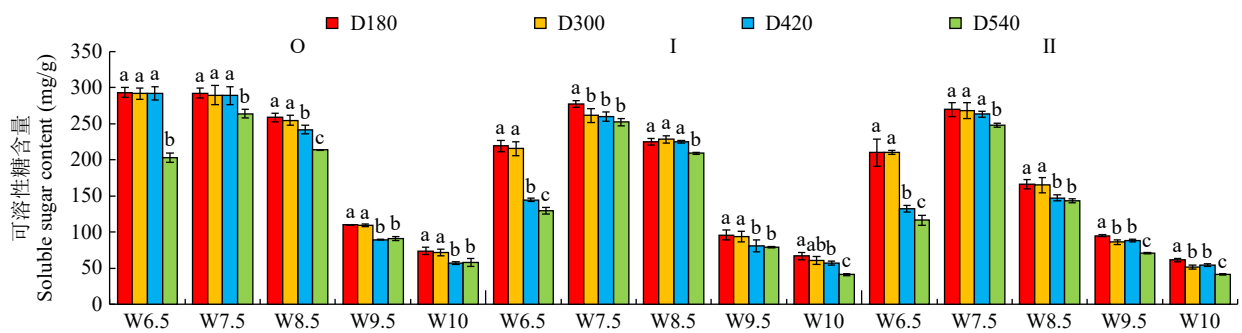


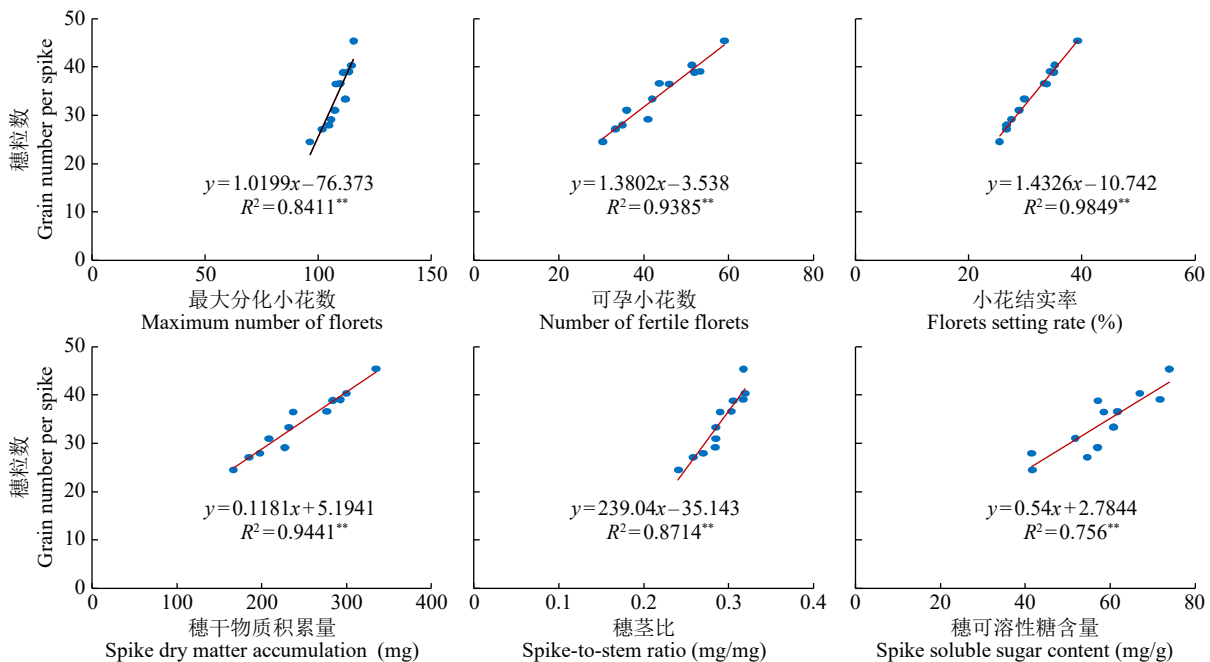
图4 不同密度处理下冬小麦各生育时期的穗可溶性糖含量  
Fig.4 Spike soluble sugar content of winter wheat at different growth stages under different density treatments

均与 D180 和 D540 的差异达显著水平。

### 2.5 冬小麦穗粒数与各性状的相关性分析

由可孕小花数、穗干物质积累量、穗茎比、穗可溶性糖含量、最大分化小花数、小花结实率与穗

粒数的相关性分析(图5)可知,最大分化小花数、可孕小花数、小花结实率均与穗粒数呈极显著正相关,可孕小花数、小花结实率与穗粒数的相关系数均高于最大分化小花数;穗干物质积累量、穗茎比



“\*\*”表示极显著相关 ( $P < 0.01$ )。

“\*\*” indicates extremely significant correlation ( $P < 0.01$ ).

图5 可孕小花数、穗干物质积累量、穗茎比、穗可溶性糖含量、最大分化小花数、小花结实率与穗粒数的相关性分析

Fig.5 Correlation analysis of number of fertile florets, spike dry matter accumulation, spike-to-stem ratio, spike soluble sugar content, maximum number of florets, florets setting rate and grain number per spike

也均与穗粒数呈极显著正相关,说明幼穗干物质积累量的增加及其分配的比例的提高有利于增加穗粒数。除此之外,穗可溶性糖含量与穗粒数也呈极显著正相关。本研究中,同一蘖位下低密度处理的穗粒数均高于高密度处理,且同一密度处理下,蘖位越高则穗粒数下降越明显。结合表 1、图 3 和图 5 可知,穗干物质积累量、穗茎比和穗可溶性糖含量的增加为穗粒数的提高奠定了良好的物质基础。

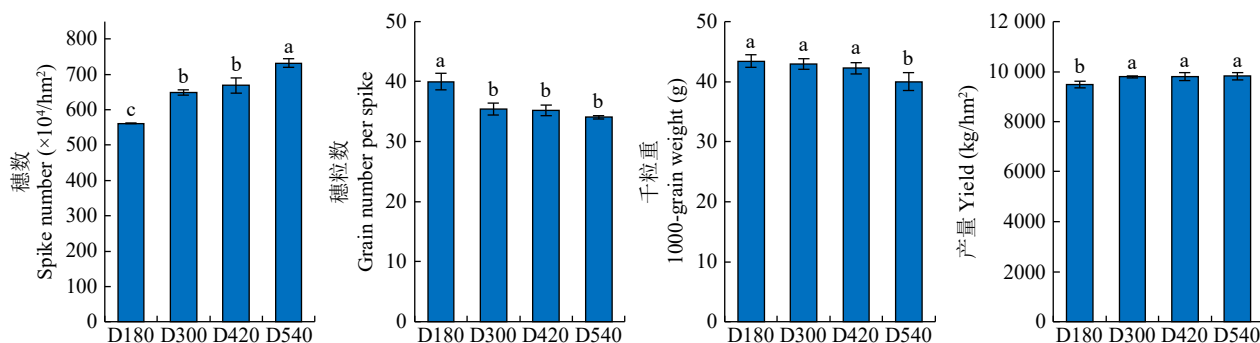


图 6 不同密度处理下冬小麦的产量及其构成因素

Fig.6 Yield and its components of winter wheat under different density treatments

D420 和 D540 处理差异不显著。综上,从节约生产成本和提高经济效益角度考虑,D300 是本试验的最优密度处理。

### 3 讨论

谢琰<sup>[7]</sup>研究认为,增加密度降低了最大分化小花数,基本苗 300 万株/hm<sup>2</sup> 处理的最大分化小花数比 150 万株/hm<sup>2</sup> 处理低 7.81%。本研究中,主茎、I 分蘖和 II 分蘖在 D540 处理的最大分化小花数分别比 D180 处理低 6.63%、8.72%和 12.16%,并且蘖位越高,穗粒数下降越明显,与李怡香<sup>[13]</sup>的研究一致。马金荣等<sup>[10]</sup>研究认为,密度对可孕小花数的影响程度大于最大分化小花数。本研究中,密度由 D180 处理增至 D540,主茎、I 分蘖和 II 分蘖可孕小花数降幅分别为 22.03%、31.82%和 30.53%,均高于最大分化小花数的降幅,与马金荣等<sup>[10]</sup>研究一致。研究<sup>[14-15]</sup>显示,小麦小花发育过程分为分化、退化和败育 3 个阶段,单穗最大分化小花数一般在 150 朵左右,70%~80%的小花先后退化,只有 20%~30%的小花能发育形成籽粒。本研究中,主茎、I 分蘖和 II 分蘖小花的结实率分别在 33.77%~39.24%、26.70%~35.19%和 25.43%~33.34%,说明有大量小花退化;因此,降低小花退化率,增加小花结实率,尤其是可孕小花结实率对提高穗粒数具

### 2.6 密度对冬小麦产量及其构成因素的影响

由图 6 可知,随着密度的增加,穗数呈增加趋势,其中, D300 和 D420 与 D180、D540 处理间的差异均达显著水平。D180 处理下的穗粒数显著高于 D300、D420 和 D540 处理。D180、D300 和 D420 处理间的千粒重差异不显著,但均显著高于 D540 处理。随着密度增加,产量呈增加趋势,其中, D180 处理显著低于其余 3 个密度水平, D300、

有重要作用<sup>[16]</sup>。密度是影响小花发育的重要措施之一,本研究中,密度降低后小花结实率提高了 16.18%~31.80%,尽管如此,仍有 60.76%的小花退化。前人<sup>[16-18]</sup>研究显示,外部喷施 14-羟基芸苔素甾醇、褪黑素和硼等生长调节剂能有效减少小花退化,提高小花结实率。因此,在最佳种植密度的基础上,外源喷施生长调节剂可作为进一步提升穗粒数的有效措施<sup>[10]</sup>。

孕穗至开花期是冬小麦穗、茎干物质积累量快速增长的时期<sup>[19]</sup>, Miralles 等<sup>[20]</sup>研究认为,开花前幼穗与茎秆对有限资源的激烈竞争导致穗部同化物供应不足,致使小花退化。研究<sup>[21-22]</sup>认为,降低密度显著增加了大穗型品种该生长阶段的穗和茎干物质积累量,较多的同化物转移到穗部,有利于减少小花退化,增加结实粒数。本研究中, D180 处理的穗干物质积累量在各时期均显著高于 D540 处理,穗粒数比 D540 处理高 17.43%,说明穗干物质积累量的增加为穗粒数的提高奠定了良好的物质基础<sup>[22]</sup>。本研究中,穗粒数与穗干物质积累量和穗茎比均呈极显著正相关,说明穗干物质积累量的增加及干物质向穗部分配比例的提高均有利于增加穗粒数,与 Zhang 等<sup>[19]</sup>和 Slafer 等<sup>[22]</sup>的研究结果一致,同化物向穗部的分配比例对穗粒数的影响更大。可溶性糖是小麦生长代谢过程中的重要能量载

体和信号传递分子<sup>[23]</sup>, 在小麦幼穗发育的关键时期, 充足的可溶性糖供应为穗部细胞的分裂和分化提供了强大的能量支撑, 对小穗和小花的分化数量起着决定性作用, 植株内部能否提供充足的碳水化合物直接影响幼穗和小花的发育<sup>[24]</sup>。本研究中, 穗粒数与穗可溶性糖含量呈极显著正相关, 说明增加穗部碳水化合物有利于促进小花发育成粒, 进而增加穗粒数<sup>[25]</sup>。

冬小麦主茎和分蘖由于形成时间不同表现出不均一发育的特点, 早发生的低位分蘖通常可拦截更多的光合有效辐射, 抑制晚发高位分蘖的生长。研究<sup>[26-27]</sup>显示, 小麦主茎与分蘖穗部性状存在明显差异, 总体上, 低位分蘖的结实特性优于高位分蘖。李萍等<sup>[28]</sup>研究显示, 主茎穗粒数分别比 I、II 和 III 分蘖高 11.23%、19.54%和 29.19%。本研究中, 主茎的穗粒数分别比 I 和 II 分蘖高 12.49%~30.48%和 24.09%~48.81%, 说明蘖位越高则穗粒数下降越明显, 与李萍等<sup>[28]</sup>和佟汉文等<sup>[29]</sup>的结论一致。综上, 生产中除了注重主茎穗的结实外, 也应重视增加分蘖穗的结实粒数。

#### 4 结论

增加密度显著降低了主茎、I 分蘖、II 分蘖的最大分化小花数、可孕小花数、小花结实率和穗粒数。本试验条件下, D180 和 D300 的穗粒数分别比 D540 处理高 17.43%和 3.94%。可孕小花数、小花结实率、穗干物质积累量、穗茎比和穗可溶性糖含量均与穗粒数呈极显著正相关, 穗干物质积累量和分配比例、可溶性糖含量的增加为穗粒数的提高奠定了良好的物质基础。随着蘖位升高, 同一密度处理的穗粒数显著下降, 因此, 在小麦栽培中, 除了注重主茎穗的结实外, 也应重视分蘖穗的结实。由于产量及其构成因素间的协调作用, D300 处理获得了较高产量, 是本试验的最优密度处理。

#### 参考文献

- [1] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴—2024. 北京: 中国统计出版社, 2024.
- [2] 朱慧杰, 郑春风, 张国钊, 等. 栽培管理模式对冬小麦小花发育与结实特性的影响. 麦类作物学报, 2014, 34(10): 1383-1389.
- [3] 郑春风, 任伟, 徐福新, 等. 孕穗前期叶面喷赛苗旺对冬小麦穗粒数和粒质量的影响. 河南农业科学, 2018, 47(11): 8-12.
- [4] Zhu Y G, Chu G P, Dai X L, et al. Delayed sowing increases grain number by enhancing spike competition capacity for assimilates in winter wheat. *European Journal of Agronomy*, 2019, 104: 49-62.
- [5] 王志敏, 王树安, 苏宝林. 小麦穗粒数的调节 II 开花前遮光对穗碳水化合物代谢和内源激素水平的影响. 华北农学报, 1997, 12(4): 43-48.
- [6] 朱元刚, 肖岩岩, 初金鹏, 等. 不同播期冬小麦小花发育特性与同化物代谢的相关性. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(3): 370-381.
- [7] 谢琰. 氮肥和密度对不同穗型小麦穗粒数形成的影响. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [8] 于振文. 不同密度条件对冬小麦小花发育的影响. 作物学报, 1984, 10(3): 185-194.
- [9] 文祥朋, 任伟, 孙克刚, 等. 不同穗型小麦小花发育过程中幼穗内同化物分配与穗粒数的关系. 江西农业学报, 2017, 29(8): 11-14.
- [10] 马金荣, 张雁鸿, 王雅群, 等. 种植密度对不同穗型冬小麦品种结实特性和产量的影响. 麦类作物学报, 2023, 43(12): 1607-1615.
- [11] Waddington S R, Cartwright P M, Wall P C. A quantitative scale of spike initial and pistil development in barley and wheat. *Annals of Botany*, 1983, 51(1): 119-130.
- [12] Shang Y Q, Wang S, Lin X, et al. Supplemental irrigation at jointing improves spike formation of wheat tillers by regulating sugar distribution in ear and stem. *Agricultural Water Management*, 2023, 279: 108160.
- [13] 李怡香. 氮肥和密度对小麦穗粒数形成的影响及生理基础. 南京: 南京农业大学, 2014.
- [14] Wen L Y, Liu Y Q, Zhou B J, et al. Differences between two wheat genotypes in the development of floret primordia and contents of pigments and hormones. *The Crop Journal*, 2024, 12: 1196-1207.
- [15] Zheng C F, Zhu Y J, Zhu H J, et al. Floret development and grain setting characteristics in winter wheat in response to pre-anthesis applications of 6-benzylaminopurine and boron. *Field Crops Research*, 2014, 169: 70-76.
- [16] 张荣, 刘淋茹, 付凯霞, 等. 干旱胁迫下外源褪黑素对冬小麦小花发育及碳营养代谢的调控. 中国农业科学, 2024, 57(23): 4644-4657.
- [17] 刘北城, 张艳艳, 戎亚思, 等. 干旱胁迫下喷施 14-羟基芸苔素甾醇对冬小麦穗花发育及碳氮代谢的调控. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(6): 1004-1015.
- [18] 郑春风, 朱慧杰, 朱云集, 等. 冬小麦小花发育及结实特性对叶面喷硼的响应. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(2): 550-556.
- [19] Zhang Z, Li J, Hu N Y, et al. Spike growth affects spike fertility through the number of florets with green anthers before floret abortion in wheat. *Field Crops Research*, 2021, 260: 108007.
- [20] Miralles D J, Katz S D, Colloca A, et al. Floret development in near isogenic wheat lines differing in plant height. *Field Crops Research*, 1998, 59: 21-30.
- [21] 王志敏, 王树安. 小麦穗茎生长与穗粒数的关系. 北京农业科学, 1996, 14(3): 4-7.
- [22] Slafer G A, Calderini D F, Miralles D J, et al. Preanthesis shading effects on the number of grains of three bread wheat cultivars of different potential number of grains. *Field Crops Research*, 1994, 36: 31-39.
- [23] 王嘉佳, 唐中华. 可溶性糖对植物生长发育调控作用的研究进展. 植物学研究, 2014, 3(3): 71-76.
- [24] Li J, Li G G, Li Z Y, et al. Spermidine alleviates drought-induced wheat floret degeneration by mitigating oxidative damage and maintaining energy homeostasis. *The Crop Journal*, 2024, 12: 1765-1779.

- [25] Dreccer M F, Wockner K B, Palta J A, et al. More fertile florets and grains per spike can be achieved at higher temperature in wheat lines with high spike biomass and sugar content at booting. *Functional Plant Biology*, 2014, 41: 482-495.
- [26] Xu H C, Cai T, Wang Z L, et al. Physiological basis for the differences of productive capacity among tillers in winter wheat. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(10): 1958-1970.
- [27] 张晶, 王姣爱, 党建友, 等. 冬小麦主茎及分蘖籽粒产量和品质的差异. *麦类作物学报*, 2010, 30(3): 526-528.
- [28] 李萍, 尚云秋, 林祥, 等. 拔节期阶段性干旱对小麦茎蘖成穗与结实的影响. *中国农业科学*, 2020, 53(20): 4137-4151.
- [29] 佟汉文, 彭敏, 朱展望, 等. 湖北稻茬小麦主茎、分蘖 1、分蘖 2 和分蘖 3 的成穗率、产量贡献率及主要农艺性状分析. *麦类作物学报*, 2020, 40(2): 177-184.

## Effects of Accumulation and Distribution of Assimilates on Floret Development and Grain Set of Winter Wheat and the Regulatory Effect of Density

Liu Dongliang<sup>1</sup>, Wang Yaqun<sup>1</sup>, Huang Qin<sup>2</sup>, Wang Pengyue<sup>1</sup>, Zhang Hongyan<sup>1</sup>, Fang Qin<sup>1</sup>, Li Ruiqi<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>College of Agronomy, Hebei Agricultural University/State Key Laboratory of Crop Improvement and Regulation in North China/Hebei Provincial Laboratory of Crop Growth Regulation, Baoding 071001, Hebei, China; <sup>2</sup>Baoding Academy of Agricultural Sciences, Baoding 071000, Hebei, China)

**Abstract** To clarify the effects of assimilate accumulation and distribution on floret development and grain set of winter wheat and the regulatory effect of density, a field experiment was conducted from 2023 to 2024 using the winter wheat cultivar Hengguan 35. Four density levels were set at  $1.8 \times 10^6$  (D180),  $3.0 \times 10^6$  (D300),  $4.2 \times 10^6$  (D420), and  $5.4 \times 10^6$  plants/ha (D540). The differences in the maximum number of florets, number of fertile florets, floret setting rate, and grain number per spike of the main stem, tiller I, and tiller II were compared. Combined with the dry matter accumulation of spikes and stems and the soluble sugar content of spikes, the impact of assimilate accumulation and distribution on floret development and grain set was analyzed. The results showed that under the same density, the number of florets and grains per spike of the main stem were higher than those of the tillers. With the increase in density, the maximum number of florets, number of fertile florets, and floret setting rate all showed a decreasing trend, and the differences between D180 and D420 and between D180 and D540, reached significant levels. The dry matter accumulation of spikes and stems, as well as the spike-to-stem ratio, were higher in the low-density treatments than in the high-density treatments, with a significant difference between D180 and D540. Correlation analysis indicated that the maximum number of florets, number of fertile florets, spike dry matter accumulation, spike-to-stem ratio, and spike soluble sugar content were all extremely significantly and positively correlated with the grain number per spike. Under the experimental conditions, the grain number per spike of the main stem, tiller I, and tiller II followed the order of  $D180 > D300 > D420 > D540$ . The increase in assimilate accumulation and its distribution ratio in the spike provided a material foundation for promoting floret development into grains and increasing the grain number per spike. In summary, the yield components of D300 treatment were more coordinated, making it the optimal density treatment in this study.

**Key words** Winter wheat; Planting density; Number of fertile florets; Spike dry matter accumulation; Soluble sugar content; Grain number per spike