麦类作物学报 2023,43(12):1607－1615
Journal of Triticeae Crops doi: 10.7606/j.issn.1009-1041.2023.12.13

网络出版时间:2023-07-13
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms2/detail/61.1359.s.20230711.1804.040.html

种植密度对不同穗型冬小麦品种结实特性和产量的影响

马金荣,张鸿雁,王雅群,张迎香,王红光,房 琴,李瑞奇
(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,河北保定 071001)

摘 要:为了明确种植密度对冬小麦结实特性和产量的影响,于2020－2021年以大穗型品种衡观35和多穗型品种济麦22为试验材料,设置4个种植密度水平,分别为每公顷基本苗180万(D180)、300万(D300)、420万(D420)和540万(D540)株,比较分析了不同种植密度下冬小麦小花结实、籽粒空间分布特征和产量的差异。结果表明,随着种植密度的降低,衡观35主茎穗上部和Ⅰ分蘖穗下部、济麦22主茎和Ⅰ分蘖穗中上部小穗位的结实粒数呈增加的趋势。降低种植密度促进了两个品种穗中部小穗位弱势小花、上部和下部小穗位强势小花的结实。衡观35主茎穗中上部和Ⅰ分蘖穗中部小穗位的结实粒数均高于济麦22。开花期穗干重与可孕小花数呈显著正相关。低种植密度处理下开花期穗干重的增加为其获得较高的穗粒数奠定了良好的物质基础。种植密度对千粒重影响不显著,但显著降低了衡观35的穗数。由于产量构成三要素的协调作用,两个品种均在D300处理下获得了最高产量,但与其余种植密度处理间差异均不显著。综合来看,在保证穗数的前提下,适当降低种植密度会促进冬小麦主茎和分蘖穗结实,进而增加穗粒数和产量,可节约生产成本,有利于冬小麦绿色高产高效生产。

关键词:冬小麦;品种;种植密度;结实特性;产量
中图分类号:S512.1;S311 **文献标识码**:A **文章编号**:1009-1041(2023)12-1607-09

Effects of Planting Density on Grain Setting Characteristics and Grain Yield of Winter Wheat Cultivars with Two Spike Types

MA Jinrong, ZHANG Hongyan, WANG Yaqun, ZHANG Yingxiang, WANG Hongguang, FANG Qin, LI Ruiqi
(College of Agronomy, Hebei Agricultural University/State Key Laboratory of North China CropImprovementand Regulation/Key Laboratory of Crop Growth Regulation of Hebei Province, Baoding, Hebei071001, China)

Abstract: In order to investigate the effects of planting density on grain setting characteristics and grain yield of winter wheat, Hengguan 35(a large-spike cultivar) and Jimai 22(a multi-spike cultivar) were used in 2020－2021. Four densities were conducted: 1.8×10^6(D180), 3.0×10^6(D300), 4.2×10^6(D420), and 5.4×10^6(D540) plants·hm^{-2}. The effect of densities on grain setting characteristics, grain spatial distribution and yield were studied. The results showed that the kernel number in upper spikelets of main stem and in basal spikelets of I tiller of Hengguan 35 increased with the decrease of planting density. In addition, the kernel number in middle and upper spikelets of main stem and I tiller of Jimai 22 also increased with the decrease of density. Reducing density effectively promoted the grain setting of inferior florets in middle spikelets and superior florets in upper and basal spikelets. The kernel number in middle and upper spikelets of main stem of Hengguan 35 was higher than that of Jimai 22. Meanwhile, the kernel number in the middle spikelets of I tiller of Hengguan 35 was also higher than that of Jimai 22. The ear weight at anthesis was positively correlated with the number of fertile

收稿日期:2022-11-14 修回日期:2022-12-27
基金项目:河北农业大学引进人才科研专项(YJ201851);国家小麦产业技术体系项目(CARS-03-05)
第一作者 E-mail:15131521895@163.com
通讯作者:房 琴(E-mail:fangqinhebei@163.com);李瑞奇(E-mail:li-rq69@163.com)

florets. The increase in spike weight at anthesis under low plant density provided sufficient nutrition for the development of florets to grains. There was no significant effect of plant density on 1 000-grain weight. However, the spikes of Hengguan 35 decreased significantly with the increase of density. D300 achieved the highest grain yield. Whereas, there was no significant difference in yield between the four plant densities of each cultivar. In conclusion, properly reducing plant density saved cost, and realized green, high yield and high efficiency of winter wheat production by increasing kernel number on the promise of ensuring spike number at maturity.

Keywords: Winter wheat; Variety; Planting density; Grain setting characteristics; Yield

冬小麦是我国重要的粮食作物之一，其高产稳产对保障国家粮食安全具有重要意义。近年来，城镇化加剧、水资源短缺等问题的出现导致冬小麦种植面积逐年降低[1]。如何在有限耕地面积上提高冬小麦产量成为众多学者关注的焦点问题。在产量构成三要素中，穗粒数对产量的贡献高于粒重，且对栽培措施和环境的反应较敏感。随着冬小麦产量水平的提高，许多学者认为，在稳定穗数的基础上，增加穗粒数是进一步提高产量的关键[2]。

穗粒数是由小花分化、发育、退化、结实等一系列生理过程决定的[3]。冬小麦分化小花数高达140～170 个，但开花前约有 70%～80%的小花退化为无效小花，减少小花退化是提高穗粒数的有效途径。种植密度是调节冬小麦小花发育和结实的重要栽培措施之一。降低小麦种植密度有利于减少小花退化，提高穗粒数。有学者认为，小麦种植密度从每公顷基本苗 540 万株降低到 300 万株后，穗粒数增加了 11.37%，产量提高了 9.16%[4]。Liu 等[5]研究发现，降低种植密度主要通过增加麦穗上部和下部小穗的结实粒数来增加穗粒数。但有人提出，增加小麦种植密度（播量从 112.5 kg·hm^{-2} 增加到 225 kg·hm^{-2}）有利于改善麦穗下部小穗的结实特性，提高产量[6]。屈会娟等[7]研究表明，大穗型品种的小穗结实粒数对种植密度的反应比多穗型品种敏感。

综上所述，虽然前人关于种植密度对冬小麦小花发育和结实的影响进行了相关研究，但因为环境条件、种植密度设置范围、品种特性的差异，研究结果不尽相同。本课题组近 6 年的研究结果表明，在河北省中南部平原区，冬小麦适期播种（10 月上中旬）条件下，冬前积温充足，每公顷基本苗在 150 万～540 万株时，成熟期每公顷穗数均在 720 万以上，产量均达到了 9 000 kg·hm^{-2} 的水平，说明适当降低种植密度既可减少种子投入，又可通过提高穗粒数来实现高产[4,8-9]。但目前关于种植密度对冬小麦小花结实特性的研究尚未开展。本研究重点分析了种植密度对大穗型和多穗型冬小麦品种主茎和 I 分蘖小花结实、籽粒空间分布特征和产量的影响，以期为降低生产成本和实现冬小麦绿色高产高效栽培提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2020－2021 年度在河北省石家庄市藁城区梅花镇刘家庄村（38.03°N，114.53°E）进行。近 30 年气象记录显示，冬小麦整个生长季平均降水量为 121.3 mm，日平均温度为 8.2 ℃。2020－2021 年冬小麦生育期降水量为 76.3 mm，日平均温度为 9 ℃。试验地土壤为砂质壤土，0～200 cm 土层土壤容重为 1.4 g·cm^{-3}，0～20 cm 土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷和速效钾含量分别为 17.4 g·kg^{-1}、1.1 g·kg^{-1}、118.5 mg·kg^{-1}、19.0 mg·kg^{-1} 和 192.1 mg·kg^{-1}。

1.2 试验材料与设计

供试品种为衡观 35（HG35）和济麦 22（JM22）。其中，HG35 株型紧凑，旗叶宽大、卷曲，分蘖力中等，属大穗型品种；JM22 株型半紧凑，旗叶宽短、上冲，分蘖力较强，属多穗型品种。试验采用裂区设计，主区为品种，副区为种植密度。种植密度设置 4 个水平，分别为每公顷基本苗 180 万株（D180）、300 万株（D300）、420 万株（D420）和 540 万株（D540）。每个处理 3 次重复，共 24 个小区，小区面积为 40 m^2。

前茬作物为玉米，玉米收获后秸秆粉碎还田。全生育期施用尿素（含纯 N 46%）521.7 kg·hm^{-2}、磷肥（P_2O_5 46%）260.8 kg·hm^{-2} 和钾肥（KCl 60%）250 kg·hm^{-2}，其中磷、钾肥作为底肥一次性施用，尿素 50%底施，50%拔节期追施。

冬小麦于 2020 年 10 月 7 日采用 15 cm 等行距播种,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进行灌水,每次灌水量为 60 mm,次年 6 月 12 日收获。其他田间管理措施与高产田一致。

1.3　测定项目与方法

1.3.1　群体总茎(穗)数测定

于冬小麦三叶期在小区中间选取长势均匀一致的 1 m 双行样段定苗,并分别在越冬期、拔节期、开花期和成熟期调查该样段的总茎(穗)数。

1.3.2　分化小花数和可孕小花数测定

自返青期开始,每处理选取生长均匀一致的冬小麦植株 100 株,用不同颜色的皮筋标记主茎和Ⅰ分蘖。于拔节期开始每隔 3 d 取样 1 次,至花后 5 d 结束。每处理选取标记的冬小麦植株 3 株,在 SZX7 解剖镜(日本,Olympus 公司)下观察主茎和Ⅰ分蘖的幼穗分化时期,幼穗分化时期按照 Waddington 等[10]的标准,并记录分化小花数、可孕小花数(具有完整绿色花药和羽状柱头的小花数)。计算可孕小花结实率和小花结实率。可孕小花结实率=结实粒数/可孕小花数×100%;小花结实率=结实粒数/最大分化小花数×100%。

1.3.3　开花期穗干重测定

于开花期选取有代表性的 20 个麦穗,置于 105 ℃烘箱中杀青 30 min,在 80 ℃鼓风干燥条件下烘干至恒量,测定穗干重。

1.3.4　各小穗位、小花位结实粒数测定

于成熟期选取返青期用皮筋标记的小麦植株 20 株,调查各处理主茎和Ⅰ分蘖穗的可孕小穗数和不孕小穗数,计算小穗结实率,并调查每个小穗的结实粒数和不同小花位的结实粒数。不同小穗位划分:穗下部小穗位为基部第 1～第 7 个小穗;中部小穗位为第 8～第 15 个小穗;上部小穗位为第 16 个小穗～顶小穗。小花位命名参照 González 等[3]的方法,根据小花原基在轴上着生的位置将其分为 F1、F2、F3、F4,分别对应第 1、第 2、第 3 和第 4 小花位。F1 是离轴最近的小花原基,F4 是最远端的小花原基。F1 和 F2 为强势小花,F3 和 F4 为弱势小花。

1.3.5　产量及构成因素测定

成熟期,在各小区定点样段处调查总穗数,计算每公顷穗数。并在各小区内选取长势均匀一致、连续的 50 个穗,调查穗粒数。各小区收获 3 m^2 小麦植株,脱粒风干后称重,按 13%的含水量计算每公顷籽粒产量。在小区测产的风干籽粒中取样调查千粒重,每处理随机选取 2 组各 500 粒,分别称重,2 份重量的差值除以 2 份重量的平均值,若得数小于或等于 5.0%,将 2 份质量相加即为千粒重,若超过 5.0%,则需要数第 3 份,将 2 份重量相近的相加即为千粒重。

1.4　统计分析

利用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析,在 0.05 显著水平上采用邓肯多重检验比较处理间的平均差异,并进行显著性差异检验(LSD 法)。利用 Microsoft Excel 2019 绘图。

2　结果与分析

2.1　种植密度对两个品种各生育时期群体总茎(穗)数的影响

随着生育时期的推进,冬小麦群体总茎(穗)数呈先增加后降低的趋势;在同一时期,冬小麦群体总茎(穗)数也随种植密度的增加而增大(图 1)。各处理的群体总茎数在越冬期达到最大值(本试验中未调查起身期群体总茎数),此时期不同种植密度间的差异也最大,其中 HG35 和 JM22 在 D180 处理下群体总茎数分别比 D540 处理低 41.59%和 34.17%。至成熟期,两个品种在 D180 处理下的穗数分别比 D540 处理低 20.81%和 12.19%。品种间比较,HG35 各生育时期的群体总茎(穗)数均低于 JM22。

2.2　种植密度对两个品种最大分化小花数、可孕小花数和结实粒数的影响

随着种植密度的增加,两个品种的最大分化小花数、可孕小花数和结实粒数均呈降低趋势(图 2)。与 D540 处理相比,在 D180 处理下,HG35 主茎和Ⅰ分蘖穗的最大分化小花数分别高 3.70%和 12.24%,而 JM22 分别高 3.70%和 2.34%;两个品种的最大分化小花数在 D180 与 D540 处理间差异均显著,但在 D300～D540 处理间差异均不显著。除主茎穗的可孕小花数在 HG35 的 D300 与 D420 和 D420 与 D540 处理间及 JM22 的 D300～D540 处理间差异均不显著外,两个品种的主茎和Ⅰ分蘖穗的可孕小花数在其余处理间差异均显著。HG35 主茎穗的结实粒数在 4 个密度处理间差异均显著,而 JM22 主茎穗的结实粒数在 D180 处理下显著高于其余处理,但其余处理间差异均不显著;两个品种的Ⅰ分蘖穗结实粒数在 D420 与 D540 处理间差异不显著,但在其余

处理间差异均显著。这说明降低种植密度有利于增加最大分化小花数、可孕小花数和结实粒数，且种植密度对Ⅰ分蘖穗的影响程度大于主茎。品种间比较，HG35 主茎和Ⅰ分蘖穗的最大分化小花数分别比 JM22 低 0.45%和 4.18%，但主茎的可孕小花数和结实粒数分别比 JM22 高 4.96%和 8.33%；Ⅰ分蘖穗的结实粒数比 JM22 高 2.13%，说明 HG35 的小花结实能力优于 JM22。

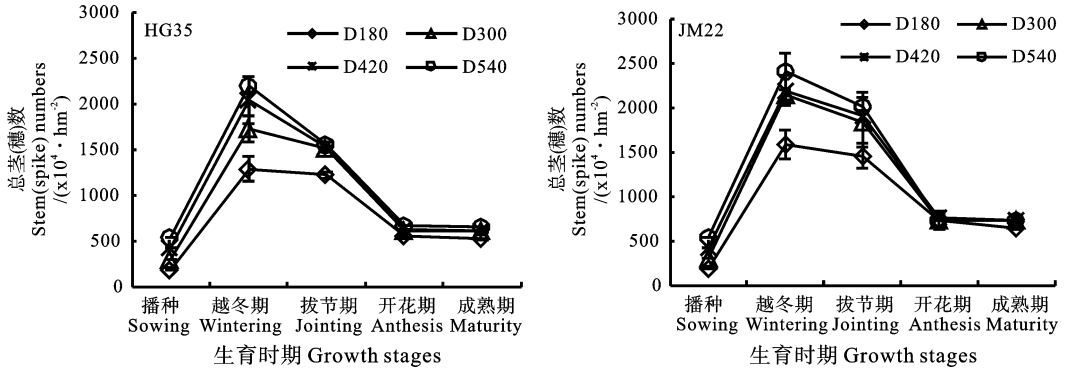
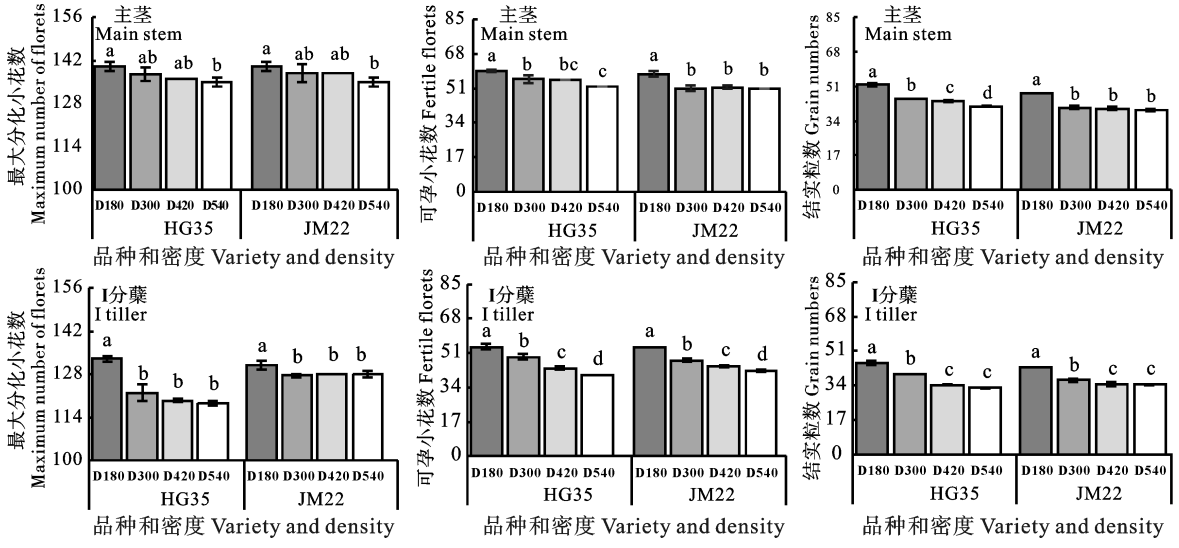


图 1 不同种植密度下各生育时期 HG35 和 JM22 的群体总茎(穗)数

Fig. 1 Stem(spike) number of HG35 and JM22 at different growth stages under different planting densities



图柱上不同字母表示不同密度间差异显著。图 3 同。

Different letters on the columns indicate significant differences among different densities at 0.05 level. The same in figure 3.

图 2 不同种植密度下 HG35 和 JM22 的最大分化小花数、可孕小花数和结实粒数

Fig. 2 Maximum number of differentiated florets, fertile florets, and grains of HG35 and JM22 under different planting densities

2.3 种植密度对两个品种小花结实率、可孕小花结实率和小穗结实率的影响

在 D180 处理下，两个品种主茎穗的小穗结实率均显著高于 D300、D420 和 D540 处理，但在 D300、D420、D540 处理间差异均不显著(图 3)。HG35 主茎穗的小花结实率表现为 D180＞D300＞D420＞D540，其中 D300 与 D420 处理间差异不显著，其余处理间差异均显著；JM22 主茎穗的 D180 处理小花结实率显著高于 D300、D420 和 D540 处理，而后三个处理间差异均不显著。两个品种Ⅰ分蘖穗的小穗结实率和小花结实率均随种植密度的增加而下降，其中 D180 处理与 D420 和 D540 处理差异均显著，与 D300 处理的差异除 HG35 的小花结实率外均达显著水平。两个品种主茎穗的可孕小花结实率均表现为 D180 处理显著高于 D540 处理，其余处理间差异均不显著。而种植密度对两个品种Ⅰ分蘖穗的可孕小花结实率影响均不显著。品种间比较，HG35 主茎和Ⅰ分蘖穗在各种植密度处理下的小花结实率均高于 JM22，小穗结实率则均低于 JM22，说明与 JM22 相比，HG35 穗粒数的增加主要是通过小花结实率和可孕小花结实率的提高来实现的。

2.4　种植密度对两个品种不同小穗位结实粒数的影响

随小穗位从穗下部至顶部,两个品种的结实粒数均先增后降(图 4),明显符合二次曲线变化趋势,其二次方程的 R^2 值均大于 0.85,达到了极显著水平($P<0.01$)。各处理均以中部小穗位的结实粒数最多。两个品种各小穗位的结实粒数均随着种植密度的降低呈增加的趋势。其中,HG35 主茎穗上部和Ⅰ分蘖穗下部、JM22 主茎和Ⅰ分蘖穗中上部小穗位的结实粒数增加幅度最大。品种间比较,HG35 主茎和Ⅰ分蘖穗下部小穗位的结实粒数均低于 JM22,但主茎穗中上部和Ⅰ分蘖穗中部小穗位的结实粒数均高于 JM22,说明与 JM22 相比,HG35 穗粒数的增加主要是依靠中上部小穗位结

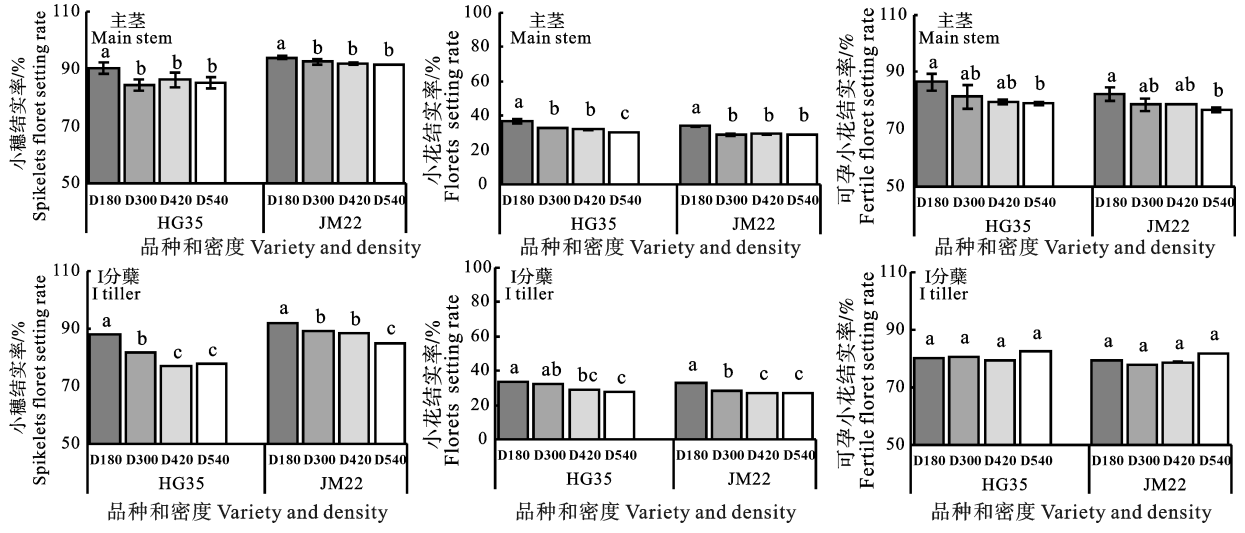


图 3　不同种植密度下 HG35 和 JM22 的小穗结实率、小花结实率和可孕小花结实率

Fig. 3　Spikelet setting rate, floret setting rate, and fertile floret setting rate of HG35 and JM22 under different planting densities

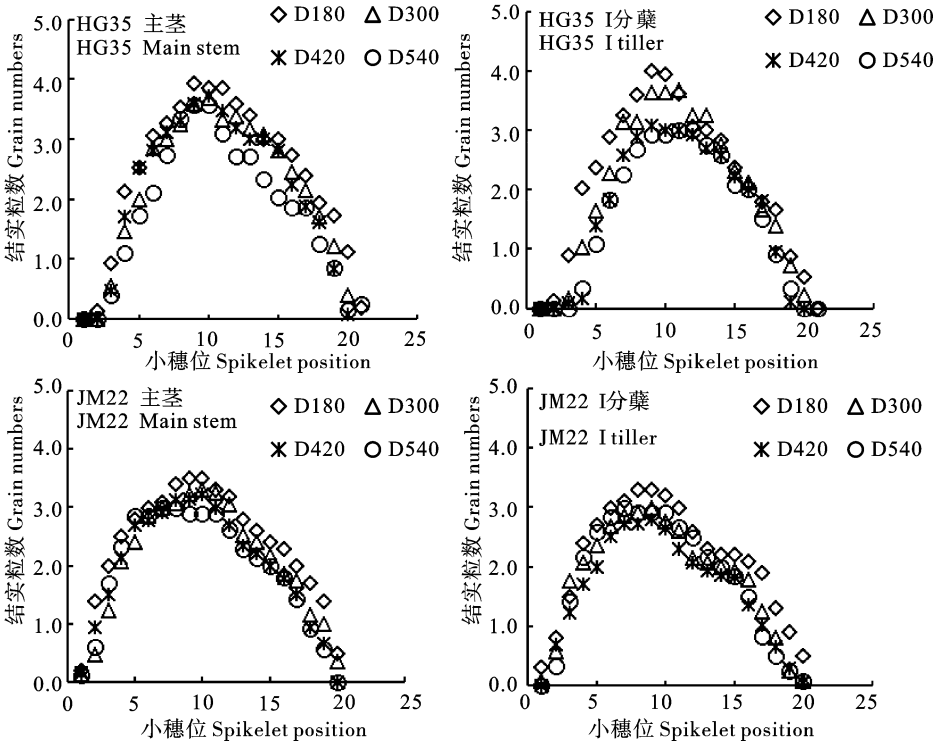


图 4　不同种植密度下 HG35 和 JM22 的不同小穗位结实粒数

Fig. 4　Grain number at different spikelet position of HG35 and JM22 under different planting densities

实粒数的增加来实现的。

2.5 种植密度对两个品种不同小花位结实粒数的影响

各处理穗下部(第 1～第 7 小穗)小穗位的结实粒数随小穗位的上升呈增加的趋势,上部(第 15～第 21 小穗)小穗位的结实粒数则呈下降的趋势,中部(第 7～第 14 小穗)小穗位的强势小花均能结实(图 5 和图 6)。比较不同小穗位各小花位的结实粒数可知,两个品种下部和上部小穗位的第 1、第 2 小花位及中部小穗位的第 3、第 4 小花位的结实粒数均随种植密度的降低呈增加的趋势,且 JM22 中部小穗位弱势小花位的结实粒数增加更显著。品种间比较,HG35 主茎穗的第 1、第 2 小花位的结实粒数分别比 JM22 低 5.87%、1.59%,第 3、第 4 小花位的结实粒数分别比 JM22 高 8.02%、158.72%;I 分蘖穗第 1、第 2 小花位的结实粒数分别比 JM22 低 6.80%、2.45%,第 3、第 4 小花位的结实粒数分别比 JM22 高 25.42%、108.12%,表明 HG35 弱势小花位结实粒数的增加为其获得较高的穗粒数奠定了基础。

2.6 开花期穗干重与可孕小花数、穗粒数的相关性

两个品种开花期穗干重均与可孕小花数呈显

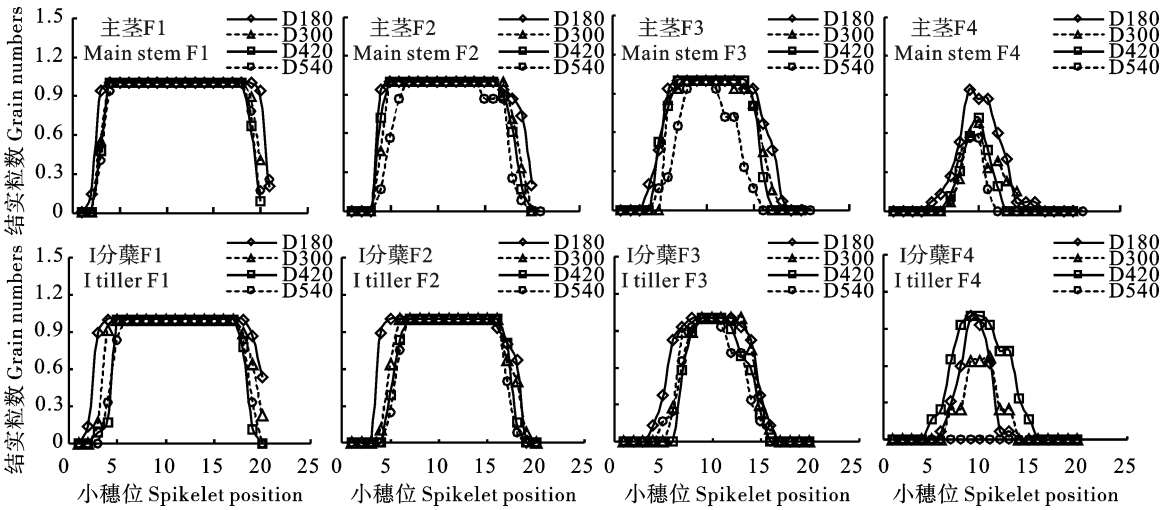


图 5 不同种植密度下 HG35 不同小花位结实粒数

Fig. 5 Grain number (floret 1 to 4 from bottom to top of spikelet) in different spikelet position of HG35 under different planting densities

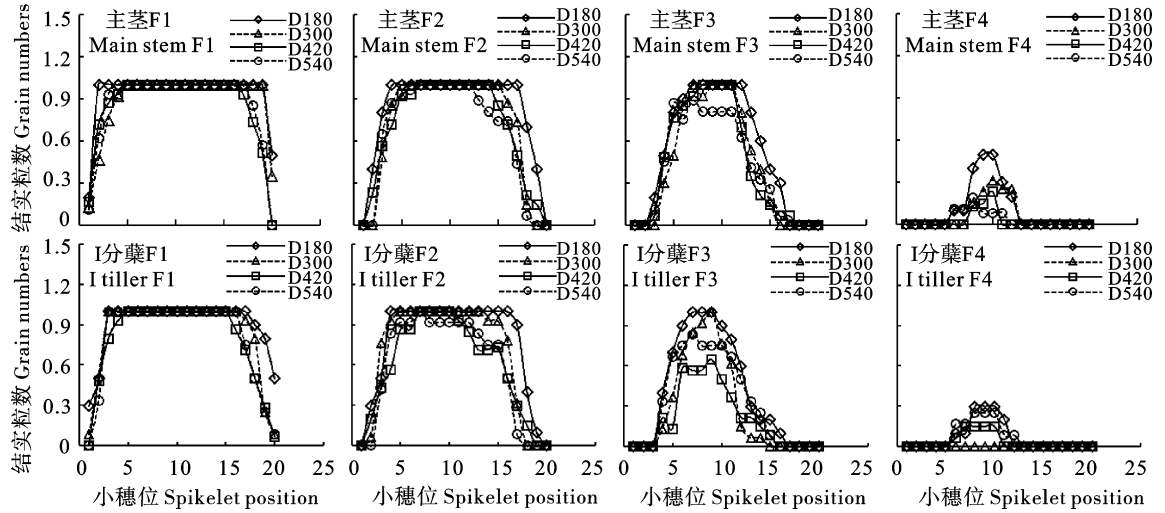


图 6 不同种植密度下 JM22 不同小花位结实粒数

Fig. 6 Grain numbers (floret 1 to 4 from bottom to top of spikelet) in different spikelet positions of JM 22 under different planting densities

著正相关($P<0.05$)(图 7)。HG35 开花期穗干重与穗粒数呈极显著正相关($P<0.01$),而 JM22 呈不显著的正相关($P>0.05$),说明穗部同化物的积累有利于可孕小花数和穗粒数的增加。

2.7　种植密度对两个品种产量及其构成的影响

种植密度对两个品种穗粒数及 HG35 穗数影响显著,但对两个品种的产量、千粒重及 JM22 的穗数影响均不显著(表 1)。HG35 的穗数随着种植密度的增加呈增加趋势,而穗粒数呈下降趋势,且 D180 处理的穗数和穗粒数与其余处理差异均显著。这说明低种植密度虽然减少了穗数,但通过增加穗粒数使 HG35 的产量保持稳定。JM22 的产量构成对种植密度反应不敏感,从而保持了高产和稳产。

3　讨论

3.1　不同穗型冬小麦小花退化和结实对种植密度的响应

前人研究认为,冬小麦穗粒数与最大分化小花数相关不显著,而与开花期可孕小花数呈显著正相关[11]。潘洁等[4]研究表明,降低种植密度可显著增加冬小麦主茎穗和分蘖穗的可孕小花数,促进小花结实,增加穗粒数。本研究中,当种植密度从 540 万株·hm^{-2} 降低到 180 万株·hm^{-2} 时,两个品种主茎和Ⅰ分蘖穗的可孕小花数分别增加了 13.73%～14.42%和 26.56%～35.0%;穗粒数分别增加了 21.26%～26.01%和 24.01%～36.95%,且种植密度对Ⅰ分蘖穗的影响程度高于主茎穗。冬小麦品种穗部的结实特性存在遗传差异,大穗型品种的小花结实率、可孕小花结实率和小穗结实率均高于多穗型品种[12]。本研究中,HG35 的小花结实率和可孕小花结实率均高于 JM22,但小穗结实率低于 JM22,说明多穗型品种 JM22 小穗结实率的提高并未带来穗粒数的增加。

Slafer 等[13]研究认为,冬小麦开花前快速伸长的节间和迅速分化的幼穗形成竞争关系,降低光合产物向茎基部第 4、第 5 节间的分配比例,增加其向穗部的分配比例,有利于减少小花退化,促进小花发育成粒。Ferrante 等[14]通过研究也得

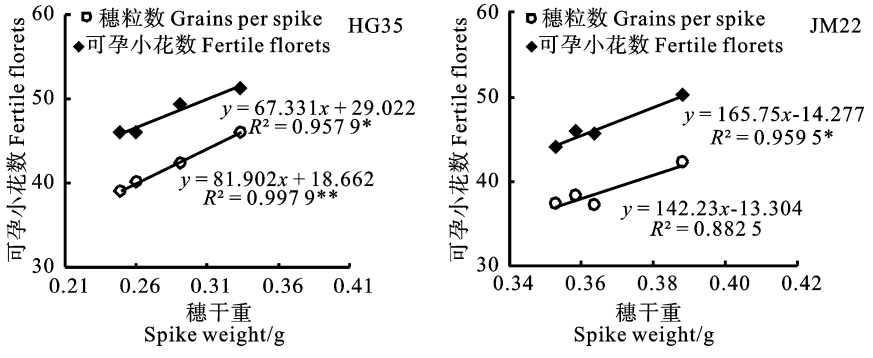


图 7　开花期穗干重与可孕小花数、穗粒数相关性分析

Fig. 7　Correlation between spike weight and fertile floret number and grains per spike

表 1　不同种植密度处理下 HG35 和 JM22 产量和产量三要素

Table 1　Yield and yield components of HG35 and JM22 under different planting densities

品种 Cultivar	处理 Treatment	穗数 Spike number/(×10^4·hm^{-2})	穗粒数 Grains per spike	千粒重 1 000-grain weight/g	籽粒产量 Grain yield/(kg·hm^{-2})
HG35	D180	520.03c	46.09a	48.70a	9 981.39a
	D300	610.00b	42.37b	48.72a	10 400.67a
	D420	613.36b	40.14c	48.80a	10 000.20a
	D540	656.69a	39.09c	48.20a	10 240.16a
JM22	D180	648.40a	42.18a	45.93a	10 276.22a
	D300	732.26a	38.28b	45.73a	10 443.38a
	D420	733.37a	37.20b	45.16a	10 160.34a
	D540	738.37a	37.26b	44.93a	10 170.00a

出,冬小麦可孕小花数与同化物向穗部的分配比例有关,而与穗器官干物质重关系不大。但在本研究中,冬小麦开花期穗部干物质积累量与可孕小花数呈显著正相关,低种植密度处理下穗部积累的光合同化物较多,从而为获得较高的穗粒数奠定了良好的物质基础。也有研究者[15]发现,冬小麦营养器官如茎叶重和结实粒数呈显著正相关,维持一定水平的茎叶重,促进光合物质生产,协调好营养生长和生殖生长间的关系是提高小花发育质量,减少籽粒败育,增加结实粒数的关键。

3.2 不同穗型冬小麦籽粒空间分布特征对种植密度的响应

前人关于冬小麦穗部籽粒空间分布的研究结果总体一致,认为其呈偏纺锤形,表现出中部小穗结实粒数最多的近中优势[16]。本研究中,各处理均以中部小穗位结实粒数最多。屈会娟等[7]研究认为,降低种植密度均能促进大穗和多穗型冬小麦品种茎蘖穗下部小穗的结实。本研究中,大穗型品种 HG35 主茎穗上部小穗位和Ⅰ分蘖穗中下部小穗位的结实粒数随着种植密度的降低而显著增加,但对多穗型品种 JM22 而言,降低种植密度主要增加了主茎和Ⅰ分蘖穗中上部小穗位的结实粒数。这可能与品种的遗传特性和播量不同有关[17]。

外部栽培手段的干预对冬小麦各小穗的粒位效应产生影响。马建辉等[16]研究认为,冬小麦拔节期追施纯氮 100 kg·hm^{-2} 有利于穗基部和上部小穗位第 1、第 2 小花位及各小穗位第 3 小花位的结实。李春喜等[18]提出,降低种植密度可促进基部和上部小穗位强势小花和各小穗位弱势小花的结实。本研究中,降低种植密度主要增加了两个品种穗下部和上部小穗位第 1、第 2 小花位、中部小穗位第 3、第 4 小花位的结实粒数,与前人的研究结果基本一致。本研究还发现,Ⅰ分蘖穗第 3、第 4 小花位的结实粒数对种植密度的反应较敏感。因此,在冬小麦生产中,除了注重增加主茎穗的结实粒数外,也应重视分蘖穗小花尤其是弱势小花的结实。

3.3 不同穗型冬小麦产量和产量构成要素对种植密度的响应

Liu 等[5]研究认为,降低种植密度显著降低了大穗型品种的穗数,本研究也得出类似的结论。但种植密度对多穗型品种 JM22 的穗数影响不显著。冬小麦分蘖的发生受积温调控。吕丽华等[19]研究表明,充足的积温有利于小麦形成壮苗群体,充分发挥低位分蘖的优势,增加穗数。本研究中,在播种至越冬期,0 ℃以上积温为 546.80 ℃,D180 和 D300 处理下,JM22 冬前单株分蘖数分别为 8.81 和 7.15 个,群体总茎数分别为 1 585.91 万·hm^{-2} 和 2 146.77 万·hm^{-2},为其获得较高的穗数奠定了基础。郑飞娜等[20]研究结果显示,种植密度从 550 万株·hm^{-2} 下降到 130 万株·hm^{-2} 时,小麦穗粒数增加了 45.22%,千粒重仅增加 9.22%。本研究中,不同种植密度处理间千粒重差异不显著,但降低种植密度显著增加了 HG35 和 JM22 的穗粒数。两个品种在 D180 处理下的穗粒数比 D540 处理分别高 17.90%和 13.20%。郭文善等[21]研究提出,限制产量的主要因素是“库”,而不是“源”。本研究中,降低种植密度后,尽管小花退化数减少了 10.17%,但仍有 65.57%的小花退化。可见,冬小麦的库容量仍有较大的提升空间。前人研究认为,适期追肥、外部喷施植物生长调节剂等可促进小花结实,起到增花保粒的作用[22-23]。因此,在最佳种植密度设置的基础上,采取适当的外部调控措施,可作为进一步提升冬小麦产量的有效途径。

4 结论

适当降低种植密度减少了小麦小花退化,促进了主茎和Ⅰ分蘖穗中部小穗位弱势小花、下部和上部小穗位强势小花的结实,且种植密度对Ⅰ分蘖穗的影响程度高于主茎穗。与多穗型品种 JM22 相比,大穗型品种 HG35 穗中上部小穗位结实粒数的增加是其获得较高穗粒数的关键。本试验条件下,种植密度为 300 万株·hm^{-2} 时,两个品种产量构成三要素能够协调发展,并节约生产成本,实现冬小麦绿色高产高效。

参考文献:

[1]XIAO D P,LIU D L,FENG P Y,*et al*. Future climate change impacts on grain yield and groundwater use under different cropping systems in the North China Plain [J]. *Agricultural Water Management*,2021,246:106685

[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[J].麦类作物学报,2014,34(10):1383.
ZHU H J,ZHENG C F,ZHANG G Z,*et al*. Effects of cultivation modes on the characteristics of floret development and grain set of winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2014,34(10):1383.

[3]GONZÁLEZ F G,TERRILE I I,FALCÓN M O. Spike fertility and duration of stem elongation as promising traits to improve potential grain number (and yield): variation in Modern Argentinean wheats [J]. *Crop Science*,2011,51:1693.

[4]潘 洁,姜 东,曹卫星,等.小麦穗籽粒数单粒重及单粒蛋白质含量的小穗位和粒位效应[J].作物学报,2005,31(4):431.
PAN J,JIANG D,CAO W X,*et al*. Effects of spikelet and grain positions on grain number,weight and protein content of wheat spike [J]. *Acta Agronomica Sinica*,2005,31(4):431.

[5]LIU Y,LIAO Y C,LIU W Z. High nitrogen application rate and planting density reduce wheat grain yield by reducing filling rate of inferior grain in middle spikelets [J]. *The Crop Journal*,2021,9(2):412.

[6]WEI C,ZHANG J J,DENG X P. The spike weight contribution of the photosynthetic area above the upper internode in a winter wheat under different nitrogen and mulching regimes [J]. *The Crop Journal*,2019,7(1):89

[7]屈会娟,李金才,沈学善.播种种植密度对冬小麦不同穗位与粒位结实粒数和粒重的影响[J].作物学报,2009,35(10):1875.
QU H J,LI J C,SHEN X S. Effects of plant density on grain number and grain weight at different spikelets and grain positions in winter wheat cultivars [J]. *Acta Agronomica Sinica*,2009,35(10):1875.

[8]刘慧婷,李瑞奇,王红光,等.种植密度和施氮量对强筋小麦藁优 2018 产量和抗倒性的影响[J].麦类作物学报,2017,37(12):1619.
LIU H T,LI R Q,WANG H G*et al*. Effect of planting density and nitrogen fertilization rate on lodging resistance and grain yield of strong gluten wheat Gaoyou 2018 [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2017,37(12):1619.

[9]房 琴,王红光,马伯威,等.种植密度和施氮量对超高产冬小麦群体质量和产量形成的影响[J].麦类作物学报,2015,35(3):364.
FANG Q,WANG H G,MA B W,*et al*. Effect of planting density and nitrogen application rateon population quality and yield formation of super high-yielding winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2015,35(3): 364.

[10]WADDINGTON S R,CARTWRIGHT P M,WALL P C. A quantitative scale of spike initial and pistil development in barley and wheat [J]. *Annals of Botany*,1983,51:119.

[11]ZU 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 [J]. *European Journal of Agronomy*,2019,104:49.

[12] 王兆龙,曹卫星,戴廷波,等.不同穗型小麦品种小花发育与结实特性研究[J].南京农业大学学报,2000,23(4):9.
WANG Z L,CAO W X,DAI T B,*et al*. Characteristics of floret development and grain set in three wheat genotypes of different spike sizes [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*,2000,23(4):9.

[13]SLAFER G A,ANDRADE F H. Physiological attributes related to the generation of grain yield in bread wheat cultivars released at different eras [J]. *Field Crops Research*,1993,31(3-4):351.

[14]FERRANTE A,SAVIN A,SLAFER G A. Floret development of durum wheat in response to nitrogen availability [J]. *Journal of Experimental Botany*,2010,61(15):4351.

[15]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[J].植物营养与肥料学报,2019,25(3):370.
ZHU Y G,XIAO Y Y,CHU J P,*et al*. Correlation between floret development characteristics and photosynthate metabolism of winter wheat in different sowing dates [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*,2019,25(3):370.

[16]马建辉,齐冰玉,姜丽娜,等.拔节期追氮对冬小麦不同穗粒位籽粒特性的影响[J].河南师范大学学报(自然科学版),2016,44(3):125.
MA J H,QI B Y,JIANG L N,*et al*. Effects of nitrogen supplementation at jointing stage on grain characteristics of winter wheat at different panicle positions [J]. *Journal of Henan Normal University*,2016,44(3):125.

[17]刘雨晴,孙娜娜,高艳梅,等.不同基因型冬小麦穗粒数与粒重生理差异分析[J].中国农业大学学报,2021,26(2):1.
LIU Y Q,SUN N N,GAO Y M, *et al*. Physiological difference analysis of spike number and grain weight of winter wheat with different genotypes [J]. *Journal of China Agricultural University*,2021,26(2):1.

[18]李春喜,石惠恩,姜丽娜.小麦不同种植密度粒重分布特性的研究[J].西北植物学报,1999,19(1):135.
LI C X,SHI H E,JING L N. Investigation on the grain weight distribution characteristic of wheat in different densities [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentall Sinica*,1999,19(1):135.

[19]吕丽华,梁双波,张丽华,等.不同小麦品种产量对冬前积温变化的响应[J].作物学报,2016,42(1):149.
LU L H,LIANG S B,ZHANG L H,*et al*. Yield in response to accumulated temperature before winter in winter wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*,2016,42(1):149.

[20]郑飞娜,初金鹏,张 秀,等.播种方式与种植种植密度互作对大穗型小麦品种产量和氮素利用率的调控效应[J].作物学报,2020,46(3):423.
ZHENG F N,CHU J P,ZHANG X,*et al*. Interactive effects of sowing pattern and planting density on grain yield and nitrogen use efficiency in large spike wheat cultivar [J]. *Acta Agronomica Sinica*,2020,46(3):423.

[21]郭文善,封超年,严六零,等.小麦开花后源库关系分析[J].作物学报,1995,21(3):334.
GUO W S,FENG C N,YAN L L,*et al*. Analysis of source-sink relationships after anthesis in wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*,1995,21(3):334.

[22]邱泽生,刘捷平,黄勤妮,等.冬小麦的小花发育与碳氮代谢的关系[J].作物学报,1980,6(3):139.
QIU Z S,LIU J P,HUANG Q N,*et al*. The relationship between winter wheat floret development and carbon and nitrogen metabolism [J]. *Acta Agronomica Sinica*,1980,6(3):139.

[23]吕晓康,温晓霞,廖允成,等.外源多胺对小麦小花退化的调控机制[J].作物学报,2016,42(9):1391.
LÜ X K,WEN X X,LIAO Y C,*et al*. Effect of exogenous polyamines on mechanism of floret degeneration in wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*,2016,42(9):1391.