

# 种植密度对甘肃不同生态区小麦产量形成的影响

柴芳梅<sup>1</sup> 高甜甜<sup>1</sup> 柴守玺<sup>1</sup> 程宏波<sup>2</sup> 宋亚丽<sup>3</sup> 鲁清林<sup>4</sup>

(<sup>1</sup> 甘肃省干旱生境作物学重点实验室/甘肃农业大学农学院, 730070, 甘肃兰州; <sup>2</sup> 甘肃农业大学生命科学与技术学院, 730070, 甘肃兰州; <sup>3</sup> 庆阳市农业科学研究院, 745000, 甘肃庆阳; <sup>4</sup> 甘肃省农业科学院小麦研究所, 730070, 甘肃兰州)

**摘要** 为揭示不同播种量处理对甘肃省3个不同生态区小麦产量形成的影响, 分别以陇中2号、兰天36号和铜麦6号为材料, 设置5个播种量水平, 低温半干旱区和半湿润易旱区为150.0、187.5、225.0、262.5和300.0 kg/hm<sup>2</sup>, 半干旱区为112.5、150.0、187.5、225.0和262.5 kg/hm<sup>2</sup>。研究了小麦产量及产量构成要素、群体结构的变化特性和不同区域产量差异。结果表明, 低温半干旱区、半湿润易旱区和半干旱区适宜播种量依次为187.5、225.0和225.0 kg/hm<sup>2</sup>, 最高产量分别是5 472.0、5 730.0和7 271.4 kg/hm<sup>2</sup>。随种植密度的升高, 各生态区小麦产量、穗数均呈先升后降变化趋势, 穗粒数随之减小, 千粒重无明显变化; 基本苗和分蘖成穗率随密度的变化趋势与产量变化一致; 地上部生物量随密度增大呈增加趋势, 半湿润易旱区和半干旱区不同播种量间地上部生物量差异显著; 在相同的播种量下(150.0和225.0 kg/hm<sup>2</sup>), 不同区域的产量差异较大, 以半干旱区平均产量最高, 半湿润易旱区次之, 低温半干旱区最低。

**关键词** 甘肃; 生态区; 种植密度; 小麦; 产量

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



种植密度是影响小麦生长发育及产量形成的重要因素之一<sup>[1]</sup>。合理密植可有效缓解群体和个体之间的矛盾, 促进穗数、穗粒数和千粒重的协调发展<sup>[2-3]</sup>, 形成优良的群体结构, 提高小麦产量<sup>[4-5]</sup>。研究普遍认为小麦产量随着种植密度的增加呈现先增加后降低的趋势<sup>[6-8]</sup>。一定范围内, 随着种植密度的增加单位面积有效穗数不断增加, 超过一定种植密度后开始下降<sup>[9-10]</sup>。小麦分蘖能力受种植密度影响显著, 通过减少分蘖来缓解高种植密度个体间的竞争压力, 增加分蘖来补偿低种植密度单位面积的穗数<sup>[11]</sup>; 各生育时期群体茎蘖数随种植密度增加均呈现极显著增加趋势, 但茎蘖数持续增加会加剧群体无效分蘖, 降低成穗率、穗粒数和千粒重<sup>[12-13]</sup>。有关小麦穗粒数和种植密度关系的研究结果不尽一致, 有研究表明穗粒数随种植密度的增加呈逐渐降低趋势<sup>[14-15]</sup>; 但也有一些研究者认为一定种植密度下处理间穗粒数差异不显著<sup>[6, 16]</sup>。

杨吉福等<sup>[17]</sup>研究发现, 小麦的株高和成穗数

均随着种植密度的增加而增加; 种植密度持续增加致使茎秆重心普遍上移, 植株生长旺盛, 群体数量过大, 茎秆抗倒伏能力降低, 影响产量<sup>[18]</sup>; 株高较低可避免群体内光照不足、通风不畅、植株早衰和病虫害发生<sup>[19]</sup>等一系列潜在问题。种植密度影响小麦总茎数、穗长、茎节长度及茎粗等性状, 随种植密度的增加, 单株茎数越来越少, 小麦总茎数增多, 穗长缩短<sup>[20-21]</sup>。

当前气候环境特征、农田土壤条件、品种特性及农业生产力水平等因素都发生了不同程度的变化, 不同品种在不同地区受种植密度影响的变化趋势不一致, 小麦的适宜播种量范围存在较大差异。为此, 本研究选取甘肃省3个不同生态区, 分别设置5个播种量水平, 围绕小麦生长进程, 系统研究不同种植密度对小麦生物量、产量及其三要素的影响, 明确在当前农业生产力水平下不同生态区的最优播种量, 以实现小麦苗、株、穗和粒的协调发展, 在一定程度上提高小麦产量, 为甘肃省旱作农业区小麦生产提供理论参考及技

作者简介: 柴芳梅, 主要从事作物栽培学与生理生态研究, E-mail: 2544257980@qq.com

柴守玺为通信作者, 主要从事作物栽培学与生理生态研究, E-mail: sxchai@126.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0200401); 国家小麦产业技术体系(CARS-3-2-49); 国家自然科学基金(31760362)

收稿日期: 2019-10-21; 修回日期: 2020-02-18; 网络出版日期: 2020-05-25

术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2017–2018 年分别在甘肃省通渭县平襄镇旱作循环农业试验示范基地、甘肃省农业科学院清水试验站和甘肃省庆阳市农业科学研究院和盛科研基地 3 个地区进行。

甘肃省通渭县平襄镇旱作循环农业试验示范基地（35° 11′ N、105° 19′ E）属于低温半干旱区，海拔 1 750m，年日照时数 2 100~2 430h，年均温 7.2℃，无霜期 120~170d，年均降水量 390.7mm。试验区土壤类型为黄绵土，耕层土壤含有机质 11.72g/kg，速效磷 11.63mg/kg，速效钾 122.7mg/kg。

甘肃省农业科学院清水试验站（34° 70′ N、106° 20′ E）属于半湿润易旱区，海拔 1 360m，年日照时数 2 012h，年均温 8.8℃，无霜期 170d，年均降水量 583.0mm。试验区土壤类型为黄绵土，耕层土壤含有机质 12.24g/kg、速效磷 12.20mg/kg 和速效钾 122.54mg/kg。

甘肃省庆阳市农业科学研究院和盛科研基地（35° 30′ N、107° 38′ E）属于半干旱区，海拔 1 480m，年日照时数 2 213~2 540h，年均温 8.7℃，无霜期 160~180d，年蒸发量 >520mm，年均降水量 492.0mm。试验区土壤类型为黄绵土，耕层土壤含有机质 13.01g/kg、速效氮为 10.20mg/kg、速效磷 12.01mg/kg 和速效钾 131.94mg/kg。

2017–2018 年冬小麦各生育期降水量见表 1。

表 1 2017–2018 年冬小麦生育期降水量  
Table 1 Precipitation in winter wheat growth in 2017–2018 mm

气候类型区 Climate type region	播种 – 越冬期 Sowing–Wintering	越冬 – 返青期 Wintering–Reviving	返青 – 抽穗期 Reviving–Filling	抽穗 – 成熟期 Filling–Mature	合计 Total
低温半干旱区 Low–temperature semi–arid region	33.0	13.3	71.9	32.8	151.0
半湿润易旱区 Semi–humid arid region	43.6	13.5	77.8	30.1	165.0
半干旱区 Semi–arid region	35.8	20.0	117.9	30.3	204.0

1.2 试验设计

试验采用 5 个播种量水平，3 次重复的随机区组试验设计，小区面积 16m<sup>2</sup>（4m × 4m）。播前进行旋耕镇压，播种方式均为人工开沟条播，田间管理为当地大田常规方式。各试点施氮水平均为纯氮 150kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 120kg/hm<sup>2</sup> 作基肥一次性施入，各处理所施氮肥为尿素，磷肥为磷二铵。开花后 7d 开始进行 1~2 次“一喷三防”，以防后期病虫害、干热风和小麦植株早衰。

低温半干旱区、半湿润易旱区和半干旱区的供试品种均选择各生态区各自适应的主栽品种，分别为陇中 2 号、兰天 36 号和铜麦 6 号。陇中 2 号为冬性品种，兰天 36 号和铜麦 6 号为半冬性品种。结合生产实际，各区域密度处理有差异。低温半干旱区和半湿润易旱区播种量设置均为 150.0、187.5、225.0、262.5 和 300.0kg/hm<sup>2</sup>，半干旱区播种量设为 112.5、150.0、187.5、225.0 和 262.5kg/hm<sup>2</sup>。密度处理通过播种量控制。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 基本苗和总茎数的测定 小麦齐苗后 5d 左右，在每个小区选取长势均匀的 3~5 个点，每点以

行长 1m，数并列 2~3 行的出苗数，计算每公顷基本苗数，用相同方法在拔节期调查总茎数。

1.3.2 产量及产量构成因素的测定 小麦成熟期，在同一小区随机选取 3 个点进行取样并混合，于混合样中随机取 20 株。测定每株地上部干重、穗长、穗数、穗粒数和千粒重等，按小区收获计产。

穗粒数按 20 穗的平均每穗结实粒数计数，随机取风干籽粒 1 000 粒称重作为千粒重（g），2 次重量相差不得大于其平均值的 3%。

经济系数 = 籽粒产量 / 地上部生物量。籽粒产量按照小区单独脱粒，称取并计算单位面积风干籽粒产量和地上部风干秸秆产量。单位面积生物量为籽粒产量和秸秆产量之和。

1.4 统计分析

利用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 20.0 软件对试验数据进行处理和统计分析，采用 Duncan 法进行差异显著性检验，差异显著性水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 种植密度对小麦产量及产量构成因素的影响 由表 2 可知，不同生态区冬小麦产量随播种

量增加均呈先升后降趋势，且均以最低播种量时产量最低。低温半干旱区、半湿润易旱区和半干旱区最高产量分别是 5 472.0、5 730.0 和 7 271.4kg/hm<sup>2</sup>，分别较最低产量高 8.26%、8.52% 和 6.59%，差异均达到显著水平。低温半干旱区、半湿润易旱区和半干旱区对应的最适播种量依次为 187.5、225.0 和

表 2 播种量对产量及产量结构因素的影响  
Table 2 Effects of plant density on yield and yield structure factors

气候类型区 Climate type region	播种量 Plant density (kg/hm <sup>2</sup> )	产量 Yield (kg/hm <sup>2</sup> )	穗数 Spike number (×10 <sup>4</sup> /hm <sup>2</sup> )	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 1000-grain weight (g)
低温半干旱区 Low-temperature semi-arid region	150.0	5 054.5c	501.6c	25.4b	43.4a
	187.5	5 472.0a	484.6d	27.9a	44.1a
	225.0	5 379.5ab	546.4ab	23.9b	44.0a
	262.5	5 226.5b	586.1a	24.3b	42.6a
	300.0	5 252.0b	550.8ab	24.5b	42.7a
	变异系数 Variation coefficient (%)	3.0	7.6	6.5	1.6
	最大差异率 Maximum difference rate (%)	8.3	21.0	17.2	3.5
半湿润易旱区 Semi-humid arid region	150.0	5 280.0c	523.2c	29.2a	45.1b
	187.5	5 490.0b	586.8ab	25.4c	46.7a
	225.0	5 730.0a	606.0a	26.9b	46.9a
	262.5	5 565.0ab	581.2ab	25.4c	45.0b
	300.0	5 535.0ab	552.8b	28.8a	45.8a
	变异系数 Variation coefficient (%)	2.9	5.7	6.6	2.0
	最大差异率 Maximum difference rate (%)	8.5	15.8	15.0	4.2
半干旱区 Semi-arid region	112.5	6 821.6c	484.2c	34.4a	45.0a
	150.0	7 006.5b	547.0b	31.6ab	44.2a
	187.5	7 106.4b	538.9b	32.1ab	45.1a
	225.0	7 271.4a	635.5a	28.3b	44.1a
	262.5	7 146.4ab	610.5a	28.7b	44.6a
	变异系数 Variation coefficient (%)	2.4	10.7	8.2	1.0
	最大差异率 Maximum difference rate (%)	6.6	31.2	21.9	2.2

注：不同小写字母表示在 0.05 水平下差异显著，下同  
Note: Different lowercase letters indicate significantly difference at 0.05 level, the same below

225.0kg/hm<sup>2</sup>。  
播种量主要影响冬小麦的穗数和穗粒数。随播种量增加，单位面积有效穗数呈先增后降的趋势。低温半干旱区穗数以 262.5kg/hm<sup>2</sup> 种植密度处理最高（586.1 万/hm<sup>2</sup>），较其他处理高 6.4%~20.9%，300.0kg/hm<sup>2</sup> 种植密度处理次之且与 262.5kg/hm<sup>2</sup> 无显著差异；半湿润易旱区和半干旱区在 225.0kg/hm<sup>2</sup> 种植密度下穗数均达最大，最大穗数分别为 606.0 万/hm<sup>2</sup> 和 635.5 万/hm<sup>2</sup>，分别高于最低种植密度的 15.8% 和 31.3%。同一生态区，穗粒数随种植密度增加而减小，低温半干旱区穗粒数在 187.5kg/hm<sup>2</sup> 种植密度处理达最高，与其他处理相比显著提高 11.0%~16.7%，其他播种量水平间无明显差异。半

湿润易旱区和半干旱区穗粒数均以最低种植密度最大，分别高于各自区域内其他播种量的 1.4%~15.0% 和 6.9%~21.6%。

2.2 种植密度对小麦群体结构的影响

小麦高产群体结构受品种特性和栽培技术的影响，其中种植密度是影响群体结构的最主要因素。表 3 数据结果显示，各生态区不同种植密度的基本苗变化基本一致，即群体基本苗数均随种植密度增大而增大，基本苗在各处理间差异达显著水平，增加幅度逐渐减小。半干旱区基本苗数增幅依次为 33.5%、22.2%、17.1% 和 16.4%；半湿润易旱区增幅为 28.0%、19.1%、17.4% 和 11.9%；低温半干旱区增幅为 22.8%、19.4%、16.7% 和 11.5%，表

表 3 不同播种量对小麦群体结构的影响  
Table 3 Effects of plant density on wheat population structure

气候类型区 Climate type region	播种量 Plant density (kg/hm <sup>2</sup> )	基本苗 Basic seedling (×10 <sup>4</sup> /hm <sup>2</sup> )	总茎数 The total number of stem (×10 <sup>4</sup> /hm <sup>2</sup> )	分蘖成穗率 Tiller heading rate (%)	地上部生物量 Aboveground biomass (kg/hm <sup>2</sup> )	收获指数 Harvest index
低温半干旱区 Low-temperature semi-arid region	150.0	294e	517c	62.3a	9 319.8b	0.41a
	187.5	361d	556b	40.3d	11 335.4b	0.41a
	225.0	431c	578ab	46.2c	11 852.5ab	0.39b
	262.5	503b	594a	53.1b	12 373.8a	0.39b
	300.0	561a	603a	39.1d	12 683.7a	0.38b
	变异系数 Variation coefficient (%)	24.9	6.0	20.0	11.6	3.5
	最大差异率 Maximum difference rate (%)	77.5	16.5	59.4	36.1	6.3
半湿润易旱区 Semi-humid arid region	150.0	286e	603c	56.1a	13 442.0d	0.54a
	187.5	366d	715b	47.4ab	16 653.0c	0.54a
	225.0	436c	820a	42.2b	18 914.4b	0.56a
	262.5	512b	854a	38.7b	22 323.2a	0.53a
	300.0	573a	887a	31.5c	23 607.6a	0.53a
	变异系数 Variation coefficient (%)	26.2	15.0	21.4	21.8	2.6
	最大差异率 Maximum difference rate (%)	82.4	47.2	78.0	75.6	7.0
半干旱区 Semi-arid region	112.5	236e	498c	64.7a	12 226.6d	0.36a
	150.0	315d	555bc	69.2a	15 340.5c	0.37a
	187.5	385c	590ab	55.6b	17 055.5bc	0.47a
	225.0	451b	624ab	50.0c	19 122.4b	0.43a
	262.5	541a	649a	42.9d	22 192.3a	0.38a
	变异系数 Variation coefficient (%)	29.5	10.2	19.0	21.9	11.6
	最大差异率 Maximum difference rate (%)	116.5	30.2	61.5	81.5	31.1

明随着播种量的增加，种子之间的竞争加剧，基本苗的增长受到水分、温度和养分等环境因素的限制，使得增加幅度逐渐降低。3 个生态区播种量变异系数由大到小为半干旱区（29.5%）>半湿润易旱区（26.2%）>低温半干旱区（24.9%），说明在半干旱区小麦对种植密度更加敏感。

同一种植密度不同生态区小麦总茎数存在显著差异（表 3）。低温半干旱区不同播种量下总茎数为 517 万~603 万/hm<sup>2</sup>，半湿润易旱区为 603 万~887 万/hm<sup>2</sup>，半干旱区为 498 万~649 万/hm<sup>2</sup>。各生态区小麦总茎数随播种量增加而减少，增加幅度逐渐降低，低温半干旱区总茎数增幅依次为 7.5%、4.0%、2.8% 和 1.5%；半湿润易旱区总茎数增幅依次为 18.6%、14.7%、4.2% 和 3.9%；半干旱区总茎数增幅依次为 11.5%、6.3%、5.8% 和 4.0%，说明随着种植密度增加，不同生态区小麦自身对群体的调控存在差异。同一种植密度条件下小麦总

茎数均表现为半湿润易旱区>半干旱区>低温半干旱区，与 3 个生态区年平均水分温度条件一致，可见，水温状况对植株总茎数具有重要影响。受不同生态区水热条件影响，同一播种量下半湿润易旱区的分蘖能力强于低温半干旱区和半干旱区，但平均分蘖率为半干旱区（56.5%）>低温半干旱区（48.2%）>半湿润易旱区（43.2%）。3 种不同气候类型产区的分蘖成穗率基本上呈现随播种量增加而下降趋势（表 3），表明播种量较低时，水分和养分充足，小麦植株的个体生长状况良好，但在群体密度大时，水分和养分等单株营养条件受到制约，限制个体发育。

低温半干旱区、半湿润易旱区和半干旱区地上部生物量均随种植密度增加而增加，半湿润易旱区地上部生物量增幅依次为 23.9%、13.6%、18.0% 和 5.8%；低温半干旱区增幅依次为 25.5%、11.2%、12.1% 和 16.1%；低温半干旱区地上部生物量增幅



依次为 21.6%、4.6%、4.4% 和 2.5%。3 个生态区地上部生物量的变异系数依次为 11.6%、21.8% 和 21.9%，说明在半湿润易旱区与半干旱区小麦地上部生物量对种植密度变化最敏感，低温半干旱区次之。

各生态区收获指数（表 3）对种植密度的响应趋势不尽一致，低温半干旱区和半湿润易旱区收获指数受种植密度影响较小；半干旱区收获指数与单位面积籽粒产量均随种植密度的增加呈先增后降趋势，下降拐点出现在 187.5kg/hm<sup>2</sup> 种植密度而变幅最大的区段在 150.0 和 187.5kg/hm<sup>2</sup> 处理，这可能受基因型和环境的影响。

### 2.3 不同区域产量差异分析

在相同播种量（150.0 和 225.0kg/hm<sup>2</sup>）条件下，不同区域的产量差异较大，以半干旱区平均产量最高，半湿润易旱区次之，低温半干旱区最低，半干旱区和半湿润易旱区产量分别平均高出低温半干旱区 36.8% 和 5.5%。旱作区不同生态区域间的产量差异主要取决于试验当年降水量及分布，其次与各区域品种差异和气温也有一定关系。从降水量差异来看，虽然半湿润易旱区多年平均降水量大于半干旱区和低温半干旱区，但在试验年份小麦生育期间（2017 年 10 月–2018 年 6 月），半干旱区、半湿润易旱区和低温半干旱区大于 5.0mm 有效降水依次为 204.0、165.0 和 151.0mm；其中在生育前期和中期阶段（返青–抽穗），半干旱区有效降水分别高出半湿润易旱区和低温半干旱区 40 和 46mm，显然区域间生育期有效降水差异与产量差异趋势基本一致。尤其返青–抽穗阶段正值营养生长与生殖生长旺盛阶段，也是产量构成因素（穗数和穗粒数）的形成阶段，供水是否充足对产量高低具有决定性作用。从表 2 和表 3 可见，在播种量 150.0 和 225.0kg/hm<sup>2</sup> 条件下，半干旱区的穗数、穗粒数、千粒重和地上部生物产量平均分别高出半湿润易旱区 7.7%、13.8%、5.3% 和 52.8%，分别高出低温半干旱区 12.8%、21.5%、1.0% 和 62.8%，以地上部生物产量差异最大。可见抽穗前较充足供水显著促进了营养生长，而良好的营养生长奠定了穗多粒多的高产形成基础。从产量构成三因素比较，区域间产量差异主要取决于穗数和穗粒数差异，尽管不同生态区品种不同，但区域间千粒重差异相对较小。

## 3 讨论

### 3.1 种植密度对小麦产量及产量构成因素的影响

创造优良群体结构是小麦高产栽培的重要目标。不同地区的适宜播种量不同<sup>[22]</sup>，现代小麦品种对种植密度的响应增强，不同小麦品种适宜的种植密度有一定差异<sup>[23]</sup>。本试验结果表明，不同生态区产量随种植密度增加均呈先增后降趋势，这与李伟华等<sup>[24]</sup>的研究结果一致。

比较产量三因素，区域间产量差异主要取决于穗数和穗粒数差异，而千粒重相对较稳定。也有研究表明，单位面积穗数随种植密度增加而增加，但穗粒数和千粒重随之下降<sup>[24–25]</sup>。王立峰等<sup>[26]</sup>研究表明，不同播种量下，有效穗数和千粒重无显著差异，但穗粒数随种植密度增加显著下降。产量构成因素对种植密度的响应不同，与各地生态生产条件和品种类型不同有关。

### 3.2 种植密度对小麦群体结构和生长的影响

合理密植是小麦增苗增穗和增产的关键，播种量过大或过小均会影响小麦群体结构、生长状况及产量形成<sup>[27]</sup>，群体结构不良和与当地生态生产条件不匹配都会导致小麦减产<sup>[28–29]</sup>。本研究中，各生态区基本苗数随播种量的增加而增加，但增幅逐渐降低。小麦具有分蘖自动调节能力，通过调节分蘖来平衡个体间竞争和补偿调节单位面积穗数。各生态区不同种植密度下的分蘖能力有显著差异，但总体呈随播种量增加，分蘖成穗率逐渐下降的趋势。地上部生物量是衡量群体营养生长的指标，但营养生长量不是越多越好，高产建立在营养生长和生殖生长协调的基础上。本研究表明，各生态区地上部生物量均随密度增大而增加。但半湿润易旱区和半干旱区地上部生物量对密度反应较敏感，而低温半干旱区则较迟钝，这表明在低温半干旱区水热资源较差的条件严重地限制了地上部营养生长，造成不同密度间地上生物量的差异较小。

### 3.3 密度试验对品种的选择

本试验在不同生态区采用不同的品种进行密度效应研究，主要基于以下考虑：一是甘肃省不同小麦产区生态条件差异大，尤其是气温条件差异大且年际间波动大，因此小麦品种通用性差。甘肃省海拔较高的低温半干旱区适合种植冬性品种，而海拔较低的半湿润易旱区和半干旱区适合种植半冬性品

种。如果在低温半干旱区种植半冬性品种, 越冬死亡率高, 也极易遭倒春寒危害; 相反, 若在半湿润易旱区和半干旱区种植冬性品种, 在秋冬两季偏暖年份, 会造成不能通过春化阶段或春化不完全, 难以抽穗或抽穗不整齐。二是密度试验需要探究适宜品种在不同密度下的产量差异和高产潜力。受遗传背景控制, 在低温半干旱区冬性品种产量水平较高, 而在半干旱区和半湿润易旱区, 半冬性品种产量水平较高; 冬性和半冬性品种产量差异的主要原因与分蘖力、分蘖成穗率和不同干旱条件下的冗余生长和水分生产效率有关。三是利用各生态区各自适应的主栽品种进行密度效应研究, 对不同生态区合理密植和构建合理群体结构更具有生产指导价值和应用针对性。尽管各生态区选用品种不同, 仍发现在不同生态区的密度效应存在许多共同性。不同生态条件和不同品种类型间, 密度效应存在共同性和差异性都是正常现象。

今后可继续进行密度和品种结合试验, 即在相同生态区采用不同类型品种进行密度试验, 以深化了解不同品种对密度响应差异, 为因种合理密植、良种良法配合、大幅度提高当地水热资源生产潜力提供依据。

## 4 结论

不同种植密度对产量结构因素的影响显著, 同时能不同程度地改变小麦群体结构和生长, 最终影响小麦产量。低温半干旱区、半湿润易旱区和半干旱区最适播种量依次为 187.5、225.0 和 225.0 kg/hm<sup>2</sup>, 产量分别达 5 472.0、5 730.0 和 7 271.4 kg/hm<sup>2</sup>。穗数随播种量增加呈先增后降的趋势, 低温半干旱区半、湿润易旱区和半干旱区穗数分别以 262.5 (586.1 万/hm<sup>2</sup>)、225.0 (606.0 万/hm<sup>2</sup>) 和 225.0 kg/hm<sup>2</sup> (635.5 万/hm<sup>2</sup>) 种植密度最高; 穗粒数随种植密度增加而减小, 低温半干旱区 187.5 kg/hm<sup>2</sup> 处理穗粒数最高, 而半湿润易旱区和半干旱区最低种植密度的穗粒数最高; 千粒重受种植密度影响较小。各生态区群体基本苗数均随种植密度增大而增大, 而穗数、总茎数和分蘖成穗率基本上都呈现出随播种量增加而下降的趋势; 不同生态区小麦自身对群体的调控存在差异, 同一种种植密度条件下小麦总茎数表现为半湿润易旱区 > 半干旱区 > 低温半干旱区, 植株总茎数受水温状况影响显著; 地上部生物量均随

种植密度增加而增加, 在半湿润易旱区与半干旱区小麦地上部生物量对种植密度变化最敏感, 低温半干旱区次之。

## 参考文献

- [1]姜丽娜, 刘佩, 齐冰玉, 等. 不同施氮量及种植密度对小麦开花期氮素积累转运的影响. 中国生态农业学报, 2016, 24(2): 131-141.
- [2]胡焕焕, 刘丽平, 李瑞奇, 等. 播种期和密度对冬小麦品种河农822产量形成的影响. 麦类作物学报, 2008, 28(3): 490-495, 501.
- [3]薛亚光, 魏亚凤, 李波, 等. 播期和密度对宽幅带播小麦产量及其构成因素的影响. 农学学报, 2016, 6(1): 1-6.
- [4]Dornbusch T, Baccar R, Watt J, et al. Plasticity of winter wheat modulated by sowing date, plant population density and nitrogen fertilisation: Dimensions and size of leafblades, sheaths and internodes in relation to their position on a stem. Field Crops Research, 2011, 121(1): 116-124.
- [5]Whaley J M, Sparkes D L, Foulkes M J, et al. The physiological response of winter wheat to reductions in plant density. Annals of Applied Biology, 2000, 137(2): 165-177.
- [6]杨卫君, 贾永红, 石书兵, 等. 播期和密度对春小麦品种新春26号生长及产量的影响. 麦类作物学报, 2016, 36(7): 913-918.
- [7]闫树平. 不同品种冬小麦花前干物质积累转运及对产量的影响. 山东农业科学, 2016, 48(10): 65-68.
- [8]杨永光, 张维城, 吴玉娥, 等. 播量对小麦产量和籽粒营养品质的影响. 河南职技师院学报, 1989(Z1): 113-116.
- [9]潘雪娇, 黄振江, 陈慧, 等. 滴灌条件下种植密度对新冬20生长及产量性状的影响. 安徽农业科学, 2017, 45(30): 32-35.
- [10]王文鑫. 不同密度下苗带宽度对冬小麦产量调控的生理基础. 泰安: 山东农业大学, 2016.
- [11]Spink J H, Semere T, Sparkes D L, et al. Effect of sowing date on the optimum plant density of winter wheat annals of applied biology. Annals of Applied Biology, 2000, 137(2): 179-188.
- [12]王方瑞. 密度对不同年代小麦品种产量的影响及其生理基础. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [13]胡焕焕. 播种期和密度对冬小麦群体质量和产量的调控效应. 保定: 河北农业大学, 2008.
- [14]董秀春, 韩伟, 杨洪宾. 播量对冬小麦干物质积累、小穗结实性和产量的影响. 山东农业科学, 2018, 50(9): 31-35.
- [15]任寒, 马云国, 何军光, 等. 播种量对小麦新品种鑫麦296农艺性状及产量的影响. 山东农业科学, 2018, 50(5): 43-47.
- [16]薛志伟, 杨春玲, 宋志均, 等. 不同密度对安麦8号和安麦9号产量和产量构成因素的影响. 中国种业, 2018(4): 49-52.
- [17]杨吉福, 刁立功, 赵海涛, 等. 播期播量对胶东小麦植株性状及产量的影响. 作物杂志, 2013(3): 93-95.
- [18]林桦. 鹿角灵芝产品研讨会在京召开. 中国食品, 2012(21): 42.
- [19]刘兆晔. 小麦株高问题的探讨. 山东农业科学, 2014, 46(3): 130-134.
- [20]何井瑞, 陈之政, 张洪树, 等. 不同播期与基本苗对小麦生长发育及产量构成的影响. 中国农学通报, 2015, 31(33): 37-47.
- [21]常向楠, 陈树林, 程西永, 等. 稀植和密植下小麦主要农艺性状的遗传差异及关系分析. 河南农业大学学报, 2018, 52(4): 497-505.
- [22]石祖梁. 土壤—小麦植株系统氮素运移及高效利用的生态基础. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [23]张伟. 不同种植密度下小麦新品系223和2138主要性状的比较研究. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- [24]李伟华, 张静, 郭振升, 等. 种植密度对百农418小麦群体动态、产量及农艺性状的影响. 中国农学通报, 2018, 34(12): 1-6.
- [25]姚金保, 马鸿翔, 张平平, 等. 种植密度和施氮量对小麦宁麦24籽

- 粒产量和品质的影响. 江苏农业科学, 2018, 46(15): 41–44.
- [26] 王立峰, 张鹏飞, 唐清, 等. 播期与密度对襄麦D51产量及其构成因素的影响. 湖北农业科学, 2018, 57(17): 21–25.
- [27] 周秋峰, 于沐, 张果果. 种植密度对小麦生长及产量的影响. 安徽农业科学, 2018, 46(20): 35–37.
- [28] 雷钧杰, 宋敏. 播种期与播种密度对小麦产量和品质影响的研究进展. 新疆农业科学, 2007, 44(B11): 138–141.
- [29] 海江波, 由海霞, 张保军. 不同播量对面条专用小麦品种小偃503生长发育、产量及品质的影响. 麦类作物学报, 2002, 22(3): 92–94.

## Effects of Planting Density on Wheat Yield Formation in Different Ecological Regions of Gansu Province

Chai Fangmei<sup>1</sup>, Gao Tiantian<sup>1</sup>, Chai Shouxi<sup>1</sup>, Cheng Hongbo<sup>2</sup>, Song Yali<sup>3</sup>, Lu Qinglin<sup>4</sup>

(<sup>1</sup>Gansu Provincial Key Laboratory of Aridland Crop Science/Agronomy College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China; <sup>2</sup>College of Life Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China; <sup>3</sup>Qingyang Academy of Agricultural Sciences, Qingyang 745000, Gansu, China; <sup>4</sup>Wheat Research Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, Gansu, China)

**Abstract** In order to reveal the effect of different rate of sowing quantity treatment on wheat yield formation in three different ecological regions of Gansu Province, three varieties of Longzhong No.2, Lantian No.36 and Tongmai No.6 were used as materials in each region and five sowing quantity levels (150.0, 187.5, 225.0, 262.5, 300.0kg/ha in low-temperature semi-arid region and semi-humid region, and 112.5, 150.0, 187.5, 225.0, 262.5kg/ha in semi-arid region) were set up. The variation characteristics of wheat yield and yield compositions, planting density and yield difference in different regions were studied. The results showed that the suitable sowing quantity in low-temperature semi-arid region, semi-humid arid and semi-arid region were 187.5, 225.0, 225.0kg/ha, corresponding to the highest yield of 5 472.0, 5 730.0 and 7 271.4kg/ha respectively. With the increase of planting density, the yield of wheat and the number of spikes per unit area in each ecological region showed the trend of first increasing and then decreasing, the grain number per spike decreased, 1000-grain weight had no obvious change; change trend of basic seedling and tiller heading rate were similar to that of yield; aboveground biomass increased with the increasing of planting density, and there was significant difference among different planting densities in semi-humid arid region and semi-arid region. Under the same sowing quantity (150.0 and 225.0kg/ha), the yield of different regions varied greatly, with the highest average yield in the semi-arid region, followed by the semi-humid arid region, and the lowest in the low-temperature semi-arid region.

**Key words** Gansu; Ecological region; Planting density; Wheat; Yield