

种植密度对西北不同生态区大豆产量及品质的影响

王晓婷^{1,2} 王立明^{1,2} 杜世坤³ 杨如萍^{1,2} 张晓艳^{1,2} 汤春晖^{1,2} 陈光荣^{1,2}

(¹甘肃省农业科学院旱地农业研究所, 730070, 甘肃兰州; ²甘肃省旱作区水资源高效利用重点实验室, 730070, 甘肃兰州; ³白银市农业科学研究所, 730900, 甘肃白银)

摘要 为探索西北地区大豆密度—产量—品质协同提升途径,于2024年在西北3个不同生态区开展大田试验,选用汾豆93和佳禾2号2个品种,设置6个密度梯度(9.0万、13.5万、18.0万、22.5万、27.0万以及31.5万株/hm²),探究种植密度对大豆籽粒产量及品质的影响。结果表明,种植密度显著影响不同生态区的大豆籽粒产量和品质,且不同生态区产量和品质差异较大,2个大豆品种籽粒产量以及脂肪含量均在半干旱区最高,干旱半湿润区次之,而在干旱区最低;蛋白质含量均在干旱半湿润区最高,半干旱区次之,干旱区最低。汾豆93在干旱区、半干旱区以及干旱半湿润区的最佳种植密度分别为21.58万、22.02万和17.53万株/hm²;最高籽粒产量分别为3279.41、4322.79和3507.18 kg/hm²;佳禾2号在干旱区、半干旱区以及干旱半湿润区的最佳种植密度分别为24.03万、19.94万和12.37万株/hm²;最高籽粒产量分别为2983.48、4460.88和3749.87 kg/hm²。

关键词 种植密度;生态区;大豆;品种;籽粒产量;品质

大豆是植物蛋白和植物油料的主要来源作物之一,在保障国家粮食安全中具有重要的地位。近年来,虽然我国大豆产量不断增长,但供需缺口较大,大豆进口量仍保持高位^[1-2]。随着人们对素食需求的增加,大豆蛋白越来越受到人们的关注。合理密植是现阶段实现大豆优质高产栽培的重要技术途径^[3-4],既能充分发挥个体生产潜力,有效控制群体结构,还能提高大豆产量及品质^[5-6]。

作物产量是不同生态因素作用的结果,大豆产量不仅受品种的影响,环境因素以及密度对其影响也极为显著^[7-8]。王晓光等^[9]研究表明,充足的光照能提高大豆产量。戚尚恩等^[10]研究表明,降水量与日照时数是影响大豆产量的关键气候因子。大豆是群体生产,密度是影响大豆个体发育、控制群体结构以及调控产量形成的重要因素^[11]。大豆籽粒产量随着密度增加呈先增加后降低的趋势,大豆产量在中等密度下最高^[12-13]。密度过高时,种群内个体受到光照、水分、矿质营养和生存空间的限制,种内竞争加剧,个体发育受限,导致整体产量较低^[14];密度过低时,个体能够获得较好的发育但群体数量不足,会导致整体产量较低;而适宜的种植密度不仅能提高大豆产量,还能提高田间水分利用效率^[15]。

大豆的油脂及蛋白质含量是由不同品种本身的遗传物质决定的,同时还受到非生物因子的影响(如地理位置、肥料、种植密度和光照强度等)^[7,16-18]。近年来,国内外对大豆产量以及品质的密度效应开展了广泛研究。Sobko等^[5]研究发现,大豆产量以及底荚高度随种植密度的增加而增加,而单株荚数以及有效分枝数随之减少,在70株/m²种植密度下,大豆能获得最高的产量和最佳蛋白含量。刘渊等^[19]研究发现,种植密度对夏播大豆蛋白质以及油脂含量具有较大影响。顾米嫦等^[20]研究种植密度对青贮玉米—大豆带状间作群体产量和混合青贮品质的影响时发现,群体产量在玉米(10.5万株/hm²)+大豆(15万株/hm²)组合下达到最高,同时以混合青贮品质最好。大豆是光温敏感性植物,大豆品质除了受到遗传因素的影响,同样也受到环境因素的影响^[21-22],韩天富等^[23]研究发现,较长时间的光照能够提升大豆脂肪和亚油酸含量。可见,种植密度以及环境因素不仅能影响大豆产量,还对籽粒品质存在较大影响。

然而,对大豆产量的密植效应多针对东北和淮海等地区^[24-26],在西北不同生态区种植密度对产量以及品质的相关研究较少,不同大豆品种的产量

作者简介:王晓婷,主要从事植物生态与作物栽培学研究, E-mail: wangxt2025@163.com

陈光荣为通信作者,主要从事作物栽培学与耕作学研究, E-mail: chengr516@163.com

基金项目:农业生物育种重大项目(2023ZD0403506);甘肃省农业科技支撑项目(KJZC-2024-26);国家自然科学基金项目(32260325);国家大豆产业技术体系兰州综合试验站建设项目(CARS04-CES17);甘肃省科技重大专项(25ZDNA002)

收稿日期:2025-04-29;修回日期:2025-07-04;网络出版日期:2025-09-22

及品质在不同生态区是否存在差异也尚不清楚。因此，本研究通过设置不同种植密度，在西北不同生态区（干旱区、半干旱区和干旱半湿润区）开展大田试验，研究 2 个大豆品种（佳禾 2 号和汾豆 93）产量及品质的变化，明确西北不同生态区大豆最佳种植密度，以期为大豆优质高产栽培技术提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验于 2024 年分别在甘肃省农业科学院黄羊麦类作物试验站（以下简称“黄羊”）、甘肃省白银市平川区水泉镇（以下简称“平川”）以及甘肃省农业科学院镇原试验站（以下简称“镇原”）3 个地区进行。

黄羊（37°40' N、102°51' E）属干旱区，海拔 1594 m，年日照时数 1664.6~2532.7 h，年均气温

8.0 °C，无霜期 150 d，年均降水量 154.6 mm，土壤类型属于荒漠淤土，肥力中等。平川（36°79' N、104°64' E）属半干旱区，海拔 1417 m，年日照时数 2713.0 h，年均气温 9.0 °C，无霜期 200 d，年均降水量 290.0 mm，土壤类型属于灰钙土，肥力较好。镇原（35°30' N、107°29' E）属干旱半湿润区，海拔 1297 m，年日照时数 2474.0 h，年均气温 8.7 °C，无霜期 285 d，年均降水量 520.0 mm，土壤类型为黑垆土，肥力适中，是典型的旱作雨养农业区。

黄羊 2024 年年均降水量达 353.1 mm，年均气温为 8.4 °C，大豆生长期（5-9 月）降水量达 294.8 mm，属丰水年型。平川 2024 年年均降水量达 323.4 mm，年均气温为 10.8 °C，大豆生长期（5-9 月）降水量达 312.9 mm，属丰水年型。镇原 2024 年年均降水量达 499.9 mm，年均气温为 11.7 °C，大豆生长期（5-9 月）降水量为 336.9 mm，属平水年型（图 1）。

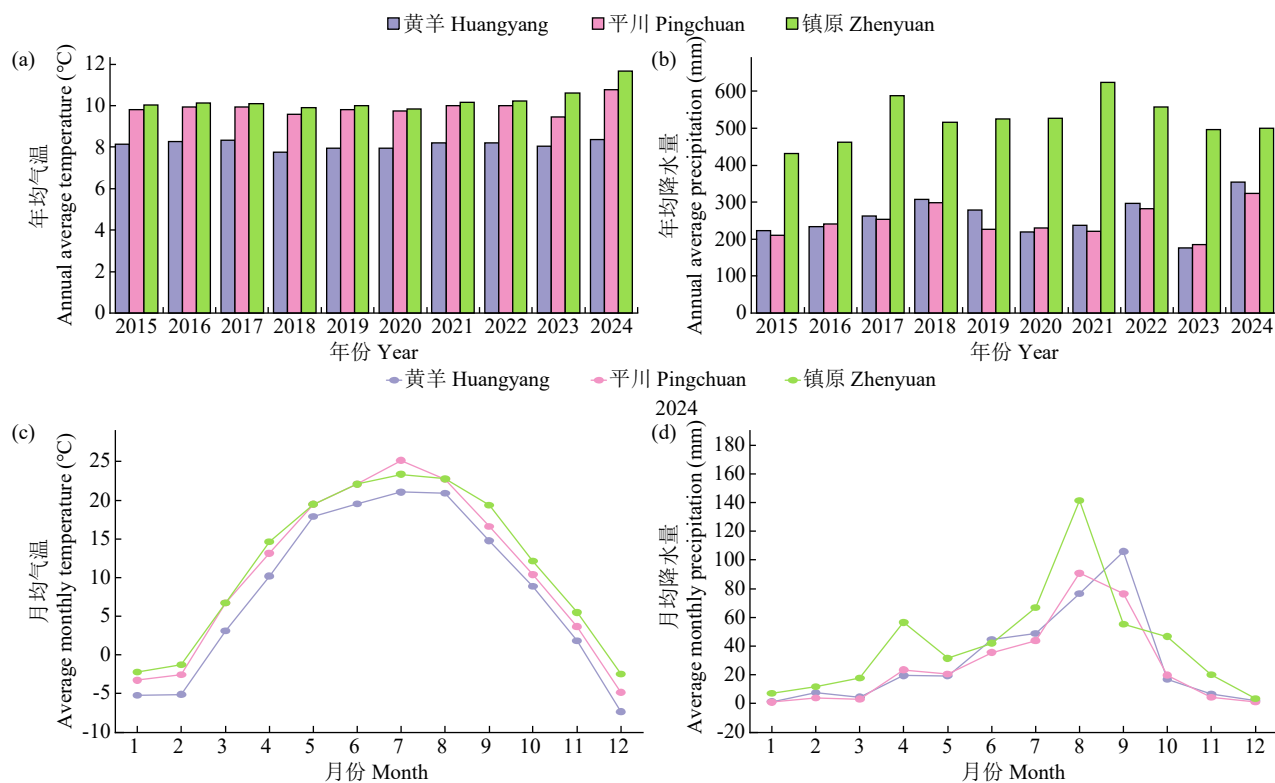


图 1 不同生态试验区气温和降水量
Fig.1 Temperature and precipitation in different ecological experimental regions

1.2 试验设计

采用随机区组试验设计，设 6 个种植密度梯度处理，分别为 9.0 万 (D1)、13.5 万 (D2)、18.0 万 (D3)、22.5 万 (D4)、27.0 万 (D5) 和 31.5 万株/hm² (D6)，株距分别是 22.2、14.8、

11.1、8.9、7.4 和 6.3 cm。小区面积为 6.0 m×3.0 m，3 次重复。以佳禾 2 号 (JH2) 和汾豆 93 (FD93) 作为供试材料，佳禾 2 号由甘肃环科雅农业科技有限公司、甘肃省农业科学院旱地农业研究所以及甘肃现代农业发展有限公司共同选

育, 株型收敛, 亚有限结荚习性, 叶椭圆形, 生育期为 131 d^[27]。汾豆 93 由山西省农业科学院经济作物研究所选育, 株型半开张, 有限结荚习性, 叶卵圆形, 生育期为 142 d^[28]。

采用黑色地膜(幅度为 90.0 cm, 膜面 0.7 m, 膜间 0.3 m)覆盖种植, 膜上穴播 2 行, 行距 0.5 m。小区之间设计 1.0 m 的过道, 试验地边缘设置 1.0 m 宽的保护行, 各试验点播种之前将底肥一次性施入(尿素 8.18 kg、过磷酸钙 31.35 kg 以及硫酸钾 6.03 kg)。每穴播种 2~3 粒, 出苗后进行间苗, 使田间的实际密度与试验设计密度相同。黄羊 5 月 8 日播种, 10 月 8 日收获; 平川 4 月 26 日播种, 10 月 8 日收获; 镇原 5 月 9 日播种, 10 月 5 日收获。

大豆生育期内, 干旱区(黄羊)灌水 3 次, 每次 1700 m³/hm²; 半干旱区(平川)灌水 3 次, 每次 1500 m³/hm²; 干旱半湿润区(镇原)依靠自然降水。整个生育期进行常规田间管理, 定期去除杂草。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 农艺性状 大豆成熟时, 每个种植小区选取中间 1 行连续取 10 株进行室内考种, 取平均值。测定农艺性状, 包括株高、底荚高度、主茎节数、有效分枝数、单株荚数、单株粒数、百粒重以及地上生物量。其中株高为茎基部至主茎顶端的高度; 底荚高度为茎基部至第一个有效荚果柄部的垂直距离; 主茎节数为从子叶节向上至主茎顶端的茎节个数; 有效分枝数为主茎上着生有效荚果的分枝

数; 单株荚数与单株粒数分别为单株全部有效荚总数及脱粒后正常发育种子总数; 百粒重为种子风干至恒重后, 随机取 100 粒称重, 重复 3 次, 结果取平均值; 地上生物量采用精度 0.01 g 的电子天平称量单株地上部分重量。

1.3.2 品质性状 采用 G1200-A 便携式大豆蛋白仪(广东星创众谱仪器)测定大豆的蛋白质和脂肪含量。蛋脂总和计算公式: 蛋脂总和(%)=蛋白质含量+脂肪含量。

1.3.3 籽粒产量 在大豆收获期, 采取全小区实收法进行测产。考种所用样品的产量计入该小区总产量, 最终折算为单位面积产量。

1.4 数据处理

采用 SPSS 27.0 软件进行方差分析, 比较不同种植密度对不同生态区 2 个大豆品种产量以及品质的影响。

2 结果与分析

2.1 种植密度对不同生态区大豆农艺性状的影响

种植密度显著影响 2 个品种不同生态区大豆株高、底荚高度、主茎节数, 而对 FD93 的单株荚数、单株粒数及 2 个品种百粒重影响均不显著, 且与不同生态区和品种交互作用显著。JH2 以及 FD93 单株荚数、单株粒数以及主茎节数随着种植密度的增加逐渐降低。不同生态区株高、底荚高度、有效分枝数、单株荚数、单株粒数以及百粒重差异显著, 且与品种交互作用极显著, 而主茎节数在不同生态区间差异不显著(表 1)。

表 1 种植密度和生态区对不同大豆品种农艺性状的影响
Table 1 Effects of planting density and ecological region on agronomic traits for different soybean varieties

生态区 Ecological region	种植密度 Planting density	株高 Plant height (cm)		底荚高度 Bottom pod height (cm)		主茎节数 Main stem node number		有效分枝数 Effective branch number		单株荚数 Pods per plant		单株粒数 Grains per plant		百粒重 100-seed weight (g)	
		JH2	FD93	JH2	FD93	JH2	FD93	JH2	FD93	JH2	FD93	JH2	FD93	JH2	FD93
		干旱区 Arid region	D1	99.0ab	141.2ab	13.7c	18.6a	5.1a	3.1a	19.9a	20.1a	87.0a	51.1a	220.3a	121.7a
	D2	102.8a	147.5ab	15.4bc	17.2a	4.6a	2.2ab	19.8a	18.6ab	77.0a	42.7a	183.6b	102.3a	19.4a	25.8a
	D3	103.2a	135.9b	17.6b	18.6a	2.8bc	2.6ab	18.9a	17.2b	50.5bc	41.0a	119.9cd	93.9a	19.9a	26.3a
	D4	90.9bc	140.2b	15.7bc	19.7a	3.3b	2.3ab	27.6a	18.6ab	58.7b	43.3a	141.7c	107.1a	20.4a	26.5a
	D5	105.5a	136.8ab	20.5a	17.0a	1.8d	1.9ab	18.3a	18.5ab	45.9bc	39.4a	117.7cd	101.6a	20.4a	25.9a
	D6	88.6c	151.7a	16.1bc	20.2a	1.9cd	1.7b	17.7a	18.6ab	39.9c	39.1a	99.2d	91.9a	20.9a	27.7a
半干旱区 Semi-arid region	D1	95.2a	112.4b	11.6a	17.4b	5.8a	4.8a	21.0a	21.0ab	142.0a	67.4a	324.4a	145.6a	22.7a	31.1a
	D2	80.2a	128.2b	13.2a	26.8b	3.2b	2.5ab	18.8a	21.0ab	66.4b	65.9a	154.4b	132.3a	23.5a	30.8a
	D3	84.2a	130.4ab	13.0a	32.0a	2.8bc	1.2b	18.0b	17.8ab	61.4b	40.0a	143.6b	82.0a	23.0a	30.5a
	D4	93.0a	127.0b	15.8a	25.6b	1.8bcd	3.4ab	19.4a	21.8a	56.2b	57.2a	137.0b	118.4a	20.4a	32.3a
	D5	94.8a	153.4a	13.6a	30.0a	1.4cd	2.0b	18.6a	22.0a	41.8b	53.0a	111.6b	112.6a	22.1a	30.9a
	D6	65.8b	127.4b	15.8a	35.8a	0.8d	1.4b	15.2b	16.8b	27.8b	38.4a	63.6b	69.8a	22.5a	32.8a

续表 1 Table 1 (continued)

生态区 Ecological region	种植密度 Planting density	株高 Plant height (cm)		底荚高度 Bottom pod height (cm)		主茎节数 Main stem node number		有效分枝数 Effective branch number		单株荚数 Pods per plant		单株粒数 Grains per plant		百粒重 100-seed weight (g)	
		JH2	FD93	JH2	FD93	JH2	FD93	JH2	FD93	JH2	FD93	JH2	FD93	JH2	FD93
干旱半湿润区 Dry subhumid region	D1	82.2a	109.9b	12.1b	14.8ab	3.6a	2.7b	15.7ab	15.2b	51.3a	42.7ab	109.2a	80.1b	23.9a	35.7a
	D2	90.8a	114.3ab	11.9b	112.5b	2.7b	3.4a	16.4a	15.9ab	49.2a	49.6a	102.8ab	92.4ab	23.8a	34.9a
	D3	92.2a	120.8a	14.0a	15.4ab	2.8b	3.4a	16.4a	17.2a	48.1ab	46.1ab	92.4ab	82.8b	22.8a	34.2ab
	D4	88.2a	113.3ab	12.0b	14.5ab	2.7b	2.7b	15.8ab	16.0ab	44.0ab	45.6ab	91.3ab	88.9ab	23.7a	34.8a
	D5	86.6a	119.4ab	12.3b	18.4a	2.2b	2.7b	14.6b	15.8ab	48.9a	39.2b	92.3ab	86.4ab	24.2a	29.8b
	D6	89.3a	110.5b	12.4b	13.7b	2.0b	2.8ab	15.5ab	16.8a	38.8b	50.6a	84.0b	104.8a	23.2a	34.7a
生态区 Ecological region (E)		***		**		ns		***		***		***		***	
种植密度 Planting density (D)		**		**		***		ns		***		***		ns	
品种 Cultivar (C)		***		**		ns		ns		***		***		***	
E×D		***		*		**		ns		***		***		ns	
E×C		***		**		***		ns		***		***		**	
D×C		**		ns		***		ns		***		***		ns	
E×D×C		***		**		*		ns		***		**		ns	

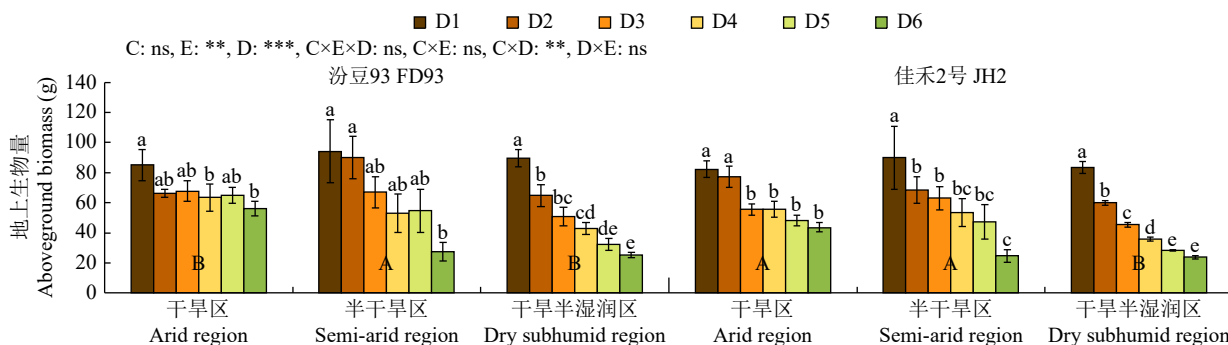
不同小写字母表示同一生态区不同密度之间差异显著 ($P < 0.05$)。“*”、“**”和“***”分别表示在 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$ 水平存在显著差异，“ns”表示差异不显著 ($P > 0.05$)。下同。

Different lowercase letters indicate the significant differences among different planting densities under the same ecological region ($P < 0.05$). “*”、“**” and “***” indicate significant differences at $P < 0.05$, $P < 0.01$ and $P < 0.001$ levels, respectively, “ns” indicates no significance ($P > 0.05$). The same below.

2.2 种植密度对不同生态区大豆地上生物量的影响

种植密度显著影响不同生态区大豆地上生物量，不同生态区 2 个大豆品种地上生物量均随种植密度增加呈现降低的趋势（图 2）。不同生态区地

上生物量差异显著，且与品种交互作用显著。FD93 地上生物量在半干旱区显著高于干旱区以及干旱半湿润区；JH2 地上生物量在干旱区以及半干旱区显著高于干旱半湿润区。



不同大写字母表示不同生态区之间差异显著 ($P < 0.05$)，不同小写字母表示同一生态区下不同密度之间差异显著 ($P < 0.05$)。“*”、“**”和“***”分别表示在 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$ 水平存在显著差异，“ns”表示差异不显著 ($P > 0.05$)。C: 品种，D: 种植密度，E: 生态区。下同。

Different uppercase letters indicate significant differences among different ecological regions at $P < 0.05$ level, different lowercase letters indicate significant differences among the different planting densities under the same ecological region at $P < 0.05$ level. “*”、“**” and “***” indicate significant differences at $P < 0.05$, $P < 0.01$ and $P < 0.001$ levels, respectively, “ns” indicates no significance ($P > 0.05$). C: cultivar, D: planting density, E: ecological region. The same below.

图 2 种植密度和生态区对不同大豆品种地上生物量的影响

Fig.2 Effects of planting density and ecological region on the aboveground biomass for different soybean varieties

2.3 种植密度对不同生态区大豆籽粒产量的影响

种植密度显著影响不同生态区大豆籽粒产量，且与品种交互作用显著（图 3）。不同生态区不同大豆品种籽粒产量均随种植密度增加呈先增加后降低的趋势。FD93 在干旱区 D3 密度时籽粒产量达到最高，为 3279.41 kg/hm²，半干旱区与干旱半湿润区不同密度间籽粒产量差异不显著，

半干旱区最高籽粒产量是 4322.79 kg/hm²，干旱半湿润区最高籽粒产量为 3507.18 kg/hm²；JH2 在干旱半湿润区 D2 密度时籽粒产量达到最高，为 3749.87 kg/hm²，在干旱区 D4 密度时籽粒产量达到最高，为 2983.48 kg/hm²，而在半干旱区籽粒产量差异不显著，最高产量为 4460.88 kg/hm²。不同生态区大豆籽粒产量差异显著，2 个大豆品种均在半

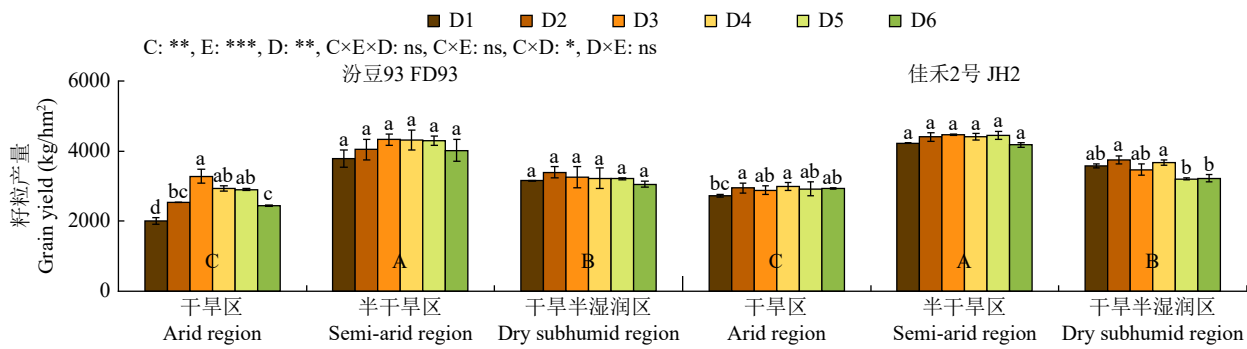


图3 种植密度和生态区对不同大豆品种籽粒产量的影响

Fig.3 Effects of planting density and ecological region on the grain yield for different soybean varieties

干旱区最高，干旱半湿润区次之，而在干旱区最低。

进一步分析大豆籽粒产量与种植密度间的数学关系，结果（表 2）表明，FD93 在干旱区、半干

旱区以及干旱半湿润区的最佳种植密度分别是

21.58 万、22.02 万和 17.53 万株/hm²；JH2 在干旱区、半干旱区以及干旱半湿润区的最佳种植密度分

表 2 不同生态区大豆适宜种植密度

Table 2 Optimal soybean planting density in different ecological regions

品种 Variety	生态区 Ecological region	模型 Model	R ²	P 值 P-value	最佳种植密度 (万株/hm ²) Optimal planting density (×10 ⁴ plants/hm ²)
汾豆 93 FD93	干旱区	$y = -7.0634x^2 + 304.81x - 175.85$	0.813	0.027	21.58
	半干旱区	$y = -3.4297x^2 + 151.06x + 2676.9$	0.954	0.004	22.02
	干旱半湿润区	$y = -1.283x^2 + 44.974x + 2904.6$	0.451	0.044	17.53
佳禾 2 号 JH2	干旱区	$y = -0.8841x^2 + 42.487x + 2452.2$	0.491	0.041	24.03
	半干旱区	$y = -2.0599x^2 + 82.164x + 3653.0$	0.786	0.036	19.94
	干旱半湿润区	$y = -1.2962x^2 + 32.072x + 3440.4$	0.446	0.047	12.37

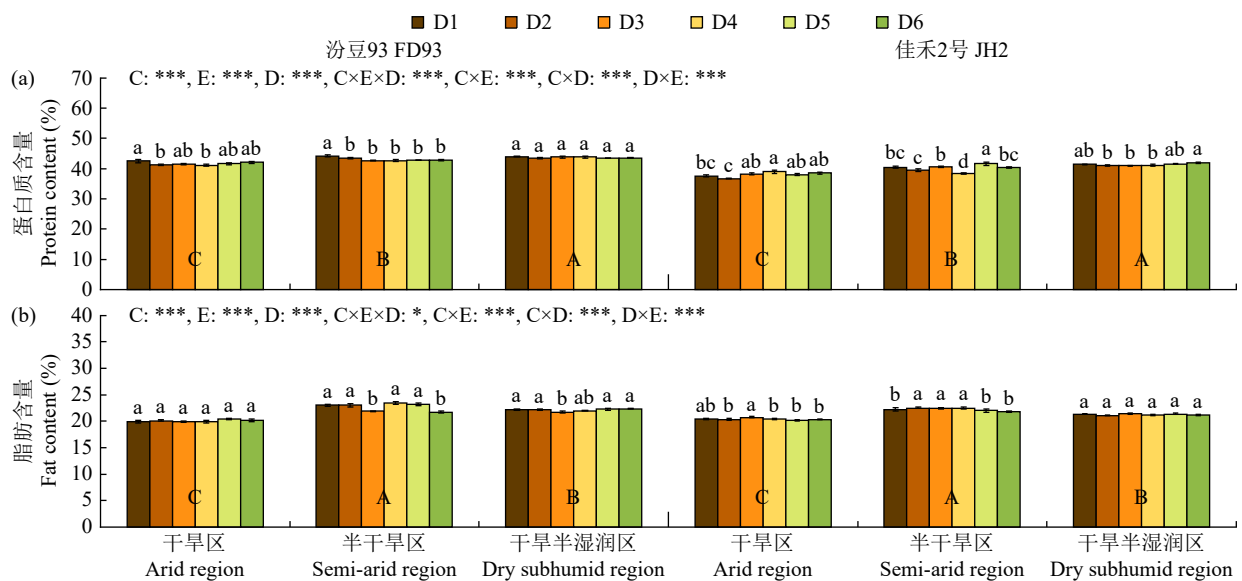
别是 24.03 万、19.94 万和 12.37 万株/hm²。

2.4 种植密度对不同生态区大豆品质的影响

种植密度显著影响不同生态区大豆蛋白质以及脂肪含量，且与生态区以及品种具有显著交互作用，而对不同生态区蛋脂总和影响不显著。此外，不同生态区不同品种品质差异显著，2 个品种蛋白

质含量均在干旱半湿润区最高，半干旱区次之，干旱区最低；而 2 个品种脂肪含量在半干旱区最高，干旱半湿润区次之，干旱区最低；2 个品种干旱半湿润区以及半干旱区蛋脂总和均显著高于干旱区（图 4）。

FD93 蛋白质含量在干旱区（42.48%）与半



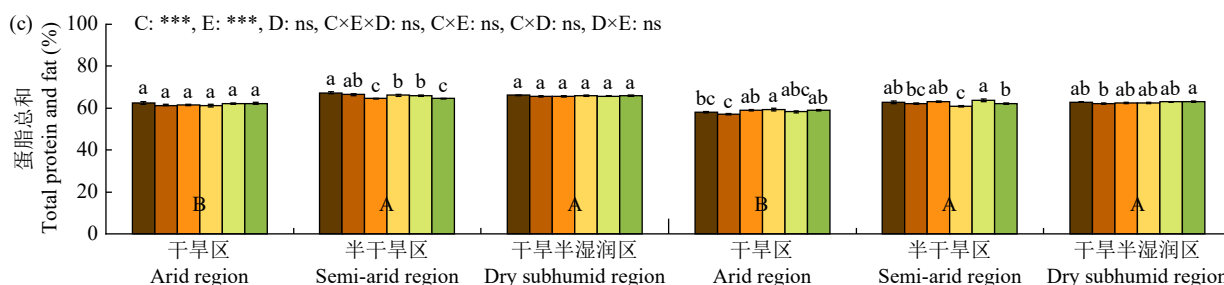


图 4 种植密度和生态区对不同大豆品种品质的影响

Fig.4 Effects of planting density and ecological region on the quality for different soybean varieties

干旱区 (42.18%) 均处于较高水平, 干旱半湿润区无显著差异; JH2 蛋白质含量在干旱区 D4、半干旱区 D5 和干旱半湿润区 D6 密度下较高, 分别为 38.99%、39.68% 和 39.97%; 脂肪含量方面, FD93 在干旱区各密度无显著差异, 半干旱区在 D1、D2、D4 和 D5 密度下较高 (22.06%~22.48%), 干旱半湿润区在 D1、D2、D5 和 D6 密度下较高 (21.18%~21.37%); JH2 在干旱区 D3 (22.76%) 和半干旱区 D2~D4 密度下较高 (21.48%~21.54%), 干旱半湿润区无显著差异; 蛋脂总和方面, FD93 仅在半干旱区 D1 密度下表现突出 (64.24%), 其余区域无显著差异; JH2 则分别在干旱区 D4 (59.38%)、半干旱区 D5 (60.72%) 和干旱半湿润区 D6 (60.16%) 密度下达到较高值。

3 讨论

3.1 种植密度对不同生态区大豆农艺性状的影响

种植密度的变化导致作物个体发育发生显著变化, 也必然影响植株农艺性状的变化^[29]。本试验中, 种植密度显著影响了大豆株高、底荚高度、主茎节数、单株荚数以及单株粒数, 这与前人^[29-30]研究结果基本一致。随着种植密度的增加, 株高和底荚高度增加, 而主茎节数和有效分枝数降低。种植密度过高时, 植株间的空间竞争会增加, 导致光照、水分和养分竞争, 为了获得更多的资源, 个体通常会发生适应性改变。

不同生态区大豆株高、底荚高度、有效分枝数、单株荚数、单株粒数以及百粒重差异显著。而单株荚数以及单粒粒数在半干旱区最高, 这是因为半干旱区具有更充足的光资源, 更多的光能有助于植物积累足够的营养物质, 促进更多荚和粒的形成^[31-32]。此外, 适宜的温度也是单株荚数和单株粒数增加的关键因素^[33], 在适宜的温度下, 大豆能够进行有效的光合作用、呼吸作用和营养物质的运

输, 从而增加单株荚数和单株粒数。而百粒重在干旱半湿润区最高, 可能是种子发育阶段 (如种子灌浆期) 获得足够的水分, 从而促进种子的健康发育, 增加百粒重。

3.2 种植密度对不同生态区大豆籽粒产量的影响

大豆籽粒产量主要决定于植株干物质积累, 通过合理增密而增加群体干物质生产和累积是实现大豆增产的重要途径^[4]。研究^[34]显示, 大豆产量随种植密度的增加一般呈先增加后降低的趋势, 密度过高会导致产量降低, 这是因为高密度下, 作物个体之间的竞争加剧影响个体生长发育, 从而导致群体产量下降。本研究中, 佳禾 2 号和汾豆 93 籽粒产量在不同生态区均呈现出单峰变化曲线。通过拟合籽粒产量与密度间的数学模型, 结果表明汾豆 93 在干旱区、半干旱区以及干旱半湿润区的最佳种植密度分别是 21.58 万、22.02 万和 17.53 万株/hm²; 佳禾 2 号在干旱区、半干旱区以及干旱半湿润区的最佳种植密度分别是 24.03 万、19.94 万和 12.37 万株/hm²。

不同生态区大豆籽粒产量差异显著, 2 个大豆品种均在半干旱区最高, 干旱半湿润区次之, 而在干旱区最低。这可能是因为半干旱区具有较高的日照时长和光强, 能为大豆的光合作用提供充足的光资源。研究^[35]表明, 充足的光照是大豆产量提高的重要环境条件, 开花后长日照可显著提高大豆的干物质积累量。此外, 日均气温以及活动积温也是影响大豆生长发育的主要气候因子^[33]。日均气温较高时, 有利于大豆叶片进行光合作用, 增加籽粒产量; 同时生育期内具有较高的活动积温, 有利于积累较多的光合物质。甘肃白银平川区较高的生育期内活动积温以及日均气温可能是大豆高产形成的主要原因。

3.3 种植密度对不同生态区大豆品质的影响

大豆品质主要受到遗传影响, 其次为环境因

素^[18,21], 种植密度对大豆品质的影响因品种而异^[36]。在本研究中, 汾豆 93 蛋白质以及蛋脂总和随着密度的升高而略有降低, 而脂肪含量则随着密度变化较小; 佳禾 2 号的蛋白质含量以及蛋脂总和随着密度升高而略有升高, 而脂肪含量随着密度升高而略有降低。

不同生态区对大豆品质差异显著, 这可能是由于不同生态区光照时间差异较大, 影响大豆的光合作用, 从而间接影响大豆的品质。研究^[23]表明, 光照时间较长时, 会增加大豆脂肪以及亚油酸比例, 而降低蛋白质以及棕榈酸比例。在本研究中, 半干旱区大豆脂肪含量最高, 干旱半湿润区大豆蛋白质含量最高, 这与李春杰等^[18]的研究结果一致。

4 结论

种植密度显著影响西北不同生态区大豆籽粒产量以及品质, 且不同生态区产量和品质差异较大, 2 个大豆品种籽粒产量以及脂肪含量表现为半干旱区 > 干旱半湿润区 > 干旱区; 蛋白质含量表现为干旱半湿润区 > 半干旱区 > 干旱区。汾豆 93 在干旱区、半干旱区以及干旱半湿润区的最佳种植密度分别为 21.58 万、22.02 万和 17.53 万株/hm²; 最高籽粒产量分别为 3279.41、4322.79 和 3507.18 kg/hm²; 佳禾 2 号在干旱区、半干旱区以及干旱半湿润区的最佳种植密度分别为 24.03 万、19.94 万和 12.37 万株/hm²; 最高籽粒产量分别为 2983.48、4460.88 和 3749.87 kg/hm²。

参考文献

- [1] 许佳伟. 我国玉米大豆中长期供需预测研究. 北京: 中国农业科学院, 2023.
- [2] 孙元成, 曹霞, 孙浩楠, 等. 不同种植密度对高产型大豆产量及农艺性状的影响. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2023, 38(1): 50-55.
- [3] 林海波. 种植密度对不同大豆品种产量及产量构成因素的影响. 陕西农业科学, 2023, 69(6): 55-58.
- [4] 梁建秋, 安建刚, 王嘉, 等. 不同种植密度对四川大豆农艺性状及产量的影响. 大豆科学, 2021, 40(5): 653-661.
- [5] Sobko O, Hartung J, Zikeli S, et al. Effect of sowing density on grain yield, protein and oil content and plant morphology of soybean (*Glycine max* L. Merrill). *Plant, Soil and Environment*, 2019, 65(12): 594-601.
- [6] Carciochi W D, Schwalbert R, Andrade F H, et al. Soybean seed yield response to plant density by yield environment in North America. *Agronomy Journal*, 2019, 111(4): 1923-1932.
- [7] 杨如萍. 中国不同地区大豆单产及品质性状的比较. 兰州: 甘肃农业大学, 2012.
- [8] 李炜. 主要气象因子对大豆生长发育及产量的关联分析. 黑龙江农业科学, 2008(2): 41-43.
- [9] 王晓光, 赵念力, 魏建军, 等. 中黄 35 大豆超高产实例分析. 大豆科学, 2011, 30(6): 1051-1053.
- [10] 戚尚恩, 孙有丰, 祁宦, 等. 淮北气候条件对夏大豆生长的影响. 中国农业气象, 2010, 31(2): 267-270.
- [11] Xu C L, Li R D, Song W W, et al. Responses of branch number and yield component of soybean cultivars tested in different planting densities. *Agriculture*, 2021, 11(1): 69.
- [12] 张永强, 张娜, 王娜, 等. 种植密度对夏大豆光合特性及产量构成的影响. 核农学报, 2015, 29(7): 1386-1391.
- [13] 张永强, 张娜, 王娜, 等. 种植密度对北疆复播大豆光合特性及产量的影响. 西北植物学报, 2015, 35(3): 571-578.
- [14] 黎磊, 周道玮, 盛连喜. 密度制约决定的植物生物量分配格局. 生态学杂志, 2011, 30(8): 1579-1589.
- [15] 王立明, 杨如萍, 陈光荣, 等. 陇黄系列大豆新品种适宜种植密度研究. 中国种业, 2020(9): 42-45.
- [16] 赵桂范, 刘婧琦, 贾会彬, 等. 白浆土大豆不同群体结构对产量及其产量性状的影响. 中国农学通报, 2011, 27(27): 200-203.
- [17] 何世炜, 常生华, 武得礼, 等. 大豆播种密度对籽实产量及其构成因素影响的研究. 草业学报, 2005, 14(5): 43-47.
- [18] 李春杰, 许艳丽, 魏巍, 等. 结荚期光照时间对大豆产量和化学品质的影响. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(11): 71-74.
- [19] 刘渊, 李文龙, 李喜焕, 等. 施肥水平和种植密度对河北山区夏播大豆产量及品质影响. 中国农业科技导报, 2017, 19(8): 115-123.
- [20] 顾米婧, 舒泽兵, 蒲甜, 等. 北疆灌区种植密度对青贮玉米-大豆带状间作群体产量和混合青贮品质的影响. 草业科学, 2025, 42(5): 1267-1277.
- [21] 宋雯雯. 中国大豆功能性成分地理分布规律及环境影响因素分析. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- [22] 胡国华, 宁海龙, 王寒冬, 等. 光照强度对大豆产量及品质的影响I. 全生育期光照强度变化对大豆脂肪和蛋白质含量的影响. 中国油料作物学报, 2004, 26(2): 87-89.
- [23] 韩天富, 王金陵, 杨庆凯, 等. 开花后光照长度对大豆化学品质的影响. 中国农业科学, 1997, 30(2): 47-53.
- [24] 田艺心, 高凤菊, 曹鹏鹏, 等. 黄淮海高蛋白夏大豆新品种适宜种植密度研究. 大豆科学, 2021, 40(3): 362-369.
- [25] 周新雨, 王天舒, 任利东, 等. 种植密度和氮施用时期对不同大豆品种农艺性状和产量的影响. 中国土壤与肥料, 2023(4): 105-113.
- [26] 周长征, 田中艳, 吴耀坤, 等. 种植密度与氮肥追施对农友豆 28 农艺性状及产量的影响. 大豆科学, 2022, 41(6): 688-695.
- [27] 陈光荣, 王丽梅, 左丽萍, 等. 大豆品种佳禾 2 号地方标准: DB62/T 5012-2024. 兰州: 甘肃省市场监督管理局, 2024.
- [28] 刘小荣, 任小俊, 任海红, 等. 耐旱大豆新品种汾豆 93 的选育及高产栽培技术. 大豆科学, 2022, 41(6): 758-762.
- [29] 孙国伟, 付连舜, 张凤路, 等. 播期及密度对不同大豆品种农艺性状及产量的影响. 大豆科学, 2016, 35(3): 423-427.
- [30] 田艺心, 高凤菊, 徐冉. 种植密度对高蛋白大豆经济性状和产量的影响. 中国油料作物学报, 2017, 39(4): 476-482.
- [31] 龚万灼, 吴雨珊, 雍太文, 等. 玉米-大豆带状套作中荫蔽及光照恢复对大豆生长特性与产量的影响. 中国油料作物学报, 2015, 37(4): 475-480.
- [32] Liu B, Li Y S, Liu X B, et al. Lower total soluble sugars in vegetative parts of soybean plants are responsible for reduced pod number under shading conditions. *Australian Journal of Crop Science*, 2011, 5(13): 1852-1857.

- [33] 赵凌尘, 李忠娴, 王鹏, 等. 辽西地区大豆生长发育和产量对气候变化的响应. 江西农业学报, 2024, 36(2): 7-12.
- [34] 杜长玉, 胡兴国, 何忠仁, 等. 不同密度对大豆产量和生理指标影响的研究. 内蒙古农业科技, 2006(2): 35-36.
- [35] 韩天富, 王金陵, 范彬彬, 等. 开花后光照长度对大豆农艺性状的影响. 应用生态学报, 1996, 7(2): 169-173.
- [36] 宁海龙, 杨庆凯, 李文霞, 等. 农艺措施对大豆籽粒蛋白质和脂肪含量的影响. 东北农业大学学报, 2001(4): 332-335.

Effects of Planting Density on Soybean Yield and Quality in Different Ecological Regions of Northwest China

Wang Xiaoting^{1,2}, Wang Liming^{1,2}, Du Shikun³, Yang Ruping^{1,2},
Zhang Xiaoyan^{1,2}, Tang Chunhui^{1,2}, Chen Guangrong^{1,2}

(¹Institute of Dryland Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, Gansu, China; ²Key Laboratory of Water Resources Efficient Utilization in Dryland Farming Areas of Gansu Province, Lanzhou 730070, Gansu, China; ³Baiyin Institute of Agricultural Sciences, Baiyin 730900, Gansu, China)

Abstract To explore the coordinated improvement pathways of soybean density, yield and quality in Northwest China, field experiments were conducted in 2024 across three ecological regions in Northwest China. Two soybean cultivars, Fendou 93 and Jiahe 2, were evaluated under six planting densities (90 000, 135 000, 180 000, 225 000, 270 000, and 315 000 plants/ha), to explore the effects of planting density on soybean grain yield and quality. The results showed that planting density significantly affected soybean grain yield and quality across different ecological regions, and there were significant differences in grain yield and quality among regions. For both varieties, grain yield and fat content were highest in the semi-arid region, followed by the dry subhumid region, and lowest in the arid region. Protein content was highest in the dry subhumid region, followed by the semi-arid region, and lowest in the arid region. The optimal planting densities of Fendou 93 in the arid, semi-arid and dry subhumid regions were 215 800, 220 200 and 175 300 plants/ha, with the maximum grain yield reaching 3279.41, 4322.79 and 3507.18 kg/ha, respectively. For Jiahe 2, the optimal planting densities in the arid, semi-arid and dry subhumid regions were 240 300, 199 400 and 123 700 plants/ha, and its maximum grain yields were 2983.48, 4460.88 and 3749.87 kg/ha.

Key words Planting density; Ecological region; Soybean; Variety; Grain yield; Quality