



播期对北疆膜下滴灌春大豆根系生长、产量及水分利用效率的影响

闫博文¹, 胥雅馨¹, 章建新^{1*}, 王聪¹, 薛丽华²

(1. 新疆农业大学 农学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆农业科学院 粮食作物研究所, 新疆 乌鲁木齐 830091)

摘要:为探究播期对膜下滴灌春大豆根系生长与产量形成的关系,明确北疆膜下滴灌春大豆的适宜播期,于2021和2022年采用裂区试验设计,设置4月3日和4月7日(B₁)、4月11日和4月14日(B₂)、4月19日和4月21日(B₃)、对照组4月27日和4月28日(B₄)4个播期处理,系统研究合农71(P₁)和新大豆27(P₂)的生育进程,0~80 cm土层根系干重和干重密度、侧根长和根长密度及产量和水分利用效率等指标,分析根系生长指标与产量的关系。结果表明:与对照B₄相比,早播处理B₁和B₂早熟2~17 d,生育期延长2~14 d;最大总根干重增加31.65%~79.29%,0~20 cm土层最大根干重增加22.35%~87.55%,20~40 cm土层增加0.71%~49.94%;最大总侧根长增加11.54%~42.37%,0~20 cm土层最大侧根长增加22.35%~87.55%,20~40 cm土层增加19.08%~38.76%,40~60 cm土层增加13.21%~38.27%;成熟期单株荚数增加2.07%~19.71%,单株粒数增加0.27%~27.15%,百粒重增加2.85%~6.81%;产量增加8.70%~32.90%,水分利用效率和灌溉水利用效率分别提高13.11%~70.91%和14.81%~69.86%。结果说明北疆膜下滴灌春大豆的播种期由4月底提至4月上旬能够充分利用早春土壤雪墒促进根系生长,显著增加0~40 cm土层的根干重和0~60 cm土层的侧根长,促使大豆生育进程提前、生育期延长,增加产量并提高水分利用效率,同时降低生育期间的灌水量。研究结果可为优化北疆膜下滴灌春大豆节水高产栽培技术提供科学依据。

关键词:春大豆;播期;膜下滴灌;根系;产量

Effects of Sowing Date on Root Growth, Yield and Water Use Efficiency of Spring Soybean under Drip Irrigation in Northern Xinjiang

YAN Bowen¹, XU Yaxin¹, ZHANG Jianxin^{1*}, WANG Cong¹, XUE Lihua²

(1. Agricultural College, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China; 2. Institute of Grain Crops, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, Xinjiang, China)

Abstract: In order to investigate the relationship between sowing date, root growth and yield formation of spring soybean drip irrigation under plastic film mulch, the suitable sowing date of spring soybean under drip irrigation in northern Xinjiang was discussed. Split-plot design was adopted in 2021 and 2022, four sowing dates were set up on April 3 and April 7 (B₁), April 11 and April 14 (B₂), April 19 and April 21 (B₃), and April 27 and April 28 (B₄) as the control group. We studied the growth process of Henong 71 (P₁) and Xindadou 27 (P₂) systematically, and analyzed the effects of root dry weight and dry weight density, lateral root length and root length density, yield and water use efficiency in 0-80 cm soil layer. The results showed as follows: Compared with control B₄, B₁ and B₂ were early maturing for 2-17 d, the growth period was extended for 2-14 d; the max total root dry weight increased by 31.65%-79.29%, the max root dry weight of 0-20 cm soil layer increased by 22.35%-87.55%, and 20-40 cm soil layer increased by 0.71%-49.94%; the max total lateral root length increased by 11.54%-42.37%, the max lateral root length of 0-20 cm soil layer increased by 22.35%-87.55%, 20-40 cm soil layer increased by 19.08%-38.76%, and 40-60 cm soil layer increased by 13.21%-38.27%; pods number per plant was increased by 2.07%-19.71%, seeds number per plant was increased by 0.27%-27.15%, the 100-seed weight was increased by 2.85%-6.81%; and yield was increased by 8.70%-32.90%. Water use efficiency and irrigation water use efficiency were increased by 13.11%-70.91% and 14.81%-69.86%, respectively. The results showed that the sowing date of spring soybean under drip irrigation in northern Xinjiang from the end of April to early April could make full use of the soil moisture in early spring, significantly increase the root dry weight of 0-40 cm soil layer and the lateral root length of 0-60 cm soil layer by promoting root growth, advance the growth process and prolong the growth period of soybean, increase yield and improve water use efficiency. At the same time, reduce irrigation during growth. The results of this study can provide a scientific basis for optimizing the water-saving and high-yield cultivation technology of drip irrigation spring soybean under film in northern Xinjiang.

Keywords: spring soybean; sowing date; drip irrigation under film; root system; yield

收稿日期:2025-01-15

基金项目:维吾尔自治区重大科技专项(2022A02008-2);国家自然科学基金(32160520)。

第一作者:闫博文,男,硕士研究生,主要从事大豆高产栽培研究。E-mail:1724645774@qq.com。

通讯作者:章建新,男,博导,教授,主要从事大豆高产栽培研究。E-mail:zjxin401@126.com。

新疆地处西北内陆干旱区,光热资源十分丰富,大豆高产优势突出,产业发展潜力巨大。但新疆的灌溉用水资源匮乏严重,因此,采用高效节水技术是新疆发展大豆生产的必然选择。膜下滴灌技术作为高效节水技术已经在新疆棉花生产上得到广泛应用^[1-2]。该技术既能提高田间水肥利用效率^[3],避免深层渗漏,减少株间蒸发,同时又具备增温保墒的作用^[4]。目前,膜下滴灌技术已大面积应用于北疆春大豆生产,并取得了显著的节水增产效果。2019 和 2020 年在新疆石河子市分别用合农 71 和吉育 86 与膜下滴灌技术结合创造了全国春大豆高产纪录,分别达到 6 712.05 和 6 803.10 kg·hm⁻²^[5-6]。但北疆春大豆膜下滴灌技术多借鉴棉花田间管理,技术尚未优化,节水增产潜力不能充分发挥,严重影响了该技术的应用效果。

大豆根系是吸收土壤水分和养分及根瘤固氮的重要器官,其生长、分布和构型等状况直接影响植株地上部茎叶生长、花荚形成和最终产量^[7-8]。培育发达而健壮的根系是大豆高产的基础。适期播种是大豆高产高效的基本技术措施。随着播期推迟,春大豆的生育进程加快,生育期缩短,产量呈先增后降的变化趋势^[9-10]。过早播种由于气温低,出苗慢,幼苗长势弱,根系小,易导致出苗不齐甚至出现缺苗断垄的现象^[11]。覆膜可充分利用太阳辐射,提高土壤耕层温度,在一定程度上可补偿作物苗期积温的不足^[12]。大豆根系快速生长期与花荚形成期同步,健壮根系能够增加单位面积总荚数和总粒数^[13]。目前,鲜见播期对膜下滴灌春大豆根系生长和产量形成影响的报道。生产上膜下滴灌春大豆的适宜播期缺乏科学依据。现北疆地区春播大豆的传统播期为 4 月底,有研究表明北疆土壤由于早春积雪融水的浸润,出苗与幼苗生长的水分条件适宜,在覆膜条件下,4 月初膜下 5 cm 日平均地温均为 13℃左右^[14],完全满足大豆出苗的下限地温(6℃)^[15]要求,春大豆播期可适当提前。本研究在田间系统研究了 4 个播期处理对膜下滴灌春大豆的合农 71 和新大豆 27 的 0~80 cm 土层根系生长、产量及水分利用效率的影响规律,为优化北疆膜下滴灌春大豆节水高产栽培技术提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试大豆品种为合农 71 和新大豆 27。合农 71 是由黑龙江省农业科学院佳木斯分院和黑龙江省

合丰种业有限责任公司 2005 年以国外资源 Swsi 为母本、Rocki 为父本进行有性杂交,并于 F₂ 辐射选育而成。该品种株型收敛,抗倒伏能力强,高产稳产^[16]。新大豆 27 是 2014 年经新疆维吾尔自治区种子管理部门审定由新疆农业大学农学院选育,该品种是由九农 21 号经辐射诱变选育而成,早中熟,有限结荚习性,高产稳产,适宜北疆春播^[17]。

1.2 试验地概况

试验于 2021—2022 年在新疆农业大学三坪实习农场(43°56'N,87°20'E)进行,该地区属中温带大陆性干旱气候,年平均日照可达 27 369.7 h,年平均气温 8.4℃,平均降水量 228.8 mm,全年无霜期 163 d。试验地为沙壤土,2021 年试验地前茬为夏玉米,0~20 cm 土层有机质为 13.0 g·kg⁻¹,碱解氮 51.2 mg·kg⁻¹,速效磷 16.2 mg·kg⁻¹,速效钾 216.0 mg·kg⁻¹,pH8.17。2022 年试验地前茬为西瓜,0~20 cm 土层有机质为 22.4 g·kg⁻¹,碱解氮 48.8 mg·kg⁻¹,速效磷 20.2 mg·kg⁻¹,速效钾 413.6 mg·kg⁻¹,pH8.34。翻地前分别基施磷酸二铵 320.0 kg·hm⁻²。全生育期气象数据如图 1 所示,由农业气象大数据统计软件 Wheat A 小麦芽 v1.5.4 测得 2021 年和 2022 年大豆生长季降水量分别为 92.60 和 75.79 mm,平均气温分别为 22.77 和 23.90℃。

1.3 试验设计

试验采用裂区试验设计。主区为播期:2021 年和 2022 年分别为 4 月 3 日和 4 月 7 日(B₁)、4 月 11 日和 4 月 14 日(B₂)、4 月 19 日和 4 月 21 日(B₃),以该地区春大豆传统适播期 4 月 27 日和 4 月 28 日(B₄)为对照。副区为品种:合农 71(P₁)和新大豆 27(P₂)。采用人工先铺毛管(1 管 2 行)覆膜后,随即在膜上打孔穴播,采用宽 1.4 m、厚 0.06 mm 的农用黑膜,一膜 4 行,0.5 和 0.3 m 宽窄行种植,穴距 8.3 cm;小区行长 8 m,小区面积 25.6 m²,重复 3 次。第 1 片复叶全展时进行定苗,每穴留 1 株,理论留苗数 30 万株·hm⁻²。开花期、结荚期分别随水各滴施尿素 150 kg·hm⁻²,累计滴施尿素 300 kg·hm⁻²,人工锄草 4 次,其余管理与大田管理一致。不同播期大豆生育时期灌水量详见表 1。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 土壤含水量测定 每个播期在播种前和收获后用烘干法分别测定 0~100 cm 土层(分 5 层,每层 20 cm)的含水量^[7]。

1.4.2 生育进程记载 记录各处理播种期、出苗期

(VE)、始花期(R1)、盛荚期(R4)、始粒期(R5)和满粒期(R6)^[18]的详细生育进程。

1.4.3 根干重及根系形态指标测定 分别在各处理的苗期、始花期、盛荚期、始粒期和满粒期进行采样测量,选取具代表性的样点,采用分层挖掘法分别挖掘各处理0~80 cm土层根系(每层20 cm),取出体积为 $0.4\text{ m}\times 0.2\text{ m}\times 0.2\text{ m}=0.016\text{ m}^3$ 内的植株根样,2次重复。将挖掘出带有根系的土样分层取出,装入网兜袋冲洗干净,再将主根和侧根分开,根系形态参数采用根系扫描分析仪(中晶 File scan 1860 × plus)测定。将洗净根样(侧根)整齐码放在树

脂槽中,加入水并使其淹过根样,将根样充分松散摆放整齐后,进行扫描获取样片,经专用数字化软件(万深 LA-S 植物根系图像分析系统)分析后获得总侧根长($\text{m}\cdot\text{m}^{-2}$)等形态指标。将扫描后的根样在 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下杀青 30 min ,然后调至 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重,用 $1/10\text{ }000$ 电子天平称量总根干重($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)和不同土层的根干重,计算各处理各土层根干重密度、侧根长密度等。根干重密度 $[\text{RWD}/(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})]=$ 单位体积内根干重(每层 20 cm),侧根长密度 $[\text{RLD}/(\text{m}\cdot\text{m}^{-3})]=$ 单位体积内侧根长度(每层 20 cm)。

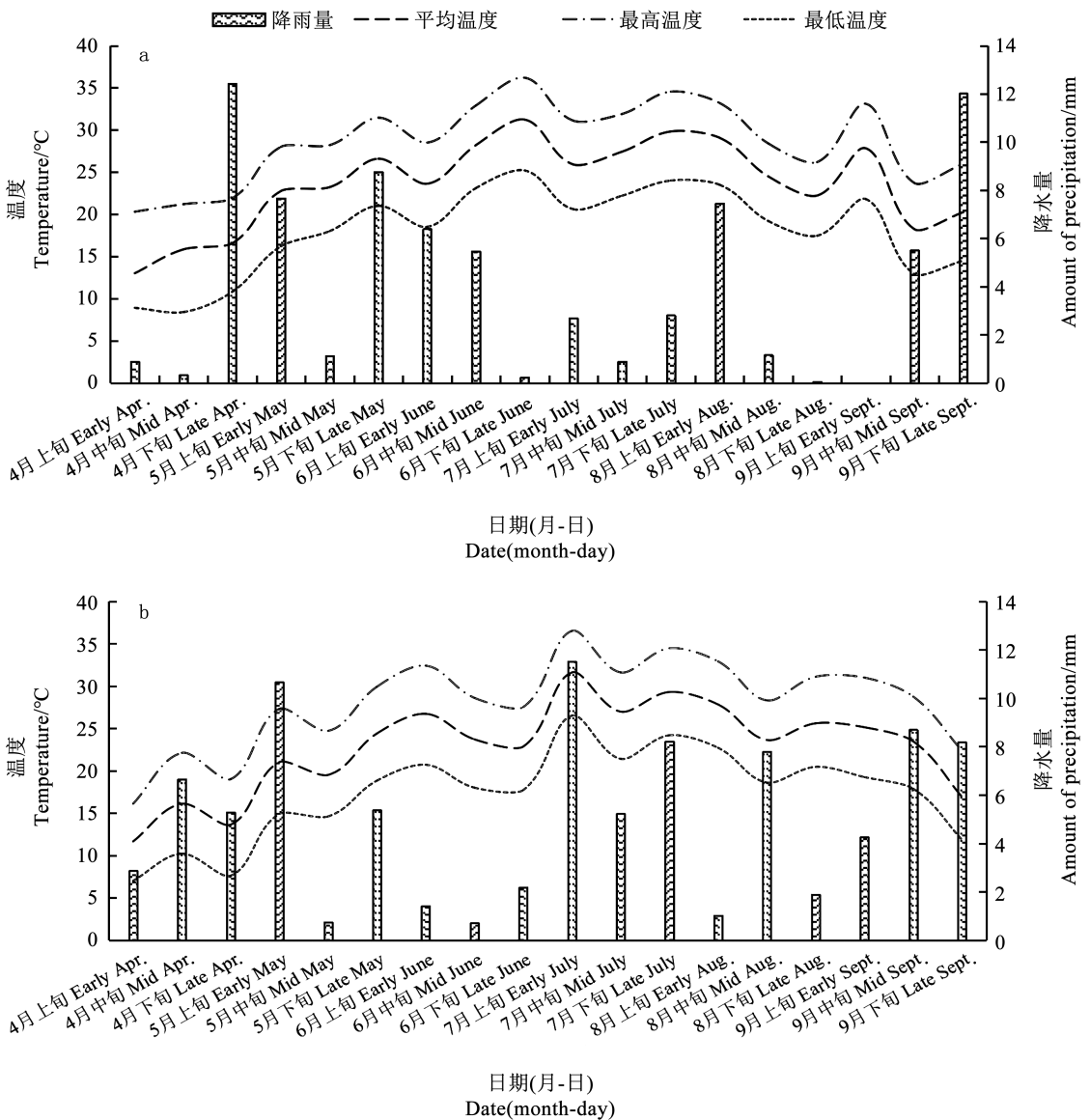


图1 2021年(a)和2022年(b)膜下滴灌春大豆生育期气象数据

Fig. 1 Meteorological data of spring soybean during its growth period under drip irrigation in 2021 (a) and 2022 (b)

表 1 不同播期的大豆生育时期灌水量

Table 1 Irrigation amount in soybean growth period at different sowing dates

年份 Year	播期处理 Sowing date treatment	品种 Cultivar	日期(月-日) Date(month-day)								总灌水量 Total irrigation/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)
			04-28	06-04	06-17	06-29	07-14	07-26	08-08	08-15	
			2021	B ₁	P ₁	0	600	600	700	700	
		P ₂	0	600	600	700	700	700	600	0	3900
	B ₂	P ₁	0	600	600	700	700	700	600	0	3900
		P ₂	0	600	600	700	700	700	600	0	3900
	B ₃	P ₁	0	600	600	700	700	700	600	600	4500
		P ₂	0	600	600	700	700	700	600	600	4500
	B ₄	P ₁	450	600	600	700	700	700	600	600	4950
		P ₂	450	600	600	700	700	700	600	600	4950
2022	B ₁	P ₁	0	600	600	750	750	750	600	0	4050
		P ₂	0	600	600	750	750	750	600	0	4050
	B ₂	P ₁	0	600	600	750	750	750	600	0	4050
		P ₂	0	600	600	750	750	750	600	0	4050
	B ₃	P ₁	0	600	600	750	750	750	600	600	4650
		P ₂	0	600	600	750	750	750	600	600	4650
	B ₄	P ₁	525	600	600	750	750	750	600	600	5175
		P ₂	525	600	600	750	750	750	600	600	5175

1.4.4 产量及产量构成因素测定 成熟期各处理选取具有代表性的大豆植株 15 株,分为 3 次重复,进行室内考种,调查测定植株单株荚数、单株粒数、单株粒重等指标,去除边行,在各小区中间实收 4.8 m^2 (长 $3.0 \text{ m} \times$ 宽 1.6 m),并统计该测产区实际收获株数,重复 3 次,人工脱粒后自然晾干,称量小区籽粒产量并折合成含水量为 13.0% 的产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),并测定各处理百粒重。

1.4.5 水分利用效率的测定 总耗水量计算公式: $ET = \Delta W + I + P$ 。式中: ΔW 为播前与收获期土壤含水量的变化值, m^3 ; I 为总灌水量, m^3 ; P 为生育期有效降雨量, m^3 。

灌溉水利用效率计算公式: $IWUE = Y/I$ 。式中, Y 为大豆籽粒产量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

水分利用效率计算公式: $WUE = Y/ET$ 。

1.4.6 数据分析 采用 WPS office 2019 软件处理数据和绘图,用 SPSS 22.0 软件进行方差分析与统计分析,用 LSD 法检验差异显著性。

2 结果与分析

2.1 播期对春大豆生育进程和生育期的影响

由表 2 可知,不同播期大豆生育进程差异明显。2021 年合农 71 的 B₁、B₂ 和 B₃ 处理出苗期、成熟期分别较对照 B₄ 早 2 ~ 22 d、0 ~ 8 d,延长生育期 2 ~ 14 d;

新大豆 27 的 B₁、B₂ 和 B₃ 处理出苗期、成熟期分别较对照 B₄ 早 6 ~ 22 d、2 ~ 12 d,延长生育期 4 ~ 13 d。2022 年合农 71 的 3 个早播处理分别较 B₄ 早出苗 9 ~ 18 d、早成熟 4 ~ 11 d,延长生育期 5 ~ 7 d;新大豆 27 的 3 个早播处理分别较 B₄ 早出苗 7 ~ 17 d、早成熟 5 ~ 10 d,延长生育期 2 ~ 7 d。两年结果一致,适期早播提早出苗、早成熟、延长生育期,以 B₁ 和 B₂ 的出苗期和成熟期提早幅度较大,生育期较长。

2.2 播期对春大豆总根干重及根干重密度的影响

如表 3 所示,合农 71 和新大豆 27 的播期各处理根系总干重随生育进程的推进呈先增后降的变化趋势,在始粒期达到峰值,且播期处理间差异达显著水平。2021 年总根干重合农 71 各生育时期多表现为 B₂ > B₁ > B₃/B₄。其中,始粒期 B₁、B₂ 和 B₃ 的总根干重分别较 B₄ 处理增加 38.28%、65.38% 和 6.02%;新大豆 27 与合农 71 表现一致,始粒期 B₁、B₂ 和 B₃ 的总根干重分别较 B₄ 处理增加 41.60%、79.29% 和 14.09%。2022 年总根干重,合农 71 各生育时期整体表现为 B₁ > B₂ > B₃/B₄,其中,始粒期 B₁、B₂ 和 B₃ 的总根干重分别较 B₄ 处理增加 40.27%、39.18% 和 12.08%;新大豆 27 与合农 71 表现一致,始粒期 B₁、B₂ 和 B₃ 的总根干重分别较 B₄ 处理增加 45.37%、31.65% 和 13.31%。两年结果相近,适期早播增加根系最大总干重。

表2 不同播期大豆生育进程和生育期

Table 2 Growth process and growth period of soybean at different sowing dates

年份 Year	播期处理 Sowing date treatment	品种 Cultivar	生育时期/(月-日) Growth stage/(month-day)						生育期 Maturity/d
			VE	R1	R4	R5	R6	R8	
2021	B ₁	P ₁	04-16	05-31	07-03	07-12	08-07	08-30	136
		P ₂	04-13	05-27	07-02	07-11	08-06	08-26	135
	B ₂	P ₁	04-27	06-08	07-09	07-14	08-10	09-04	130
		P ₂	04-25	06-07	07-08	07-16	08-09	09-02	130
	B ₃	P ₁	05-06	06-19	07-15	07-22	08-15	09-07	124
		P ₂	05-02	06-17	07-14	07-21	08-14	09-05	126
	B ₄	P ₁	05-08	06-18	07-18	07-26	08-17	09-07	122
		P ₂	05-08	06-21	07-19	07-28	08-18	09-07	122
2022	B ₁	P ₁	04-19	06-09	07-08	07-17	08-07	08-23	126
		P ₂	04-17	06-05	07-04	07-12	08-02	08-17	122
	B ₂	P ₁	04-26	06-12	07-11	07-20	08-08	08-25	121
		P ₂	04-24	06-11	07-10	07-19	08-04	08-20	118
	B ₃	P ₁	04-28	06-20	07-14	07-25	08-10	08-30	124
		P ₂	04-27	06-18	07-14	07-21	08-06	08-22	117
	B ₄	P ₁	05-07	06-27	07-16	07-28	08-11	09-03	119
		P ₂	05-04	06-24	07-17	07-24	08-09	08-27	115

表3 不同播期处理春大豆总根干重

Table 3 Different sowing dates treatments on total root dry weight of soybeans

单位:g·m⁻²

年份 Year	播期处理 Sowing date treatment	品种 Cultivar	生育时期 Growth stage				
			VE	R1	R4	R5	R6
2021	B ₁	P ₁	15.01 bc	34.84 ab	52.48 c	75.64 b	55.73 bc
		P ₂	28.52 a	37.82 ab	67.03 b	73.7 b	60.31 b
	B ₂	P ₁	21.43 b	37.01 ab	65.44 b	90.45 a	67.77 b
		P ₂	32.11 a	43.08 a	83.02 a	93.31 a	87.10 a
	B ₃	P ₁	19.36 b	32.78 b	48.45 c	57.99 c	51.79 bc
		P ₂	25.69 ab	32.79 b	38.62 d	59.38 c	44.09 cd
	B ₄	P ₁	15.58 bc	27.13 c	35.61 d	54.70 cd	38.96 cd
		P ₂	19.69 b	27.16 c	36.43 d	52.04 cd	41.20 cd
2022	B ₁	P ₁	38.02 a	44.08 a	78.18 b	108.06 a	80.96 b
		P ₂	25.93 b	50.81 a	99.19 a	111.49 a	104.06 a
	B ₂	P ₁	33.32 a	42.18 ab	62.71 c	90.91 b	66.58 bc
		P ₂	18.70 d	44.63 a	80.08 b	87.11 b	72.05 b
	B ₃	P ₁	31.76 ab	39.29 b	57.87 c	71.71 c	61.86 bc
		P ₂	22.06 c	39.85 b	46.14 d	69.52 c	52.68 c
	B ₄	P ₁	24.16 bc	33.67 c	42.55 d	67.55 c	46.55 d
		P ₂	18.00 d	31.19 c	43.52 d	60.38 c	49.22 d

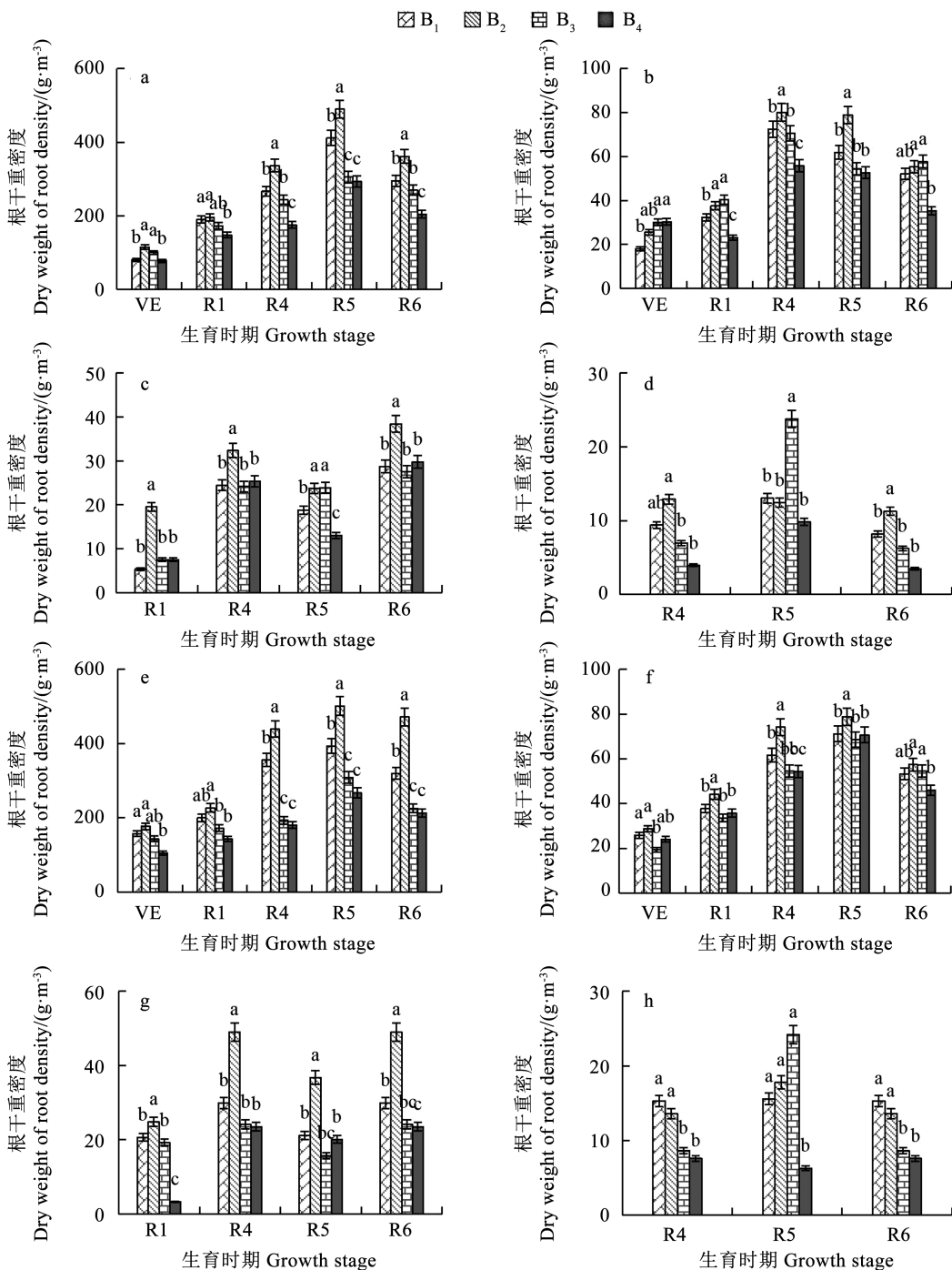
注:不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments ($P < 0.05$). The same below.

如图2所示,2021年合农71与新大豆27各生育时期播期0~80 cm土层根系干重密度随土层深度增加迅速降低,且处理间差异显著。其中,始粒期0~20 cm土层,B₁、B₂和B₃处理分别较B₄处理根

干重密度增加40.10%、66.83%和3.96%;20~40 cm土层分别增加17.52%、49.94%和3.48%,根干重密度表现为B₂ > B₁ > B₃ > B₄。新大豆27与合农71表现一致,始粒期,0~20 cm土层,B₁、B₂和B₃

处理分别较 B_4 处理根干重密度增加 47.29%、87.55% 和 15.63%; 20~40 cm 土层, B_1 和 B_2 处理分

别较 B_4 处理根干重密度增加 0.71% 和 11.49%, B_3 处理较 B_4 处理根干重密度降低 2.82%。



注: a. 合农 71 土层 0~20 cm; b. 合农 71 土层 20~40 cm; c. 合农 71 土层 40~60 cm; d. 合农 71 土层 60~80 cm; e. 新大豆 27 土层 0~20 cm; f. 新大豆 27 土层 20~40 cm; g. 新大豆 27 土层 40~60 cm; h. 新大豆 27 土层 60~80 cm。不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

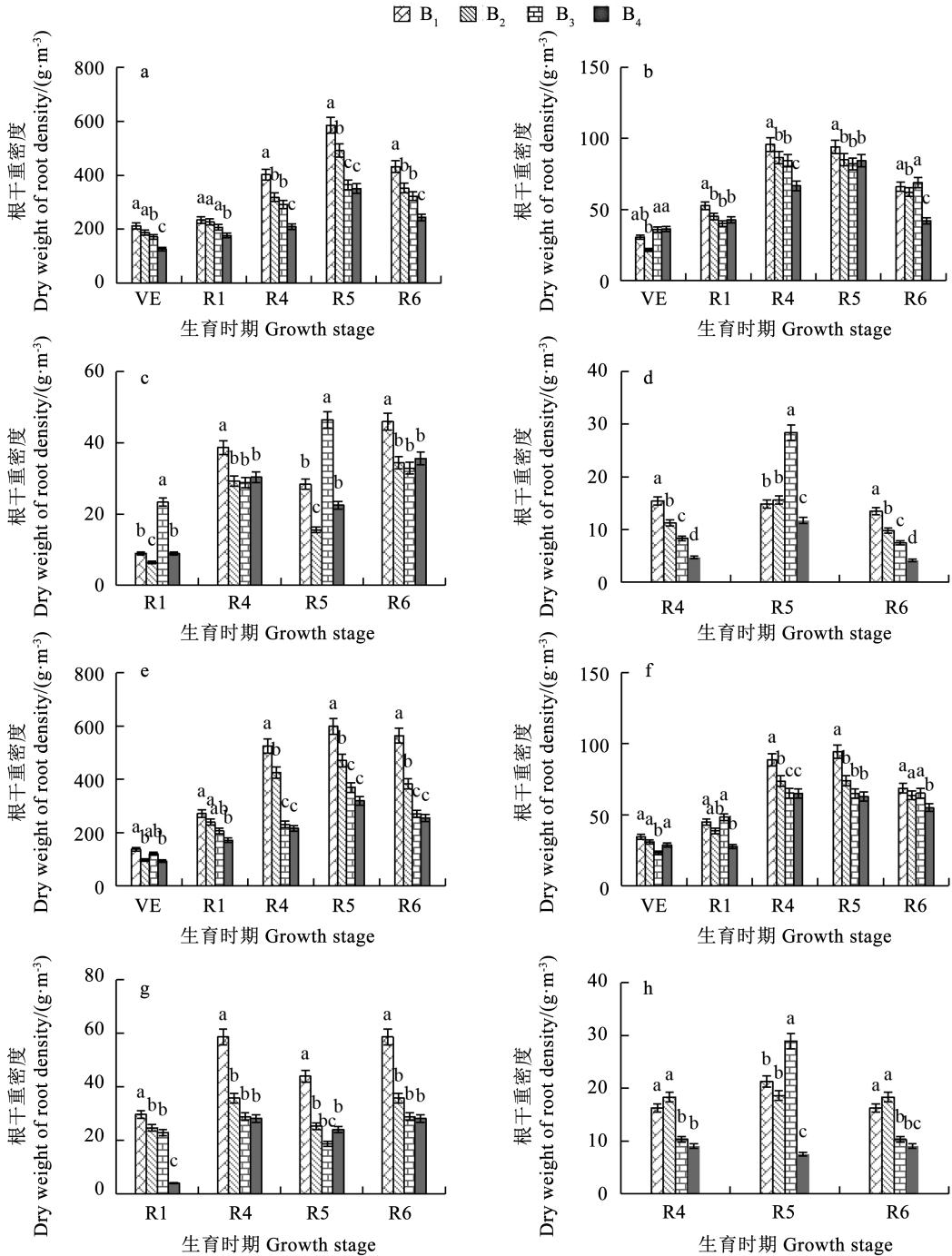
Note: a. Henong 71, soil layer 0-20 cm; b. Henong 71, soil layer 20-40 cm; c. Henong 71, soil layer 40-60 cm; d. Henong 71, soil layer 60-80 cm; e. Xindadou 27, soil layer 0-20 cm; f. Xindadou 27, soil layer 20-40 cm; g. Xindadou 27, soil layer 40-60 cm; h. Xindadou 27, soil layer 60-80 cm. Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments ($P < 0.05$).

图 2 2021 年合农 71 和新大豆 27 不同土层根系干重密度动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of root dry weight density in different soil layers of Henong 71 and Xindadou 27 in 2021

如图3所示,2022年合农71与新大豆27播期处理间的根系干重密度差异显著,始粒期,0~20 cm土层, B_1 、 B_2 和 B_3 分别较 B_4 的根干重密度增加40.06%、28.62%和3.81%;20~40 cm土层分别增加10.31%、0.71%和2.91%, $B_1 > B_2 > B_3/B_4$;新大豆27

与合农71表现一致,始粒期,0~20 cm土层, B_1 、 B_2 和 B_3 分别较 B_4 侧根长密度增加46.70%、32.11%和13.52%;20~40 cm土层分别增加33.31%、14.91%和3.37%。两年结果相近,适期早播显著增加根干重,主要是0~40 cm土层根干重增加的结果。



注:a. 合农71 土层0~20 cm; b. 合农71 土层20~40 cm; c. 合农71 土层40~60 cm; d. 合农71 土层60~80 cm; e. 新大豆27 土层0~20 cm; f. 新大豆27 土层20~40 cm; g. 新大豆27 土层40~60 cm; h. 新大豆27 土层60~80 cm。不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

Note: a. Henong 71, soil layer 0-20 cm; b. Henong 71, soil layer 20-40 cm; c. Henong 71, soil layer 40-60 cm; d. Henong 71, soil layer 60-80 cm; e. Xindadou 27, soil layer 0-20 cm; f. Xindadou 27, soil layer 20-40 cm; g. Xindadou 27, soil layer 40-60 cm; h. Xindadou 27, soil layer 60-80 cm. Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments ($P < 0.05$).

图3 2022年合农71和新大豆27不同土层根系干重密度动态变化

Fig. 3 Dynamic changes of root dry weight density in different soil layers of Henong 71 and Xindadou 27 in 2022

2.3 播期对春大豆总侧根长和侧根长密度的影响

如表 4 所示,合农 71 和新大豆 27 播期各处理的根系总侧根长随生育进程的推进呈先增后降的变化趋势,与根干重表现一致,于始粒期达到峰值,且播期处理间差异达显著水平。2021 年合农 71 各生育时期总侧根长多表现为 $B_2 > B_1 > B_3/B_4$ 。其中,始粒期 B_1 、 B_2 和 B_3 的总侧根长分别较 B_4 处理增加 29.54%、42.37% 和 13.54%;新大豆 27 与合农 71 表现一致,始粒期 B_1 、 B_2 和 B_3 的总侧根长分别较 B_4 处理增加 26.48%、39.09% 和 11.54%。2022 年合农 71 各生育时期总侧根长多表现为 $B_1 > B_2 > B_3/B_4$,其中,始粒期 B_1 、 B_2 和 B_3 的总侧根长分别较 B_4 处理增加 20.03%、12.61% 和 7.98%;新大豆 27 与合农 71 表现一致,始粒期 B_1 、 B_2 和 B_3 的总侧根长分别较 B_4 处理增加 18.65%、16.40% 和

3.29%。2 年结果相近,适期早播增加根系的最大总侧根长。

如图 4 所示,2021 年合农 71 与新大豆 27 各生育时期 0~80 cm 土层侧根长密度随土层深度增加而降低,且处理间差异显著。其中,始粒期 0~20 cm 土层, B_1 、 B_2 和 B_3 处理分别较 B_4 处理侧根长密度增加 34.83%、56.57% 和 20.57%;20~40 cm 土层分别增加 23.57%、28.72% 和 7.40%;40~60 cm 土层分别增加 33.71%、38.27% 和 7.82%,侧根长密度表现为 $B_2 > B_1 > B_3 > B_4$ 。新大豆 27 与合农 71 表现一致,始粒期,0~20 cm 土层, B_1 、 B_2 和 B_3 处理分别较 B_4 处理侧根长密度增加 28.78%、45.57% 和 11.02%;20~40 cm 土层分别增加 28.02%、38.76% 和 13.39%;40~60 cm 土层分别增加 15.10%、16.25% 和 10.48%。

表 4 不同播期处理春大豆总侧根长

Table 4 Different sowing dates treatments on total lateral root length of soybeans

单位: $m \cdot m^{-2}$

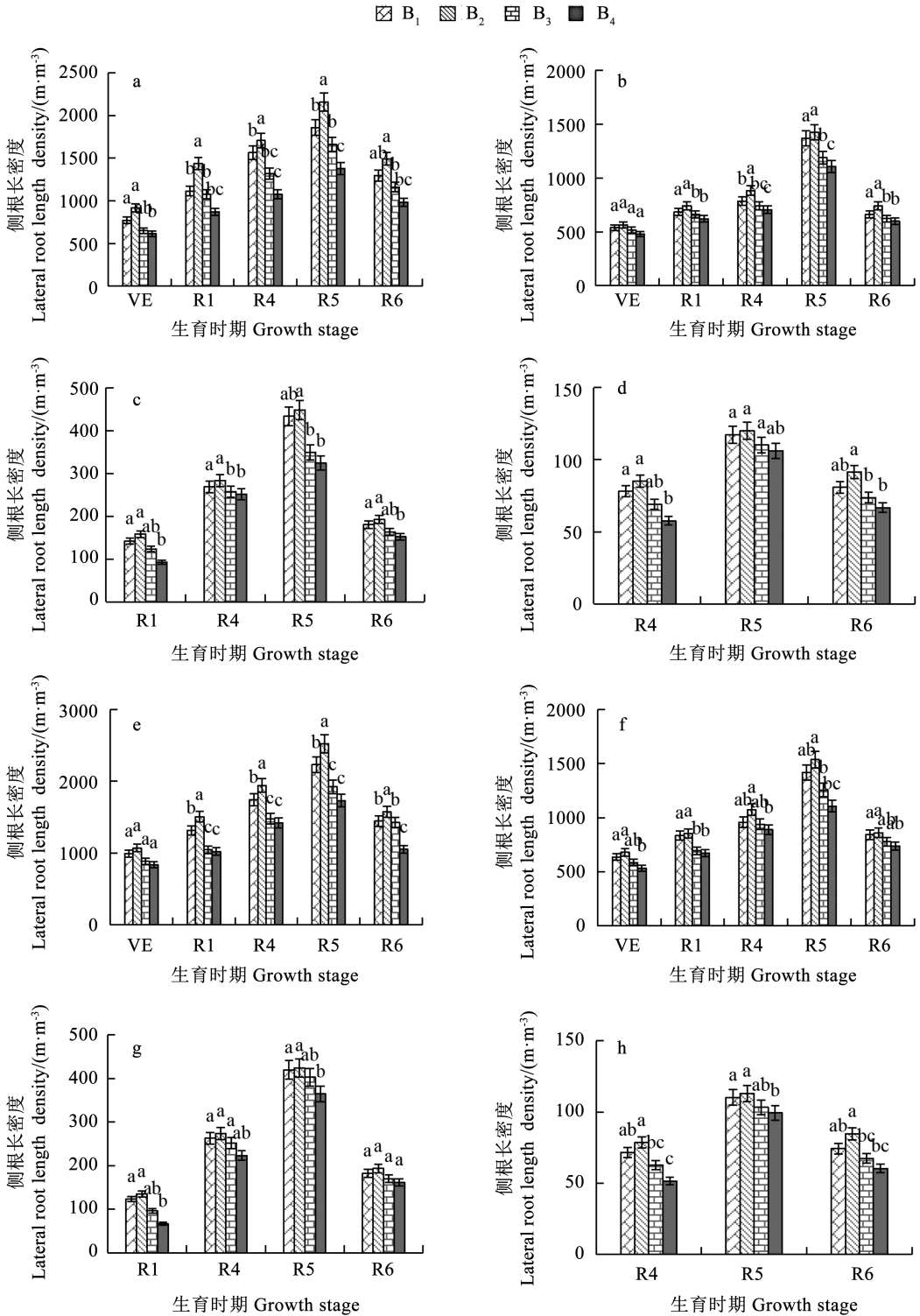
年份 Year	播期处理 Sowing date treatment	品种 Cultivar	生育时期 Growth stage				
			VE	R1	R4	R5	R6
2021	B_1	P_1	436.08 bc	646.34 b	898.79 bc	1258.93 bc	740.13 b
		P_2	543.76 ab	758.45 ab	1012.33 b	1393.39 b	848.40 ab
	B_2	P_1	494.14 b	779.04 a	985.90 b	1383.64 b	838.83 ab
		P_2	584.36 a	832.64 a	1123.57 a	1532.28 a	904.36 a
	B_3	P_1	388.85 c	620.03 b	794.42 c	1103.41 c	673.88 b
		P_2	490.26 b	612.67 b	910.73 bc	1228.82 bc	814.99 ab
	B_4	P_1	363.81 c	527.50 c	697.23 cd	971.85 cd	600.02 c
		P_2	456.44 b	587.68 bc	862.20 bc	1101.64 c	671.78 c
2022	B_1	P_1	576.60 b	909.03 a	1095.22 b	1614.52 b	978.79 ab
		P_2	681.87 a	971.58 a	1314.89 a	1787.96 a	1106.61 a
	B_2	P_1	508.84 c	754.19 b	1000.26 c	1469.00 c	863.63 b
		P_2	634.49 a	885.00 ab	1183.53 b	1625.89 b	1036.20 a
	B_3	P_1	453.73 d	723.49 b	968.44 c	1287.52 d	786.33 b
		P_2	572.06 bc	714.90 b	1065.10 c	1433.86 c	907.11 b
	B_4	P_1	424.52 d	615.51 c	792.91 d	1134.01 d	700.14 c
		P_2	532.61 c	685.75 c	1017.16 c	1285.46 cd	793.44 c

注:不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments ($P < 0.05$).

如图 5 所示,2022 年合农 71 和新大豆 27 播期处理间的侧根长密度差异显著,始粒期,0~20 cm 土层, B_1 、 B_2 和 B_3 处理分别较 B_4 处理侧根长密度增加 36.13%、25.83% 和 17.06%;20~40 cm 土层分别增加 22.31%、19.08% 和 6.89%;40~60 cm 土层分别增加 27.68%、25.21% 和 7.25%,具体表现为 $B_1 > B_2 > B_3/B_4$;新大豆 27 与合农 71 表现一致,始

粒期,0~20 cm 土层, B_1 、 B_2 和 B_3 处理分别较 B_4 处理侧根长密度增加 31.30%、22.35% 和 9.93%;20~40 cm 土层分别增加 27.93%、21.89% 和 11.81%;40~60 cm 土层分别增加 13.98%、13.21% 和 9.48%。2 年结果相近,适期早播处理可以增加大豆侧根长度,主要是 0~60 cm 土层侧根长增加的结果。

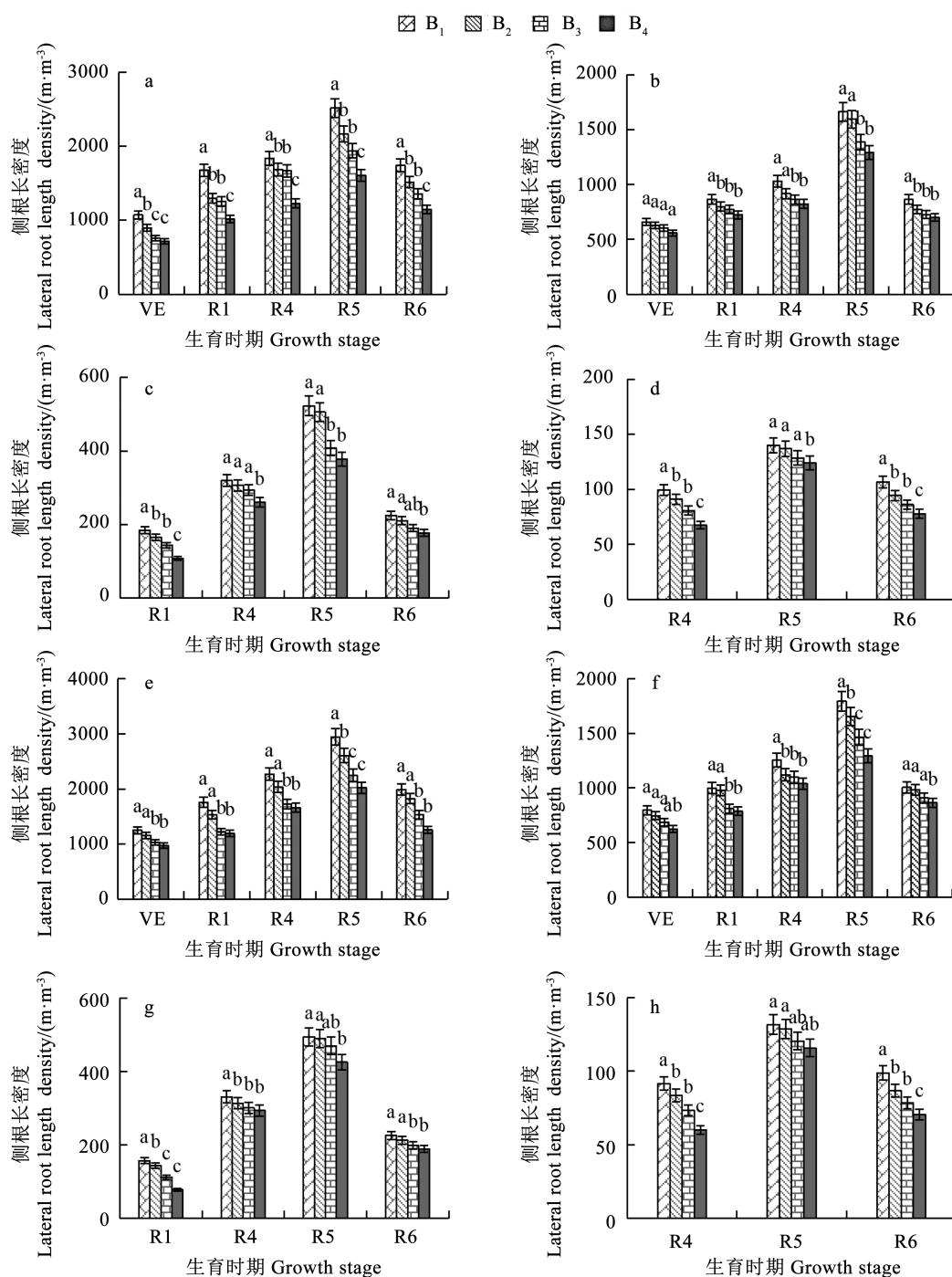


注: a. 合农71 土层0~20 cm; b. 合农71 土层20~40 cm; c. 合农71 土层40~60 cm; d. 合农71 土层60~80 cm; e. 新大豆27 土层0~20 cm; f. 新大豆27 土层20~40 cm; g. 新大豆27 土层40~60 cm; h. 新大豆27 土层60~80 cm。不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: a. Henong 71, soil layer 0-20 cm; b. Henong 71, soil layer 20-40 cm; c. Henong 71, soil layer 40-60 cm; d. Henong 71, soil layer 60-80 cm; e. Xindadou 27, soil layer 0-20 cm; f. Xindadou 27, soil layer 20-40 cm; g. Xindadou 27, soil layer 40-60 cm; h. Xindadou 27, soil layer 60-80 cm. Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments ($P < 0.05$).

图4 2021年合农71和新大豆27不同土层侧根长密度动态变化

Fig.4 Dynamic changes of lateral root length density in different soil layers of Henong 71 and Xindadou 27 in 2021



注: a. 合农 71 土层 0~20 cm; b. 合农 71 土层 20~40 cm; c. 合农 71 土层 40~60 cm; d. 合农 71 土层 60~80 cm; e. 新大豆 27 土层 0~20 cm; f. 新大豆 27 土层 20~40 cm; g. 新大豆 27 土层 40~60 cm; h. 新大豆 27 土层 60~80 cm。不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: a. Henong 71, soil layer 0-20 cm; b. Henong 71, soil layer 20-40 cm; c. Henong 71, soil layer 40-60 cm; d. Henong 71, soil layer 60-80 cm; e. Xindadou 27, soil layer 0-20 cm; f. Xindadou 27, soil layer 20-40 cm; g. Xindadou 27, soil layer 40-60 cm; h. Xindadou 27, soil layer 60-80 cm. Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments ($P < 0.05$).

图 5 2022 年合农 71 和新大豆 27 不同土层侧根长密度动态变化

Fig. 5 Dynamic changes of lateral root length density in different soil layers of Henong 71 and Xindadou 27 in 2022

2.4 播期对春大豆产量及其构成因素的影响

如表 5 所示, 年际间对大豆产量无显著影响, 2 年中各品种播期处理间产量构成因素及产量差

异显著。2021 年合农 71 的收获株数、单株粒数和百粒重分别表现为 $B_2 > B_1 > B_3 > B_4$ 、 $B_1/B_4 > B_2/B_3$ 和 $B_2/B_3/B_4 > B_1$, 产量表现为 $B_2 > B_1/B_3 > B_4$,

B₁ 和 B₂ 处理分别较 B₄ 处理增产 10.81% 和 15.43% ; 新大豆 27 的收获株数、单株粒数、百粒重分别表现为 B₂ > B₁/B₃ > B₄、B₁/B₄ > B₂/B₃ 和 B₁/B₂/B₃ > B₄, 产量表现为 B₂ > B₁/B₃ > B₄, B₁ 和 B₂ 处理分别较 B₄ 处理增产 8.70% 和 21.70%。品种间产量差异不显著, 播期与品种的互作对产量的影响均不显著。

2022 年合农 71 和新大豆 27 的收获株数分别

表现为 B₁/B₂/B₃ > B₄ 和 B₁/B₂ > B₃/B₄, 单株粒数分别表现为 B₁/B₄ > B₂/B₃ 和 B₁ > B₂/B₃/B₄, 百粒重均表现为 B₁/B₂/B₃ > B₄, 产量分别表现为 B₁ > B₂/B₃/B₄ 和 B₁ > B₂ > B₃/B₄。合农 71 的 B₁ 处理较 B₄ 处理增产 16.66%, 新大豆 27 的 B₁ 和 B₂ 处理分别较 B₄ 处理增产 32.90% 和 13.13%。两年结果相近。适时早播通过增加收获株数、单株粒数显著增加产量, B₁ 和 B₂ 处理产量较高。

表 5 不同播期的大豆产量及其构成因素

Table 5 Soybean yield and its components at different sowing dates

年份 Year	播期处理 Sowing date treatment	品种 Cultivar	收获株数 Plant number ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	单株荚数 Pods number per plant	单株粒数 Seed number per plant	百粒重 100-seed weight/g	产量 Yield/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
2021	B ₁	P ₁	25.07 b	69.50 ab	99.12 a	18.14 bc	4 462.23 c
		P ₂	24.27 bc	49.48 cd	85.41 c	21.29 a	4 361.34 c
	B ₂	P ₁	27.60 a	73.70 a	89.16 bc	19.34 ab	4 705.84 b
		P ₂	27.80 a	53.33 c	80.21 de	22.06 a	4 884.97 b
	B ₃	P ₁	24.13 c	63.00 b	93.05 b	19.12 b	4 287.21 cd
		P ₂	25.40 b	46.73 d	78.15 d	21.91 a	4 294.76 cd
	B ₄	P ₁	21.60 d	64.80 b	98.46 a	18.77 b	3 979.76 e
		P ₂	23.07 cd	47.03 d	84.33 c	20.70 ab	4 014.07 de
2022	B ₁	P ₁	26.83 a	56.30 c	98.46 ab	18.50 b	4 889.54 b
		P ₂	25.08 b	44.15 d	101.90 a	19.64 ab	5 017.36 a
	B ₂	P ₁	26.17 ab	42.55 d	90.82 bc	18.48 b	4 382.58 c
		P ₂	24.08 c	36.20 e	90.70 bc	19.56 ab	4 271.07 d
	B ₃	P ₁	25.74 b	43.65 d	93.05 b	18.03 bc	4 304.52 cd
		P ₂	21.58 d	43.55 d	93.24 b	19.32 ab	3 885.90 e
	B ₄	P ₁	23.67 c	46.50 d	102.24 a	17.32 c	4 191.30 d
		P ₂	21.33 d	35.45 e	93.80 b	18.90 b	3 775.25 e
	F	B	58.802 **	58.399 **	21.451 *	533.516 **	24.965 **
		P	21.365	2.843	7.187	21.828 *	1.845
	B × P	0.007	0.097	0.024	0.002	0.019	

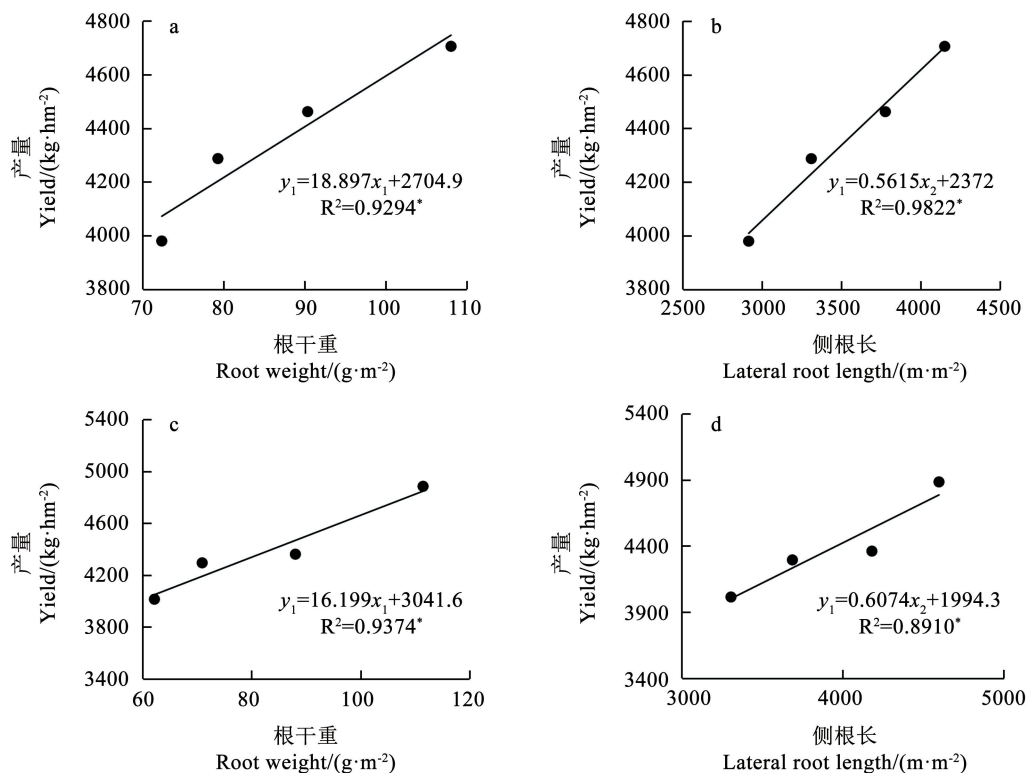
注: * 和 ** 分别表示存在显著 ($P < 0.05$) 和极显著差异 ($P < 0.01$)。

Note: * and ** indicated significant ($P < 0.05$) and extremely significant ($P < 0.01$) respectively.

2.5 膜下滴灌春大豆根系生长与产量的关系

由图 6 可知, 2021 年合农 71 收获产量 (y_1) 与 R5 期 (始粒期) 根干重 (x_1) 和侧根长 (x_2) 分别符合直线回归方程 $y_1 = 18.897x_1 + 2 704.9$ ($R^2 = 0.929 4^*$) 和 $y_1 = 0.561 5x_2 + 2 372$ ($R^2 = 0.398 2^*$)。新大豆 27 收获产量 (y_1) 与 R5 期根干重 (x_1) 和侧根长 (x_2) 分别符合直线回归方程 $y_1 = 21.195x_1 + 2 184.3$ ($R^2 = 0.970 5^*$) 和 $y_1 = 7.082 8x_2 - 1 002.3$ ($R^2 = 0.917 7^*$)。由图 7 可知, 2022 年合农 71 收获产量

(y_1) 与 R5 期根干重 (x_1) 和侧根长 (x_2) 分别符合直线回归方程 $y_1 = 11.7x_1 + 3 231.4$ ($R^2 = 0.925 4^*$) 和 $y_1 = 4.145 7x_2 + 1 342.4$ ($R^2 = 0.887 3^*$)。新大豆 27 产量 (y_1) 与 R5 期根干重 (x_1) 和侧根长 (x_2) 分别符合直线回归方程 $y_1 = 21.195x_1 + 2 184.3$ ($R^2 = 0.970 5^*$) 和 $y_1 = 7.082 8x_2 - 1 002.3$ ($R^2 = 0.917 7^*$)。两年结果一致, 且春大豆播期从 B₁ (4 月初) 至 B₄ (4 月底) 范围之间, 其 R5 期 (始粒期) 的根干重和侧根长均与产量显著相关。

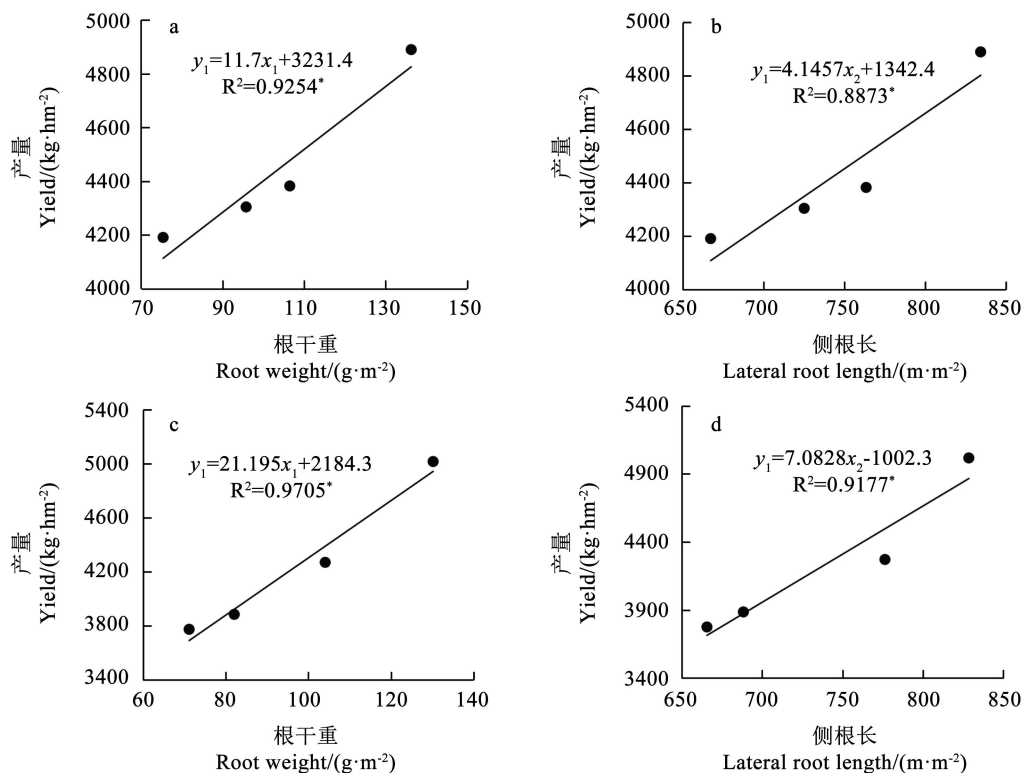


注: a~b. 合农 71; c~d. 新大豆 27。

Note: a-b. Henong 71; c-d. Xindadou 27.

图 6 2021 年合农 71 和新大豆 27 根干重、侧根长与产量的关系 (R5 期)

Fig. 6 Relationship between root dry weight, lateral root length and yield of Henong 71 and Xindadou 27 in 2021 (R5 stage)



注: a~b. 合农 71; c~d. 新大豆 27。

Note: a-b. Henong 71; c-d. Xindadou 27.

图 7 2022 年合农 71 和新大豆 27 根干重、侧根长与产量的关系 (R5 期)

Fig. 7 Relationship between root dry weight, lateral root length and yield of Henong 71 and Xindadou 27 in 2022 (R5 stage)

2.6 播期对大豆水分利用效率的影响

如表6所示,不同播期处理对大豆灌溉水利用效率及水分利用效率影响显著。随着播期推迟土壤耗水量先减少后增加,而总耗水量逐渐增加。同一播期处理下,合农71和新大豆27差异不显著。随着播期推迟,土层表面水分蒸发,0~100 cm土层含水量减少,总耗水量增加,灌溉水利用效率、水分利用效率呈先增加后下降的趋势。合农71的早播处理的水分利用效率较B₄提高17.86%~50.00%;灌溉水利用效率提高18.75%~51.25%。新大豆27

的早播处理的水分利用效率较B₄提高17.54%~54.39%;灌溉水利用效率提高17.28%~54.32%。品种间水分利用效率差异不显著。2022年灌溉水及水分利用效率变化规律与2021年基本一致,合农71早播处理的水分利用效率较B₄提高13.11%~47.54%;灌溉水利用效率提高14.81%~49.38%。新大豆27早播处理的水分利用效率较B₄提高14.55%~70.91%;灌溉水利用效率提高15.07%~69.86%。品种间水分利用效率差异不显著。适期早播可显著提高灌溉水及水分利用效率,减少灌溉量。

表6 不同播期的大豆水分利用效率

Table 6 Water use efficiency of soybean at different sowing dates

年份 Year	播期 处理 Sowing date treatment	品种 Cultivar	总灌水量 Total irrigation/ (m ³ ·hm ⁻²)	降水量 Precipitation/ (m ³ ·hm ⁻²)	土壤耗水量 Soil water consumption/ (m ³ ·hm ⁻²)	总耗水量 Total water consumption/ (m ³ ·hm ⁻²)	灌溉水 利用效率 Irrigation water use efficiency/ (kg·m ⁻³)	水分 利用效率 Water use efficiency/ (kg·m ⁻³)	
2021	B ₁	P ₁	3900	926	940.61 abc	6366.61 b	1.14 a	0.77 b	
		P ₂	3900	926	863.33 bc	6289.33 b	1.12 a	0.77 b	
	B ₂	P ₁	3900	926	784.66 bc	6210.66 ab	1.21 a	0.84 a	
		P ₂	3900	926	706.75 c	6132.75 ab	1.25 a	0.88 a	
	B ₃	P ₁	4500	926	1030.84 ab	6456.84 ab	0.95 ab	0.66 b	
		P ₂	4500	926	1024.40 ab	6450.40 ab	0.95 ab	0.67 b	
	B ₄	P ₁	4950	926	1187.72 a	7063.72 a	0.80 b	0.56 c	
		P ₂	4950	926	1152.16 a	7028.16 a	0.81 b	0.57 c	
2022	B ₁	P ₁	4050	758	687.99 c	5945.99 c	1.21 a	0.90 a	
		P ₂	4050	758	619.70 c	5877.70 c	1.24 a	0.94 a	
	B ₂	P ₁	4050	758	824.79 b	6082.79 b	1.08 ab	0.79 ab	
		P ₂	4050	758	757.07 bc	6015.07 b	1.05 b	0.78 b	
	B ₃	P ₁	4650	758	903.91 ab	6161.91 b	0.93 ab	0.69 b	
		P ₂	4650	758	898.32 ab	6156.32 b	0.84 c	0.63 bc	
	B ₄	P ₁	5175	758	1 041.50 a	6749.50 a	0.81 b	0.61 bc	
		P ₂	5175	758	1 010.27 a	6718.27 a	0.73 d	0.55 c	
	F			B		94.589 **	503.18 **	216.61 **	113.195 **
				P		8.035	7.987	2.173	0.158
			B × P		0.028	0.001	0.014	0.025	

注:不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments ($P < 0.05$).

3 讨论

播期通过改变作物生长的温度与水分等条件影响其生长发育。作物产量形成的关键生长期处于适宜的光温等条件下是适期播种增加产量的主要原因^[19]。适期播种花生,可以缩短幼苗期,加快植株与根系生长^[20]。早播土壤低温的条件有利于棉花幼苗根系生长,但不利于地上部生长;晚播高温条件下,棉花幼苗地上部生长迅速,但根系生长缓慢^[21]。茎秆粗壮,根系发达,生长稳健是作物壮苗的基本特征,而壮苗对高产形成有利。适期早播

有利于棉花壮苗的形成,是提高单产的重要措施之一。本研究中,北疆土壤由于早春积雪融水的浸润,出苗与幼苗生长的水分条件适宜,2021年与2022年4月上旬平均气温均达12.99℃以上,在覆膜条件下,膜下5 cm日平均地温均在13℃左右^[14],完全满足大豆出苗的下限地温(6℃)^[15]要求,此时播种,较低的温度和较为充足的土壤水分条件,不仅可以促进其根系建成与地上部的稳健生长,而且在一定程度上可避免后期高温天气导致的“落花落荚”(开花期提前至6月上旬)。随着气温快速升高(4月中下旬达16.19℃),土壤表层迅速

失墒^[14],此后播种,大豆因土壤表层墒情不足,在出苗期无有效降水的情况下,将严重降低出苗率。若在干土播种后立即灌出苗水(干播湿出),因气温较高,加上水分充足,易导致大豆地上部徒长,根系生长受阻,形成“高脚苗”,不能形成壮苗;同时,B₄处理的开花期也相应推迟到6月下旬,易受高温危害,增加“落花落荚”率,最终降低产量。早播较低的温度和适宜的水分条件促进早播春大豆苗期根系干重和侧根长保持较高的增长速率,这与张旭东等、Wijewardana 等^[22-23]的研究结果一致。北疆早播春大豆处于较低温度和适宜的土壤水分条件下,促进根系生长,形成壮苗,生育进程前移,并延长生育期,是其较晚播大豆增加产量的重要原因。大豆根系生长与花荚形成的关系密切,80%以上的根系干物质和根长都是在花荚期形成的^[24],根系快速生长与花荚形成同步是大豆形成深广根系的关键^[25]。本研究结果表明,春大豆盛花期(R₂)后,气温逐渐升高,早播处理B₁和B₂在6月下旬处于R₅期,此时气温范围为21.04℃~23.71℃,而B₄于7月下旬到达R₅期,此时日平均气温达28.66℃,远高于大豆花荚期最适生长温度20~27℃^[25]。通过相关回归分析发现,2品种的R₅期根干重和侧根长均与产量呈显著正相关,高温显著抑制了大豆0~40cm根系干物质积累和根长伸长的增加,这与李婕等^[26]在水稻上的研究结果相似。这可能是因为升温后大豆蒸腾作用增强,土壤养分有效性增加,植物根系投入降低,导致根系形态指标和根生物量降低。也有可能是因为升温降低了植物地上部生物量,进而降低了光合产物向地下的分配^[27-28]。

北疆春大豆适时早播可利用雪墒出苗并早熟,可较晚播春大豆节省了出苗水和最后1次生育期灌水。可见,春大豆适期早播,一方面大幅度降低了灌水量,同时又增加产量。故早播可以大幅度提高大豆的水分利用效率,降低灌溉定额。本试验结果中,2021年根系总干重、总根长及产量多表现为产量为B₂>B₁/B₃>B₄,而与2022年的表现B₁>B₂/B₃/B₄不同,在于2021年4月22日B₁遭受霜冻危害,减少收获株数,导致年份间结果不同。即便是早播出苗后遇霜冻危害(2021年B₁处理),其产量仍高于B₄处理。这是由于B₁处理部分遭受霜冻的豆苗发生了分枝,增加单株粒数,部分补偿了因霜冻降低产量的缘故。膜下滴灌春大豆适期早播(终霜前播种,终霜后出苗),不但能促进根系生长、延长生育期而获得高产,而且还能充分利用早春土壤雪墒出苗。膜下滴灌春大豆适期早播对大豆节水高产有利。有关膜下滴灌春大豆节水高产的根系形态特征和生理特性有待深入研究。

4 结论

当播期由4月底提至4月上旬,北疆膜下滴灌春大豆生育进程显著提前,延长生育期。早播促进春大豆根系生长,显著增加了0~40cm土层的根干重及0~60cm土层的侧根长,不同播期处理间春大豆的产量均与始粒期(R₅)的总根重密度和总侧根长密度呈显著正相关性,早播通过良好的土壤雪墒条件加速春大豆根系生长,促进了根系对水分和养分的吸收利用,有效保证了关键生育期根系对大豆植株生长所需养分和水分的供应,最终实现大豆节水增产。同时,早播充分利用了早春土壤雪墒出苗,节约了出苗水,增产与节水共同导致灌溉水利用效率明显提高。综合考虑春大豆早播生育进程与生育期、根系生长、产量形成与水分利用效率等因素,北疆膜下滴灌春大豆的适播期应为4月上旬,有利于大豆实现高产、节水。

参考文献

- [1] 刘新永,田长彦.棉花膜下滴灌盐分动态及平衡研究[J].水土保持学报,2005,19(6):82-85.
LIU X Y, TIAN C Y. Study on dynamic and balance of salt for cotton under plastic mulch in south Xinjiang[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2005, 19(6): 82-85.
- [2] 张伟,吕新,李鲁华,等.新疆棉田膜下滴灌盐分运移规律[J].农业工程学报,2008,24(8):15-19.
ZHANG W, LÜ X, LI L H, et al. Salt transport law of drip irrigation under plastic film in cotton field in Xinjiang [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(8): 15-19.
- [3] WHITE S C R, STEVEN R. Identifying the potential to apply deficit irrigation strategies in cotton using large mobile irrigation machines [J]. The 4th International Crop Science Congress, 2004, 11(1): 26-34.
- [4] 李明思,郑旭荣,贾宏伟,等.棉花膜下滴灌灌溉制度试验研究[J].中国农村水利水电,2001(11):13-15.
LI M S, ZHENG X R, JIA H W, et al. Experimental research on under-mulch drip irrigation regime for cotton [J]. China Rural Water and Hydropower, 2001(11): 13-15.
- [5] 郭美玲,郭泰,王志新,等.创全国大豆高产纪录品合农71及其超高产栽培技术[J].黑龙江农业科学,2020,21(6):139-141.
GUO M L, GUO T, WANG Z X, et al. The soybean variety Henong 71 and its cultivation technology of super high yield [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2019, 21(6): 139-141.
- [6] 曾凯,赵靓,张恒斌,等.新疆春大豆膜下滴灌超高产栽培模式创建[J].大豆科学,2021,40(1):28-38.
ZENG K, ZHAO J, ZHANG H B, et al. Establishment of super high yield cultivation mode of spring soybean under film drip irrigation in Xinjiang [J]. Soybean Science, 2021, 40(1): 28-38.
- [7] 赵占营,楚光红,李思忠,等.栽培密度对高产大豆根系生长及花荚形成的影响[J].干旱地区农业研究,2019,37(5):62-69.
ZHAO Z Y, CHU G H, LI S Z, et al. Effects of different densities

- on root growth and pod formation of high-yield soybean [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(5): 62-69.
- [8] 李思忠, 章建新. 春大豆根系生长与花荚形成的关系研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(5): 91-97.
LI S Z, ZHANG J X. Study on the relationship between root growth of spring soybean and flower pod formation [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(5): 91-97.
- [9] 杜亚敏, 高阳, 章建新. 播期对新疆高产春大豆产量和品质的影响[J]. *大豆科学*, 2018, 37(1): 87-91.
DU Y M, GAO Y, ZHANG J X. Effect of sowing date on yield and quality of high-yield spring soybean in Xinjiang[J]. *Soybean Science*, 2018, 37(1): 87-91.
- [10] 李灿东, 窦亚南, 郭泰, 等. 播种期对北方春早熟大豆生育进程及产量相关性状的影响[J]. *作物杂志*, 2015(6): 112-116.
LI C D, DOU Y N, GUO T, et al. Effects of sowing date on development process and yield agronomic characters of early-maturing spring soybean in NorthEast China [J]. *Crops*, 2015 (6): 112-116.
- [11] 张秋英, 李彦生, 李艳华, 等. 晚播对菜用大豆根系、干物质积累及鲜食产量的影响[J]. *大豆科学*, 2009, 28(4): 623-627.
ZHANG Q Y, LI Y S, LI Y H, et al. Influence of late sowing on root, dry matter accumulation and fresh yield in vegetable soybean [J]. *Soybean Science*, 2009, 28(4): 623-627.
- [12] 孙本普, 李秀云, 张宝民. 晚播覆膜小麦与适时播种小麦产量比较的研究[J]. *耕作与栽培*, 1990, 10(6): 34-37, 33.
SUN B P, LI X Y, ZHANG B M. Study on yield comparison between late sowing covered wheat and timely sowing wheat [J]. *Tillage and Cultivation*, 1990, 10(6): 34-37, 33.
- [13] 龚振平, 沈昌蒲, 赵福华. 大豆肥田机制的研究: II. 常规技术条件下大豆根系动态[J]. *大豆科学*, 2000, 19(4): 351-355.
GONG Z P, SHEN C P, ZHAO F H. Study on mechanism of fertility increase soil by growing soybean: ii. The Dynamic Changes of Soybean Roots in Soil Wider Conventional Cultural Practice [J]. *Soybean Science*, 2000, 19(4): 351-355.
- [14] 闫博文, 胥雅馨, 马鹏, 等. 播期对新疆北疆膜下滴灌春大豆产量及水分利用效率的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2023, 28(10): 50-65.
YAN B W, XU Y X, MA P, et al. Effects of sowing date on spring soybean yield and water use efficiency under drip irrigation in northern Xinjiang [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(10): 50-65.
- [15] 李育军, 赵玉田, 常汝镇, 等. 大豆萌发期对6℃低温的反应[J]. *大豆科学*, 1990, 9(2): 136-144.
LI Y J, ZHAO Y T, CHANG R Z, et al. Germination phase of soybean responses to temperature stress at 6℃ [J]. *Soybean Science*, 1990, 9(2): 136-144.
- [16] 郑伟, 韩旭东, 郭泰, 等. 利用国外大豆资源选育合农71 [J]. *中国种业*, 2016(9): 67-68.
ZHENG W, HAN X D, GUO T, et al. Breeding henong 71 with foreign soybean resources [J]. *China Seed Industry*, 2016(9): 67-68.
- [17] 王聪, 章建新. 滴水量对新大豆27号根系生长及产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(5): 169-174, 185.
WANG C, ZHANG J X. Effects of drip irrigation amount on root growth and yield of soybean 27 [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(5): 169-174, 185.
- [18] FEHR WR, CAVINESS C E. Stages of soybean development [J]. *Special Report 80, Iowa Agricultural Experiment Station, Iowa Cooperative External Series, Iowa State University*, 1977: 1-11.
- [19] 陈紫薇, 丁奠元, 董文俊, 等. 覆膜对不同播期冬小麦根系生长和产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(6): 136-145.
CHEN Z W, DING D Y, DONG W J, et al. Effects of plastic mulching on root growth and yield of winter wheat under different sowing dates [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(6): 136-145.
- [20] 申孝军, 张笑培, 姚宝林, 等. 气候变化对新疆膜下滴灌花生适宜播期的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 39(2): 107-115.
SHEN X J, ZHANG X P, YAO B L, et al. Effects of climate change on optimal sowing date of peanuts under drip irrigation under film in Xinjiang [J]. *Transactions of Agricultural Engineering*, 2020, 39(2): 107-115.
- [21] 随龙龙, 田景山, 姚贺盛, 等. 播期温度对新疆膜下滴灌棉花出苗率及苗期生长的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(21): 4040-4051.
SUI L L, TIAN J S, YAO H S, et al. Effects of different sowing dates on emergence rates and seedling growth of cotton under mulched drip irrigation in Xinjiang [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(21): 4040-4051.
- [22] 张旭东, 王智威, 韩清芳, 等. 玉米早期根系构型及其生理特性对土壤水分的响应[J]. *生态学报*, 2016, 36(10): 2969-2977.
ZHANG X D, WANG Z W, HAN Q F, et al. Responses of maize root architecture and physiological characteristics to soil water. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(10): 2969-2977.
- [23] WIJEWARDANA C, ALSAJRI F A, IRBY J T, et al. Water deficit effects on soybean root morphology and early-season vigor [J]. *Agronomy*, 2019, 9(12): 836.
- [24] 李春艳, 李思忠, 楚光红, 等. 不同滴水量处理下大豆根系生长与花荚形成的关系[J]. *南京农业大学学报*, 2016, 39(2): 198-204.
LI C Y, LI S Z, CHU G H, et al. Relationship of soybean root growth and flower-pod formation under different irrigation quantities [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2016, 39(2): 198-204.
- [24] 李春艳, 李思忠, 楚光红, 等. 不同滴水量处理下大豆根系生长与花荚形成的关系[J]. *南京农业大学学报*, 2016, 39(2): 198-204.
LI C Y, LI S Z, CHU G H, et al. Relationship of soybean root growth and flower-pod formation under different irrigation quantities [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2016, 39(2): 198-204.
- [25] 卢城, 宫青涛, 陶雨佳, 等. 盛花期高温对大豆结荚及产量的影响[J]. *大豆科学*, 2021, 40(4): 504-509, 516.
LU C, GONG Q T, TAO Y J, et al. Effects of high temperature on pod setting and yield of soybean [J]. *Soybean Science*, 2019, 40(4): 504-509, 516.
- [26] 李婕, 周泽源, 刘成, 等. 大气CO₂浓度增加和升温对不同品种水稻根系形态的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2019, 46(1): 71-82.
LI J, ZHOU Z Y, LIU C, et al. Effects of increasing atmospheric CO₂ concentration and warming on root morphology of rice cultivars [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2019, 46(1): 71-82.
- [27] WANG J S, DEFRENNE C, MCCORMACK M L, et al. Fine-root functional trait responses to experimental warming: a global meta-analysis [J]. *New Phytologist*, 2021, 230(5): 1856-1867.
- [28] LIN D L, XIA J Y, WAN S Q. Climate warming and biomass accumulation of terrestrial plants: a meta-analysis [J]. *New Phytologist*, 2010, 188(1): 187-198.