



## 播期和萌发期冷处理对不同耐低温性大豆生态性状的影响

孙晓环<sup>1,2</sup>, 陈造业<sup>3</sup>, 白艳凤<sup>1</sup>, 孙国宏<sup>1</sup>, 王燕平<sup>1</sup>, 宗春美<sup>1</sup>, 王晓梅<sup>1</sup>, 杜维广<sup>1\*</sup>

(1. 黑龙江省农业科学院 牡丹江分院/含硫氨基酸大豆育种工程技术研究中心/国家大豆产业技术体系牡丹江综合试验站, 黑龙江 牡丹江 157041; 2. 新疆农业大学 农学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 3. 南京农业大学 农学院, 江苏 南京 210095)

**摘要:**为给选育萌发期耐低温大豆品种和农民“适时早播”种植大豆提供理论依据,本研究首先以相对发芽率和相对正常苗率为指标,综合评价了169份东北大豆种质资源萌发期的耐低温(6℃)能力,从中筛选出10份耐冷型(T)、8份中间型(M)和9份敏感型(S)代表性大豆资源进行田间试验,研究了早播(K)、正常(CK)和晚播(P)等3个播期和萌发期冷处理(N)对不同耐低温类型大豆生态性状的影响。结果表明:随播期推迟,整体上大豆各生育阶段缩短和活动积温减少,有效分枝数从2.2个降低到1.1个,粗蛋白含量从38.8%降低到38.0%,蛋脂总量从60.9%降低到59.0%,同时晚播(P)时单株有效荚数和粒重显著降低,但是早播(K)时大豆单株产量与CK无明显差异;不同耐低温型大豆种质之间各性状随播期的变化规律基本相同,但是存在一些差异;耐冷型(T)大豆具有更高的有效分枝数、蛋白质含量与蛋脂总量(T>M>S)以及单株有效荚数;生育期和积温无明显变化时,大豆萌发期6℃处理后,大豆的花荚脱落率下降5.8%,有效分枝数和单株有效荚数均显著增加,单株粒重增加2.3g,有增产效应。结果说明,选育萌发期耐冷型大豆并适时早播,有利于改善大豆品质,增加有效分枝数,同时发现萌发期冷胁迫能影响大豆后期生长发育且具有增产效应。

**关键词:**种质资源;大豆;萌发期;耐低温;播期;产量

## Effects of Cold Treatment During Sowing and Germination Periods on Ecological Characters of Soybeans with Different Low Temperature Tolerance

SUN Xiaohuan<sup>1,2</sup>, CHEN Zaoye<sup>3</sup>, BAI Yanfeng<sup>1</sup>, SUN Guohong<sup>1</sup>, WANG Yanping<sup>1</sup>, ZONG Chunmei<sup>1</sup>, WANG Xiaomei<sup>1</sup>, DU Weiguang<sup>1\*</sup>

(1. Mudanjiang Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences/Research Center for Sour Amino Acid Soybean Breeding Engineering Technology/Mudanjiang Comprehensive Experimental Station of National Soybean Industry Technology System, Mudanjiang 157041, China; 2. College of Agriculture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 3. College of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** To provide theoretical basis for breeding low-temperature tolerant soybean varieties during the germination period and for farmers to plant soybeans with “timely early sowing”, this study first comprehensively evaluated the low-temperature tolerance (6℃) ability of 169 northeast soybean germplasm resources during the germination period using relative germination rate and relative normal seedling rate as indicators. 10 representative soybean resources of cold tolerant type (T), 8 intermediate type (M), and 9 sensitive type (S) were selected for field experiments, and the effects of early sowing (K), normal sowing (CK), and late sowing (P), as well as cold treatment (N) during the germination period, on the ecological traits of different low-temperature tolerant soybean types were studied. The results showed that with the delay of sowing date, the overall growth stages of soybean shortened and the accumulated temperature of activity decreased. The number of effective branches decreased from 2.2 to 1.1, the crude protein content decreased from 38.8% to 38.0%, and the total protein and fat content decreased from 60.9% to 59.0%. At the same time, the number of effective pods and seeds weight per plant significantly decreased during late sowing (P), but there was no significant difference in soybean yield per plant between early sowing (K) and CK. The changes in various traits of different low-temperature tolerant soybean germplasm with different sowing dates were basically the same as the whole, but there were some differences. Cold tolerant (T) soybeans exhibited higher effective branching numbers, protein content, total protein and fat content (T>M>S), and effective pods numbers per plant. When there were no significant changes in the growth period and accumulated temperature, after treatment at 6℃ during soybean germination, the shedding rate of soybean pods decreased by 5.8%, the number of effective branches and effective pods per plant increased significantly, and the seeds weight per plant increased by 2.3 g, showing a yield increasing effect. The above explanation shows that early sowing of cold tolerant soybeans during the germination period is beneficial for improving soybean quality and the number of effective branches increasing. At the same time, it is found that cold stress during the germination period can affect the growth and development of soybeans anaphase and increase yield.

**Keywords:** germplasm resource; *Glycine max* (L.) Merr; germination stage; low-temperature tolerance; sowing time; yield

收稿日期:2024-09-25

基金项目:黑龙江省农业科学院科技攻关项目(2021YYF006); 崖州湾种子实验室与中国种子集团有限公司联合揭榜挂帅项目(B23YQ1501); 国家自然科学基金(32272048); 国家重点研发计划(2021YFD1200103)。

第一作者:孙晓环,女,博士研究生,副研究员,主要从事作物遗传育种研究。E-mail:xaozm@yeah.net。

通讯作者:杜维广,男,研究员,主要从事作物遗传育种研究。E-mail:weiguangdu@126.com。

大豆[*Glycine max* (L.) Merr.]是我国重要的粮食作物,也是植物蛋白和油料的主要来源。近年来,我国大豆消费需求逐年攀升,2023年我国大豆种植面积和单产双增,产量达到2 084万t,但是我国仍然从国外进口了9 941万t大豆弥补市场缺口<sup>[1]</sup>。北方春大豆产区是我国最主要的大豆产区,提高该地区大豆产量对于保障我国粮食安全具有重要意义<sup>[2]</sup>。

大豆作为典型的短日照、喜温性作物,对光温条件的变化敏感<sup>[3]</sup>。有限的热量资源以及多变的气象条件成为制约北方春大豆产量的重要因素<sup>[4]</sup>。为充分利用光、温、水等自然条件,减少极端气候变化对大豆产量的影响,“适时早播”成为保障大豆安全生产的重要措施之一<sup>[5]</sup>。在美国中南部以北地区通过“适时早播”改善大豆产量也已经成为重要的策略<sup>[6]</sup>。通过分期播种试验,发现播期带来的光温变化能对大豆生长发育产生影响,有利于选择合适的早播时间使大豆产量和品质得到改善<sup>[7,8]</sup>。然而,“适时早播”存在大豆遭遇低温冷害的风险<sup>[9]</sup>。低温容易引起出苗时间延长,产生畸形苗或者种子霉烂变质而丧失发芽能力,造成大豆出苗率降低,从而导致大豆减产。前人针对大豆萌发期耐低温性做了大量研究<sup>[10-12]</sup>,暂时没有形成统一的鉴定方法。

在东北地区,受极端气候频发影响,大豆生殖生长期也可能遭遇冷害(0~15℃),使花粉败育,落花落荚数增加,导致产量降低<sup>[13]</sup>。同时,开花期遇到低温气候,会影响种子的质量,产生种皮变色和种皮裂开等现象<sup>[14]</sup>。大量研究表明,植物的耐低温性受到大量遗传基因的调控<sup>[15]</sup>。因此,研究不同基因型大豆的耐低温性,培育耐低温品种,对于提高大豆产量具有重要意义。另外,有研究表明,低温胁迫可以降低植物的DNA甲基化水平<sup>[16]</sup>,而DNA甲基化水平的降低导致的表观遗传变异,以表观遗传记忆的形式参与基因的调控,从而影响植物后期的生长<sup>[17,18]</sup>。DNA甲基化作为大豆进化上的保守修饰,会导致叶片形态、开花期、花器官特性、生育力的相关基因沉默,从而影响性状变化<sup>[19]</sup>。在大豆中,萌发期低温胁迫影响大豆后期生长发育的报道较少,有待进一步研究。

本研究结合前人对大豆萌发期耐低温的鉴定方法,对169份东北大豆种质萌发期的耐低温性进行了综合评价和分类,对筛选得到的27份具有低温敏感性差异的代表性资源进行分期播种试验,研究不同萌发期低温敏感性的品种对播期的响应,探讨萌发期持续低温胁迫对大豆生长发育的影响,旨在

为我国东北地区萌发期耐低温大豆品种的选育和合适播期的选择提供理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

萌发期耐低温鉴定试验材料为169份东北大豆种质资源,由黑龙江省农业科学院牡丹江分院收集。在考虑熟期组分布合理(避免材料过于集中在某一熟期组)和保证试验种子用量充足的条件下,根据耐低温性鉴定结果,分别从不同耐性等级中随机挑选出部分存在萌发期低温敏感性差异的品种,用于田间分期播种并研究萌发期低温胁迫对大豆生态性状的影响。

### 1.2 试验设计

1.2.1 萌发期耐低温性鉴定方法 试验于2020年在黑龙江省农业科学院牡丹江分院室内的HPG-280HX智能控温人工气候箱进行。试验温度、调查天数和调查项目参考李育军等<sup>[10]</sup>的方法。试验组:取50粒饱满、大小均一的大豆种子,用75%的酒精棉擦拭1min,并用5%的次氯酸钠溶液消毒2~3min,用去离子水冲洗2~3遍,放入消毒塑料杯中,加入适量去离子水,常温吸胀12h,然后转移至垫有3层滤纸的120mm的培养皿中,每皿加入10mL去离子水,于6℃下萌发(若发现发霉,及时去掉霉丝,并用去离子水冲洗),分别于第5、8、11、14、17和20天调查种子发芽数量;在低温胁迫20d后,将种子转移到卷纸(20cm×30cm)中,采用卷纸法于25℃条件下出苗,6d后调查最终发芽数和正常苗数(以胚根长度达种子本身长度1/2以上为发芽标准;纸卷法和正常苗数的定义参考“农作物种子检验规程国家标准GB/T 3543.4-1995”,下同)。对照组:取50粒饱满、大小均一的种子,消毒并冲洗后,采用卷纸法(20cm×30cm)于常温25℃条件下进行萌发并出苗7d(因为试验组种子已经低温胁迫发芽一段时间,且种子吸胀需要时间,因此对照比实验组多1d),调查最终发芽数和正常苗数。试验组和对照组均设置3个重复(区组),采用完全随机区组试验设计。采用相对指标来衡量大豆萌发期耐低温性。其中,发芽率或正常苗率定义为已发芽的种子数或正常幼苗数占供测样品种子数的百分率,评价指标如下:

$$\text{相对发芽率 } RGR = \frac{6\text{℃ 第14天发芽率}}{25\text{℃ 发芽率}} \times 100\% \quad [10,20]$$

$$\text{相对正常苗率 } RNSR = \frac{6\text{℃ 胁迫20d后正常苗率}}{25\text{℃ 正常苗率}} \times 100\% \quad [10,20]$$

以 RGR 和 RNSR 的平均隶属函数值 (U-value) 为综合评价指标<sup>[21]</sup>, 隶属函数值越大代表大豆维持低温萌发和胁迫后恢复常温成苗的综合能力越强。公式如下: 各指标隶属函数值  $U(X_{ij}) = (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin})$ , 平均隶属函数值  $X_i = \sum U(X_{ij}) / n$ , 其中  $X_{ij}$  为某一指标的测定值,  $X_{jmax}$  为该指标的最大值,  $X_{jmin}$  为该指标的最小值,  $n$  为测定指标数。

### 1.2.2 田间试验设计和大豆重要生态性状调查

试验于 2021 年黑龙江省农业科学院牡丹江分院试验地 (129°31'E, 44°26'N) 进行。利用筛选出的品种, 分别设置了 K (早播, 4 月 10 日)、CK (正常播期, 5 月 13 日)、N (萌发期 6 °C 胁迫 10 d 后鲜粒播种, 5 月 14 日) 和 P (晚播, 5 月 31 日) 等 4 个播期处理。采用二因素裂区设计, 主区为播期处理, 副区为品种, 每一品种均采用宽窄行播种 (行长为 1 m, 宽行行距 40 cm, 窄行 20 cm, 人工开沟点播, 待幼苗 V1 期后定苗, 株距设为 10 cm), 每个播期处理中所有品种均设置 3 个宽窄行重复。在田间起垄的同时施加肥料, 采用当地常规施肥水平 (350 ~ 450 kg · hm<sup>-2</sup> 大豆复合肥), 其中, 氮肥为尿素 (含纯 46% N), 磷肥为磷酸二铵 (含 46% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 含 18% N), 钾肥为氯化钾 (含 62% K<sub>2</sub>O), 试验肥料由牡丹江市牡丰专用肥厂提供。

田间及时除草, 花荚期防虫, 其他田间管理方式等同于大田。每个重复取 2 株长势基本一致的植株, 利用自制纱网收集法将室内制作好的长方体纱网套落于植株四周, 底部在田间人工缝制, 利用四根细竹竿将纱网固定, 使网内通风透光条件良好。花荚脱落率测定方法参考孙晓环等<sup>[22]</sup>, 将网内 2 个单株以及未罩网的 3 个单株均用于考种, 取 5 株表型平均值作为 1 个生物学重复。调查的性状包括 VE、R1、R8、株高、有效分枝数、主茎节数、地上生物量 (干物质质量)、百粒重、有效荚数、单株粒数、有效结荚率、花荚脱落数、粗脂肪和粗蛋白含量等。相关表型鉴定标准参考《大豆种质资源描述

规范和数据标准》<sup>[23]</sup>, 其中, 粗脂肪和粗蛋白含量采用 FOSS 近红外谷物分析仪 (Infratec TM1241) 进行测定。

1.2.3 土壤温度测量和气候数据来源 试验于田间实际环境中, 采用 RC-4 自动温度记录仪中温度探头测量 5 cm 表层土壤温度, 并利用黑龙江省农业科学院牡丹江分院气象站所收集的气候数据分析温度和活动积温。

### 1.3 数据分析

采用 Excel 2016 对数据进行整理。利用 SAS9.4 中 PROC GLM 进行单因素方差分析, 采用 VARCOMP 进行方差组分估计, 采用 PROC MEANS 进行描述性统计分析, 平均数之间的差异显著性采用 Duncan 新复极差测验 ( $P < 0.05$ )。广义遗传率计算公式为  $H^2 = \sigma_g^2 / (\sigma_g^2 + \sigma^2 / r)$ ; 遗传变异系数计算公式为  $GCV = \sigma_g / \mu \times 100\%$ , 其中  $\sigma_g^2$  为遗传方差,  $\sigma^2$  为误差方差,  $r$  为重复数,  $\mu$  为整体平均数。采用 GraphPad Prism8 软件制作柱形图。采用 SPSS 22.0 软件的 K-MEANS 聚类方法进行品种分类。

## 2 结果与分析

### 2.1 169 份大豆种质萌发期耐低温性鉴定

2.1.1 相对发芽率及相对正常苗率 相对发芽率 (RGR) 反映了种子在 6 °C 下的发芽能力, 相对正常苗率 (RNSR) 反映了萌发的种子持续低温胁迫后恢复常温时的成苗能力。这两个指标在一定程度上均可以反映大豆萌发期的耐低温能力。由表 1 可知, 169 份东北大豆种质中, RGR 变幅和变异系数分别为 10.4% ~ 74.7% 和 32.5%, RNSR 的变幅和变异系数分别为 16.8% ~ 92.7% 和 30.9%, 说明两个指标在材料中的变异均很大; 同时, 两个指标的品种因素  $F$  值的显著性分析可知, 不同品种之间耐低温能力存在显著差异; 另外, 两个指标的广义遗传率分别为 89.6% 和 96.9%, 说明该性状主要受遗传因素控制, 为以后研究大豆萌发期耐低温能力的遗传基础提供参考。

表 1 东北春大豆种质资源室内 6 °C 胁迫下的相对发芽率和相对正常苗率描述统计分析

Table 1 Statistical analysis of RGR and RNSR of northeast spring soybean germplasm resources under indoor 6 °C stress

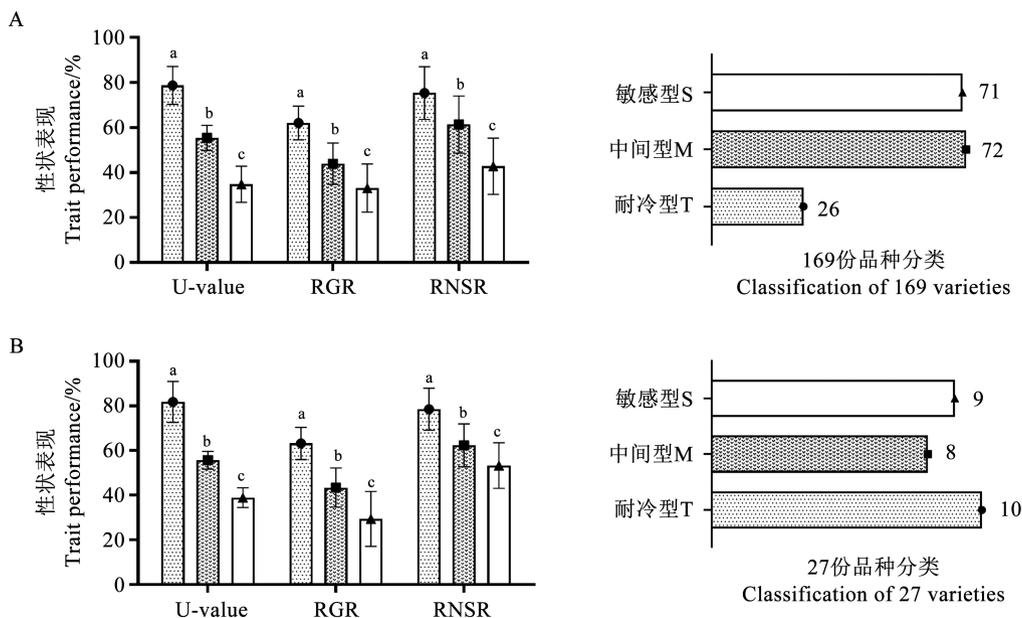
性状 Trait	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV/%	遗传变异系数 GCV/%	遗传率 H <sup>2</sup> /%	F 值 F value
相对发芽率 RGR/%	10.4	74.7	42.2	13.7	32.5	32.0	89.6	26.9**
相对正常苗率 RNSR/%	16.8	92.7	55.7	17.2	30.9	30.4	96.9	33.3**

注:  $F$  值为单因素方差分析中品种因素结果, \*\* 代表 0.01 水平下显著性。

Note: The  $F$  value is the result of the breed factors in the one-way ANOVA, \*\* represents the significance at the 0.01 level.

2.1.2 综合评价 利用隶属函数值法对大豆萌发期耐低温进行综合评价,并通过 K-MEANS 方法对平均隶属函数值进行聚类,如图 1A 所示,根据萌发期耐低温性将 169 份大豆种质分为 3 类:耐冷品种 26 份(平均值 78.7%)、中间型品种 72 份(平均值

55.4%)、敏感型品种 71 份(平均值 34.8%)。多重比较分析表明,3 类品种之间的相对发芽率(RGR)和相对正常苗率(RNSR)均存在显著差异( $P < 0.05$ ),均表现出:耐冷型 T > 中间型 M > 敏感型 S,说明平均隶属函数值(U-value)可以区分品种的耐低温差异。



注:A为169份品种分类结果,B为27份品种分类结果;T.耐冷型;M.中间型;S.敏感型。柱形图中数字后的不同小写字母表示不同分组之间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

Note: A shows the classification results of 169 varieties, while B shows the classification results of 27 varieties. T. Cold tolerance type; M. Mediate type; S. Sensitive type; The different lowercase letters after the numbers in the bar chart indicate significant differences between different groups ( $P < 0.05$ ). The same below.

图1 不同耐低温型品种的分类和性状表现

Fig. 1 Classification and trait performance of different low-temperature resistant varieties

表2 27个大豆品种萌发期耐低温水平分布

Table 2 Distribution of low-temperature tolerance levels in germination stages and maturity group of 27 soybean varieties

品种 Varieties	熟期 MG	隶属函数 U-value	耐性水平 Tolerance	排名 Ranking	品种 Varieties	熟期 MG	隶属函数 U-value	耐性水平 Tolerance	排名 Ranking
蒙豆6号 Mengdou 6	MG00	0.964	T	1	垦鉴7 Kenjian 7	MG0	0.551	M	66
黑河50 Heihe 50	MG00	0.936	T	2	黑农33 Heinong 33	MG0	0.550	M	67
北豆21 Beidou 21	MG0	0.871	T	5	黑农53 Heinong 53	MGI	0.528	M	74
吉育89 Jiyu 89	MGI	0.866	T	6	辽豆22 Liaodou 22	MGI	0.489	M	87
东农50 Dongnong 50	MG0	0.811	T	10	吉林3 Jilin 3	MGI	0.432	S	107
黑河33 Heihe 33	MG000	0.807	T	13	垦豆26 Kendou 26	MGI	0.431	S	108
合丰42 Hefeng 42	MG00	0.768	T	14	合丰56 Hefeng 56	MG0	0.418	S	112
北豆23 Beidou 23	MG00	0.751	T	15	红丰11 Hongfeng 11	MG0	0.396	S	122
铁丰31 Teifeng 31	MGI	0.728	T	18	牡丰1号 Mufeng 1	MG0	0.389	S	126
吉育92 Jiyu 92	MGI	0.674	T	26	元宝金 Yuanbaojin	MG0	0.388	S	129
绥农14 Suinong 14	MG0	0.621	M	36	黑河52 Heihe 52	MG00	0.381	S	132
垦丰17 Kenfeng 17	MG0	0.585	M	48	Beeson	MG0	0.375	S	135
东农48 Dongnong 48	MG0	0.580	M	52	黑农54 Heinong 54	MGI	0.286	S	153
垦丰16 Kenfeng 16	MGI	0.554	M	64					

注:排名为169份大豆种质中的隶属函数值名次。

Note: The ranking column is the ranking based on U-value of 169 soybean germplasms.

2.1.3 萌发期不同耐低温性种质选择 为了进一步研究不同耐低温类型的大豆种质在不同播期处理下的生态性状差异,从 169 份品种中随机挑选了 27 份,如图 1B 和表 2 所示:耐冷型(T)品种 10 个,包括蒙豆 6 号(MG 00,耐低温性表现最好)、黑河 50 (MG 00)、北豆 21 (MG 0)、铁丰 31 (MG III)等;中间型(M)品种 8 个,包括绥农 14 (MG 0)、垦丰 17 (MG 0)、东农 48 (MG 0)、垦丰 16 (MG I)等;敏感型(S)品种有 9 个,包括吉林 3 号 (MG II)、垦豆 26 (MG I)和红丰 11 (MG 0)等。由图 1B 可知,相对发芽率(RGR)和相对正常苗率(RNSR)均表现为:耐冷型 T > 中间型 M > 敏感型 S,说明挑选的 3 类品种的萌发期耐低温性存在显著差异,接下来被用于田间分期播种和萌发期低温胁迫后播种试验。

## 2.2 播期处理对不同耐低温性大豆种质生育期结构的影响

2.2.1 全部大豆种质的生育期结构、温度和积温变化分析 不同播期下,对全部大豆种质整体上的生育期结构以及各生育阶段的温度和积温变化进行分析,如表 3 和图 2 所示:在早播(K)时,大豆出苗时 5 cm 土层平均地温为 9.5 °C (低于正常播期的 19.1 °C),出苗时间比正常播期(CK)显著延长 23.3 d,说明低温对大豆出苗期影响显著;随播期推迟,大豆的营养生长期、生殖生长期以及全生育期的时间

和有效活动积温均呈下降趋势(其中营养生长期从 43.3 d 缩短到了 32.2 d,积温从 774.9 °C 降低到 679.8 °C;而生殖生长期从 73.5 d 缩短到了 70.6 d,积温 1 638.4 °C 降低到 1 489.4 °C);播期提前,大豆的始花期到末花期的时间呈增加趋势(比较正常播期,早播时显著增加了 3.9 d,而晚播时显著减少了 1.4 d)。对各生育阶段的平均温度进行分析,如图 2 所示:晚播(P)时营养生长期和开花期间温度更高,但是整个生殖生长时期的温度偏低;同时,早播(K)和正常播期(CK)时,大豆在开花期 7 d 内均比晚播(P)遭遇了更低的温度,其中早播(K)大豆开花期前 7 d 温度最低(平均温度为 16.4 °C,平均最低温度为 14.5 °C)。由上可知,早播时各生育阶段和积温均延长,但是提前开花使开花期遭遇了更低的温度。

2.2.2 不同耐低温性大豆种质之间生育期结构变化比较 不同播期下,对萌发期不同耐低温型大豆种质之间的生育期结构变化进行比较,如表 3 可知,不同耐低温类型种质之间的各生育期结构均无明显差异,且其随播期的变化规律与整体基本相同,但是略有差异。与正常播期(CK)相比,早播(K)条件下的敏感型大豆种质的出苗时间变幅比中间型大豆种质略长,和耐冷型大豆种质无明显差异;晚播(P)时,中间型大豆种质花期更长,略有增加。

表 3 不同播期处理下萌发期不同耐低温类型的大豆种质中各生育阶段持续天数的差异比较

Table 3 Comparison of differences in the durations of each growth stage in soybean germplasm with different low temperature tolerance at germination stages under different sowing dates

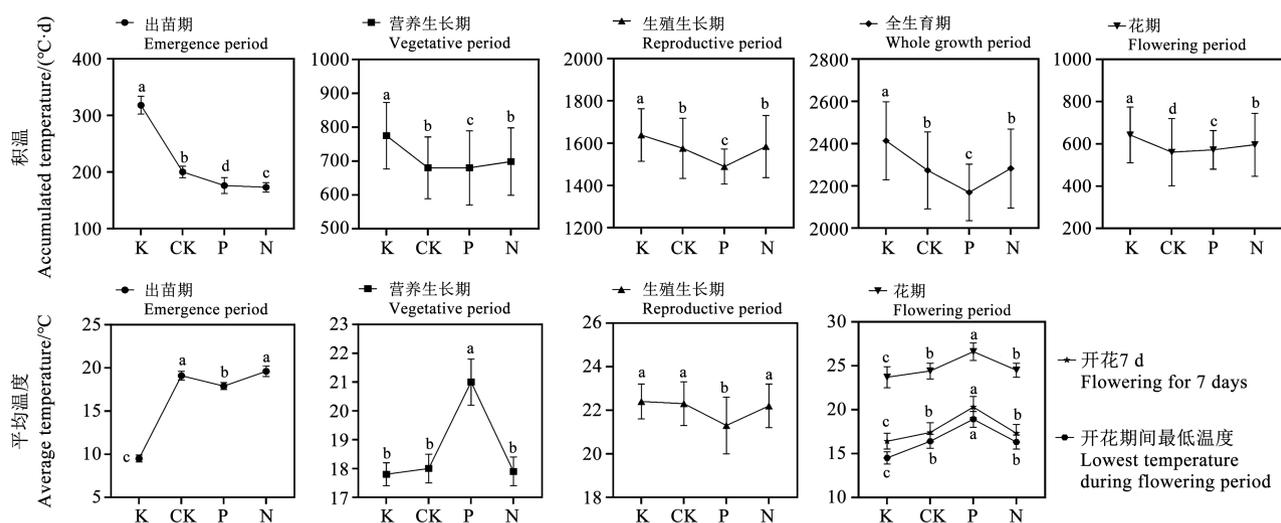
性状 Traits	类型 Type	不同播期处理 Treatments at different sowing date				与对照差值 Difference compared with CK		
		K	CK	P	N(6 °C)	K-CK	P-CK	N-CK
出苗期 Emergence period/d	耐冷型 T	33.3 ± 1.0 aA	10.1 ± 0.7 bA	8.7 ± 0.6 cA	8.8 ± 0.6 cA	23.2* AB	-1.4* A	-1.3* A
	中间型 M	33.4 ± 1.5 aA	10.8 ± 0.5 bA	9.1 ± 0.8 cA	8.8 ± 0.3 cA	22.6* B	-1.6* A	-1.9* A
	敏感型 S	34.3 ± 0.7 aA	10.5 ± 0.2 bA	8.8 ± 0.6 cA	8.9 ± 0.4 cA	23.8* A	-1.7* A	-1.6* A
	全部 Total	33.7 ± 1.2 a	10.4 ± 1.6 b	8.8 ± 0.7 c	8.8 ± 0.4 c	23.3*	-1.6*	-1.6*
营养生长期 Vegetative period/d	耐冷型 T	43.9 ± 5.0 aA	38.6 ± 3.5 bA	32.2 ± 4.8 cA	38.2 ± 4.4 bA	5.3* A	-6.5* A	-0.4 A
	中间型 M	44.6 ± 5.7 aA	39.5 ± 6.3 cA	33.8 ± 4.1 dA	40.7 ± 6.4 bA	5.1* A	-5.7* A	1.2* A
	敏感型 S	41.4 ± 3.4 aA	37.8 ± 1.8 bA	30.7 ± 5.0 cA	37.8 ± 1.7 bA	3.6* A	-7.1* A	0.0 A
	全部 Total	43.3 ± 4.8 a	38.6 ± 4.0 b	32.2 ± 4.6 c	38.8 ± 4.4 b	4.7*	-6.4*	0.2
生殖生长期 Reproductive period/d	耐冷型 T	71.6 ± 11.4 aA	70.9 ± 13.8 bA	69.6 ± 10.0 cA	71.9 ± 13.4 bA	0.7* A	-1.3* A	0.9 A
	中间型 M	75.7 ± 4.7 aA	72.9 ± 3.4 cA	73.7 ± 2.4 bA	72.4 ± 5.2 cA	2.8* A	0.8* A	-0.5 A
	敏感型 S	73.7 ± 6.9 aA	70.2 ± 8.5 cA	69.0 ± 5.5 dA	71.1 ± 9.3 bA	3.4* A	-1.2* A	0.9* A
	全部 Total	73.5 ± 8.3 a	71.3 ± 9.6 b	70.6 ± 7.1 c	71.7 ± 9.8 b	2.2*	-0.6*	0.5
全生育期 Whole growth period/d	耐冷型 T	115.6 ± 15.2 aA	109.6 ± 16.2 bA	101.8 ± 13.8 cA	110.1 ± 16.3 bA	6.0* A	-7.8* A	0.5 A
	中间型 M	120.3 ± 8.4 aA	112.4 ± 8.2 bA	107.5 ± 5.5 cA	113.0 ± 8.9 bA	7.9* A	-4.9* A	0.7 A
	敏感型 S	115.1 ± 9.6 aA	108.1 ± 10.0 bA	99.8 ± 8.3 cA	108.9 ± 10.5 bA	7.0* A	-8.3* A	0.8 A
	全部 Total	116.8 ± 11.5 a	109.9 ± 12.0 b	102.8 ± 10.3 c	110.5 ± 12.3 b	6.9*	-7.1*	0.7

表3 (续)

性状 Traits	类型 Type	不同播期处理 Treatments at different sowing date				与对照差值 Difference compared with CK		
		K	CK	P	N(6 °C)	K-CK	P-CK	N-CK
花期 Flowering period/d	耐冷型 T	27.2 ± 5.4 aA	24.7 ± 7.2 bA	22.6 ± 5.1 cA	25.0 ± 6.9 bA	2.5* A	-2.1* A	0.3 B
	中间型 M	25.8 ± 4.3 aA	20.4 ± 3.3 dA	21.1 ± 3.4 cA	22.6 ± 4.2 bA	5.5* A	0.7* A	2.2* A
	敏感型 S	27.5 ± 3.8 aA	23.4 ± 4.7 cA	20.9 ± 3.4 dA	24.8 ± 4.9 bA	4.0* A	-2.5* A	1.4* AB
	全部 Total	26.9 ± 4.5 a	23.0 ± 5.6 c	21.6 ± 4.0 d	24.2 ± 5.4 b	3.9*	-1.4*	1.2*

注:表中数据为平均值 ± 标准差;同一行数字后的不同小写字母表示各播期条件下的差异显著( $P < 0.05$ );每一性状中同一列数字后不同大写字母表示不同耐低温类型种质之间的差异显著( $P < 0.05$ );\*代表各播期条件下与CK的差值在0.05水平上差异显著。下同。

Note: The data in the table is the mean ± standard deviation; Values in the same line of mean followed by different lowercase letters are significantly different among different sowing dates ( $P < 0.05$ ); Values in the same column of mean for each trait followed by different capital letters are significantly different among different low-temperature tolerant types ( $P < 0.05$ ); \* represents a significant difference at 0.05 level in the difference between CK and each sowing dates. The same below.



注:活动积温的定义:出苗期内为5 cm土层0 °C以上的活动积温,其他生育阶段均为10 °C以上有效活动积温。

Note: Active accumulated temperature: 5 cm soil layer above 0 °C during the emergence period, while other growing stages are above 10 °C.

图2 不同播期条件下大豆种质整体上各生育阶段的平均温度和活动积温比较

Fig. 2 Comparison of average temperature and accumulated temperature at each growth stages of soybean germplasm under different sowing dates

2.2.3 大豆萌发期6 °C胁迫对大豆生育期结构的影响 如表3和图2,对大豆种子萌发期6 °C持续胁迫处理(N)播种后的生育期结构变化(与正常播期CK相比)进行分析:整体上出苗时间略缩短1.6 d,这与种子萌发期胁迫时已经发芽一段时间有关;全部种质整体上的营养生长期、生殖生长期以及全生育期的时间、温度和积温均无明显变化,但是,始末花期持续时间增加了1.6 d;除中间型和敏感型大豆种质花期时间显著增加以外,不同耐低温型大豆种质之间生育期结构的变化无明显差异。

## 2.3 播期处理对不同耐低温性大豆种质形态性状和品质性状的影响

### 2.3.1 全部种质的形态性状和品质性状变化分析

不同播期下,对全部种质的3个形态性状(株高、主茎节数和有效分枝数)和3个品质性状(粗蛋白、

粗脂肪和蛋脂总量)的变化分别进行分析,如表4所示:随播期推迟,全部种质中株高从早播(K)时80.4 cm增加到了晚播(P)时的89.6 cm,整体上呈显著增加趋势;有效分枝数从早播(K)时2.2个降低到了晚播(P)时1.1个,整体上呈显著降低趋势;主茎节数整体呈先增加后减少趋势,但是早播(K)时降低幅度不显著(与正常播期相比)。在品质性状方面,如表4所示:随播期推迟,粗蛋白含量从38.8%降低到38.0%,蛋脂总量从60.9%降低到59.0%,整体均呈显著降低趋势;早播(K)和正常播期(CK)的粗脂肪含量整体无明显差异,但是晚播时显著降低了0.3%(与正常播期相比)。由上分析可知,早播有利于增加有效分枝数和提高粗蛋白含量和蛋脂总量,而晚播降低了有效分枝数且品质下降。

2.3.2 不同耐低温性大豆种质之间形态性状和品质性状变化比较 不同播期下,对萌发期不同耐低温型大豆种质之间的形态性状和品质性状变化进行比较,由表 4 可知:随播期推迟,不同耐低温大豆种质中有效分枝数、粗蛋白含量和粗脂肪含量均呈降低趋势,粗脂肪含量晚播(P)时均显著降低,与整体规律相同;与正常播期(CK)相比,3 种不同耐低温大豆种质(T、M 和 S)的株高在早播(K)时分别显著降低了 8.7、4.4 和 9.4 cm,晚播时只有中间型(M)大豆种质株高增加显著;不同播期下,除早播

(K)时耐冷型大豆种质的主茎节数降幅更大以外,不同耐低温种质的主茎节数的变化规律不明显;另外,以上形态性状和品质性状中,对于早播(K)和晚播(P)带来的变化(与 CK 的差值),不同耐低温类型种质之间均无明显差异,但是,对比不同耐低温型种质在各播期下的性状表现,发现耐冷型(T)大豆种质表现出更多的有效分枝数,早播(K)、正常播期(CK)下,平均有效分枝数  $T > S > M$ ,以及更高的粗蛋白含量和蛋脂总量,晚播(P)和正常播期(CK)下,平均蛋白质含量和蛋脂总量  $T > M > S$ 。

表 4 不同播期处理下萌发期不同耐低温类型的大豆种质农艺性状和品质性状的差异比较

Table 4 Comparison of differences in agronomic and quality traits of soybean germplasm with different low temperature tolerance at germination stages under different sowing dates

性状 Traits	类型 Type	不同播期处理 Treatments at different sowing date				与对照差值 Difference compared with CK			
		K	CK	P	N(6 °C)	K-CK	P-CK	N-CK	
		株高 Plant height/cm	耐冷型 T	77.8 ± 16.6 bA	86.5 ± 17.6 aA	88.4 ± 17.5 aA	86.9 ± 19.2 aA	-8.7 *A	1.8 A
	中间型 M	86.1 ± 11.4 cA	90.5 ± 9.2 bA	92.8 ± 11.5 aA	90.1 ± 10.2 bA	-4.4 *A	2.3 *A	-0.4 A	
	敏感型 S	78.3 ± 12.3 bA	87.7 ± 14.4 aA	88.2 ± 13.1 aA	87.4 ± 13.8 aA	-9.4 *A	0.5 A	-0.3 A	
	全部 Total	80.4 ± 13.8 c	88.1 ± 14.0 b	89.6 ± 14.1 a	88.0 ± 14.7 b	-7.7 *	1.5 *	-0.1	
主茎节数 Main stem nodes number	耐冷型 T	16.9 ± 1.9 cA	17.5 ± 2.1 abA	17.1 ± 2.2 bcA	17.6 ± 2.3 aA	-0.5 *A	-0.4 A	0.1 A	
	中间型 M	17.4 ± 0.9 aA	17.3 ± 1.2 aA	17.2 ± 1.4 aA	17.3 ± 1.0 aA	0.1 A	-0.1 A	-0.1 A	
	敏感型 S	16.8 ± 1.4 aA	16.7 ± 1.7 abA	16.5 ± 2.1 bA	17.1 ± 1.5 aA	0.1 A	-0.3 A	0.3 A	
	全部 Total	17.0 ± 1.5 bc	17.2 ± 1.7 ab	16.9 ± 1.9 c	17.3 ± 1.7 a	-0.1	-0.3 *	0.3	
	有效分枝数 Effective branching number	耐冷型 T	3.0 ± 1.4 aA	2.2 ± 0.9 cA	1.6 ± 0.9 dA	2.5 ± 1.1 bA	0.8 *A	-0.5 *A	0.3 *A
		中间型 M	1.6 ± 0.7 aB	0.9 ± 0.5 bcB	0.7 ± 0.6 cA	1.1 ± 0.7 bB	0.7 *A	-0.3 A	0.2 A
敏感型 S		1.8 ± 1.3 aAB	1.1 ± 1.2 cB	1.1 ± 0.9 cA	1.6 ± 1.0 bAB	0.7 *A	0.0 A	0.5 *A	
	全部 Total	2.2 ± 1.3 a	1.5 ± 1.1 c	1.1 ± 0.9 d	1.8 ± 1.1 b	0.7 *	-0.4 *	0.3 *	
	粗蛋白含量 Protein content/%	耐冷型 T	39.8 ± 2.4 aA	39.3 ± 2.0 bA	38.1 ± 2.7 dA	38.4 ± 2.2 cA	0.5 *A	-1.2 *A	-0.9 *A
		中间型 M	38.5 ± 1.3 aA	37.7 ± 1.6 bAB	37.5 ± 1.8 cAB	37.2 ± 1.8 dAB	0.8 *A	-0.2 *A	-0.5 *A
敏感型 S		38.1 ± 2.0 aA	36.7 ± 1.2 bB	35.8 ± 1.6 dB	36.3 ± 1.2 cB	1.3 *A	-0.9 *A	-0.5 *A	
	全部 Total	38.8 ± 2.1 a	38.0 ± 2.0 b	37.2 ± 2.3 d	37.3 ± 2.0 c	0.9 *	-0.8 *	-0.7 *	
	粗脂肪含量 Oil content/%	耐冷型 T	21.8 ± 1.6 bA	21.7 ± 1.5 bA	21.5 ± 1.7 cA	22.0 ± 1.6 aA	0.1 A	-0.2 *A	0.3 *A
		中间型 M	22.2 ± 1.1 bA	22.2 ± 1.2 abA	21.8 ± 1.2 cA	22.3 ± 1.2 aA	0.0 A	-0.4 *A	0.1 A
敏感型 S		22.3 ± 1.9 cA	22.4 ± 1.8 bA	22.3 ± 2.0 cA	22.5 ± 1.9 aA	-0.1 *A	-0.2 *A	0.1 *A	
	全部 Total	22.1 ± 1.5 b	22.1 ± 1.5 b	21.8 ± 1.7 c	22.3 ± 1.6 a	0.0	-0.3 *	0.2 *	
	蛋脂总量 Total protein and fat content/%	耐冷型 T	61.6 ± 1.8 aA	61.0 ± 1.5 bA	59.6 ± 1.4 dA	60.4 ± 1.4 cA	0.6 *A	-1.4 *A	-0.6 *A
		中间型 M	60.7 ± 0.6 aA	59.9 ± 0.8 bAB	59.3 ± 1.1 dA	59.5 ± 0.9 cAB	0.8 *A	-0.6 *A	-0.4 *A
敏感型 S		60.4 ± 2.2 aA	59.2 ± 1.8 bB	58.1 ± 0.8 dB	58.8 ± 1.6 cB	1.2 *A	-1.1 *A	-0.4 *A	
	全部 Total	60.9 ± 1.7 a	60.1 ± 1.6 b	59.0 ± 1.3 d	59.6 ± 1.5 c	0.8 *	-1.1 *	-0.5 *	

2.3.3 大豆萌发期 6 °C 胁迫对大豆形态性状和品质性状的影响分析 与正常播期(CK)相比,大豆种子萌发期 6 °C 持续胁迫处理(N)播种后的形态性状和品质性状变化,如表 4 所示:从全部种质来看,株高和主茎节数无明显变化,但是有效分枝数和粗脂肪含量显著增加,有效分枝数平均增加 0.3 个,粗脂

肪含量平均增加 0.2%,而粗蛋白含量和蛋脂总量显著降低,粗蛋白含量平均降低 0.7%,蛋脂总量平均降低 0.5%。另外,具体比较该处理下的 3 种耐低温型大豆种质(T、M 和 S)的性状变化:株高和主茎节数变化无明显差异,与整体规律相同;中间型(M)大豆种质的有效分枝数和粗脂肪含量变化不显

著,而耐冷型(T)和敏感型(S)大豆种质的有效分枝数分别显著增加了0.3和0.5,粗脂肪含量分别显著增加0.3%和0.1%;对性状自身表现分析,耐冷型大豆种植也表现出更高的有效分枝数、粗蛋白含量和蛋脂总量。以上分析说明:大豆萌发期6℃持续胁迫处理能对大豆后期生长发育过程中的有效分枝数和籽粒品质性状产生影响。

## 2.4 播期对耐低温种质单株产量及其构成因素的影响

### 2.4.1 全部种质的单株产量及其构成因素变化分析

不同播期下,对全部种质的单株产量及其构成

因素进行分析,如表5所示:早播(K)时的单株有效荚数、花荚总数和花荚脱落率、单株粒重和百粒重整体上与正常播期(CK)无显著差异,但是地上生物量略微下降了1.7g;与正常播期(CK)相比,晚播(P)时整体上单株有效荚数显著降低了7.7个,花荚总数显著降低了19.3个,地上生物量显著降低了4.4g,以及单株粒重显著降低了1.5g,但是百粒重降低不显著。表明晚播(P)不利于大豆单株产量的提升,早播(K)时地上生物量略微降低,但单株产量和正常播期无明显差异。

表5 萌发期不同耐低温类型的大豆种质产量构成因素在各播期处理下的差异比较

Table 5 Comparison of differences in yield components of soybean germplasm with different low temperature tolerance at germination stages under different sowing dates

性状 Traits	类型 Type	不同播期处理 Treatments at different sowing date				与对照差值 Difference compared with CK		
		K	CK	P	N	K-CK	P-CK	N-CK
		单株有效荚数 Effective pods number	耐冷型 T	55.2 ± 19.5 bA	55.8 ± 15.2 bA	48.8 ± 12.5 cA	60.5 ± 18.5 aA	-0.6 AB
单花荚脱落率 Pods shedding rate/%	中间型 M	43.3 ± 6.2 bA	47.0 ± 5.6 aAB	35.9 ± 3.6 cB	48.8 ± 6.0 aA	-3.7 *B	-11.1 *B	1.7 A
	敏感型 S	46.0 ± 5.8 bA	42.0 ± 4.6 cB	35.8 ± 1.6 dB	48.1 ± 8.3 aA	4.0 *A	-5.6 *A	6.0 *A
	全部 Total	48.6 ± 13.4 b	48.6 ± 11.4 b	40.9 ± 10.1 c	52.9 ± 13.6 a	0.0	-7.7 *	4.3 *
花荚总数 Total number of flowers and pods/%	耐冷型 T	49.0 ± 8.5 aA	46.1 ± 12.3 bA	44.4 ± 13.0 bA	38.7 ± 12.7 cA	2.9 *A	-1.7 A	-7.4 *A
	中间型 M	53.7 ± 6.8 aA	50.2 ± 7.6 bA	52.7 ± 7.4 abA	46.5 ± 5.7 cA	3.5 *A	2.5 A	-3.7 *A
	敏感型 S	47.8 ± 13.0 abA	51.7 ± 9.4 aA	49.1 ± 12.5 aA	45.7 ± 11.4 bA	-3.9 A	-2.6 A	-6.0 *A
地上生物量 Above-ground Biomass/g	全部 Total	50.0 ± 9.8 a	49.2 ± 10.1 a	48.4 ± 11.5 a	43.3 ± 10.9 b	0.8	-0.8	-5.8 *
	耐冷型 T	115.0 ± 34.9 aA	114.9 ± 31.1 aA	94.0 ± 24.4 bA	105.6 ± 29.6 aA	0.1 A	-20.9 *A	-9.3 A
	中间型 M	102.0 ± 24.0 aA	104.0 ± 26.6 aA	81.2 ± 16.5 bA	96.6 ± 16.1 aA	-2.1 A	-22.8 *A	-7.5 A
单株粒重 Seed weight per plant/g	敏感型 S	99.5 ± 26.0 aA	97.7 ± 25.3 aA	83.4 ± 25.0 bA	96.0 ± 20.0 aA	1.8 A	-14.3 *A	-1.7 A
	全部 Total	106.0 ± 28.9 a	105.9 ± 27.9 a	86.7 ± 22.5 b	99.7 ± 22.7 a	0.1	-19.3 *	-6.2
	耐冷型 T	39.7 ± 7.6 cA	41.5 ± 8.8 bA	38.9 ± 6.1 cA	44.0 ± 9.0 aA	-1.8 *A	-2.5 *A	2.5 *A
百粒重 100-seed weight/g	中间型 M	39.5 ± 2.9 cA	43.3 ± 3.7 bA	37.1 ± 2.8 dA	46.2 ± 3.8 aA	-3.8 *A	-6.2 *A	2.8 *A
	敏感型 S	40.2 ± 4.1 bA	39.7 ± 3.7 bA	35.6 ± 4.3 cA	44.1 ± 3.5 aA	0.5 A	-4.1 *A	4.4 *A
	全部 Total	39.8 ± 4.7 c	41.5 ± 5.5 b	37.1 ± 4.4 d	44.8 ± 5.4 a	-1.7 *	-4.4 *	3.3 *
单株有效荚数 Effective pods number	耐冷型 T	17.0 ± 3.3 bA	17.4 ± 3.8 bA	16.4 ± 3.0 bA	19.4 ± 3.6 aA	-0.4 AB	-0.9 A	2.0 *A
	中间型 M	16.3 ± 1.4 cA	18.1 ± 2.4 bA	15.7 ± 1.8 cA	19.8 ± 1.8 aA	-1.7 *B	-2.4 *A	1.7 *A
	敏感型 S	17.5 ± 2.3 bA	16.3 ± 2.0 bA	14.8 ± 1.5 cA	19.6 ± 2.0 aA	1.2 A	-1.5 *A	3.3 *A
地上生物量 Above-ground Biomass/g	全部 Total	17.0 ± 2.5 b	17.2 ± 2.9 b	15.7 ± 2.3 c	19.6 ± 2.6 a	-0.3	-1.5 *	2.3 *
	耐冷型 T	16.5 ± 4.8 aA	16.3 ± 4.1 aA	15.7 ± 4.2 bA	16.1 ± 4.1 aA	0.2 A	-0.5 *B	-0.2 B
	中间型 M	18.5 ± 2.1 aA	17.9 ± 2.3 bA	18.3 ± 2.8 bA	18.0 ± 2.3 bA	0.6 *A	0.4 A	0.1 AB
单株有效荚数 Effective pods number	敏感型 S	17.5 ± 1.8 bA	17.5 ± 1.5 bA	17.2 ± 1.4 bA	17.9 ± 1.5 aA	0.0 A	-0.3 AB	0.4 *A
	全部 Total	17.4 ± 3.3 a	17.2 ± 2.9 ab	17.0 ± 3.2 b	17.3 ± 3.0 a	0.2	-0.2	0.1

2.4.2 不同耐低温性大豆种质之间单株产量及其构成因素变化分析 如表5所示,对萌发期不同耐低温性大豆种质之间的单株产量及其构成因素在各播期下的表现进行分析;3种不同耐低温型大豆

种质间以上性状的表现随播期变化的规律与整体基本相同,但是也存在差异,如早播(K)时,中间型大豆百粒重显著增加了0.6g,耐冷型大豆种质单株有效荚数增加不显著,而敏感型大豆种质单株荚数

却显著增加了 4.0 个,且地上生物量降低不显著;晚播时(P),耐冷型大豆种质百粒重显著降低;比较不同耐低温型大豆种质性状的自身表现,发现正常播期(CK)和晚播(P)时,耐冷型大豆种质均表现出更高的单株有效荚数,但是,单株粒重没有表现出优势;另外,比较早播(K)和晚播(P)与正常播期(CK)的差值,中间型大豆种质百粒重在晚播(P)时平均增加了 0.4 g,其表现比耐冷型大豆种质表现更好。

**2.4.3 大豆萌发期 6 °C 胁迫对大豆单株产量及其构成因素的影响** 如表 5 所示,大豆萌发期 6 °C 持续胁迫处理播种(N)的植株在单株产量及其构成上的表现与正常播期(CK)相比存在差异:从整体看,花荚总数略微降低,但是不显著;花荚脱落率显著降低了 5.8%,而单株有效荚数却显著增加了 4.3 个,同时地上生物量和单株粒重也分别显著增加了 3.3 和 2.3 g。其生育期结构和积温与正常播期(CK)无明显差异(表 3 和图 2),表明大豆萌发期低温胁迫可以通过降低花荚脱落率增加有效荚数,从而提升单株产量。另外,对比该处理下 3 种不同耐低温型大豆种质之间的表现:中间型大豆种质单株有效荚数增加不显著;敏感型大豆种质的百粒重显著增加了 0.4 g,而耐低温型和敏感型大豆种质的百粒重变化不显著;其他表现与整体规律相同。

## 3 讨论

### 3.1 大豆萌发期耐低温性评价

针对东北地区早春播时的低温冷害问题,前人对大豆萌发期耐低温做了一些研究,如李育军等<sup>[10]</sup>发现在 6 °C 下,13~14 d 的相对发芽率和田间出苗率存在显著的正相关,认为低温相对发芽率可以作为萌发期耐低温筛选的指标。Haidar 等<sup>[24]</sup>研究大豆的吸胀冷害时,发现部分已经发芽的种子失去活力无法正常成苗,认为用发芽指标来评价大豆的抗冷性存在局限性。本研究考虑了大豆低温下的发芽能力(RGR),同时也考虑了萌发期持续低温胁迫对大豆成苗能力(RNSR)的影响,综合两个指标对大豆萌发期的耐低温性进行评价并分成耐冷型 T、中间型 M 和敏感型 S,且它们之间在低温发芽力和低温后恢复常温成苗的能力均有显著差异。挑选的 27 个大豆品种中有 3 个品种的萌发期耐低温性在文献中报道过。其中,铁丰 31 也为耐低温品种,与郝晶等<sup>[25]</sup>鉴定结果相同,绥农 14 归类为中间型品种,与单彩云<sup>[26]</sup>利用 4 °C、17 d 相对发芽率为指标鉴定为耐冷型不同;红丰 11 归类为敏感型品种,与张大伟等<sup>[27]</sup>利用生理指标鉴定为中间型的结果

也不相同,说明不同方法和指标对同一品种的评价存在差异。因此,有必要建立稳定可靠的大豆萌发期耐低温鉴定体系,本研究可供参考。

另外,胡国玉等<sup>[12]</sup>认为大豆萌发期耐低温性状符合主基因和多基因模型,而本研究中采用的 RGR 和 RNSR 两个指标均具有较高的广义遗传率,说明大豆萌发期耐低温主要受遗传因素控制,这对于进一步研究大豆耐低温遗传基础和调控机理具有指导意义。

### 3.2 播期对不同耐低温大豆生态性状的影响

不同播期可以通过影响大豆各生育阶段的光、温、水条件来影响大豆的生育结构、形态性状、品质性状和产量及产量构成<sup>[28]</sup>。本研究中,随着播期的推迟大豆的各生育阶段时间和有效活动积温均呈减少趋势,这与孙培乐等<sup>[29]</sup>研究结果基本一致。陈立君<sup>[30]</sup>以大豆东农 42 为试验材料,表明随着播期延迟,株高和主茎节数呈先升高后降低趋势,而乔金友等<sup>[31]</sup>认为播期过早易受低温和高湿环境影响造成大豆植株矮小。吴俊彦<sup>[32]</sup>研究黑河地区主栽大豆时,发现随播期推迟,大豆的粗蛋白和粗脂肪含量呈下降趋势,提出早播有利于提高蛋白质和脂肪含量,与本研究结果基本一致。高永刚等<sup>[33]</sup>以黑农 48 为材料,发现早播和晚播都不适合大豆产量增加,而适时播期可促进光合效率,使大豆产量增加明显。本研究中,发现播期推迟时,整体上大豆的株高呈增加趋势,有效分枝数、粗蛋白含量、蛋脂总量呈下降趋势;早播和正常播期单株产量性状无明显差异,但是晚播时单株有效荚数、单株粒重、地上生物量显著降低。以上结论和前人的大多数研究基本相同。

另外,本研究中,萌发期不同耐低温类型大豆种质各生态性状随播期的变化规律与整体基本一致,且不同耐低温类型种质之间对播期的响应也基本相同,但是会存在一些规律不明显的差异,因此农业生产中可以不必考虑播期对不同萌发期耐低温类型大豆的影响。然而,在生态性状的本身表现方面,本研究发现耐冷型(T)大豆不仅萌发期耐低温能力强,且具有更高的有效分枝数、单株有效荚数、粗蛋白含量和蛋脂总量。其中,李育军等<sup>[10,34]</sup>发现大豆早播时田间出苗率和单株有效荚数呈显著正相关性(0.629\*\*),与本研究中萌发期耐冷型(T)大豆表现出更高的单株有效荚数结果类似,而粗蛋白含量与萌发期耐冷性无关,与本研究结论不同,需要进一步研究。以上研究结果可以为“适时早播”选用耐低温大豆提供指导。

### 3.3 萌发期低温胁迫影响大豆生态性状的变化

由于植物遭遇低温胁迫可以通过表观遗传调控促使植物生态性状发生变化<sup>[35]</sup>。为了探究萌发期低温胁迫对大豆生长发育的影响,本研究增加了萌发期冷处理后播种(N)试验,结果表明:在各生育阶段时间和活动积温等无明显差异时,与CK相比,大豆萌发期低温胁迫后降低了单株花荚脱落率,增加了有效分枝数,提高了单株有效荚数和粒重,且粗脂肪含量增加。这些结果说明萌发期持续低温胁迫会导致植物生长后期性状的改变,且具有增产效应,但是该现象是否是因低温引起的表观调控所导致需要证据去支撑。然而,本试验中,早播时,大豆萌发至出苗过程中也遭遇了低温胁迫,但是单株产量表现并未增加(和正常播期无明显差异),推测这可能与早播时生育期差异(与正常播期相比)引起的光温条件变化、低温胁迫强度不够以及开花期遭遇了更低温度胁迫影响花芽分化等因素有关,这需要进一步的研究。

## 4 结论

本研究中,相对发芽率(RGR)和相对正常苗率(RNSR)指标在评价大豆萌发期耐低温性时具有较高的广义遗传率,可为研究大豆萌发期耐低温性遗传基础提供参考。播期试验表明,早播可以增加大豆各生育阶段时间和活动积温,增加有效分枝数、粗蛋白含量和蛋脂总量,而晚播不利于大豆产量和品质提升;不同耐低温型大豆种质之间的生态性状随播期的变化以及对播期的响应规律和整体基本相同,生产中可以不必考虑播期对萌发期不同耐低温大豆的影响;耐低温型大豆种质表现出更高的有效分枝数、单株有效荚数、蛋白质含量和蛋脂总量;大豆萌发期6℃持续胁迫能影响大豆后期生长发育,降低花荚脱落率,增加有效分枝数、单株有效荚数,提升单株产量,具有增产效应。本研究结果可为我国东北地区选育萌发期耐低温春大豆品种和“适时早播”等生产措施以提高大豆产量和改善品质提供参考意见。

## 参考文献

[1] 郑祖庭. 2023年国内外大豆市场回顾及2024年展望[J]. 黑龙江粮食, 2024(2): 23-26, 12.  
ZHENG Z T. Review of domestic and foreign soybean market in 2023 and outlook in 2024[J]. Heilongjiang Grain, 2024(2): 23-26, 12.

[2] 李奕聪, 杨钰莹, 李佳璇, 等. 2024年大豆产业发展趋势与政策建议[J]. 大豆科技, 2024(1): 1-5.  
LI Y C, YANG Y Y, LI J X, et al. Development trends and

policy suggestions of soybean industry in 2024[J]. Soybean Science & Technology, 2024(1): 1-5.

[3] 姜芬芬, 孙磊, 刘方东, 等. 世界大豆生育阶段光温综合反应的地理分化和演化[J]. 中国农业科学, 2022, 55(3): 451-466.  
JIANG F F, SUN L, LIU F D, et al. Geographic differentiation and evolution of photo-thermal comprehensive responses of growth-periods in global soybeans[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(3): 451-466.

[4] 潘铁夫, 张德荣, 张文广. 东北地区大豆气候区划的研究[J]. 大豆科学, 1983, 2(1): 1-13.  
PAN T F, ZHANG D R, ZHANG W G, et al. The climatic regionalization in northeast China[J]. Soybean Science, 1983, 2(1): 1-13.

[5] 毕远林. 适时早播确保大豆全苗促增产[J]. 大豆科技, 2010(2): 62.  
BI Y L. Sow early in time to ensure the whole soybean seedling and promote yield increase[J]. Soybean Science & Technology, 2010(2): 62.

[6] MOURTZINIS S, SPECHT J E, CONLEY S P. Defining optimal soybean sowing dates across the US[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 2800.

[7] 宁海龙, 孙培乐, 宋兆华, 等. 不同播期对春大豆生态性状的影响[J]. 大豆科学, 2011, 30(1): 73-78.  
NING H L, SUN P L, SONG Z H, et al. Effect of sowing dates on ecological traits of spring soybean[J]. Soybean Science, 2011, 30(1): 73-78.

[8] 杜佳兴, 刘婧琦, 盖志佳, 等. 播期对高蛋白大豆籽粒品质及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(35): 31-34.  
DU J X, LIU J Q, GAI Z J, et al. Sowing dates affect seed quality and yield of high protein soybean[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(35): 31-34.

[9] BANDARA A Y, WEERASOORIYA D K, BELL T H, et al. Prospects of alleviating early planting-associated cold susceptibility of soybean using microbes: New insights from microbiome analysis[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2021, 207(2): 171-185.

[10] 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(5): 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(5): 136-144.

[11] 张国栋, 龚文娟. 高寒地区大豆品种资源的研究—大豆品种的耐寒性及其鉴定[J]. 黑龙江农业科学, 1983(5): 14-19.  
ZHANG G D, GONG W J. Research on soybean variety resources in high cold regions: Cold tolerance and its identification of soybean varieties[J]. Journal of Heilongjiang Agricultural Science, 1983(5): 14-19.

[12] 胡国玉, 赵晋铭, 周斌, 等. 大豆耐低温出苗的遗传分析与分子标记[J]. 大豆科学, 2008, 27(6): 905-910.  
HU G Y, ZHAO J M, ZHOU B, et al. Inheritance and molecular marker of chilling tolerance of soybean in early stage[J]. Soybean Science, 2008, 27(6): 905-910.

[13] 张德荣, 张学君. 大豆低温冷害试验研究报告[J]. 大豆科学, 1988, 1(2): 125-132.  
ZHANG D R, ZHANG X J. Research report on soybean cold

- injury experiment[J]. *Soybean Science*, 1988, 1(2): 125-132.
- [14] KASAI A, OHNISHI S, YAMAZAKI H, et al. Molecular mechanism of seed coat discoloration induced by low temperature in yellow soybean[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2009, 50(6): 1090-1098.
- [15] 吴宇欣, 蔡昌杨, 唐诗蓓, 等. 植物响应低温的生长发育及分子机制研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(19): 1-9.  
WU Y X, CAI C Y, TANG S B, et al. Research progress on the growth, development and molecular mechanism of plants responding to low temperature[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(19): 1-9.
- [16] STEWARD N, ITO M, YAMAGUCHI Y, et al. Periodic DNA methylation in maize nucleosomes and demethylation by environmental stress [J]. *The Journal of Biological Chemistry*, 2002, 277(40): 37741-37746.
- [17] LABRA M, GRASSI F, IMAZIO S, et al. Genetic and DNA-methylation changes induced by potassium dichromate in *Brassica napus* L[J]. *Chemosphere*, 2004, 54(8): 1049-1058.
- [18] GAO Z, ZHOU Y, HE Y. Molecular epigenetic mechanisms for the memory of temperature stresses in plants [J]. *Journal of Genetics and Genomics*, 2022, 49(11): 991-1001.
- [19] GUPTA C, SALGOTRA R K. Epigenetics and its role in effecting agronomical traits [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 925688.
- [20] 盖志佳, 张敬涛, 刘婧琦, 等. 耐低温大豆品种(系)的筛选与研究[J]. *中国种业*, 2018(6): 57-60.  
GAI Z J, ZHANG J T, LIU J Q, et al. Screening and study of soybean varieties (lines) with low temperature tolerance [J]. *China Seed Industry*, 2018(6): 57-60.
- [21] 孙旭刚, 李盛有, 曹永强, 等. 基于隶属函数值法评价大豆种质资源耐荫性[J]. *辽宁农业科学*, 2021(4): 42-44.  
SUN X G, LI S Y, CAO Y Q, et al. Evaluation of shading tolerance of soybean germplasm resources based on membership function value method[J]. *Liaoning Agricultural Sciences*, 2021(4): 42-44.
- [22] 孙晓环, 王燕平, 宗春美, 等. 东北大豆种质群体花荚器官脱落的差异及其与主要农艺性状的相关分析[J]. *大豆科学*, 2018, 37(5): 730-735.  
SUN X H, WANG Y P, ZONG C M, et al. Difference of flower and pod organ abscission and its correlation analysis between main agronomic characters in soybean in northeast of China [J]. *Soybean Science*, 2018, 37(5): 730-735.
- [23] 邱丽娟, 常汝镇. 大豆种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.  
QIU L J, CHANG R Z. Descriptors and data standard for melon (*Glycine* spp.) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006.
- [24] HAIDAR S, LACKEY S, CHARETTE M, et al. Genome-wide analysis of cold imbibition stress in soybean, *Glycine max* [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1221644.
- [25] 郝晶, 张立军, 谢甫锦. 低温对大豆不同耐冷性中萌发期保护酶活性的影响[J]. *大豆科学*, 2007, 26(2): 171-175.  
HAO J, ZHANG L J, XIE F T. Effects of the low temperature on defense enzyme activities of different chilling tolerant soybean cultivars during the germination [J]. *Soybean Science*, 2007, 26(2): 171-175.
- [26] 单彩云. 大豆耐低温资源筛选及蛋白质组学研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2008.
- SHAN C Y. Screening of soybean resources with low temperature tolerance and study on protein genomics [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2008.
- [27] 张大伟, 杜翔宇, 刘春燕, 等. 低温胁迫对大豆萌发期生理指标的影响[J]. *大豆科学*, 2010, 29(2): 228-232.  
ZHANG D W, DU X Y, LIU C Y, et al. Effect of low-temperature stress on physiological indexes of soybean at germination stage [J]. *Soybean Science*, 2010, 29(2): 228-232.
- [28] 屈洋, 马雯, 王可珍, 等. 关中西部播期对大豆农艺特性、产量和品质的影响[J]. *大豆科学*, 2022, 41(6): 696-702.  
QU Y, MA W, WANG K Z, et al. Effects of sowing date on agronomic traits, yield, and quality of soybean in the western area of Guanzhong [J]. *Soybean Science*, 2022, 41(6): 696-702.
- [29] 孙培乐, 宁海龙, 陈东升, 等. 春大豆不同播期的光温生态特性[J]. *大豆科学*, 2010, 29(6): 953-958.  
SUN P L, NING H L, CHEN D S, et al. Ecological character of light and temperature under different sowing data in spring soybean (*Glycine max* L. Merrill) [J]. *Soybean Science*, 2010, 29(6): 953-958.
- [30] 陈立君. 不同播期对大豆东农 42 产质量性状动态变化规律研究[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(3): 122-127.  
CHEN L J. The research on soybean quality property state changeable regular of Dongnong 42 in different seeding dates [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(3): 122-127.
- [31] 乔金友, 张一铭, 孙健, 等. 分期播种对黑农 84 农艺性状及适时性损失影响研究[J]. *大豆科学*, 2023, 42(1): 83-90.  
QIAO J Y, ZHANG Y M, SUN J, et al. Effects of sowing by stages on agronomic characters and timeliness loss of Heinnong 84 [J]. *Soybean Science*, 2023, 42(1): 83-90.
- [32] 吴俊彦. 播期对黑河主栽大豆生育进程和产量及品质的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013: 5-36.  
WU J Y. Effect of sowing date on growth process, yield and quality of soybean in Heihe River [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013: 5-36.
- [33] 高永刚, 高明, 杨晓强, 等. 播期对大豆开花期和鼓粒期叶片光合特性及产量的影响 [J]. *大豆科学*, 2020, 39(2): 227-234.  
GAO Y G, GAO M, YANG X Q, et al. Effects of sowing date on photosynthetic characteristics of leaves in flowering and bulking stage and yield of soybean [J]. *Soybean Science*, 2020, 39(2): 227-234.
- [34] 李育军, 常汝镇, 赵玉田, 等. 大豆抗冷性研究—II、萌发期低温处理对生长发育的影响 [J]. *中国油料*, 1989(4): 43-46.  
LI Y J, CHANG R Z, ZHAO Y T, et al. Studies on tolerance to cold in soybean—II. Effects of low temperature treatment during germination on growth and development [J]. *Chinese Oil*, 1989(4): 43-46.
- [35] 王晓凤, 曾凡锁, 詹亚光. 植物 DNA 甲基化变异对生物和非生物胁迫的响应机制 [J]. *生物技术通讯*, 2011, 22(1): 108-112.  
WANG X F, ZENG F S, ZHAN Y G. DNA methylation variation of biological and abiotic stress response mechanism in plant [J]. *Letters in Biotechnology*, 2011, 22(1): 108-112.