

## 研究报告

## Research Report

# 8 个油菜品种的耐低温萌发特性及其春播试验

朱吉风 周熙荣 江建霞 张俊英 李延莉 杨立勇 王伟荣\* 蒋美艳\*

上海市农业科学院, 上海, 201403

\* 通信作者, wangwr71@sina.com; meijanj423@163.com

**摘要** 为探索甘蓝型油菜种子的低温萌发特性, 本研究选取 8 份主栽油菜品种, 在 20、16、12 和 8℃ 恒温培养箱中进行萌芽试验, 测定分析不同温度下的种子发芽势、发芽率、根长、芽长等指标, 结果表明: 油菜种子发芽势在温度间存在显著性差异, 且 8℃ 低温显著降低油菜种子发芽势。随着萌发温度降低, 油菜根和芽的生长显著受抑, 且在不同温度间和不同品种间存在显著差异。这 3 个指标可作为油菜萌发期耐低温特性评价的主要鉴定指标。此外, 为筛选适宜春播作绿肥的油菜品种, 本试验通过春播试验分析发现, '沪油早 1 号' 的春播鲜草产量达 1 712.53 kg/m<sup>2</sup>, 远高于其它 7 个品种, 其 8℃ 低温下的相对根长仅次于 '沪油 17'、相对芽长仅次于 '沪油肥 1 号', 该研究结果为油菜作绿肥早春播种提供一定参考。

**关键词** 甘蓝型油菜; 萌发; 低温; 春播

## The Seed Germination Characteristics under Low Temperature and Spring Sowing Study of 8 Rapeseed Varieties

Zhu Jifeng Zhou Xirong Jiang Jianxia Zhang Junying Li Yanli Yang Liyong Wang Weirong\* Jiang Meijan\*

Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai, 201403

\* Corresponding author, wangwr71@sina.com; meijanj423@163.com

DOI: 10.5376/mpb.cn.2021.19.0022

**Abstract** To explore the low temperature germination characteristics of rapeseed, 8 main cultivars were selected for germination experiments in incubators at 20, 16, 12 and 8 °C, respectively, to measure and analyze the germination potential, germination rate, root length, bud length, etc. The results showed that there was significant difference in the germination potential of tested rapeseeds at temperatures. And the low temperature of 8 °C was significantly reduced the germination potential. With the decrease of germination temperature, the growth of roots and buds were inhibited significantly. There were significant differences both in temperatures and varieties. The germination potential, root length and bud length could be used as the main index to evaluate seed germination of rapeseed under low temperature. In addition, to screen varieties suitable for spring sowing as green manure, the spring sowing test was carried out. The study found that the fresh grass yield of 'Huyouzao No. 1' was 1712.53 kg/m<sup>2</sup>, which was much higher than other 7 varieties. Its relative root length was second only to 'Huyou17' and its relative bud length next to 'Huyoufei No.1' at 8 °C, respectively. The results can provide a reference for early spring sowing of rapeseed as green manure.

**Keywords** Rapeseed; Seed germination; Low temperature; Spring sowing

本文首次发表在《分子与植物育种》上, 现依据版权所有人授权的许可协议, 采用 Creative Commons Attribution License, 协议对其进行授权, 再次发表与传播

收稿日期: 2021 年 4 月 6 日; 接受日期: 2021 年 4 月 6 日; 发表日期: 2021 年 4 月 13 日

引用格式: 朱吉风, 周熙荣, 江建霞, 张俊英, 李延莉, 杨立勇, 王伟荣, 蒋美艳, 2021, 8 个油菜品种的耐低温萌发特性及其春播试验, 分子植物育种(网络版), 19(22): 1-6 (doi: 10.5376/mpb.cn.2021.19.0022) (Zhu J.F., Zhou X.R., Jiang J.X., Zhang J.Y., Li Y.L., Yang L.Y., Wang W.R., and Jiang M.Y., 2021, The seed germination characteristics under low temperature and spring sowing study of 8 rapeseed varieties, *Fengzi Zhiwu Yuzhong (Molecular Plant Breeding (online))*, 19(22): 1-6 (doi: 10.5376/mpb.cn.2021.19.0022))

种子发芽是作物形态建成的首要阶段,受遗传、水分、氧气、温度等多重因素的影响,其中,温度是影响种子发芽的一个极为重要的环境因子(Elliott et al., 2011)。温度适宜促进种子发芽,温度过低则导致种子发芽时间延长、种子发芽率和出苗率急剧下降,影响出苗整齐度和后期生长,最终降低作物的产量(Xian et al., 2017)。对大多数农作物而言,在水分适量、氧气充足的条件下,温度是影响种子发芽的最重要外界因素。油菜(*Brassica napus* L.)是中国重要的油料作物,也是中国重要的绿肥作物(曹卫东等, 2017)。20~25℃为油菜种子发芽的适宜温度,随着温度降低,种子发芽时间延长、发芽率急剧下降,当温度降至3~4℃时,油菜种子难以发芽(鲜孟筑等, 2015; 朱吉凤等, 2019)。

秋冬晚播或早春播种的油菜在种子萌发期易遭受低温胁迫(Xian et al., 2017)。低温导致油菜种子发芽时间延长,发芽率降低,影响出苗整齐度和均匀度,可能威胁植株后期生长,最终影响油菜生物产量。我国甘蓝型油菜主要分布于长江流域稻-油多熟区,随着前茬水稻成熟期的延长以及双三季稻面积的增加,晚播冬油菜易遭受低温胁迫,影响油菜冬前生长,降低越冬率和最终产量(吕艳等, 2020)。春播油菜作绿肥是恢复发展绿肥生产的一条有效途径,是实现减肥减药、后茬水稻绿色生产、保护生态环境的有效手段。因油菜早春播种易受到低温胁迫,影响种子萌发和幼苗生长,甚至造成缺苗现象,最终导致减产。春播绿肥油菜多于3月份种植,气象资料表明长江下游该时期最高温多在16℃以下、最低温多在8℃以上,因此,本研究选取8、12、16和20℃四个温度梯度,对当地主栽油菜品种开展低温发芽和春播试验,以探索油菜种子低温发芽特性与其春播鲜草产量的关系,为油菜田间早春播种提供参考。

## 1 结果与分析

### 1.1 不同品种萌发指标对处理温度的响应

供试油菜品种间的发芽势和发芽率差异均不显著,而芽长和根长的差异显著( $p < 0.05$ ),鲜重达到极显著水平( $p < 0.01$ ),说明油菜萌发后的生长速度与品种有关(表1)。试验中,除发芽率外,温度及其与品种互作均对供试品种的发芽势、芽长、根长和鲜重产生极显著影响( $p < 0.01$ ),说明温度是影响油菜种子萌发的关键因子,且不同品种对温度变化的响应存在差异。在萌发期,供试品种的根长与芽长随温度降低呈下降趋势,并受温度影响较大,其中根长的变异系数为

14.44%,以20℃下'青杂4号'选系最长(11.08 cm),以8℃下'沪油16'最短(1.54 cm);根长的变异系数为12.01%,以20℃下'沪油039'选系最长(6.74 cm),以8℃下'沪油21'最短(0.77 cm)。温度对不同品种的发芽势影响也较大,变异系数为8.56%,本试验中所有品种的发芽势在12℃及其以上温度均达到86%以上,而在8℃均不足28%,说明油菜发芽势对8℃低温敏感。

为比较不同温度对供试油菜萌发指标的影响,本研究将供试品种的萌发指标分别进行平均处理分析。随温度较低,油菜萌发指标整体呈下降趋势,且均在8℃条件下降到最低值(表3)。方差分析表明,油菜在8℃下的发芽势、发芽率、根长、芽长、鲜重均与其它温度下对应指标存在显著差异,说明油菜种子萌发期对8℃低温更加敏感。与20℃相比,供试品种在16和12℃下的发芽势、发芽率差异不显著,芽长、根长、鲜重存在显著差异,而16与12℃下根长间的差异不显著,芽长间、鲜重间存在显著差异。

### 1.2 春播油菜生育期及主要性状

供试材料中'青杂4号'选系的生育进程最早,从播种至抽薹历时41 d,从播种到初花历时52 d;'沪油早1号'次之,抽薹和初花分别为47 d和58 d;'沪油17'最晚,抽薹和初花分别为54 d和63 d(表3)。由表4可知,生育进程最早的"青杂4号"选系的株高最高(70.07 cm);"沪油早1号"次之,为61.47 cm;'沪油17'和'沪油039'较矮,株高分别为37.23 cm和39.13 cm。'沪油21'抽薹和初花时间仅次于'沪油早1号',其株高为55.17 cm,供试品种中位居前三。说明生育进程快的春播油菜,其株高相对较高。

鲜草重量影响春播油菜作绿肥的最终还田量,生物量大的品种在绿肥生产中具有良好的应用优势。在本试验供试油菜品种中,其小区鲜草产量间存在较明显的差异,变异系数为16.19%,变幅为881.80~1712.53 g/m<sup>2</sup>。单位面积的鲜草产量与单株鲜重和种植密度有关,供试品种单株鲜重间的变异明显,变异系数为15.72%,变幅为29.39~53.52 g;小区密度变异程度较低,变异系数仅1.85%,变幅为27.00~32.00 株/m<sup>2</sup>。8份供试油菜品种中,'沪油早1号'的鲜草产量、单株鲜重、种植密度均最大;'沪油21'的鲜草产量、单株鲜重仅次于'沪油早1号',但其种植密度较低,仅27.36 株/m<sup>2</sup>。供试品种株高间亦存在明显差异,其变异系数为5.99%,变幅为37.23~70.07 cm(表4)。

表 1 不同温度下油菜品种萌发指标差异比较

Table 1 Comparison of rapeseed germination indicators under different temperatures

材料 Material	温度(°C) Temperature (°C)	发芽势(%) Germination potential (%)	发芽率(%) Germination rate (%)	根长(cm) Bud length (cm)	芽长(cm) Root length (cm)	30 株鲜重(g) Weight of 30 plants (g)
沪油 16 Huyou16	20	94.00±2.00	96.67±1.15	8.14±0.37	6.58±0.29	2.51±0.12
	16	96.00±4.00	96.67±3.06	5.29±0.50	4.49±0.28	1.92±0.05
	12	86.00±2.00	93.33±3.06	4.93±0.18	2.88±0.27	1.44±0.11
	8	27.33±5.77	92.67±2.31	1.54±0.19	1.20±0.25	1.00±0.07
沪油 17 Huyou17	20	98.67±2.31	98.67±2.31	9.56±0.53	6.26±0.30	2.38±0.07
	16	100.00±0.00	100.00±0.00	5.80±0.72	4.33±0.18	1.76±0.08
	12	98.00±0.00	100.00±0.00	6.71±0.22	2.82±0.26	1.30±0.01
	8	0.00±0.00	100.00±0.00	3.26±0.37	0.85±0.05	0.87±0.01
沪油 21 Huyou21	20	100.00±0.00	100.00±0.00	10.08±0.91	5.19±0.43	1.94±0.08
	16	100.00±0.00	100.00±0.00	4.69±0.18	3.67±0.21	1.20±0.05
	12	97.33±1.15	98.67±1.15	6.62±0.11	2.35±0.06	0.94±0.01
	8	8.67±2.31	92.67±4.62	2.75±0.30	0.77±0.20	0.63±0.04
沪油 25 Huyou25	20	100.00±0.00	100.00±0.00	9.49±0.69	6.52±0.35	1.83±0.08
	16	100.00±0.00	100.00±0.00	6.51±0.33	4.76±0.46	1.34±0.08
	12	100.00±0.00	100.00±0.00	5.88±0.85	2.70±0.37	0.96±0.06
	8	0.67±1.15	96.67±3.06	1.61±0.33	0.84±0.12	0.62±0.04
沪油 039 Huyou039	20	100.00±0.00	100.00±0.00	10.94±0.20	6.74±0.13	2.22±0.08
	16	100.00±0.00	100.00±0.00	5.95±0.86	4.15±0.32	1.49±0.07
	12	100.00±0.00	100.00±0.00	6.89±0.08	3.12±0.13	1.24±0.01
	8	26.00±5.29	100.00±0.00	1.90±0.10	0.82±0.07	0.77±0.02
青杂 4 号选系 Qingza No.4 xuanxi	20	98.67±2.31	100.00±0.00	11.08±0.52	5.41±0.63	1.48±0.09
	16	99.33±1.15	99.33±1.15	6.11±0.96	3.34±0.15	0.98±0.09
	12	98.00±2.00	99.33±1.15	5.90±0.27	2.19±0.15	0.83±0.05
	8	2.00±3.46	100.00±0.00	2.06±0.15	1.01±0.09	0.59±0.02
沪油早 1 号 Huyouzao No.1	20	98.67±2.31	99.33±1.15	7.81±0.34	5.40±0.37	1.77±0.01
	16	99.33±1.15	99.33±1.15	4.96±0.92	3.88±0.33	1.17±0.08
	12	96.00±2.00	100.00±0.00	4.45±0.11	2.69±0.21	0.96±0.03
	8	3.33±3.06	92.00±2.00	2.18±0.26	1.01±0.14	0.66±0.02
沪油肥 1 号 Huyoufei No.1	20	96.00±5.29	98.67±1.15	6.92±0.60	4.58±0.43	2.05±0.05
	16	95.33±3.06	98.67±1.15	6.09±0.24	3.66±0.18	1.51±0.01
	12	91.33±4.62	100.00±0.00	4.41±0.16	2.98±0.22	1.20±0.04
	8	8.00±2.00	61.33±3.06	1.55±0.22	1.02±0.18	0.74±0.03
品种 Variety	F-Value	0.67	1.20	3.05	2.83	23.12
	P-Value	NS	NS	*	*	**
处理 Treatment	F-Value	371.05	2.51	100.02	207.46	226.40
	P-Value	**	NS	**	**	**
品种×处理 Variety×Treatment	F-Value	111.79	1.59	32.14	64.22	84.10
	P-Value	**	NS	**	**	**
变异系数(%) Coefficient of variation (%)		8.56	6.60	14.44	12.01	7.77

注: NS 差不显著; \* 显著水平( $p<0.05$ ); \*\* 极显著水平( $p<0.01$ )

Note: NS means no significant different; \*significantly different between treatments at  $p<0.05$ ; \*\*significantly different between treatments at  $p<0.01$

表2 温度对8份供试种质发芽指标的影响

Table 2 Effects of temperature on germination indicators of eight rapeseed varieties

温度(°C)	发芽势(%)	发芽率(%)	根长(cm)	芽长(cm)	30株鲜重(g)
Temperature (°C)	Germination potential (%)	Germination rate (%)	Bud length (cm)	Root length (cm)	Weight of 30 plants (g)
20 °C	98.26a	99.18a	9.25a	5.84a	2.03a
16 °C	98.74a	99.25a	5.69b	4.05b	1.43b
12 °C	95.83a	98.91a	5.73b	2.73c	1.10c
8 °C	9.5b	91.93b	2.13c	0.94d	0.74d

注: 同一列标以不同字母表示差异达 0.05 显著水平

Note: Values followed by the different letters within the same column are significantly different at  $p < 0.05$

表3 春播油菜物候期

Table 3 Phenological period of rapeseed for spring sowing

材料	播种期	抽薹期	初花期	材料	播种期	抽薹期	初花期
Material	Sowing time	Bolting time	Initial flowering time	Material	Sowing time	Bolting time	Initial flowering time
沪油 16	3/16	5/7	5/18	沪油 039	3/16	5/5	5/15
Huyou16				Huyou039			
沪油 17	3/16	5/9	5/18	青杂 4 号选系	3/16	4/26	5/7
Huyou17				Qingza No.4 xuanxi			
沪油 21	3/16	5/4	5/15	沪油早 1 号	3/16	5/2	5/13
Huyou21				Huyouzao No.1			
沪油 25	3/16	5/5	5/15	沪油肥 1 号	3/16	5/7	5/15
Huyou25				Huyoufei No.1			

### 1.3 春播油菜鲜草产量与其种子低温萌发指标的相关性

为分析春播油菜生物量与其低温萌发特性的相关性,将 16、12 和 8 °C 以 20 °C 为对照作比,得到不同指标的相对值进行相关分析。相关分析表明:鲜草产量(T1)与单株鲜重(T2)呈极显著正相关( $r=0.94, p < 0.01$ ),说明单株产量与其春播油菜鲜草产量之间具有一致性。鲜草产量与不同温度下的相对芽长呈正相关,小区密度(T18)与不同温度下的相对发芽势呈正相关,但均未达到显著水平,说明油菜种子发芽快的材料对后期长势具有一定的正效应。小区密度与 12 °C 下的相对根长呈显著负相关 ( $r=-0.73, p < 0.05$ ),与其它性状之间的相关性均未达显著水平。

## 2 讨论

随着我国粮食产量和农产品保障能力的提升,面源污染、耕地退化等农业问题日趋凸显,为应对我国农业发展新形势,农业绿色生产提上日程(李福夺和尹昌斌, 2019)。发展绿肥是建立良好农业生态系统、推进农业绿色转型、改善稻田土壤结构、提高有机质成分、增加水稻产量和品质的一个重要举措(曹

卫东等, 2017)。在我国南方拥有大量的冬春闲田、作物茬口间隙等空地(赵鲁等, 2012)。油菜是我国主要的十字花科绿肥作物,主要分布于长江流域,利用南方空闲田发展绿肥春油菜生产潜力巨大。

春播油菜面临的首要挑战则是低温下种子是否能够正常萌发(吕艳等, 2019)。早春低温是限制种子萌发的一个重要非生物胁迫因子,通常造成种子萌发困难,田间出苗不齐,最终影响群体建成和生物产量(张瑞栋等, 2020)。因此,研究油菜品种对不同萌发温度的响应特征具有重要应用价值和理论价值。本试验相关分析发现,供试品种的春播鲜草产量与种子低温萌发特性相关但未达显著性水平,可能与播种后平均气温有关(播种后 1 周内的日均气温介于 13~19°C)(图 1)。本研究中,供试品种在 12 °C 及以上条件下处理 3 d,发芽率可达 86%以上,且在温度间、品种间差异均不明显,所以,春播油菜种子正常发芽出苗后,小区鲜草产量取决于后期长势及品种间的差异。若温度降至 8 °C 时,大部分品种则需 8 d 才可完成 80%以上的发芽率。因早春极易遭遇寒流、冰冻等低温天气,油菜春播时若遭遇低温天气,则极易影响种子发芽、出苗整齐度。如 2020 年春播试验期间,虽播种后 10 d 内日均气温高于 10°C,但播种后 2~3 周

表 4 春播油菜部分农艺性状

Table 4 Some agronomic traits of rapeseed for spring sowing

材料	株高(cm)	单株鲜重(g)	小区密度(株 /m <sup>2</sup> )	鲜草产量(g/m <sup>2</sup> )
Material	Plant height	Per plant weight	Density	Grass yield
沪油 16	40.44±1.34de	37.74±10.31bc	29.67±0.58b	1122.83±322.13bc
Huyou16				
沪油 17	39.13±2.34de	37.73±3.78bc	27.47±0.82c	1036.81±108.81bc
Huyou17				
沪油 21	55.17±0.85c	51.91±10.89a	27.36±1.10c	1419.55±303.90ab
Huyou21				
沪油 25	43.57±4.70d	44.14±6.82ab	30.02±0.03b	1325.30±206.27b
Huyou25				
沪油 039	37.23±4.27c	29.39±0.69c	30.00±0.00b	881.80±20.69c
Huyou039				
青杂 4 号选系	70.07±3.72a	42.21±4.36ab	30.00±0.00b	1266.30±130.76bc
Qingza No.4 xuanxi				
沪油早 1 号	61.47±2.98b	53.52±6.09a	32.00±0.00a	1712.53±194.97a
Huyouzao No.1				
沪油肥 1 号	42.67±1.55de	48.58±4.11ab	27.00±0.00c	1311.57±110.84b
Huyoufei No.1				
变异系数(CV, %)	5.99	15.72	1.85	16.19
Coefficient of variation				

注释: 同一列标以不同字母表示差异达 0.05 显著水平

Note: Values followed by the different letters within the same column are significantly different at  $p < 0.05$

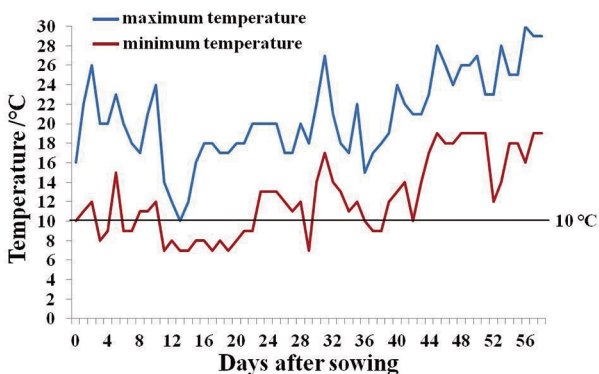


图 1 油菜春播后当地最高和最低气温日变化趋势

Figure 1 The daily maximum and minimum air temperature ranging after rapeseed spring sowing

内, 每日最低气温多低于 8 °C。所以, 为避免油菜春播后遭遇低温侵袭的风险, 选育在 8 °C 下具有高发芽势的绿肥油菜品种有利于春播绿肥产业的发展。

低温胁迫下的油菜种子快速萌发是其后期生长的首要指标。种子萌发特性是基因和环境互作的综合表现(Chinnusamy et al., 2010; Xian et al., 2017)。建立客观的低温萌发评价体系, 选取有代表性的评价指标, 对油菜品种萌发期耐低温评价及品种鉴定非

常重要。本研究表明, 不同萌发指标对低温的敏感程度存在差异。与发芽率相比, 种子萌芽后受低温影响更加敏感(表 2), 说明油菜芽的生长比发芽对温度变化更加敏感。该结果与前人在其它作物中的研究一致(常博文等, 2019; 张瑞栋等, 2020)。此外, 8 份油菜品种在萌发期对 8 °C 敏感, 这与前期研究结果一致(朱吉凤等, 2019)。黄贺等(2019)研究认为 9 °C 低温对不同油菜品种的发芽势、发芽率影响较小, 但显著影响其发芽指数及平均发芽时间。因此, 仅以种子萌发率作为作物发芽特性的评价指标存在一定的局限性。本研究除对种子的发芽势和发芽率进行评价外, 还选取了相对根长、相对芽长、相对鲜重 3 个指标对其萌发期耐低温特性进行综合评价, 结果表明, 这三个指标对温度变化敏感响应, 且品种间和温度间的变异程度较大, 因此, 这 3 个指标可作为油菜萌发期耐低温特性评价的主要鉴定指标。

### 3 材料与方法

#### 3.1 试验材料

以 '沪油 16'、'沪油 17'、'沪油 21'、'沪油 25'、'沪

表 5 油菜萌发特性与春播生物量的相关性分析

Table 5 The correlation analysis among rapeseed germination traits and spring sowing biomass

性状 Trait	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17
T2	0.94**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T3	-0.05	-0.23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T4	-0.12	-0.17	-0.35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T5	-0.52	-0.56	0.22	-0.51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T6	-0.24	-0.15	0.00	0.00	-0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T7	0.21	0.24	0.56	0.55	-0.61	0.38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T8	-0.27	-0.45	0.64	0.39	0.06	0.02	-0.32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T9	0.14	0.20	-0.37	-0.34	-0.12	0.13	0.35	-0.79	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T10	-0.39	-0.16	-0.29	0.03	0.04	0.87**	0.26	-0.12	0.06	-	-	-	-	-	-	-	-
T11	0.26	0.35	0.14	0.03	-0.47	0.64	0.45	0.02	-0.12	0.49	-	-	-	-	-	-	-
T12	0.50	0.65	-0.51	-0.32	-0.33	0.32	0.40	-0.80*	0.76*	0.33	0.24	-	-	-	-	-	-
T13	0.20	0.34	-0.59	-0.34	0.01	0.17	0.48	-0.94**	0.75*	0.21	0.14	0.73*	-	-	-	-	-
T14	0.49	0.52	0.00	-0.59	-0.12	-0.38	0.00	-0.68	0.57	-0.44	0.04	0.44	0.61	-	-	-	-
T15	-0.30	-0.33	0.15	-0.40	0.14	0.12	-0.05	-0.24	0.69	0.29	-0.09	0.34	0.22	0.13	-	-	-
T16	-0.37	-0.41	0.07	-0.32	0.29	-0.08	0.07	-0.39	0.61	-0.20	-0.26	0.01	0.47	0.50	0.59	-	-
T17	-0.14	-0.27	0.70	-0.40	0.15	-0.29	-0.34	0.14	0.15	-0.53	-0.11	-0.35	-0.12	0.49	0.38	0.69	-
T18	0.30	-0.03	0.45	0.12	0.09	-0.39	-0.09	0.45	-0.18	-0.73*	-0.33	-0.39	-0.38	-0.04	-0.20	0.03	0.33

注: T1: 鲜草产量(g/m<sup>2</sup>); T2: 单株重(g); T3: 16 °C 相对发芽势; T4: 12 °C 相对发芽势; T5: 8 °C 相对发芽势; T6: 16 °C 相对发芽率; T7: 12 °C 相对发芽率; T8: 8 °C 相对发芽率; T9: 16 °C 相对根长; T10: 12 °C 相对根长; T11: 8 °C 相对根长; T12: 16 °C 相对芽长; T13: 12 °C 相对芽长; T14: 8 °C 相对芽长; T15: 16 °C 相对鲜重; T16: 12 °C 相对鲜重; T17: 8 °C 相对鲜重; T18: 密度 (株 /m<sup>2</sup>); \* 表示在 P<0.05 水平达到显著差异; \*\* 表示在 P<0.01 水平达到显著差异

Note: T1: Grass yield (g/m<sup>2</sup>); T2: Per plant weight (g); T3: Relative germination potential at 16 °C; T4: Relative germination potential at 12 °C; T5: Relative germination potential at 8 °C; T6: Relative germination rate at 16 °C; T7: Relative germination rate at 12 °C; T8: Relative germination rate at 8 °C; T9: Relative root length at 16 °C; T10: Relative root length at 12 °C; T11: Relative root length at 8 °C; T12: Relative bud length at 16 °C; T13: Relative bud length at 12 °C; T14: Relative bud length at 8 °C; T15: Relative weight at 16 °C; T16: Relative weight at 12 °C; T17: Relative weight at 8 °C; T18: Density (plants/m<sup>2</sup>); \*: significantly different between treatments at P<0.05; \*\*: significantly different between treatments at P<0.01

油 039'、'沪油肥 1 号'、'沪油早 1 号' 和 '青杂 4 号' 选系等 8 个性状不同的甘蓝型油菜品种为试验材料,开展种子低温发芽试验和田间春播试验。其中,'沪油 16'、'沪油 17'、'沪油 21'、'沪油 25' 和 '沪油 039' 均为甘蓝型油菜中熟常规种,为上海郊区主要种植品种;'沪油肥 1 号' 和 '沪油早 1 号' 为新培育的油菜绿肥品种;'青杂 4 号' 选系为早熟油菜自交选系。

### 3.2 种子低温发芽试验

选取当年收获且籽粒饱满的无病油菜种子,放入铺有 2 层无菌滤纸的培养皿(φ=9 cm)中,每皿 50 粒,加入 20 mL 无菌蒸馏水,分别置于 20、16、12 和 8 °C 的人工气候箱中进行发芽试验,设 3 次重复,处理的第 3 d 调查统计种子发芽情况,并计算种子发芽势,即:种子发芽势(%)=第 3 d 发芽种子数/供试种子

总数×100%。供试种子连续 5 d 不再发芽结束试验,调查其最终发芽率,即:种子发芽率(%)=试验结束时的发芽种子总数/供试种子总数×100%,此外,于每皿随机取 10 个样品测定其芽长和根长,以及随机抽取 30 株拭干后测其鲜重。

### 3.3 油菜春播试验

选取饱满无病害的甘蓝型油菜种子,于 2020 年 3 月 16 日人工撒播于上海市农业科学院庄行综合试验站。试验田前茬水稻深翻休闲田,播种前一周浅耕灭茬,开沟做畦,播种前一周用 10%草甘磷除草,播后当天喷除草剂乙草胺乳油防杂草,施基肥复合肥 25 kg/ 亩,追肥尿素 5 kg/ 亩。小区面积为 25 m<sup>2</sup>,播种量为 25 g,随机区组排列,重复 3 次。5 月 13 日于每个区随机选取 10 株测量株高和单株重量,并测量

小区的鲜草产量。

### 3.4 数据处理与分析

采用软件 Excel 2010 对数据进行整理和分析, 计算各调查性状的平均值和变异系数; 利用 SAS9.2 软件对各调查性状进行统计分析。

### 作者贡献

朱吉风、王伟荣是本研究的实验设计者和实验研究的执行人; 朱吉风完成数据分析及论文初稿的写作; 蒋美艳、周熙荣参与论文修改; 王伟荣、蒋美艳、江建霞、李延莉、张俊英、杨立勇参与部分实验; 全体作者都阅读并同意最终的文本。

### 致谢

本研究由国家自然科学基金项目(31901502)资助。

### 参考文献

- Cao W.D., Bao X.G., Xu C.X., Nie J., Gao Y.J., and Geng M.J., 2017, Reviews and prospects on science and technology of green manure in China, *Zhiwu Yinyang Yu Feiliao Xuebao (Journal of Plant Nutrition and Fertilizer)*, 23(6): 1450-1461. (曹卫东, 包兴国, 徐昌旭, 聂军, 高亚军, 耿明建, 2017, 中国绿肥科研 60 年回顾与未来展望, *植物营养与肥料学报*, 23(6): 1450-1461.)
- Chang B.W., Zhong P., Liu J., Tang Z.H., Gao Y.B., Yu H.J., and Guo W., 2019, Effect of low-temperature stress and gibberellin on seed germination and seedling physiological responses in peanut, *Zuowu Xuebao (Acta Agronomica Sinica)*, 45(1): 122-134. (常博文, 钟鹏, 刘杰, 唐中华, 高亚冰, 于洪久, 郭炜, 2019, 低温胁迫和赤霉素对花生种子萌发和幼苗生理响应的影响, *作物学报*, 2019, 45(1): 122-134.)
- Chinnusamy V., Zhu J.K., and Sunkar R., 2010, Gene regulation during cold stress acclimation in plants, *Methods in Molecular Biology*, 639: 39-55.
- Elliott C.W., Fischer D.G., and Leroy C.J., 2011, Germination of three native lupinus species in response to temperature, *Northwest Science*, 85: 403-410.
- Huang H., Yan L., Lv Y., Ding X.Y., Cai J.S., Cheng Y., Zhang X.K., and Zou X.L., 2019, Screening and evaluation of low temperature tolerance of rapeseed (*Brassica napus* L.) at germination stage, *Zhongguo Youliao Zuowu Xuebao (Chinese Journal of Oil Crop Sciences)*, 41(5): 723-734. (黄贺, 闫蕾, 吕艳, 丁晓雨, 蔡俊松, 程勇, 张学昆, 邹锡玲, 2019, 甘蓝型油菜耐低温发芽种质资源鉴定, *上海农业学报*, 35(4): 22-27.)
- Li F.D., and Yin C.B., 2019, Assessment of the functions and ecological services values of green manure in paddy fields in South China, *Zhongguo Shengtai Nongye Xuebao (Chinese Journal of Eco-Agriculture)*, 27(2): 327-336. (李福夺, 尹昌斌, 2019, 南方稻区绿肥生态服务功能及生态价值评估研究, *中国生态农业学报*, 27(2): 327-336.)
- Lu Z., Shi D.Y., Gao X.Y., and An Y., 2012, Effects of alfalfa green manure on rice yield and soil fertility, *Caoye Kexue (Pratacultural Science)*, 29(7): 1142-1147. (赵鲁, 史冬燕, 高小叶, 安渊, 2012, 紫花苜蓿绿肥对水稻产量和土壤肥力的影响, *草业科学*, 29(7): 1142-1147.)
- Lv Y., Huang Y., Zou X.L., Luo D., Wang X.Y., Bao W.Z., Chen J.J., Ma H.Q., and Cheng Y., 2020, Researches on evaluation, physiological and molecular mechanism of rapeseed low-temperature resistance, *Zhongguo Youliao Zuowu Xuebao (Chinese Journal of Oil Crop Sciences)*, 42(4): 527-535. (吕艳, 黄涌, 邹锡玲, 罗丹, 王小燕, 鲍五洲, 陈建军, 马海清, 程勇, 2020, 油菜抗低温的评价指标与分子生理机制研究进展, *中国油料作物学报*, 42(4): 527-535.)
- Xian M., Luo T., Khan M.N., Hu L.Y., and Xu Z.H., 2017, Identifying differentially expressed genes associated with tolerance against low temperature stress in *Brassica napus* through transcriptome analysis, *International Journal of Agriculture and Biology*, 19: 273-281.
- Xian M.Z., Yang P., Hu L.Y., Xu Z.H., 2015, Comprehensive evaluation of low temperature tolerance in rapeseed during germination and emergence periods, *Zuowu Zazhi (Crops)*, (5): 116-122. (鲜孟筑, 杨萍, 胡立勇, 徐正华, 2015, 油菜种子萌发成苗期耐低温性评价, *作物杂志*, (5): 116-122.)
- Zang R.D., Xiao M.Y., Xu X.X., Jiang B., Xing Y.F., Chen X.F., Li B., Ai X.Y., Zhou Y.F., and Huang R.D., 2020, Responses of sorghum hybrids to germination temperatures and identification of low temperature resistance, *Zuowu Xuebao (Acta Agronomica Sinica)*, 46(6): 889-901. (张瑞栋, 肖梦颖, 徐晓雪, 姜冰, 邢艺凡, 陈小飞, 李邦, 艾雪莹, 周宇飞, 黄瑞冬, 2020, 高粱种子对萌发温度的响应分析与耐低温萌发能力鉴定, *作物学报*, 46(6): 889-901.)
- Zhu J.F., Zhang J.Y., Yang L.Y., Jiang M.Y., Jiang J.X., Li Y.L., Wang W.R., and Zhou X.R., 2019, Identification of rape (*Brassica napus* L.) germplasm resources with low temperature germination tolerance, *Shanghai Nongye Xuebao (Acta Agriculturae Shanghai)*, 35(4): 22-27. (朱吉风, 张俊英, 杨立勇, 蒋美艳, 江建霞, 李延莉, 王伟荣, 周熙荣, 2019, 甘蓝型油菜耐低温发芽种质资源鉴定, *上海农业学报*, 35(4): 22-27.)