

徐文英,刘良,张昆,等.甘蓝型油菜自然群体苗期镁效率评价及镁高效优异种质筛选[J].华中农业大学学报,2025,44(5):69-79.  
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.05.007

## 甘蓝型油菜自然群体苗期镁效率评价 及镁高效优异种质筛选

徐文英<sup>1</sup>,刘良<sup>1</sup>,张昆<sup>2</sup>,张海伟<sup>3</sup>,肖青亮<sup>1</sup>,吴可天<sup>1</sup>,杨广哲<sup>1</sup>,赵尊康<sup>1</sup>

1. 江西农业大学国土资源与环境学院/江西省农业废弃物资源化利用与面源污染防控产教融合重点创新中心, 南昌 330045; 2. 江西省植保植检站,南昌 330096; 3. 江西省烟草科学研究所,南昌 330025

**摘要** 为筛选甘蓝型油菜镁高效品种,研究油菜镁高效分子机制,以甘蓝型油菜自然群体90个品种为材料,采用苗期营养液培养两步筛选法,考查群体在低镁和镁正常处理下鲜物质量、干物质量、根冠比和镁累积量等10个性状,利用相关性分析、聚类分析、综合评价分析法对90个品种进行镁效率的综合评价并筛选镁高效品种。结果显示,90个油菜品种在2个镁处理下10个性状均呈显著差异,变异系数为14.8%~82.94%,且10个性状的耐低镁系数均呈显著正相关;以镁正常条件下干物质生物量和镁效率系数为主要评价指标,将90个品种分为4个类型,分别为高效低敏感型(14个)、高效高敏感型(21个)、低效高敏感型(19个)和低效低敏感型(36个)。通过复筛验证最终筛选到甘蓝型油菜镁高效品种W16与W100和镁低效品种W61与W132,可为后续油菜镁高效分子机制研究提供材料。

**关键词** 甘蓝型油菜; 镁; 苗期; 耐低镁系数; 镁高效品种

**中图分类号** S565.4 **文献标志码** A **文章编号** 1000-2421(2025)05-0069-11

镁是植物生长发育所必需的大量营养元素之一,作为叶绿素分子的中心原子,对维持叶绿体正常结构和光合效率具有重要作用<sup>[1-2]</sup>,缺镁会阻碍叶绿素合成、叶片活性氧代谢,进而促进叶绿素的降解,最终导致脉间叶肉组织失绿黄化和光合固碳速率的降低<sup>[3-5]</sup>。镁也是人体必需的常量矿质元素之一,人体长期缺镁会对健康造成不可逆转的严重伤害,如心血管和代谢疾病、骨质疏松、发育迟缓、神经系统异常和糖尿病等<sup>[6]</sup>。因镁在植物细胞中的含量丰富及重要作用而常被许多学者称为继氮、磷、钾之后的第四大必需矿质营养元素。然而,相对其他大量元素如氮、磷、钾、硫和微量元素铁、锌而言,镁却被植物学家和农学家忽视了几十年之久,称为“被遗忘的元素”<sup>[7]</sup>。

油菜已成为继棕榈和大豆之后的世界第三大食用油作物<sup>[8]</sup>。为实现我国食用植物油基本自给,2025年中央一号文件明确提出要深入推进粮油作物大面积单产提升行动,挖掘油菜、花生扩种潜力。镁是植

物中含量第二丰富的阳离子,为维持植物体内正常生理和生化过程,平均每千克干物质需要1.5~3.5 g 镁<sup>[2]</sup>。油菜对镁的需求量较多,全生育期每公顷油菜需吸收60 kg MgO,每生产100 kg 菜籽需2 kg MgO,需求量仅次于氮、磷、钾和钙<sup>[9]</sup>。研究表明,为满足植物生长需求,土壤溶液Mg需达到125  $\mu\text{mol/L}$ ~8.5 mmol/L水平<sup>[7]</sup>。我国长江流域冬油菜主产区油菜的产量占全国总产量的85%以上,然而,任涛等<sup>[10]</sup>研究发现,长江流域冬油菜种植区土壤有效镁平均为225.7 mg/kg,其中处于镁缺乏水平(100 mg/kg)的区域占24.2%,处于潜在镁缺乏水平(100~200 mg/kg)的区域占比29.5%,且缺镁土壤的面积和程度还在逐渐升级。此外,长江流域冬油菜种植区因镁离子的易淋失以及土壤中大量的 $\text{H}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{K}^+$ 和 $\text{Ca}^{2+}$ 等阳离子严重影响了油菜根系对镁的吸收,而使得土壤中镁的生物有效性大大降低<sup>[11]</sup>。由此可见,镁缺乏已成为影响我国油菜生长和提质增效的重要因子。增施镁肥可一定程度增加产量和提

收稿日期: 2025-07-07

基金项目:国家自然科学基金项目(32360800)

徐文英, E-mail: 18370415921@163.com

通信作者: 赵尊康, E-mail: zhaozk2019@jxau.edu.cn

升品质,但同时也会增加镁的流失浪费,因此,筛选鉴定镁高效油菜优异种质,挖掘其镁高效吸收利用的潜力和分子机制,通过生物技术手段对油菜镁效率性状进行遗传改良,对我国油菜产业的高产、高效及绿色发展具有重要意义。

研究表明,拟南芥<sup>[12]</sup>、水稻<sup>[13]</sup>、大豆<sup>[14]</sup>、番茄<sup>[15]</sup>、甘蔗<sup>[16]</sup>和玉米<sup>[17]</sup>等作物不同品种镁效率性状存在丰富的基因型差异。拟南芥中共有10个镁转运蛋白(MGT)成员,即AtMGT1~AtMGT10,分别参与不同镁环境下植株对镁的吸收、分配、存储及平衡等<sup>[12,18]</sup>。水稻中MRS2/MGT共有9个成员<sup>[19]</sup>,即OsMGT1~OsMGT9,其中OsMGT1、OsMGT2、OsMGT3、OsMGT6和OsMGT9在水稻中参与镁的吸收、转运和分配<sup>[1,11,20]</sup>。徐永成<sup>[13]</sup>通过营养液培养试验考查207份水稻品种苗期不同镁处理下的干物质生物量、SPAD、各组织器官镁浓度和累积量等性状,评价水稻苗期的镁营养效率,并进一步通过全生育期产量和生物量的复筛,筛选出镁高效水稻品种。

在油菜研究中,Sun等<sup>[21]</sup>利用39个甘蓝型油菜品种开展了苗期镁效率评价且筛选出镁高效品种P160和低效品种P153,并以这对高、低效种质为材料开展机制研究,结果表明,高效品种P160能更有效地将镁从根转运到地上部。上述甘蓝型油菜镁营养相关研究为油菜镁高效品种的筛选及机制研究奠定了较好的基础,但对油菜镁营养高效机制的研究还不够系统、深入。Sun等<sup>[21]</sup>用于筛选镁高效品种的群体仅39个基因型,规模较小,且仅发现了可能参与向地上部高效转运镁的2个转运子,没有涉及根系高效吸收、叶片高效利用等方面机制研究。本研究选用甘蓝型油菜自然群体90个品种用于镁效率的评价及镁高效品种的筛选,采用群体苗期营养液培养和候选基因型验证营养液培养两步法,考查在低镁和镁正常处理下10个镁效率相关性状指标变异情况,利用相关性分析、综合评价分析法对90个甘蓝型油菜品种进行镁效率评价,鉴定和筛选镁高效品种,旨在为甘蓝型油菜镁高效机制研究及甘蓝型油菜镁效率性状遗传改良提供基础材料。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试材料为前期收集的90份甘蓝型油菜自然群体,该群体种质收集自全球19个国家或地区,具有不

同的遗传背景,涵盖春性、冬性和半冬性,遗传变异丰富(表1)。

### 1.2 试验设计

1)自然群体营养液培养试验。2023年9—12月在江西农业大学国土资源与环境学院玻璃温室进行。90个品种各挑选饱满种子80~100粒,晒种2~3 h后温室放置24 h,75%乙醇冲洗2遍后用1%次氯酸钠消毒10 min,将种子播至含0.5 mmol/L  $\text{CaCl}_2$ 溶液的育苗盘中,当幼苗主根长至2~3 cm时,挑选长势一致的幼苗移栽定植到盛有1/4霍格兰营养液的塑料盒中(10 L),利用1 mol/L HCl和1 mol/L KOH调节营养液pH值至5.8~6.0。试验设置正常供镁(CK, 2 mmol/L  $\text{MgCl}_2$ )和低镁(LMg, 0.02 mmol/L  $\text{MgCl}_2$ )2个处理,3个生物学重复,每个重复3株。2个处理的营养液除了镁供应不同,其余营养成分与含量一致,均为 $\text{KNO}_3$  0.51 g/L;  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  1.18 g/L;  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.14 g/L;  $\text{K}_2\text{SO}_4$  0.09 g/L;  $\text{H}_3\text{BO}_3$  2.84 mg/L;  $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  1.81 mg/L;  $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  0.09 mg/L;  $\text{ZnCl}_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.22 mg/L;  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  0.08 mg/L; EDTA-Fe 18.352 5 mg/L。每4 d换1次营养液,每次换营养液后随机调整塑料盒位置。第1次营养液浓度为1/4强度,第2次为1/2强度,其后为全量营养培养,镁处理、微量元素和EDTA-Fe一直为全量供应。培养至处理间差异明显时(约24 d)分地上部和地下部采样测定指标。

2)镁高、低效候选品种营养液培养试验。在自然群体初筛的基础上,以初步筛选出的镁高效和镁低效候选品种为材料进行营养液培养复筛。复筛营养液培养试验的处理设置和培养条件均同自然群体营养液培养试验。培养24 d后分地上、下部采样测定单株干物质质量和镁含量。

### 1.3 测定性状指标与方法

将各处理地上部和根系超纯水清洗干净先测定鲜物质生物量后,于105℃杀青30 min,在60℃下烘干至恒质量,称质量测定地上部、根系干物质生物量。由地上部鲜物质生物量和根系鲜物质质量相加算出单株鲜物质生物量;地上部干物质生物量和根系干物质生物量相加算出单株干物质质量;根冠比为根系干物质生物量与地上部干物质生物量的比值。各处理地上和根系干物质样品在140℃下用68%浓 $\text{HNO}_3$ 消化后,采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定消解液中Mg的浓度,并计算出地上、根系及单株镁累积量。耐低镁相对性状为低镁胁迫下的

表 1 90 个供试甘蓝型油菜品种

Table 1 Ninety *Brassica napus* varieties used in this study

编号 No.	品种名称 Variety name	来源 Origin	编号 No.	品种名称 Variety name	来源 Origin
W2	Sl 509	斯洛伐克 Zechoslovakia	W116	Malfura	德国 Germany
W4	Valecovska	斯洛伐克 Zechoslovakia	W119	St. 118/69	德国 Germany
W7	Sl 25	斯洛伐克 Zechoslovakia	W122	Bnw 24	德国 Germany
W9	Sl 524	斯洛伐克 Zechoslovakia	W128	CR2736	意大利 Italy
W10	Slapska, Slapy	斯洛伐克 Zechoslovakia	W129	Leonessa	意大利 Italy
W11	Trebicka	斯洛伐克 Zechoslovakia	W132	Hokkai 3-go	日本 Japan
W12	Prerovska	斯洛伐克 Zechoslovakia	W134	Marasaki	日本 Japan
W14	Op 3/2	斯洛伐克 Zechoslovakia	W139	Suigenshu	朝鲜 Korea, DPK
W15	Op 01	斯洛伐克 Zechoslovakia	W140	Daichousen (murayama)	朝鲜 Korea, DPK
W16	Sl 29	斯洛伐克 Zechoslovakia	W142	CR 3197	摩洛哥 Morocco
W17	Nosovskij 9	俄罗斯 Russia	W144	Mansholts Hamburger Raps	荷兰 Netherlands
W18	CR 894	俄罗斯 Russia	W146	Ramon	荷兰 Netherlands
W19	Kiewskij 18	俄罗斯 Russia	W160	Mah 2	波兰 Poland
W20	Mitnickij 2	俄罗斯 Russia	W161	Boh 1	波兰 Poland
W22	Kiewskij 216	俄罗斯 Russia	W162	Janek	波兰 Poland
W23	Nemertschanskij	俄罗斯 Russia	W176	Janpol	波兰 Poland
W24	Marnoo	澳大利亚 Australia	W189	Daichousen (fuku)	朝鲜 Korea, DPK
W29	Bridger	加拿大 Canada	W190	Ceska	捷克 Czech Republic
W32	CR 2532	古巴 Cuba	W195	Ww 1286	瑞典 Sweden
W35	Brutor	法国 France	W196	WW 572	瑞典 Sweden
W39	Toro	法国 France	W199	Ww 917	瑞典 Sweden
W40	Janus	法国 France	W201	Ww 950	瑞典 Sweden
W43	Erra	德国 Germany	W202	Conny	瑞典 Sweden
W45	CR 3168	德国 Germany	W204	Niklas (svaloef)	瑞典 Sweden
W52	Liraglu	德国 Germany	W219	Haripur	巴基斯坦 Pakistan
W56	Eragi	德国 Germany	W220	Nowshera-C4	巴基斯坦 Pakistan
W61	Maliras	德国 Germany	W223	Laki	巴基斯坦 Pakistan
W62	Ledos	德国 Germany	W230	CR 3248	巴基斯坦 Pakistan
W63	Sabine	德国 Germany	W231	Zheshuang-72-2	中国 China
W65	Esb - Fgr - 1	德国 Germany	W232	Zheshuang-758-2	中国 China
W67	Luna	德国 Germany	W233	Huyouqing	中国 China
W69	Lisonne	德国 Germany	W243	Meijian-1	中国 China
W70	Rosko	德国 Germany	W247	ZAAS-M5	中国 China
W72	Liglory	德国 Germany	W248	ZAAS-M6	中国 China
W77	Diamant	德国 Germany	W252	ZAAS-M61	中国 China
W78	Nevin	德国 Germany	W253	ZAAS-MS-26	中国 China
W81	Echo	德国 Germany	W256	Fuyou-2-2	中国 China
W87	Kurander	德国 Germany	W257	ZY036	中国 China
W88	Belinda	德国 Germany	W259	Zheshuang-72-1	中国 China
W89	St. Si 7450/76, Norli	德国 Germany	W267	DWKL	中国 China
W97	Atlas	德国 Germany	W269	Zheshuang-8	中国 China
W100	Sonnengold	德国 Germany	W270	U1-5	中国 China
W110	Masora	德国 Germany	W272	Ningyou-7 (CHN)	中国 China
W113	Bnw 1.101/88	德国 Germany	W277	CH33-6	中国 China
W114	Bnw 1.63/83	德国 Germany	ZS11	ZS11	中国 China

性状指标值与镁正常条件下的性状指标值的比值。低镁胁迫下的单株干物质质量与镁正常条件下的单株干物质质量的比值定义为镁效率系数。

#### 1.4 数据处理与分析

采用 WPS Office Excel 进行数据整理,采用 SPSS 22.0 进行方差分析和相关性分析,用 Origin 进行图形绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 低镁胁迫对甘蓝型油菜群体苗期生长的影响

如图1所示,除正常镁和低镁条件下的根系镁累积量之外,其余各性状均表现为正态分布特征的连续变异,低镁胁迫下,甘蓝型油菜群体90个品种各表型性状呈现不同程度的降低,镁正常条件下,地上部鲜物质量、根系鲜物质量、单株鲜物质量、地上部干物质质量、根系干物质质量、单株干物质质量、根冠比、地上部镁累积量、根系镁累积量和单株镁累积量的变化分别为0.29~42.43 g/plant、0.18~6.88 g/plant、0.68~47.91 g/plant、0.362 8~2.142 1 g/plant、0.035 1~0.306 3 g/plant、0.403 8~2.443 5 g/plant、0.075 0~0.187 0、1.013 5~10.256 8 mg/plant、0.034 4~1.574 1 mg/plant、1.104 3~10.652 1 mg/plant,明显高于低镁胁迫下各性状的表型变化(0.20~10.47 g/plant、0.04~1.22 g/plant、0.60~11.62 g/plant、0.119 3~0.797 2 g/plant、0.008 4~0.061 5 g/plant、0.127 7~0.858 6 g/plant、0.049 6~0.141 6、0.035 9~0.866 5 mg/plant、0.004 8~0.110 4 mg/plant、0.040 7~0.906 7 mg/plant)。结果表明,镁对甘蓝型油菜的正常生长发育非常重要。

对2个供镁条件下甘蓝型油菜自然群体90个品种苗期10项性状指标进行统计分析,结果显示,10项性状指标在低镁胁迫下的平均值相对于镁正常条件均呈现下降趋势,并且除根冠比以外其余9项指标在2个镁处理下均达到极显著差异(表2),说明低镁胁迫对油菜苗期生长具有较强的抑制作用。2个镁处理下甘蓝型油菜苗期各性状均表现出不同程度的变异,镁正常处理和低镁胁迫处理下各性状变异系数范围分别为14.8%~82.94%、18.23%~80.82%,表明90个甘蓝型油菜品种间具有较丰富的遗传变异,同时也表明低镁胁迫对各个性状的影响程度不同,难以通过单个性状评价甘蓝型油菜镁效率。

### 2.2 甘蓝型油菜群体耐镁系数及相关性分析

如表3所示,总体上,甘蓝型油菜自然群体各基

因型在低镁胁迫后,地上部鲜物质量等10个性状的耐低镁系数平均值均小于1,10个性状指标的耐低镁系数的变异系数范围为18.949%~65.583%,具体表现为相对根系镁累积量>相对根系鲜物质量>相对单株镁累积量>相对地上部镁累积量>相对根系干物质质量>相对地上部鲜物质量>相对单株鲜物质量>相对单株干物质质量>相对地上部干物质质量>相对根冠比,甘蓝型油菜不同品种各性状的耐低镁系数变化幅度较大,说明在低镁胁迫下这些性状在不同基因型间的变化趋势不同。进一步分析10项性状的耐低镁系数间的相关性,结果如图2所示,各性状间均呈显著正相关,如,相对单株镁累积量、相对根系镁累积量、相对根系干物质质量、相对单株鲜物质量、相对根系鲜物质量和相对地上部鲜物质量均与其他性状耐低镁系数呈极显著相关。

### 2.3 甘蓝型油菜群体镁营养效率评价

如图3所示,以干物质生物量为评价指标,依据甘蓝型油菜群体苗期在镁正常条件下的生物量表现及其对低镁胁迫的敏感度(镁效率系数),将甘蓝型油菜群体90个基因型划分为4个类型。(1)高效低敏感型(A区):CK条件下生物量较大,对低镁胁迫敏感性低,生物量降幅小,表现为CK条件下生物量高于平均值且镁效率系数高于平均值,定义为镁高效基因型,该区共14个品种;(2)高效高敏感型(B区):CK条件下生物量较大,对低镁胁迫敏感性高,生物量降幅大,表现为CK条件下生物量高于平均值且镁效率系数低于平均值,该区共21个品种;(3)低效高敏感型(C区):该区品种在CK条件下生物量较小,对低镁胁迫敏感性高,生物量降幅大,表现为CK条件下生物量低于平均值且镁效率系数低于平均值,定义为镁低效基因型,该区共19个品种;(4)低效低敏感型(D区),CK条件下生物量较小,对低镁胁迫敏感性低,生物量降幅小,该区共36个品种。结果表明,群体中大部分品种镁效率和对低镁敏感性处于中等水平,少部分品种镁效率处于极端水平。

### 2.4 甘蓝型油菜群体镁营养效率极端差异种质的评价

进一步分析评价上述14个高效低敏感型品种和19个低效高敏感型的33个极端品种单株镁累积量性状,筛选出6个镁高效候选基因型:W16、W97、W100、W116、W4、W252(表4),6个镁低效候选基因型:W248、W61、W132、W230、W14、W7(表5)。

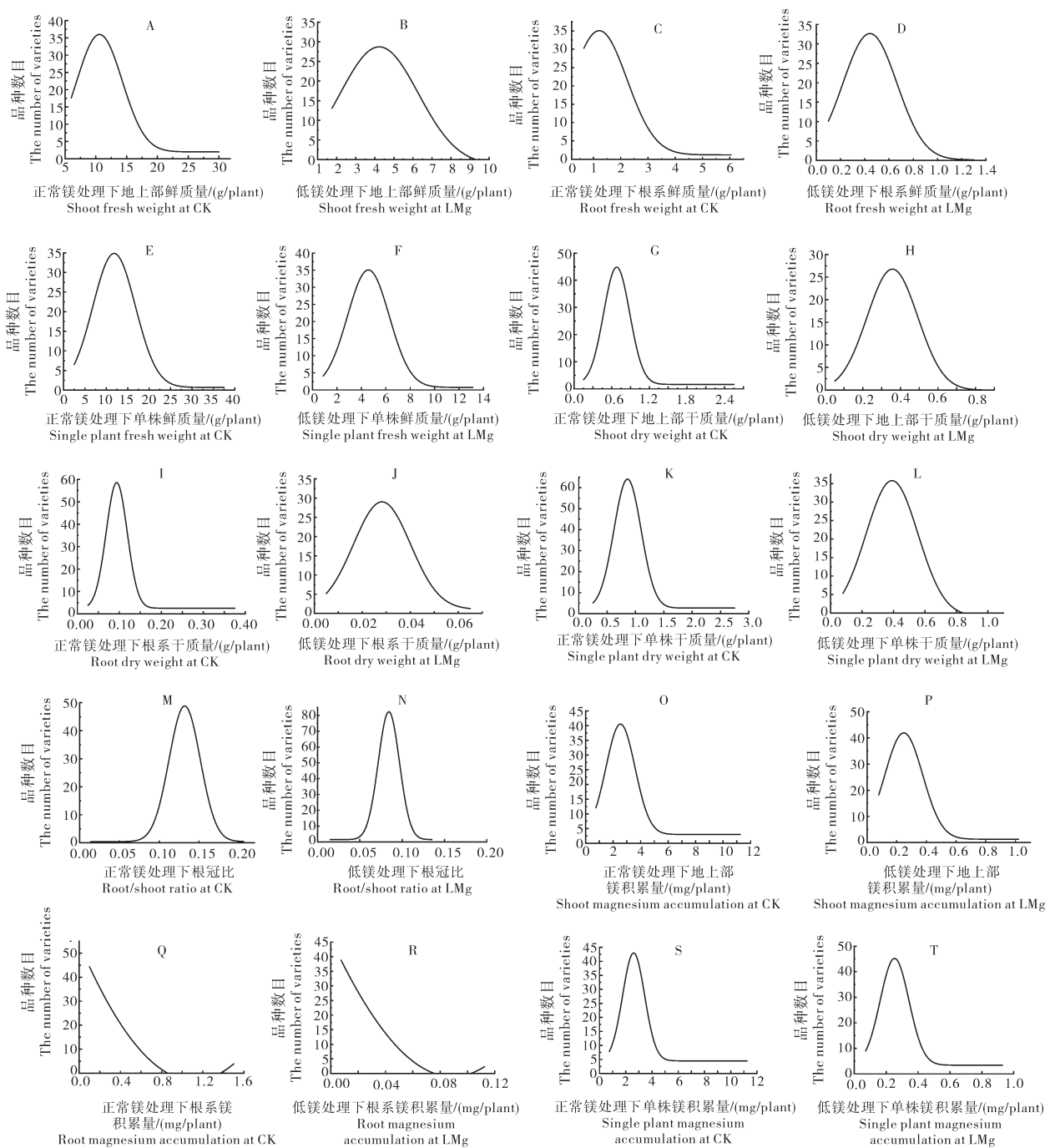


图1 甘蓝型油菜自然群体90份品种各性状的频率分布

Fig. 1 Frequency distribution of all traits of *Brassica napus* natural population 90 varieties

2.5 甘蓝型油菜镁高、低效候选基因型的验证及镁高效种质的筛选

进一步通过营养液培养试验考查和验证12个镁高、低效候选基因型在镁正常和低镁条件下的干物质生物量、镁吸收积累量和镁效率等性状,由图4可见,CK条件下,6个镁高效候选基因型的干物质生物量与6个镁低效候选基因型总体差异不明显,低镁条件下,6个镁高效候选基因型的干物质生物量总体高

于6个镁低效候选基因型。以低镁处理下单株干物质质量相对于镁正常条件下的比值为基于生物量的镁效率系数,6个镁高效候选基因型的镁效率系数明显高于6个镁低效候选基因型,其中W16和W100的镁效率系数最高(0.947 7和0.850 2),W61和W132的镁效率系数最低(0.294 0和0.327 4)。镁吸收积累量结果如图5所示,以低镁处理下单株镁积累量相对于镁正常条件下的比值为镁吸收量镁效率系数,6个镁

表 2 2 个镁处理下甘蓝型油菜群体苗期各性状的变异幅度  
Table 2 Variation amplitude of each trait in *Brassica napus* population seedling stage under two Mg treatments

性状 Traits	处理 Treat- ment	平均值 Mean	标准差 SD	最小值 Min.	最大值 Max.	变异系 数% CV	显著性 Signifi- cance
SFW	CK	12.02	5.56	0.29	42.43	46.26	**
	LMg	4.43	1.96	0.20	10.47	44.24	
RFW	CK	1.67	1.07	0.18	6.88	64.07	**
	LMg	0.47	0.23	0.04	1.22	48.94	
TFW	CK	13.80	6.48	0.68	47.91	46.96	**
	LMg	4.94	2.14	0.60	11.62	43.32	
SDW	CK	0.815 6	0.355 4	0.362 8	2.142 1	43.58	**
	LMg	0.374 1	0.134 5	0.119 3	0.797 2	35.95	
RDW	CK	0.108 7	0.0509	0.035 1	0.306 3	46.83	**
	LMg	0.031 0	0.011 8	0.008 4	0.061 5	38.06	
TDW	CK	0.924 3	0.403 4	0.403 8	2.443 5	43.64	**
	LMg	0.405 1	0.145 1	0.127 7	0.858 6	35.82	
RSR	CK	0.132 7	0.019 6	0.075 0	0.187 0	14.80	*
	LMg	0.083 5	0.015 2	0.049 6	0.141 6	18.23	
SMgA	CK	3.115 7	1.752 3	1.013 5	10.256 8	56.24	**
	LMg	0.274 2	0.146 7	0.035 9	0.866 5	53.49	
RMgA	CK	0.273 2	0.226 6	0.034 4	1.574 1	82.94	**
	LMg	0.023 6	0.019 1	0.004 8	0.110 4	80.82	
TMgA	CK	3.402 4	1.883 7	1.104 3	10.652 1	55.36	**
	LMg	0.297 8	0.157 2	0.040 7	0.906 7	52.79	

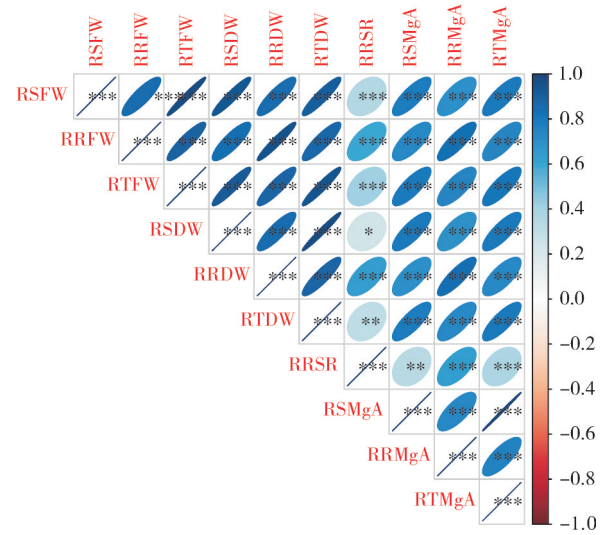
注: SFW: 地上部鲜物质量; RFW: 根系鲜物质量; TFW: 单株鲜物质量; SDW: 地上部干物质量; RDW: 根系干物质量; TDW: 单株干物质量; RSR: 根冠比; SMgA: 地上部镁累积量; RMgA: 根系镁累积量; TMgA: 单株镁累积量。\*、\*\* 分别表示 CK 与 LMg 处理间在 0.05 和 0.01 水平差异显著。下同。Note: SFW: Shoot fresh weight; RFW: Root fresh weight; TFW: Total fresh weight; SDW: Shoot dry weight; RDW: Root dry weight; TDW: Total dry weight; RSR: Root shoot ratio; SMgA: Shoot magnesium accumulation; RMgA: Root magnesium accumulation; TMgA: Total magnesium accumulation. \*, \*\* indicate significant difference at 0.05 and 0.01 levels between CK and LMg. The same as below.

高效候选基因型的镁效率系数总体明显高于 6 个镁低效候选基因型, 其中 W16 和 W100 的镁效率系数最高(0.36 和 0.41), W61 和 W132 的镁效率系数最低(0.14 和 0.14)。综上, W16 和 W100 为甘蓝型油菜镁高效基因型, W61 和 W132 为甘蓝型油菜镁低效基因型。

表 3 甘蓝型油菜群体苗期各性状的耐低镁相对性状  
Table 3 Mg stress resistance relative character of each trait in *Brassica napus* population at seedling stage

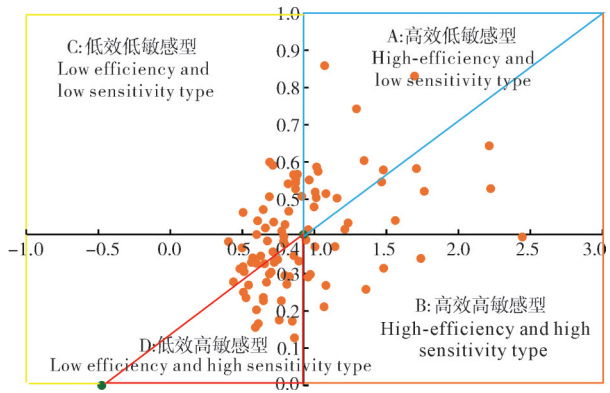
指标 Index	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	标准差 SD	变异系 数/% CV
RSFW	0.111 3	0.870 9	0.395 8	0.159	40.247
RRFW	0.064 2	0.835 0	0.339 1	0.166	49.047
RTFW	0.107 5	0.818 1	0.386 2	0.155	40.189
RSDW	0.158 9	0.991 8	0.499 3	0.185	37.146
RRDW	0.075 9	0.794 6	0.321 7	0.144	44.763
RTDW	0.148 2	0.966 9	0.474 0	0.177	37.375
RRSR	0.361 5	0.994 1	0.637 5	0.121	18.949
RSMgA	0.022 7	0.309 6	0.098 2	0.046	46.934
RRMgA	0.017 5	0.435 0	0.104 8	0.069	65.583
RTMgA	0.022 5	0.309 0	0.098 3	0.046	47.100

注: RSFW: 相对地上部鲜物质量; RRFW: 相对根系鲜物质量; RTFW: 相对单株鲜物质量; RSDW: 相对地上部干物质量; RRDW: 相对根系干物质量; RTDW: 相对单株干物质量; RRSR: 相对根冠比; RSMgA: 相对地上部镁累积量; RRMgA: 相对根系镁累积量; RTMgA: 相对单株镁累积量。下同。Note: RSFW: Relative shoot fresh weight; RRFW: Relative root fresh weight; RTFW: Relative total fresh weight; RSDW: Relative shoot dry weight; RRDW: Relative root dry weight; RTDW: Relative total dry weight; RRSR: Relative root shoot ratio; RSMgA: Relative shoot magnesium accumulation; RRMgA: Relative root magnesium accumulation; RTMgA: Relative total magnesium accumulation. The same as below.



\*表示在 0.05 水平上显著相关; \*\*表示在 0.01 水平上显著相关; \*\*\*表示在 0.001 水平上显著相关。\* represents significant correlation at the 0.05 level; \*\* represents significant correlation at the 0.01 level; \*\*\* represents significant correlation at the 0.001 level.

图 2 甘蓝型油菜群体苗期各性状耐低镁系数的相关性分析  
Fig. 2 Correlation analysis of Mg stress resistance coefficients of each single indicator in *Brassica napus* population seedling stage



以CK和LMg条件下平均生物量为原点 $O(0.92, 0.41)$ ,以CK条件下的干物质生物量为X轴,以LMg条件下干物质生物量为Y轴建立坐标系,过原点的斜线斜率 $K=0.478$ 为90个基因型镁效率系数的平均值,在此线以上的点表示镁效率系数大于0.478,在此线之下表示镁效率系数小于0.478。Taking the average biomass under CK and LMg conditions as the origin  $O(0.92, 0.41)$ , with the dry matter biomass under CK conditions as the X-axis and the dry matter biomass under LMg conditions as the Y-axis, a coordinate system was established. The slope  $K$  value (0.478) of the line passing through the origin represents the average Mg efficiency coefficient of 90 varieties. The points above this line indicate a Mg efficiency coefficient greater than 0.478, while the points below it indicate a coefficient less than 0.478.

图 3 甘蓝型油菜群体镁效率评价  
Fig. 3 Evaluation of Mg efficiency in *Brassica napus* population

表 4 不同镁处理下高效低敏感型品种单株  
镁累积量和相对单株镁累积量

Table 4    Total Mg accumulation and relative total Mg accumulation of high efficiency and low sensitivity genotype under different			
		Mg treatments	mg/plant
基因型	单株镁累积量		相对单株镁累积量
Genotype	Total Mg accumulation		Relative total Mg
	CK	LMg	accumulation
W220	4.002 3±0.78	0.285 0±0.06	0.071 2±0.00
W15	4.263 1±0.91	0.318 6±0.02	0.074 7±0.02
W119	3.395 0±0.47	0.274 6±0.13	0.080 9±0.05
W18	7.087 4±1.00	0.577 1±0.14	0.081 4±0.01
W63	4.508 0±1.40	0.412 9±0.07	0.091 6±0.05
W196	7.328 0±0.64	0.703 3±0.01	0.096 0±0.01
W252	6.806 4±0.21	0.667 4±0.01	0.098 1±0.01
W4	5.077 3±0.45	0.512 0±0.07	0.100 8±0.04
W223	3.196 6±0.93	0.349 1±0.06	0.109 2±0.04
W89	3.275 4±0.77	0.363 3±0.04	0.110 9±0.01
W116	5.215 5±0.03	0.597 8±0.18	0.114 6±0.04
W100	1.860 7±0.58	0.220 3±0.04	0.118 4±0.02
W97	3.430 7±0.03	0.562 2±0.01	0.163 9±0.00
W16	1.448 3±0.08	0.283 0±0.00	0.195 4±0.01

表 5 不同镁处理下低效高敏感品种单株镁累积量  
和相对单株镁累积量

Table 5 Total Mg accumulation and relative total Mg accumulation of low efficiency and high sensitivity genotype under different			
	Mg treatments		mg/plant
基因型 Genotype	单株镁累积量 Total Mg accumulation		相对单株镁累积量 Relative total Mg accumulation
	CK	LMg	
W248	7.886 3±1.20	0.191 1±0.03	0.024 2±0.01
W61	1.542 4±0.29	0.040 7±0.01	0.026 4±0.00
W132	1.828 8±0.21	0.070 4±0.00	0.038 5±0.00
W230	1.991 9±0.71	0.097 6±0.01	0.049 0±0.02
W14	1.400 4±0.31	0.073 4±0.01	0.052 4±0.01
W7	1.697 9±0.12	0.089 0±0.01	0.052 4±0.01
W56	2.048 1±0.06	0.118 9±0.04	0.058 1±0.00
W195	3.164 9±0.66	0.210 5±0.01	0.066 5±0.02
W233	2.886 8±0.79	0.192 3±0.06	0.066 6±0.04
W256	2.812 8±0.38	0.200 7±0.02	0.071 3±0.02
W17	1.540 2±0.41	0.112 8±0.08	0.073 2±0.03
W128	2.099 5±0.05	0.154 4±0.06	0.073 5±0.03
W140	1.954 3±0.11	0.147 1±0.02	0.075 2±0.00
W142	1.696 8±0.62	0.143 5±0.08	0.084 5±0.02
W257	3.923 4±1.28	0.335 6±0.06	0.085 5±0.04
W267	1.857 4±0.36	0.170 8±0.03	0.092 0±0.04
W134	2.001 8±0.70	0.194 4±0.00	0.097 1±0.03
W146	1.615 7±0.47	0.162 1±0.03	0.100 3±0.00
W199	2.317 3±0.56	0.382 3±0.05	0.165 0±0.02

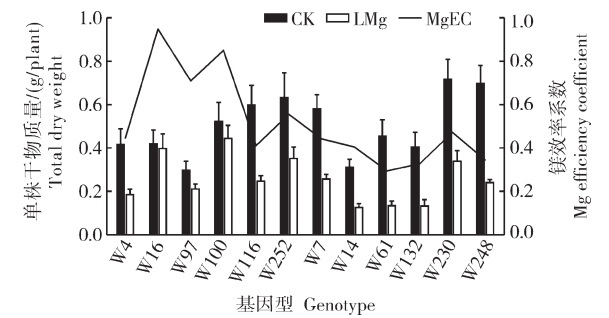


图 4 甘蓝型油菜镁高、低效候选基因型的  
单株干物质质量和镁效率系数

Fig. 4 Total dry weight and Mg efficiency coefficient of the *Brassica napus* candidate Mg-efficient and Mg-inefficient genotype

3 讨 论

镁可能是油菜除氮、磷、钾、硼外最需要通过施肥补充的养分<sup>[22]</sup>。随着高产优质品种推广以及氮磷

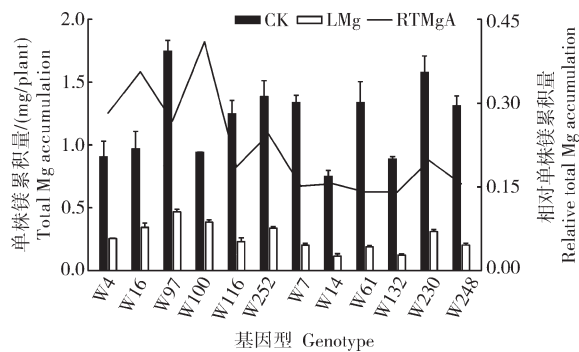


图5 甘蓝型油菜镁高、低效候选基因型的  
单株镁累积量和相对单株镁累积量

Fig. 5 Total Mg accumulation and relative total  
Mg accumulation of the *Brassica napus* candidate  
Mg-efficient and Mg-inefficient genotype

钾的大量施用,土壤中的镁营养不断消耗、不能及时补充<sup>[23]</sup>,且因 $Mg^{2+}$ 水合半径较大而导致易淋失<sup>[24]</sup>加之长江流域油菜主产区土壤酸化导致土壤中 $H^+$ 、 $NH_4^+$ 、 $Al^{3+}$ 、 $K^+$ 和 $Ca^{2+}$ 等阳离子阻碍了根系对镁的吸收<sup>[25]</sup>,缺镁已成为严重影响我国油菜产量和品质提升的重要限制因子。筛选镁高效甘蓝型油菜品种为解决油菜镁生物有效性低的最有效途径之一。本研究通过营养液培养试验,采用群体筛选和候选基因型验证筛选对甘蓝型油菜自然群体90个品种进行苗期镁效率的评价和镁高效基因型的筛选。

作物养分高效及抗性种质筛选生育时期的选择非常重要。褚海燕等<sup>[26]</sup>提出了采用两步筛选法,先在苗期进行初筛再通过大田全生育期试验复筛获得甘蓝型油菜磷高效品种。苗期是油菜的养分临界期及关键时期,对后期的生长发育起重要作用<sup>[27]</sup>,因此,不少研究者主要通过苗期的筛选试验有效鉴定和筛选养分高效抗逆品种。如,张海伟等<sup>[28]</sup>利用甘蓝型油菜重组自交系通过苗期营养液培养筛选到磷极端高效和低效品种;张雯等<sup>[29]</sup>通过苗期试验对甘蓝型油菜群体进行了铝耐受性评价并筛选出铝抗性种质。本研究通过苗期营养液培养试验对甘蓝型油菜自然群体<sup>[30]</sup>90个品种的10个镁效率相关性状镁效率变异情况进行评价,以生物量和镁效率系数指标为主要依据,将90个品种筛分成了4个类群,并结合苗期复筛试验最终筛选出了2个镁高效和2个镁低效甘蓝型油菜品种。Sun等<sup>[21]</sup>利用39个甘蓝型油菜品种通过苗期筛选试验,筛选出低镁耐性和敏感性品种,并开展了耐性机理的研究,结果表明通过苗期的筛选不仅可以筛得较理想的养分高效种质,还可以节省筛选试验的工作量和成本。小麦<sup>[31]</sup>、谷

子<sup>[32]</sup>、燕麦<sup>[33]</sup>和绿豆<sup>[34]</sup>等作物已通过苗期评价与筛选试验获得养分高效抗逆品种。

能否筛选出更优异的养分高效抗逆种质,筛选样本规模的选择非常关键。筛选群体规模越大意味着品种间遗传差异越丰富,筛选的养分高效抗逆品种就越可靠。如,张海伟等<sup>[28]</sup>选用的137个甘蓝型油菜重组自交系磷效率相关性状变异系数在30%以上,表现出丰富的遗传变异,并最终通过苗期筛选获得了差异极显著的磷高、低效品种。Duan等<sup>[35]</sup>采用两步筛选法对194个甘蓝型油菜品种通过盆栽试验筛选出了12个极端磷高效和低效品种,进一步通过大田试验鉴定出磷高效品种97081和低效品种97009。陈燕玲等<sup>[36]</sup>选用的400份甘蓝型油菜自然群体其苗期生物量及磷效率性状变异系数达40%左右,初步筛选出32份磷高效候选品种和31份磷低效候选品种,并通过大田试验对产量进行验证,鉴定出稳定可靠的磷高效和低效品种。张雯等<sup>[29]</sup>通过苗期盆栽试验对甘蓝型油菜997个品种进行初筛和复筛,评价了铝毒抗性,并最终筛选出2个铝抗性品种和2个铝毒敏感品种,为甘蓝型油菜铝毒抗性机制及遗传改良提供了坚实基础。本研究选用甘蓝型油菜自然群体90个品种,通过苗期初筛和验证筛选等两步镁效率评价,最终筛选出差显著的镁高效和低效品种。

选定作物养分高效及抗逆品种筛选的紧密连锁相关且有效的筛选指标也非常重要<sup>[37]</sup>,应根据筛选目标选定最相关的性状指标来评价和筛选养分高效抗逆品种。Duan等<sup>[35]</sup>研究证实油菜苗期以磷效率系数和低磷地上部生物量为指标筛选磷高、低效油菜品种的可行性。夏龙飞等<sup>[38]</sup>以甘蔗苗期地上部生物量、株高、磷累积量、磷素利用效率和第5叶磷含量为甘蔗磷高效品种筛选的关键性状指标。徐子先<sup>[39]</sup>以生物量和氮效率系数性状为主要指标筛选甘蓝型油菜氮高效品种。廖博<sup>[40]</sup>通过26个甘蓝型油菜品种的主成分分析表明地上部干质量与镁含量在主成分1上的占比均大于0.7,属于重要影响指标,并进一步采用聚类分析筛选出甘蓝型油菜镁稳定(高效)和敏感(低效)品种。本研究分析了甘蓝型油菜鲜/干物质生物量、镁吸收累积量和镁效率系数的变异情况,结果显示这3类性状间呈极显著正相关(图2),最终主要利用干物质生物量和镁效率系数来评价群体90个品种,获得14个高效低敏感型和19个低效高敏感型品种,然后结合这33个品种的相对镁累积量变异

情况初步筛选出镁高效候选基因型和低效候选基因型各6个品种,最终通过验证筛选获得镁高效、低效品种各2个。综上,生物量、镁累积量以及镁效率系数是甘蓝型油菜苗期镁效率评价及镁高效种质筛选的关键有效性状指标。

## 参考文献 References

- [1] CHEN Z C, PENG W T, LI J, et al. Functional dissection and transport mechanism of magnesium in plants [J]. *Seminars in cell & developmental biology*, 2018, 74: 142-152.
- [2] MARCHNER H, MARSCHNER P. Marschner's mineral nutrition of higher plants [M]. London: Waltham Academic Press, 2012.
- [3] DE BANG T C, HUSTED S, LAURSEN K H, et al. The molecular-physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants [J]. *New phytologist*, 2021, 229(5): 2446-2469.
- [4] TRÄNKNER M, TAVAKOL E, JÁKLI B. Functioning of potassium and magnesium in photosynthesis, photosynthate translocation and photoprotection [J/OL]. *Physiologia plantarum*, 2018; 12747 [2025-07-07]. <https://doi.org/10.1111/ppl.12747>.
- [5] JAMALI JAGHDANI S, JAHNS P, TRÄNKNER M. Mg deficiency induces photo-oxidative stress primarily by limiting CO<sub>2</sub> assimilation and not by limiting photosynthetic light utilization [J/OL]. *Plant science*, 2021, 302: 110751 [2025-07-07]. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2020.110751>.
- [6] RUDE R K, SINGER F R, GRUBER H E. Skeletal and hormonal effects of magnesium deficiency [J]. *Journal of the American college of nutrition*, 2009, 28(2): 131-141.
- [7] GUO W L, NAZIM H, LIANG Z S, et al. Magnesium deficiency in plants: an urgent problem [J]. *The crop journal*, 2016, 4(2): 83-91.
- [8] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021. National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China statistical yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021 (in Chinese).
- [9] 邹娟, 鲁剑巍, 吴江生, 等. 4个双低甘蓝型油菜品种钙、镁、硫吸收动态 [J]. *华中农业大学学报*, 2009, 28(3): 295-299. ZOU J, LU J W, WU J S, et al. Dynamics of calcium, magnesium and sulfur uptake in 4 double-low rapeseed (*Brassica napus* L.) varieties [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2009, 28(3): 295-299 (in Chinese with English abstract).
- [10] 任涛, 郭丽璇, 张丽梅, 等. 我国冬油菜典型种植区域土壤养分现状分析 [J]. *中国农业科学*, 2020, 53(8): 1606-1616. REN T, GUO L X, ZHANG L M, et al. Soil nutrient status of oilseed rape cultivated soil in typical winter oilseed rape production regions in China [J]. *Scientia agricultura sinica*, 2020, 53(8): 1606-1616 (in Chinese with English abstract).
- [11] ZHANG L D, PENG Y Y, LI J, et al. OsMGT1 confers resistance to magnesium deficiency by enhancing the import of Mg in rice [J/OL]. *International journal of molecular sciences*, 2019, 20(1): 207 [2025-07-07]. <https://doi.org/10.3390/ijms20010207>.
- [12] ZHANG B, ZHANG C, TANG R J, et al. Two magnesium transporters in the chloroplast inner envelope essential for thylakoid biogenesis in *Arabidopsis* [J]. *New phytologist*, 2022, 236(2): 464-478.
- [13] 徐永成. 全基因组关联分析发掘水稻镁高效吸收遗传变异位点和材料 [D]. 南京: 南京农业大学, 2020. XU Y C. Genome-wide association study excavated genetic variation sites and materials with high magnesium absorption efficiency in rice [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [14] ANWAR A, AKHTAR J, ALEEM S, et al. Genome-wide identification of MGT gene family in soybean (*Glycine max*) and their expression analyses under magnesium stress conditions [J/OL]. *BMC plant biology*, 2025, 25(1): 83 [2025-07-07]. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05985-7>.
- [15] REGON P, CHOWRA U, AWASTHI J P, et al. Genome-wide analysis of magnesium transporter genes in *Solanum lycopersicum* [J]. *Computational biology and chemistry*, 2019, 80: 498-511.
- [16] WANG Y J, HUA X T, XU J S, et al. Comparative genomics revealed the gene evolution and functional divergence of magnesium transporter families in *saccharum* [J/OL]. *BMC genomics*, 2019, 20(1): 83 [2025-07-07]. <https://doi.org/10.1186/s12864-019-5437-3>.
- [17] LI H Y, WANG N, DING J Z, et al. The maize *CorA/MRS2/MGT*-type Mg transporter, *ZmMGT10*, responses to magnesium deficiency and confers low magnesium tolerance in transgenic *Arabidopsis* [J]. *Plant molecular biology*, 2017, 95(3): 269-278.
- [18] MENG S F, ZHANG B, TANG R J, et al. Four plasma membrane-localized MGR transporters mediate xylem Mg<sup>2+</sup> loading for root-to-shoot Mg<sup>2+</sup> translocation in *Arabidopsis* [J]. *Molecular plant*, 2022, 15(5): 805-819.
- [19] SAITO T, KOBAYASHI N I, TANOI K, et al. Expression and functional analysis of the *CorA-MRS2-ALR*-type magnesium transporter family in rice [J]. *Plant & cell physiology*, 2013, 54(10): 1673-1683.
- [20] LI J, YOKOSHO K, LIU S, et al. Diel magnesium fluctuations in chloroplasts contribute to photosynthesis in rice [J]. *Nature plants*, 2020, 6(7): 848-859.
- [21] SUN J J, LI S T, WANG S F, et al. Characterization of the main magnesium transporters mediating different Mg translocation from root to shoot between Mg-tolerant and Mg-sensitive *Brassica napus* cultivars under magnesium deficiency stress [J]. *Plant and soil*, 2019, 445(1): 453-468.

- [22] 陆志峰,任涛,鲁剑巍.我国冬油菜种植区土壤有效镁状况与油菜施镁效果[J].华中农业大学学报,2021,40(2):17-23.LU Z F,REN T,LU J W.Soil available magnesium status and effects of magnesium application on rapeseed yield in main producing area of China[J].Journal of Huazhong Agricultural University,2021,40(2):17-23(in Chinese with English abstract).
- [23] 白由路,金继运,杨俐苹.我国土壤有效镁含量及分布状况与含镁肥料的应用前景研究[J].土壤肥料,2004(2):3-5.BAI Y L,JIN J Y,YANG L P.Study on the content and distribution of soil available magnesium and foreground of magnesium fertilizer in China[J].Soils and fertilizers,2004(2):3-5 (in Chinese with English abstract).
- [24] MAGUIRE M E,COWAN J A.Magnesium chemistry and biochemistry[J].Biometals,2002,15(3):203-210.
- [25] SENBAYRAM M,GRANSEE A,WAHLE V,et al.Role of magnesium fertilisers in agriculture:plant - soil continuum[J].Crop and pasture science,2015,66(12):1219-1229.
- [26] 褚海燕,喻敏,王运华,等.甘蓝型油菜品种硼利用效率的差异研究[J].华中农业大学学报,1999,18(2):38-42.CHU H Y,YU M,WANG Y H,et al.Study on the difference of boron utilization efficiency of *Brassica napus* varieties[J].Journal of Huazhong Agricultural University,1999,18(2):38-42 (in Chinese with English abstract).
- [27] 刘波,魏全全,鲁剑巍,等.苗期渍水和氮肥用量对直播冬油菜产量及氮肥利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(1):144-153.LIU B,WEI Q Q,LU J W,et al.Effects of waterlogging at the seedling stage and nitrogen application on seed yields and nitrogen use efficiency of direct-sown winter rapeseed (*Brassica napus* L.) [J].Journal of plant nutrition and fertilizer,2017,23(1):144-153 (in Chinese with English abstract).
- [28] 张海伟,黄宇,叶祥盛,等.甘蓝型油菜重组自交系苗期磷效率的评价[J].作物学报,2008,34(12):2152-2159.ZHANG H W,HUANG Y,YE X S,et al.Evaluation of phosphorus efficiency in rapeseed (*Brassica napus* L.) recombinant inbred lines at seedling stage [J].Acta agronomica sinica,2008,34(12):2152-2159(in Chinese with English abstract).
- [29] 张雯,黄益丹,张鹏超,等.甘蓝型油菜耐铝极端品种筛选及耐铝生理机制初步解析[J].华中农业大学学报,2023,42(6):154-163.ZHANG W,HUANG Y D,ZHANG P C,et al.Screening extreme varieties with aluminum tolerance and analyzing physiological mechanisms of aluminum tolerance in *Brassica napus* [J].Journal of Huazhong Agricultural University,2023,42(6):154-163 (in Chinese with English abstract).
- [30] WU D Z,LIANG Z,YAN T,et al.Whole-genome resequencing of a worldwide collection of rapeseed accessions reveals the genetic basis of ecotype divergence [J].Molecular plant,2019,12(1):30-43.
- [31] 张恒,陈艳琦,任杰莹,等.西南麦区小麦苗期氮高效品种筛选及指标体系构建[J].四川农业大学学报,2022,40(1):10-18.ZHANG H,CHEN Y Q,REN J Y,et al.Screening of wheat cultivars with high nitrogen efficiency at seedling stage and construction of index system in southwest wheat region [J].Journal of Sichuan Agricultural University,2022,40(1):10-18 (in Chinese with English abstract).
- [32] 连盈,卢娟,胡成梅,等.低氮胁迫对谷子苗期性状的影响和耐低氮品种的筛选[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(4):523-534.LIAN Y,LU J,HU C M,et al.Effects of low nitrogen stress on foxtail millet seedling characteristics and screening of low nitrogen tolerant varieties[J].Chinese journal of eco-agriculture,2020,28(4):523-534 (in Chinese with English abstract).
- [33] 付鸾鸿,于崧,于立河,等.不同基因型燕麦萌发期耐盐碱性分析及其鉴定指标的筛选[J].作物杂志,2018(6):27-35.FU L H,YU S,YU L H,et al.Analysis of saline-alkaline tolerance and screening of identification indexes of different oat genotypes at the germination stage[J].Crops,2018(6):27-35 (in Chinese with English abstract).
- [34] 于崧,郭潇潇,梁海芸,等.不同基因型绿豆萌发期耐盐碱性分析及其鉴定指标的筛选[J].植物生理学报,2017,53(9):1629-1639.YU S,GUO X X,LIANG H Y,et al.Analysis of saline-alkaline tolerance and screening of identification indicators at the germination stage among different mung bean genotypes [J].Plant physiology journal,2017,53(9):1629-1639 (in Chinese with English abstract).
- [35] DUAN H Y,SHI L,YE X S,et al.Identification of phosphorous efficient germplasm in oilseed rape[J].Journal of plant nutrition,2009,32(7):1148-1163.
- [36] 陈燕玲,王宁,石磊.甘蓝型油菜自然群体苗期磷效率分析及磷高效优异种质筛选[J].中国油料作物学报,2023,45(1):56-62.CHEN Y L,WANG N,SHI L.Analysis of phosphorus efficiency and screening of P-efficient germplasm on natural population of oilseed rape (*Brassica napus*) at seedling stage [J].Chinese journal of oil crop sciences,2023,45(1):56-62 (in Chinese with English abstract).
- [37] 张鹏超,张雯,黄益丹,等.甘蓝型油菜苗期耐酸性综合评价及耐酸种质筛选[J].华中农业大学学报,2023,42(6):164-174.ZHANG P C,ZHANG W,HUANG Y D,et al.Comprehensive evaluation of acid-tolerance and screening of acid-tolerant germplasm in *Brassica napus* at seedling stage [J].Journal of Huazhong Agricultural University,2023,42(6):164-174(in Chinese with English abstract).
- [38] 夏龙飞,易科,张木清,等.甘蔗磷效率基因型差异及磷高效基因型筛选研究[J].热带作物学报,2017,38(5):873-880.XIA L F,YI K,ZHANG M Q,et al.Genotypic differences of phosphorus efficiency and screening of phosphorus efficient cultivars in sugarcane[J].Chinese journal of tropical crops,2017,38(5):873-880 (in Chinese with English abstract).
- [39] 徐子先.甘蓝型油菜氮效率评价及其差异的生理机制探究[D].北京:中国农业科学院,2017.XU Z X.Evaluation of nitrogen efficiency in *Brassica napus* and physiological mecha-

- nism of its differences[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [40] 廖博. 镁营养缺乏对油菜叶片同化物积累的影响及其生理机制[D]. 武汉: 华中农业大学, 2024. LIAO B. Effect of magnesium deficiency on the accumulation of assimilates in oilseed rape leaves and its physiological mechanisms [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2024 (in Chinese with English abstract).

## Evaluation of magnesium efficiency in natural populations of oilseed rape at stage of seedling and screening of elite germplasm with high magnesium efficiency

XU Wenying<sup>1</sup>, LIU Liang<sup>1</sup>, ZHANG Kun<sup>2</sup>, ZHANG Haiwei<sup>3</sup>,  
XIAO Qingliang<sup>1</sup>, WU Ketian<sup>1</sup>, YANG Guangzhe<sup>1</sup>, ZHAO Zunkang<sup>1</sup>

1.College of Land Resources and Environment/Jiangxi Province Key Innovation Center for  
Integration of Industry and Education in Resource Utilization of Agricultural Waste and Prevention and  
Control of Non-point Source Pollution, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China;  
2.Jiangxi Provincial Plant Protection and Inspection Station, Nanchang 330096, China;  
3.Jiangxi Institute of Tobacco Sciences, Nanchang 330025, China

**Abstract** Screening magnesium (Mg)-efficient germplasm of oilseed rape (*Brassica napus* L.) will provide elite materials for studying molecular mechanism of Mg efficiency in *Brassica napus*. 90 varieties of natural population of *B. napus* were used to examine 10 traits of the population including the weight of fresh biomass, the weight of dry biomass, the ratio of root to shoot and the accumulation of Mg under low and normal Mg treatments with the two-step screening method of nutrient solution culture at the stage of seedling to screen magnesium efficient varieties of *B. napus* and study the molecular mechanism of magnesium efficiency in *B. napus*. Correlation analysis, cluster analysis, and comprehensive evaluation analysis methods were used to comprehensively evaluate the magnesium efficiency in 90 varieties and screen magnesium efficient varieties. The results showed that there were significant differences in 10 traits of 90 varieties under 2 magnesium treatments, with a coefficient of variation ranging from 14.8% to 82.94%. The coefficient of low-Mg tolerance of 10 traits was significantly positively correlated. 90 varieties were divided into four types including high-efficiency and low sensitivity type (14 varieties), high-efficiency and high sensitivity type (21 varieties), low efficiency and high sensitivity type (19 varieties), and low efficiency and low sensitivity type (36 varieties) based on the weight of dry biomass and the coefficient of magnesium efficiency under normal magnesium conditions as the main indexes for evaluation. The magnesium efficient varieties including W16 and W100 and magnesium inefficient varieties including W61 and W132 of *B. napus* were finally screened out through re-screening verification, which can provide materials for subsequent studies on the molecular mechanism of high magnesium efficiency in *B. napus*.

**Keywords** oilseed rape (*Brassica napus* L.); magnesium (Mg); at the stage of seedling; coefficient of low-Mg tolerance; Mg-efficient variety

(责任编辑: 张志钰)