

甘蓝型油菜苗期地上部7种矿质元素含量的 全基因组关联分析

鲁金春子, 陈敬东, 余 忆, 薛天源, 程 苗, 戴希刚, 曾长立, 万何平

(江汉大学生命科学学院/湖北省汉江流域特色生物资源保护开发与利用工程技术研究中心, 武汉 430056)

摘要: 矿物质元素含量是评估饲草品质和开展品质育种的重要指标。近年来, 油菜作为一种优质高产饲料来源, 在缓解我国饲料原料短缺方面发挥了重要作用。本研究旨在揭示油菜核心种质中主要矿质元素的遗传变异情况, 为选育富含矿质营养元素的饲料油菜提供支持。通过对272份油菜核心种质进行水培处理, 并利用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定甘蓝型油菜地上部分中K、Ca、Na、Mg、Fe、Zn、Cu 7种主要矿质元素的含量。利用全基因组关联分析对其中具有重测序数据的261份油菜种质进行分析, 筛选出与矿质元素含量显著关联的分子标记, 并预测相关的候选基因。研究发现, 矿质元素含量在不同种质中存在显著变异。通过主成分分析将7个矿质元素指标转化为3个新指标, 累计贡献率为68.479%。部分矿质元素间存在显著的相关性。部分种质材料在多种矿质元素含量上表现出极端值。本研究共定位到134个与矿质元素含量相关的SNP位点, 预测到14个候选基因, 该研究为富含矿质元素油菜的选育和新种质创制提供了重要依据。

关键词: ICP-OES; 油菜; 矿质元素; 全基因组关联分析

Genome-Wide Association Study of Seven Mineral Element Contents in the Aerial Parts of *Brassica napus* Seedlings

LU Jingchunzi, CHEN Jingdong, YU Yi, XUE Tianyuan, CHENG Miao,
DAI Xigang, ZENG Changli, WAN Heping

(College of Life Sciences, Jianghan University/Hubei Engineering Research Center for Conservation, Development and Utilization of Characteristic Biological Resources in Hanjiang River Basin, Wuhan 430056)

Abstract: The content of mineral elements is a crucial indicator for evaluating forage quality and breeding. In recent years, rapeseed has become a valuable high-yield forage source, playing a key role in alleviating the shortage of feed resources in China. This study aimed to reveal the genetic variation of major mineral nutrients in the core germplasm of *Brassica napus* and to support the breeding of mineral-rich rapeseed. We evaluated the phenotypic variation in the contents of K, Ca, Na, Mg, Fe, Zn, and Cu in 272 core germplasms of *B. napus* using ICP-OES after hydroponic treatment. Through GWAS, we identified molecular markers significantly associated with the content of these minerals and predicted related candidate genes. The results showed significant variation in mineral content among different germplasms, and principal component analysis transformed the seven mineral indicators into three new indicators, with a cumulative contribution rate of 68.479%. Some significant positive and negative correlations were found between different minerals; some germplasms exhibited extreme values for multiple minerals. A total of 134 SNPs related to mineral content were

收稿日期: 2024-04-09 网络出版日期: 2024-10-15

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20240409002>

第一作者研究方向为油菜矿质元素含量遗传, E-mail: lujchz16@lzu.edu.cn; 陈敬东为共同第一作者

通信作者: 曾长立, 研究方向为植物营养生理与逆境生理、珍稀濒危植物资源保护与利用, E-mail: zengchangli@jhun.edu.cn

万何平, 研究方向为油菜耐盐碱遗传, E-mail: wanheping@jhun.edu.cn

基金项目: 农业生物育种国家科技重大专项(2022ZD04010); 国家自然科学基金(U22A20469); 江汉大学一流学科专项(2022XKZX17)

Foundation projects: Agricultural Biological Breeding National Major Science and Technology Project (2022ZD04010); National Natural Science Foundation of China (U22A20469); Jianghan University First-Class Discipline Program (2022XKZX17)

identified, and 14 candidate genes were predicted. This study provides important insights for the breeding and creation of new germplasm rich in mineral nutrients.

Key words: ICP-OES; *Brassica napus*; mineral elements; genome-wide association analysis

油菜是全球范围内最重要的油料作物之一,其中我国油菜产量占世界总产量的30%^[1]。甘蓝型油菜(*Brassica napus*)由白菜型油菜和甘蓝种间杂交培育得到^[2],作物类型包括油菜(OSR, oilseed rape)、瑞典蔬菜和饲料油菜^[3]。饲料油菜由傅廷栋院士以油菜为基础培育而成,通常以饲油兼用的甘蓝型双低油菜品种为主^[4]。我国农业农村部大力推介“粮改饲”“油改饲”,进行农业供给侧结构性改革^[5],对饲料油菜的研究与推广为缓解优质青绿饲料供应不足提供了切实可行的方案。研究表明,饲料油菜生长周期较短、生物量大、适口性好、持绿性好、营养物质含量高,耐寒性、耐盐碱性较强^[6];并且田间管理较简单,种植成本低,收益好;作为十字花科属植物,饲料油菜在一定程度上还可以增加土壤有效肥力,改良盐碱地的土壤^[7]。新型优质饲草资源的开发与利用已经成为养殖业发展的关键,饲料油菜作为可以替代传统牧草的一种新型饲草,具有经济、生态、社会等多方面效益,饲料油菜的饲用价值研究可对畜禽养殖业产生积极的影响。

饲料油菜不仅含有大量的粗蛋白、粗脂肪等,还具有丰富的矿质元素。牧草的矿质元素含量是评价牧草品质、平衡饲养动物营养的一项重要指标。开展改善牧草矿质营养的育种研究是保障饲料营养供给、强化饲草品质创新的重要措施。矿质元素在动物生长发育、机体代谢中发挥着重要作用:钙是动物体内主要的矿质元素,支持动物骨骼和组织生长^[8];钾参与保持细胞的动态酸碱平衡、维持细胞渗透压^[9];镁对动物体内的许多酶具有激活作用,几乎参与所有的蛋白质合成和能量代谢^[10];铁参与遗传物质的合成和修复、氧气运输、免疫防御等多个重要生理过程^[11];锌是近200种转录因子的结构和功能完整性的基础,影响着300多种酶的活性和生物结构;铜是细胞呼吸所必须的元素,还可以防止氧化应激,促进铁运输^[12]。

近年来,油菜矿质营养元素的研究取得了显著进展。康金涛等^[13]通过ICP-MS技术分析了油菜苔和15种常见蔬菜的16个离子组分含量,发现油菜苔的离子组分含量较为均衡,具有很好的蔬用价值;胡文诗等^[14]研究了高产、高含油量以及常规油菜品种在不同生育期对矿质养分的需求,发现通过调

整氮和镁的供应,可以优化油菜的产量和含油量。全基因组关联分析(GWAS, genome-wide association analysis)因其研究周期短、基于单碱基水平分辨率高、研究材料来源广泛、可作用的变异丰富等优点,近年来被应用于定位与矿质营养元素相关的关键基因。例如,Wu等^[15]利用近2000个玉米Ames组自交系,基于770万个SNP标记,分析了11种元素浓度的关联位点,结果显示2个编码金属螯合剂和5个金属转运蛋白的基因与玉米一种或多种元素水平关联。Chen等^[16]利用244个玉米自交系和300万个SNP位点,定位到了与镉、钴、铜、镍、硒和锌含量关联的842个QTL,其中12个QTL在多种元素含量中均被检测到。在油菜中,Alcock等^[17]利用GWAS结合转录组学联合分析,鉴定到383个基因型油菜品系中分别有247个和166个SNP标记与叶片中的Ca和Mg浓度相关;通过检测部分候选基因的拟南芥直系同源突变体植株的钙、镁浓度,发现4个突变体植株茎部钙浓度下降,2个突变体植株茎部镁浓度下降,初步验证了相关候选基因功能。

本研究旨在探究272份甘蓝型油菜中7种矿质元素的含量水平与变异范围,构建甘蓝型油菜核心种质主要矿质元素含量表型库,并结合261份油菜材料重测序数据筛选出与矿质元素含量相关的显著位点和候选基因,为后续制定饲料油菜育种策略提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为华中农业大学国家油菜工程技术研究中心提供的272份油菜核心种质,包括中国各油菜主产区的地方品种、育种材料和栽培品种(详见<https://doi.org/10.13430/j.cnki.jjpr.20240409002>,附表1)。

1.2 水培处理

2022年4月8日,于武汉市江汉大学生命科学学院实验室播种272份油菜品种(系)。使用规格为4×7孔的穴盘共10盘播种试验材料,穴盘、纱布用自来水冲洗20 min后再用漂白剂处理20 min待用。穴盘每格播25粒种子,每格为一份材料,放置于温室(20℃恒温,16 h光照8 h黑暗)进行发芽。2022年4月

16日,根据植株生长情况,每格选出10株大小、高矮基本一致的健康幼苗移栽于大棚。大棚设有江汉大学汉江流域生物资源保护开发与利用工程中心

构建的半自动化水培系统,水池中注入2000 L营养液(表1)。于2022年5月4日和2024年5月16日更换营养液,两次营养液体积均为4000 L。

表1 营养液配比

Table 1 Nutrient solution ratio

化学试剂名称 Chemical reagent name	母液 (g/L) Mother liquor	全营养液 (mL/L) Whole nutrient solution	化学试剂名称 Chemical reagent name	母液 (g/L) Mother liquor	全营养液 (mL/L) Whole nutrient solution
KNO ₃	102	5	EDTA-2Na	3.722	5
MgSO ₄ ·7H ₂ O	98	5	MnCl ₂ ·4H ₂ O	3.62	0.25
KH ₂ PO ₄	28	5	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.44	0.25
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	236	5	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.16	0.25
FeSO ₄ ·7H ₂ O	2.799	5			

1.3 植株中矿质元素含量测定

1.3.1 主要仪器与试剂 K、Ca、Mg混合标准溶液由国家标准物质研究中心提供,其中质量浓度为1000 μg/mL,介质为10% HCl;Fe、Zn、Cu混合标准溶液由国家标准物质研究中心提供,其中质量浓度为100 μg/mL,介质为10% HNO₃。主要化学试剂包括浓硝酸(优级纯,中国医药集团有限公司),过氧化氢(优级纯,中国医药集团有限公司),氩气(纯度99.99%,武汉润桦辉氧气气瓶检验有限公司)。

主要实验仪器包括ICP-OES电感耦合等离子体发射光谱仪(安捷伦科技中国有限公司),苏泊尔磨粉机(SMF01),石墨消解仪(北京海富达科技)。

1.3.2 材料前处理 2024年6月1日收获油菜样品。为排除边际效应,每个品种(系)选取中间行3株长势相近且健壮的油菜苗,分别收获单株的地上部分,3次生物学重复,装入纸质信封,于60℃烘箱烘干至恒重,并研磨制成干样,放入50 mL离心管,置与-4℃冰箱保存待用。

考虑到待测样品的数量以及分析方法的速度等,本研究选择湿式硝酸-过氧化氢消解法消解油菜干样。具体步骤如下:从油菜干样中准确称取0.1 g,无损失地倒入石英玻璃消化管中;设置不另加样品的组别作为空白对照。依次加入2 mL浓硝酸和0.5 mL H₂O₂,静置5 min后,转移到石墨消煮炉上150℃消解25 min。至溶液呈黄棕色,加入1 mL浓硝酸和2 mL超纯水200℃消解40 min。消解完成后,待测组分转化为无机物状态(离子状态)存在于消化液中,消化管内为无色或略带黄色的透明液体。取出消化管,冷却后将消化液转移至50 mL容

量瓶中,用超纯水定容至50 mL并混匀,置于-4℃备用。

1.3.3 ICP-OES法测定 本研究使用ICP-OES法测定样品中矿质元素K、Ca、Mg、Na、Fe、Zn、Cu的含量。以灵敏度高、干扰少、信号强度合适为原则选定各元素分析谱线。在此分析条件下,测定待测元素5个不同浓度梯度的标准系列溶液(K、Ca、Mg、Na: 0.5 mg/L, 1 mg/L, 2 mg/L, 5 mg/L和10 mg/L; Fe、Zn、Cu: 0.02 mg/L, 0.05 mg/L, 0.1 mg/L, 0.2 mg/L和0.5 mg/L),以分析线的响应值为纵坐标,浓度为横坐标,绘制标准曲线,计算回归方程,相关系数应不低于0.999。在同样的分析条件下,同时测定供试品溶液和空白对照,扣除空白对照值,从标准曲线或回归方程中查得相应的浓度,计算样品中各待测元素的含量。

1.4 数据分析

1.4.1 甘蓝型油菜植株中矿质元素含量变异分析 采用Excel 2016对试验数据进行初步统计整理,对矿质元素含量特征进行分析并绘制描述性统计分析表;Origin 2018绘制各元素雷达图;使用SPSS.22.0软件的主成分分析对目标数据提取主成分、计算成分矩阵及绘制图表;使用R语言对数据进行相关性分析及绘制图表;根据主成分分析得分情况,筛选出具有极端表型的种质,使用SPSS.22.0软件对数据进行零-均值规范化,获得标准化分数,并绘制Z分数雷达图。

1.4.2 全基因组关联分析和候选基因预测 本研究参考基因组为hzau_ZS11.v10。根据华中农业大学郭亮教授课题组提供的数据^[18],在272份油菜材料

中,有261份材料具有重测序数据。从该高密度物理图谱中获得7598988个SNP,然后除去特异性位点和位置不明确的位点,最终获得3413134个SNP用作后续GWAS分析^[18]。GWAS全流程的分析内容包括:

(1)非多态性位点去除和标记质控:对原始的标记位点,使用plink2软件。按照以下条件进行过滤^[19]:非二等位点去除;第二等位基因频率(MAF, minor allele frequency)小于0.05的位点去除;缺失率大于0.5的位点去除;杂合比例大于0.8的位点去除。

(2)群体分层分析:基于筛选后得到的SNP标记,使用gcta软件v1.93.2^[20]进行主成分分析,获得样本在各主成分中的得分矩阵。基于筛选后的SNP标记,使用gcta软件(v1.93.2)进行亲缘关系分析,获得两两样本间的亲缘关系矩阵。

(3)关联分析:本研究中进行关联分析所用软件为R的gemma软件v0.98.1^[21]。所用模型为混合线性模型MLM(QK)模型^[22]。gcta软件计算的群体结构矩阵作为相应模型的Q矩阵,gcta软件计算的样品间亲缘关系矩阵作为相应模型的K矩阵。计算得到P值,筛选出满足 $-\text{Log}_{10}P > 5$ 及模型条件下与矿质离子含量显著关联的分子标记。用R软件的CMplot绘制曼哈顿图以及QQ图(Q代表分位数Quantile),对关联分析结果进行可视化。

表2 272份油菜矿质元素含量特征描述性统计分析表

Table 2 Descriptive statistical analysis of mineral element content in 272 rape samples

矿质元素种类 Mineral element	均值 Mean	变幅 Range	中位数 Median	极差 Range	变异系数(%) CV	0.75	0.25
Ca(mg/g)	36.97	25.34~45.11	36.52	19.77	8.81	39.27	34.84
K(mg/g)	65.95	40.92~94.12	66.24	53.20	14.82	72.06	59.91
Mg(mg/g)	5.44	4.01~7.17	5.38	3.15	10.45	5.78	5.08
Na(mg/g)	3.70	2.06~5.92	3.64	3.86	18.16	4.15	3.22
Cu(mg/kg)	5.69	1.25~13.34	5.00	12.08	36.80	7.00	5.00
Fe(mg/kg)	83.43	30.00~142.50	82.50	112.50	24.59	95.25	70.00
Zn(mg/kg)	37.22	23.00~85.00	36.25	62.00	21.58	42.00	32.00

0.75和0.25分别代表数据的第三四分位数和第一四分位数

0.75 and 0.25 represent the third quartile and the first quartile

2.2 甘蓝型油菜地上部分矿质元素含量主成分分析

为了检验甘蓝型油菜地上部分矿质元素含量数据与总变异之间的关系,进行主成分分析。图1是主成分分析特征值碎石图,特征值大于1的有

(4)候选基因预测:根据hzau_ZS11.v10参考基因组测序结果,将GWAS分析中显著性的SNP位点定位到甘蓝型油菜的基因组上。将显著SNP位点上下游50 k作为候选的区间。结合油菜基因组的注释信息,以及基因在GO数据库(<http://geneontology.org/docs/download-ontology>)和KEGG数据库(<https://www.kegg.jp>)中对区间内基因的富集分析结果,筛选出与矿质元素含量相关的候选基因。

2 结果与分析

2.1 甘蓝型油菜地上部分矿质元素含量分析

在272份甘蓝型油菜种质的地上部分中,7种元素平均含量的变异系数为8.81%~36.80%(表2)。变异系数最高的Cu元素含量变幅在1.25~13.34 mg/kg,最高、最低含量相差10.672倍;变异系数最低的Ca元素含量变幅在25.34~45.11 mg/g,最高、最低含量相差1.78倍;K元素含量变幅在40.92~94.12 mg/g;Mg元素含量变幅在4.01~7.17 mg/g;Na元素含量变幅在2.06~5.92 mg/g;Fe元素含量变幅在30.00~142.50 mg/kg;Zn元素含量变幅在23.00~85.00 mg/kg。7种矿质元素的变异系数由高到底的顺序为:Cu > Fe > Zn > Na > K > Mg > Ca。变异系数越高说明元素含量在不同品种间的差异越大,Cu的变异系数属于高度变异,其他元素多属于小变异或中等变异。

3个点。前3个主成分特征值均大于1,累计贡献率为68.479%,表明前3个主成分可以反映油菜矿质元素含量的主要信息(表3)。

由表3和表4可知,主成分1贡献了36.434%的

变异,主要是由Na、Mg、Fe、Cu元素含量驱动的。主成分2贡献了16.264%的变异,主要是由K元素

含量驱动的。主成分3贡献了15.781%的变异,主要是由Zn元素含量驱动的。

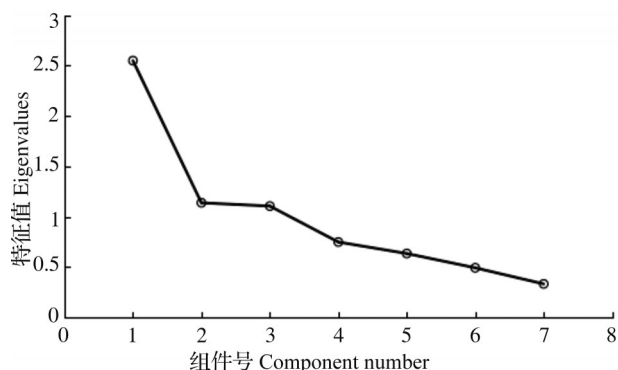


图1 主成分分析特征值碎石图

Fig.1 Principal component analysis feature root gravel

表3 主成分特征值、方差贡献率和累计贡献率

Table 3 Eigenvalues, variance contribution rates and cumulative contribution rates of principal components

主成分 Principal components	初始特征值 Initial eigenvalue			提取载荷平方和 Extract the sum of squared loads		
	总计 Total	方差百分比 Percent variance	累积(%) Cumulative	总计 Total	方差百分比 Percent variance	累积(%) Cumulative
1	2.550	36.434	36.434	2.550	36.434	36.434
2	1.138	16.264	52.698	1.138	16.264	52.698
3	1.105	15.781	68.479	1.105	15.781	68.479
4	0.748	10.692	79.171	0.748	10.692	79.171
5	0.634	9.056	88.227			
6	0.492	7.024	95.251			
7	0.332	4.749	100			

表4 7种矿质元素含量的成分矩阵

Table 4 Component matrix of concentrations of seven mineral elements content

矿质元素种类 Mineral element	主成分 Principal components			
	1	2	3	4
Ca	0.410	-0.293	-0.643	0.429
K	-0.016	0.852	0.208	0.447
Mg	0.727	0.169	-0.398	-0.014
Na	0.822	0.181	-0.017	0.023
Cu	0.715	0.198	0.116	-0.335
Fe	0.719	-0.144	0.364	-0.167
Zn	0.385	-0.454	0.586	0.473

2.3 甘蓝型油菜地上部分矿质元素含量相关性分析

对甘蓝型油菜地上部分矿质元素含量进行相关性分析(图2)。Cu与Fe、Mg、Na均具有极显著正

相关性,与Zn和Ca具有显著正相关性,而与K相关性不显著;Fe与Zn、Mg、Na均具有极显著正相关性,与K具有极显著负相关性,而与Ca相关性不显

著;Zn与Na具有极显著的正相关性,而与Ca、K、Mg相关性均不显著;Ca与Na显著正相关,与Mg具有极显著正相关性,而与K相关性不显著;K与Na

具有极显著正相关性,与Mg相关性不显著;Mg与Na具有极显著正相关性。

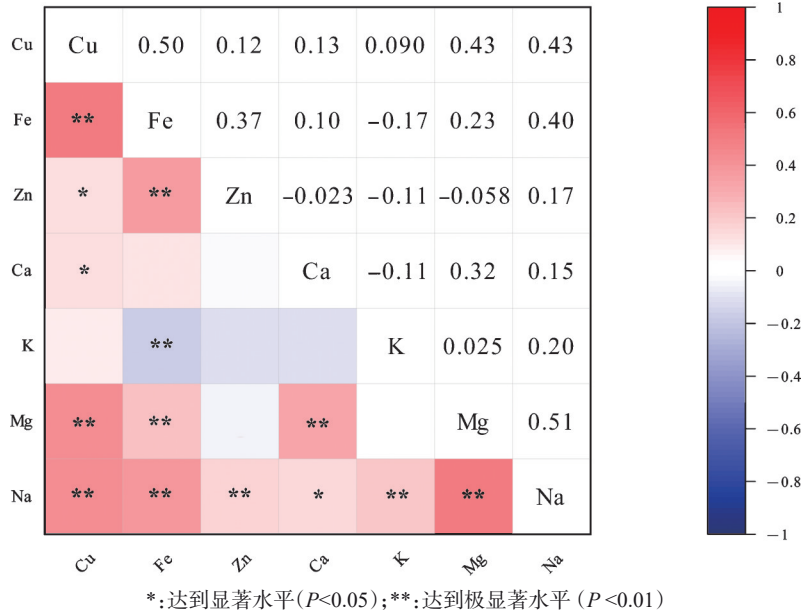


图2 甘蓝型油菜矿质元素含量的相关性分析
Fig.2 Correlation analysis of mineral element content in *Brassica napus*

2.4 极端表型材料的筛选

根据主成分分析结果计算各材料得分情况,筛选出中油589、WH-93、陕2B种质具有极端最小值;

santana、SWU88、甲920种质具有极端最大值。对数据进行零-均值规范化,获得标准化分数。这6份种质7种矿质元素含量的Z分数见图3。

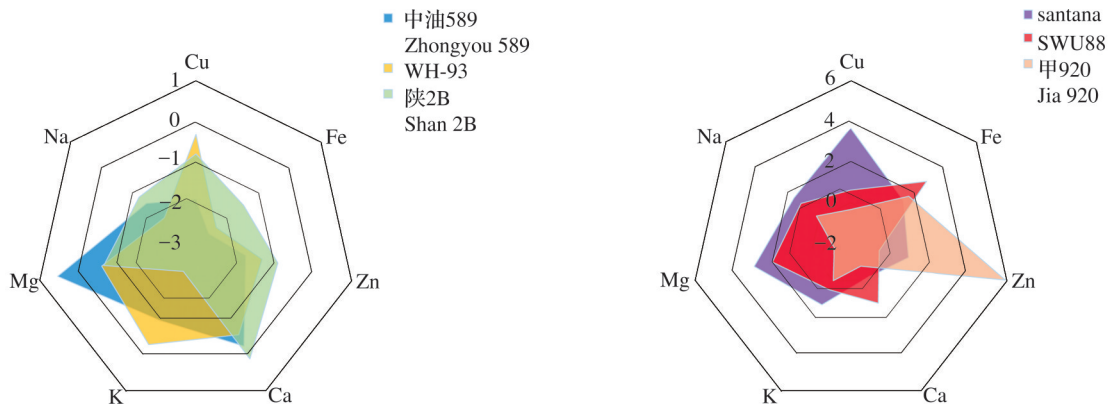
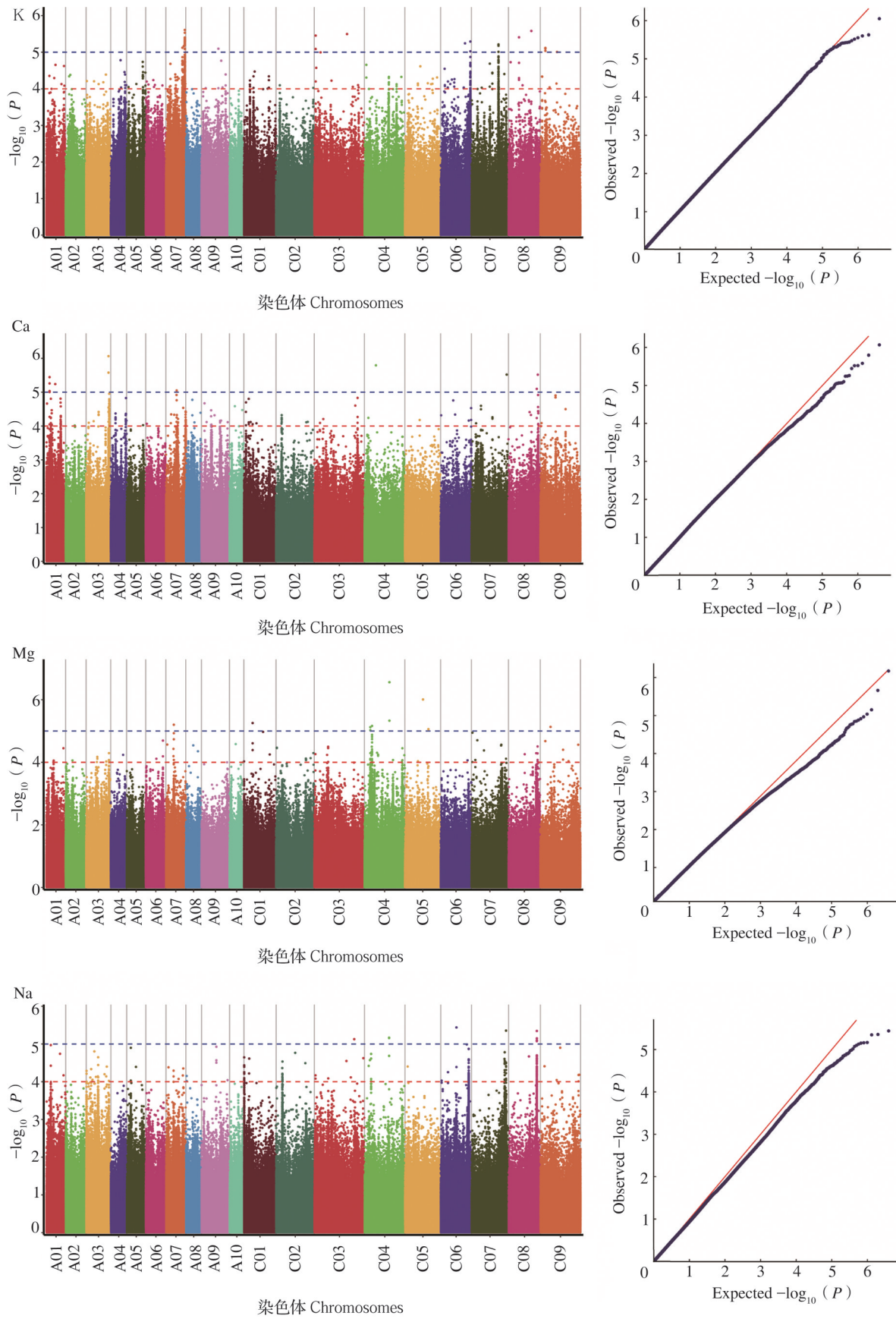


图3 极端表型的Z分数雷达图
Fig.3 Z-score radar chart of extreme phenotypes

2.5 不同矿质元素含量的相关SNP位点鉴定

通过MLM(QK)模型对280份甘蓝型油菜的矿质元素含量表型性状进行全基因组关联分析,用R软件的CMplot来绘制曼哈顿图以及QQ图。如图4所示,计算得到P值,筛选出模型条件下满足 $-\text{Log}_{10}P > 5$ 与矿质离子含量显著关联的分子标记。

最终检测到134个SNP位点分别与K、Ca、Na、Mg、Fe、Zn、Cu元素含量相关(表5)。在所有染色体上均检测到显著SNP位点,其中A07染色体上最多,达到25个,而A02和A10染色体上最少,均仅有1个;其他染色体上SNP位点数量介于7到15个之间。



(图4)

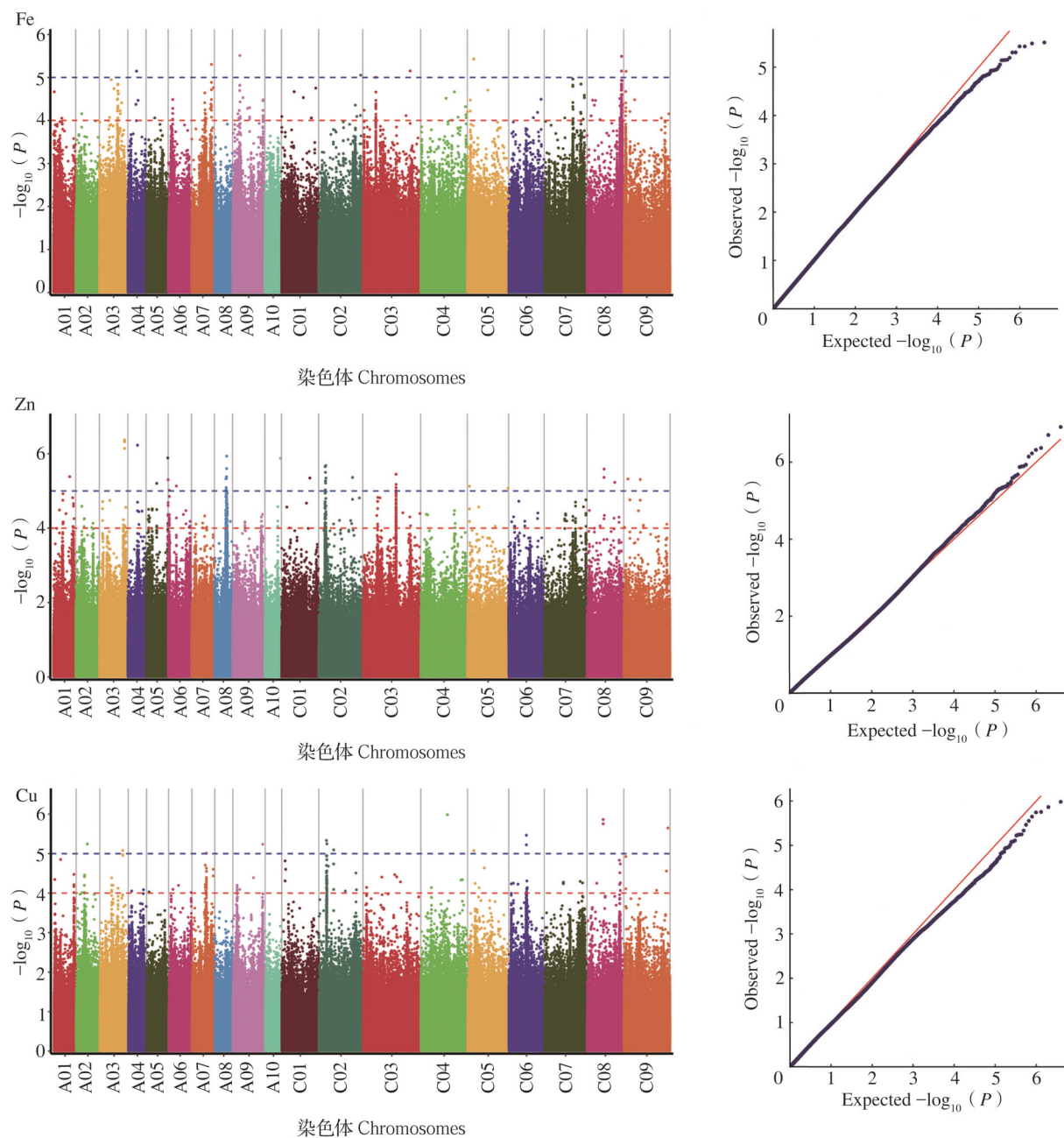


图4 MLM(QK)模型条件下的钾、钙、镁、钠、铁、锌和铜离子曼哈顿图与QQ图

Fig.4 Manhattan graph and QQ graph of K, Ca, Mg, Na, Fe, Zn and Cu ions under MLM(QK) model

表5 MLM(QK)模型检测的与矿质元素含量显著相关SNP分析结果

Table 5 The analysis of SNPs significantly associated with mineral element content using MLM(QK) model

矿质元素种类 Mineral element	标记名称 SNP	染色体 Chr.	位置(bp) Position	$-\log_{10}P$	表型贡献率(%) R^2
K	chrA07_19943554	A07	19943554	5.12	5.02
K	chrA07_21768330	A07	21768330	5.17	4.23
K	chrA07_21768333	A07	21768333	5.17	4.23
K	chrA07_22961562	A07	22961562	5.61	4.87
K	chrA07_22961916	A07	22961916	5.08	4.44
K	chrA07_22964929	A07	22964929	5.39	4.74

表5 (续)

矿质元素种类 Mineral element	标记名称 SNP	染色体 Chr.	位置(bp) Position	$-\text{Log}_{10}P$	表型贡献率(%) R^2
K	chrA07__22965679	A07	22965679	5.26	4.51
K	chrA07__22969246	A07	22969246	5.22	4.59
K	chrA07__22969300	A07	22969300	5.29	4.70
K	chrA07__22971665	A07	22971665	5.29	4.76
K	chrA07__22971744	A07	22971744	5.10	4.39
K	chrA07__22976415	A07	22976415	5.18	4.47
K	chrA07__22976420	A07	22976420	5.34	4.60
K	chrA07__22976507	A07	22976507	5.23	4.44
K	chrA07__22979494	A07	22979494	5.20	4.32
K	chrA07__22979511	A07	22979511	5.40	4.54
K	chrA07__22979519	A07	22979519	5.38	4.49
K	chrA07__22986618	A07	22986618	5.53	4.75
K	chrA07__22990848	A07	22990848	5.29	4.51
K	chrA07__22991832	A07	22991832	5.34	4.36
K	chrA07__23032016	A07	23032016	5.31	4.39
K	chrA09__20505984	A09	20505984	5.10	4.79
K	chrC03__1622597	C03	1622597	5.09	7.93
K	chrC03__1622611	C03	1622611	5.46	8.56
K	chrC03__39628716	C03	39628716	5.50	9.70
K	chrC06__29479855	C06	29479855	5.24	8.39
K	chrC06__35936119	C06	35936119	5.02	9.47
K	chrC06__35936359	C06	35936359	5.29	8.97
K	chrC07__32672993	C07	32672993	5.01	5.27
K	chrC07__32686265	C07	32686265	5.18	5.59
K	chrC07__32688603	C07	32688603	5.21	5.37
K	chrC08__12732923	C08	12732923	5.41	9.07
K	chrC08__27630000	C08	27630000	5.58	7.32
K	chrC09__6161274	C09	6161274	5.04	6.02
K	chrC09__6161281	C09	6161281	5.12	6.20
K	chrC09__6161292	C09	6161292	5.10	6.29
K	chrC09__20195566	C09	20195566	5.01	11.70
Ca	chrA01__3940655	A01	3940655	5.00	4.39
Ca	chrA01__3940658	A01	3940658	5.03	4.40
Ca	chrA01__3940971	A01	3940971	5.44	4.81
Ca	chrA01__3943113	A01	3943113	5.26	6.86
Ca	chrA01__10780515	A01	10780515	5.24	14.10
Ca	chrA03__27084106	A03	27084106	5.58	5.56
Ca	chrA03__27084164	A03	27084164	6.07	6.00
Ca	chrA07__13003386	A07	13003386	5.05	5.68

表5 (续)

矿质元素种类 Mineral element	标记名称 SNP	染色体 Chr.	位置(bp) Position	$-\log_{10}P$	表型贡献率(%) R^2
Ca	chrC04__13941328	C04	13941328	5.79	15.91
Ca	chrC07__42660904	C07	42660904	5.52	9.88
Ca	chrC08__34214045	C08	34214045	5.10	5.73
Ca	chrC08__35491059	C08	35491059	5.52	4.88
Na	chrC03__48194911	C03	48194911	5.13	7.62
Na	chrC04__29728837	C04	29728837	5.16	8.36
Na	chrC04__29728855	C04	29728855	5.17	8.32
Na	chrC06__19036559	C06	19036559	5.44	18.15
Na	chrC07__41678276	C07	41678276	5.35	5.65
Na	chrC08__34136672	C08	34136672	5.07	5.18
Na	chrC08__34145588	C08	34145588	5.35	6.05
Na	chrC08__34166733	C08	34166733	5.15	5.30
Na	chrC08__34166743	C08	34166743	5.10	5.20
Mg	chrA07__9632951	A07	9632951	5.20	4.23
Mg	chrC01__10571532	C01	10571532	5.26	10.73
Mg	chrC04__7162176	C04	7162176	5.12	4.27
Mg	chrC04__7218406	C04	7218406	5.03	4.34
Mg	chrC04__9245996	C04	9245996	5.16	5.29
Mg	chrC04__30281675	C04	30281675	6.56	11.65
Mg	chrC04__30281694	C04	30281694	5.33	9.11
Mg	chrC05__21940486	C05	21940486	6.01	16.73
Mg	chrC05__28478421	C05	28478421	5.06	7.41
Mg	chrC09__12344543	C09	12344543	5.13	7.68
Fe	chrA04__9127124	A04	9127124	5.15	5.31
Fe	chrA07__20981835	A07	20981835	5.30	4.45
Fe	chrA09__7686732	A09	7686732	5.51	5.88
Fe	chrC02__44036870	C02	44036870	5.05	6.58
Fe	chrC03__13732408	C03	13732408	5.00	4.33
Fe	chrC03__49610717	C03	49610717	5.15	8.00
Fe	chrC05__6688800	C05	6688800	5.43	9.60
Fe	chrC05__6688801	C05	6688801	5.43	9.60
Fe	chrC08__36167258	C08	36167258	5.15	4.67
Fe	chrC08__36231505	C08	36231505	5.49	5.98
Fe	chrC09__2499834	C09	2499834	5.14	7.51
Zn	chrA01__17026682	A01	17026682	5.38	7.56
Zn	chrA03__26332527	A03	26332527	6.14	5.93
Zn	chrA03__26340105	A03	26340105	6.37	8.77
Zn	chrA03__26340114	A03	26340114	6.32	8.69
Zn	chrA04__10113885	A04	10113885	6.23	5.25

表5 (续)

矿质元素种类 Mineral element	标记名称 SNP	染色体 Chr.	位置(bp) Position	$-\text{Log}_{10}P$	表型贡献率(%) R^2
Zn	chrA05__11083165	A05	11083165	5.20	7.61
Zn	chrA05__22652302	A05	22652302	5.89	5.14
Zn	chrA06__13784	A06	13784	5.30	4.15
Zn	chrA06__1163485	A06	1163485	5.01	4.24
Zn	chrA06__8532943	A06	8532943	5.13	7.88
Zn	chrA08__12088015	A08	12088015	5.32	4.36
Zn	chrA08__12126280	A08	12126280	5.03	4.20
Zn	chrA08__12340448	A08	12340448	5.09	4.24
Zn	chrA08__12511541	A08	12511541	5.02	3.96
Zn	chrA08__12528688	A08	12528688	5.01	4.27
Zn	chrA08__12663463	A08	12663463	5.35	4.65
Zn	chrA08__12664416	A08	12664416	5.38	4.78
Zn	chrA08__12803718	A08	12803718	5.60	4.92
Zn	chrA08__12840965	A08	12840965	5.93	7.93
Zn	chrA08__12848842	A08	12848842	5.00	3.98
Zn	chrA10__16321846	A10	16321846	5.87	8.46
Zn	chrC01__29743785	C01	29743785	5.35	8.36
Zn	chrC02__6824183	C02	6824183	5.65	7.66
Zn	chrC02__7068497	C02	7068497	5.03	6.45
Zn	chrC02__7228284	C02	7228284	5.50	6.22
Zn	chrC02__7268663	C02	7268663	5.27	6.01
Zn	chrC02__7289530	C02	7289530	5.21	5.09
Zn	chrC02__7537183	C02	7537183	5.68	14.09
Zn	chrC02__7669754	C02	7669754	5.35	6.63
Zn	chrC02__35520487	C02	35520487	5.36	9.67
Zn	chrC03__34891887	C03	34891887	5.45	5.73
Zn	chrC03__34893359	C03	34893359	5.01	4.99
Zn	chrC03__34893363	C03	34893363	5.09	5.07
Zn	chrC03__34897203	C03	34897203	5.18	5.62
Zn	chrC05__2163512	C05	2163512	5.13	8.57
Zn	chrC05__42573703	C05	42573703	5.07	7.07
Zn	chrC08__17861927	C08	17861927	5.36	4.40
Zn	chrC08__17954667	C08	17954667	5.59	4.54
Zn	chrC08__29207221	C08	29207221	5.23	11.63
Zn	chrC09__4448369	C09	4448369	5.32	9.77
Zn	chrC09__17361851	C09	17361851	5.31	9.84
Cu	chrA02__11706791	A02	11706791	5.25	9.01
Cu	chrA03__23976927	A03	23976927	5.08	10.60
Cu	chrA07__15237784	A07	15237784	5.01	4.83

表5(续)

矿质元素种类 Mineral element	标记名称 SNP	染色体 Chr.	位置(bp) Position	$-\log_{10}P$	表型贡献率(%) R^2
Cu	chrA09_31306430	A09	31306430	5.24	4.37
Cu	chrC02_7926638	C02	7926638	5.33	6.36
Cu	chrC02_8414326	C02	8414326	5.25	6.40
Cu	chrC02_15526724	C02	15526724	5.09	11.50
Cu	chrC04_27902009	C04	27902009	5.98	19.29
Cu	chrC05_6580378	C05	6580378	5.08	9.89
Cu	chrC06_18480764	C06	18480764	5.47	7.21
Cu	chrC06_18480770	C06	18480770	5.22	6.92
Cu	chrC08_16903598	C08	16903598	5.86	13.43
Cu	chrC08_16903639	C08	16903639	5.76	13.76
Cu	chrC09_46332424	C09	46332424	5.65	24.01

检测到37个位点与K元素含量显著相关,分别位于A07、A09、C03、C06、C07、C08和C09染色体上,表型贡献率范围为4.23%~11.70%。检测到12个位点与Ca元素含量显著相关,分别位于A01、A03、A07、C04、C07和C08染色体上,表型贡献率范围为4.39%~15.91%。检测到9个位点与Na元素含量显著相关,分别位于C03、C04、C06、C07和C08染色体上,表型贡献率范围为5.20%~18.15%。检测到10个位点与Mg元素含量显著相关,分别位于A07、C01、C04、C05和C09染色体上,表型贡献率范围为4.23%~16.73%。检测到11个位点与Fe元素含量显著相关,分别位于A04、A07、A09、C02、C03、C05、C08和C09染色体上,表型贡献率范围为4.33%~9.60%。检测到41个位点与Zn元素含量显著相关,分别位于A01、A03、A04、A05、A06、A08、A10、C01、C02、C03、C05、C08、C09染色体上,表型贡献率范围为3.96%~14.09%。检测到14个位点与Cu元素含量显著相关,分别位于A02、A03、A07和A09染色体上,表型贡献率范围为4.37%~24.01%。

2.6 不同矿质元素含量的相关的候选基因

本研究选取显著SNP标记各染色体平均LD衰减上下游50 kb范围预测候选基因,结合GO数据库

和KEGG数据库的富集分析结果,最终筛选到14个与矿质元素含量相关的候选基因(表6),分别位于A01、A03、A06、A08、C01、C02、C07、C08、C09染色体上。其中A01染色体上有1个候选基因,基因ID为*ZS11A01G007420*,与Ca元素含量性状相关;A03染色体上有2个候选基因,基因ID为*ZS11A03G045690*和*ZS11A03G045720*,都与Cu元素含量性状相关;A06染色体上有2个候选基因,基因ID为*ZS11A06G014950*和*ZS11A06G014940*,都与Zn元素含量性状相关;A08染色体上有2个候选基因,基因ID为*ZS11A08G013680*和*ZS11A08G014070*,都与Zn元素含量性状相关;C01染色体上有1个候选基因,基因ID为*ZS11C01G015850*,与Mg元素含量性状相关;C02染色体上有3个候选基因,基因ID为*ZS11C02G011390*、*ZS11C02G012340*和*ZS11C02G020370*,分别与Zn元素和Cu元素含量性状相关;C07染色体上有1个候选基因,基因ID为*ZS11C07G036900*,与Na元素含量性状相关;C08染色体上有1个候选基因,基因ID为*ZS11C08G034970*,与Fe元素含量性状相关;C09染色体上有1个候选基因,基因ID为*ZS11C09G025260*,与K元素含量性状相关。

表6 矿质元素含量相关候选基因

Table 6 Mineral element content related candidate genes

矿质元素种类 Mineral element	基因ID Gene ID	基因名 Gene name	描述 Description
K	<i>ZS11C09G025260</i>	<i>ADH2</i>	乙醇脱氢酶3类
Ca	<i>ZS11A01G007420</i>	<i>HMA2</i>	重金属ATP酶2
Na	<i>ZS11C07G036900</i>	<i>LTA2</i>	丙酮酸脱羧酶的质体E2亚基

表 6 (续)

矿质元素种类 Mineral element	基因 ID Gene ID	基因名 Gene name	描述 Description
Mg	ZS11C01G015850	AKT2	钾运输 2
Fe	ZS11C08G034970	HIPP31	重金属相关蛋白 31
Zn	ZS11A06G014950	-	BnaA06g14370D
Zn	ZS11A06G014940	-	BnaA06g14370D
Zn	ZS11A08G013680	BRCA1	乳腺癌易感蛋白 1
Zn	ZS11A08G014070	-	未知蛋白质 LOC106410831
Zn	ZS11C02G011390	RHF2A	环-H2 组 F2A
Cu	ZS11A03G045690	ATL29	拟南芥酵母中有毒 29
Cu	ZS11C02G012340	WAV3	E3 泛素连接酶参与根向地性
Cu	ZS11C02G020370	BETA-OHASE	β -胡萝卜素羟化酶 1
Cu	ZS11A03G045720	ALMT12	铝激活苹果酸转运体 12

--:无基因名

--:No gene name

ZS11C09G025260(*ADH2*) 植物 *ADH* 基因家族成员在不同的植物中的数目差异较大,*ADH* 在营养器官和生殖器官发育发挥着重要作用,尤其在响应组织器官发育过程中的生物或非生物胁迫中发挥着不同的作用^[23]。GO 注释结果显示,它与锌离子结合、钾离子运输过程相关。

ZS11A01G007420(*HMA2*) HMA 家族是一类金属离子转运的重要蛋白家族,之前的研究中将 P1B-ATPase 分为两个亚族:Group1(转运 Zn/Cd/Co/Pb)和 Group2(转运 Cu/Ag)^[24]。GO 注释结果显示,它参与了铜、钙、钾、镉离子的转运、结合和跨膜运输等过程。

ZS11C07G036900(*LTA2*) *LTA* 编码苏氨酸酯缩酶。GO 注释结果显示,它在钠离子转运和跨膜转运蛋白活性过程中发挥了作用。

ZS11C01G015850(*AKT2*) *AKT2* 是 K^+ 通道基因家族的成员,在植物叶片的叶肉细胞中,*AKT2* 约占 K^+ 通透性的 50%^[25]。GO 注释结果显示,它在离子通道、离子转运和跨膜运输都具有生物学作用。

ZS11C08G034970(*HIPP31*) *HIPP* 编码重金属相关异戊二烯化植物蛋白,*HIPPs* 作为金属伴侣蛋白,能够结合金属离子并将其转运至靶蛋白以维持细胞的金属离子稳态^[26]。GO 结果显示,它参与了铜和汞离子运输、结合以及调节离子稳态过程。

ZS11A08G013680(*BRCA1*) *BRCA1* 编码蛋白的 N 末端序列含有一环状结构域(ring domain),能够与 *BRCA1* 相关环状蛋白(*BARD1*, *BRCA12* associated RING domain protein)组成环 2 环异二

聚体^[27]。

ZS11C02G011390(*RHF2A*) *RHF2A* 是 RING-finger 家族的成员,编码 E3 泛素连接酶。在拟南芥中,RING-finger 蛋白家族作为蛋白降解 E3 连接酶中的重要成员,存在于各个生化反应过程中^[28]。

ZS11A03G045690(*ATL29*) *ATL* 家族编码 E3 泛素连接酶,*ATL* 调节植物的不同通路,如胁迫响应和碳响应调节^[29]。

ZS11C02G012340(*WAV3*) *WAV3* 基因编码一个 RING 型 E3 泛素连接酶。GO 注释结果显示,它们都参与了离子结合尤其是锌离子结合过程。

ZS11A03G045720(*ALMT12*) *ALMT* 家族蛋白是植物所特有的一类新型阴离子通道,参与调控气孔运动、果实酸度、种子发育、根系抗铝毒等生物学过程。*ALMT12* 参与控制气孔关闭,具有快型(R-type)阴离子通道特征,又名快阴离子通道 *QUAC1*。GO 注释结果显示,它参与了离子运输过程。

3 讨论

近年来,随着我国畜牧业的快速发展,饲料用粮的需求量不断增加,饲料油菜及其配套种植技术拓展了优质饲草的来源。研究表明,饲料油菜在供应季节和养分含量上具有无法替代的优势,已经逐渐在全国推广种植^[30]。参考美国豆科与禾本科饲草等级指标,饲料油菜的品质在中等禾本科干草品质以上,具有较高的饲喂价值^[31]。利用我国南部和西北地区的冬季空闲田种植油菜,可以降低饲养成本,提高土地利用效率,并且不影响其他粮食作物的

种植。有研究表明,合理利用饲料油菜与其他饲料搭配,不仅增重效果显著,还能提升肉质和营养品质^[32]。

矿物质元素含量是牧草品质评价的重要指标。牧草对矿质营养元素的吸收能力和种植土壤的供给能力直接影响牧草体内矿质养分的含量。本研究系统评价了272份甘蓝型油菜核心种质苗期地上部分的矿质营养元素含量,筛选出富含矿质营养元素的优异资源,为选育优质饲料油菜品种提供了优良资源。

测定结果显示,272份甘蓝型油菜地上部分K含量平均最高,Na含量平均最低,呈现高钾低钠的特点。Na的变异系数最大为18.16%,微量元素的变异系数范围在30%~50%之间,变异较丰富。不同种质对元素的吸收存在差异,有些品种富集某些元素,而有些品种则相对排斥一些元素。例如,油菜种质中油589的Fe、Zn含量显著较少^[33]。与其他作物相比,甘蓝型油菜在矿质元素含量上差异明显,其高钾低钠的特点,有助于改善家畜的营养水平,提高肉质品质^[34]。

本研究采用半自动化水培系统,为甘蓝型油菜提供了相对稳定的外界环境,支持了大规模快速鉴定甘蓝型油菜表型的研究^[35]。使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES),能够同时检测多个元素,适配大量样品的快速检测,也为本研究中的元素含量测定提供了必要的技术支持^[36]。

GWAS方法可用于解析复杂遗传性状的遗传基础,但存在一定局限性,如表型贡献率有限。与Fe元素含量显著相关的SNP位点表型贡献率较小(4.33%~9.60%),表明Fe元素含量受到多个基因的共同影响^[37]。Cu元素含量的表型贡献率相对较高(如SNP位点chrC09_46332424达到24.01%),表明特定基因显著影响Cu元素含量表型。关键候选基因与矿质元素转运和积累密切相关,值得后续对其调控矿质元素含量的遗传机制进行深入探讨。本次研究中并未定位到多个元素含量都能检测到的SNP位点,可能表明了油菜积累各元素的遗传机制相对独立。

4 结论

在272份甘蓝型油菜种质中,地上部分主要矿质元素含量平均值从高到低依次为钾(K)、钙(Ca)、镁(Mg)、钠(Na)、铁(Fe)、锌(Zn)、铜(Cu),且不同种质间差异显著。主成分分析表明,主成分1贡献

了36.434%的变异,部分矿质元素含量之间表现出显著的相关性。种质santana、SWU88、甲920是矿质元素含量最丰富的材料,可用于培育优良品种。通过GWAS分析,从261份具有重测序数据的材料中筛选出134个与主要矿质元素含量相关的SNP位点,预测出14个候选基因,其中*ADH2*、*HMA2*、*LTA2*、*AKT2*和*HIPP31*分别与K、Ca、Na、Mg和Fe含量相关,其余候选基因与Zn和Cu含量相关。这些候选基因因为油菜矿质营养改良提供了潜在的遗传资源。

参考文献

- [1] 孟春花, 张建丽, 钱勇, 王飞, 石祖梁, 仲跻峰. 油菜秸秆饲料化利用的研究进展. 江苏农业科学, 2021, 49(16): 26-31
Meng C H, Zhang J L, Qian Y, Wang F, Shi Z L, Zhong J F. Research progress on forage utilization of rape straw. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(16): 26-31
- [2] Kalaitzandonakes N, Phillips P W, Wesseler J, Smyth S J. The coexistence of genetically modified, organic and conventional foods. Natural Resource Management and Policy, 2016, 49: 1-11
- [3] Thomas C L, Alcock T D, Graham N S, Hayden R, Matterson S, Wilson L, Young S D, Dupuy P J, White J P, Hammond J P, Danku J M, Salt D E, Sweeney A, Bancroft I, Broadley M R. Root morphology and seed and leaf ionic traits in a *Brassica napus* L. diversity panel show wide phenotypic variation and are characteristic of crop habit. BMC Plant Biology, 2016, 16(1): 214
- [4] 李纯, 傅廷栋, 杨小牛. 春播油菜绿肥试验简报. 湖北农业科学, 1987(1): 10-11
Li C, Fu T D, Yang X N. Brief report of spring sowing rape green fertilizer test. Hubei Agricultural Sciences, 1987(1): 10-11
- [5] 刁志成, 曲扬华, 刘策, 高月锋, 罗海玲. 饲用油菜混合青贮对湖羊屠宰性能及肉品质的影响. 中国畜牧兽医, 2018, 45(6): 1564-1570
Diao Z C, Qu Y H, Liu C, Gao Y F, Luo H L. Effects of forage rape mixed silage on slaughter performance and meat quality of Hu sheep. China Animal Husbandry and Veterinary, 2018, 45(6): 1564-1570
- [6] 牟海日, 王春朋, 胡立艳. 辽宁地区种植国外饲料油菜的试验报告. 中国奶牛, 2012(3): 9-11
Mu H R, Wang C P, Hu L Y. Experimental report on cultivation of foreign feed rape in Liaoning area. Chinese Cow, 2012(3): 9-11
- [7] 李桂花, 张建峰, 梅勇, 韦东普, 杨俊诚. 盐碱胁迫下油菜对磷元素的吸收. 核农学报, 2007, 21(5): 498-501
Li G H, Zhang J F, Mei Y, Wei D P, Yang J C. Phosphorus uptake in rapeseed under salt-alkali stress. Journal of Nuclear Agronomy, 2007, 21(5): 498-501

- [8] 吴静璇, 翟羽佳, 廖秀冬, 张丽阳, 李素芬, 吕林. 饲料钙和非植酸磷水平对肉仔鸡生长性能和血清指标的影响. 中国畜牧杂志, 2023, 59(9): 264-268
Wu J X, Zhai Y J, Liao X D, Zhang L Y, Li S F, Lv L. Effects of dietary calcium and non-phytate phosphorus levels on growth performance and serum parameters of broiler chickens. Chinese Journal of Animal Science, 2023, 59(9): 264-268
- [9] 汲全柱. 动物饲料添加二甲酸钾在影响畜禽生长性能及替代抗生素中的作用. 新农业, 2021(23): 55-56
Ji Q Z. Effect of adding potassium diformate to animal feed on the growth performance of livestock and poultry and replacing antibiotics. New Agriculture, 2021(23): 55-56
- [10] 柴明娜, 王婷, 朱志强, 黄雪洁, 韩冰. 刈青燕麦饲草全株及茎叶穗的5种矿质元素含量分析. 河北农业科学, 2023, 27(4): 31-36, 55
Chai M N, Wang T, Zhu Z Q, Huang X J, Han B. Analysis on the content of 5 mineral elements in the whole plant and stem, leaf and ear of the forage grass of oats. Hebei Agricultural Sciences, 2023, 27(4): 31-36, 55
- [11] 孔雨昕, 马喜波, 王桂芹. 铁的生物学功能及其在鱼类中的应用研究进展. 饲料工业, 2024, 45(8): 56-63
Kong Y X, Ma X B, Wang G Q. Research progress on biological function of iron and its application in fish. Feed Industry, 2024, 45(8): 56-63
- [12] Suttle N. Mineral nutrition of livestock. 4th edn. Wallingford: CABI Digital Library, 2010: 540-554
- [13] 康金涛, 刘昆鹏, 杨闯, 全成滔, 戴成, 马朝芝. 油菜苔和常见蔬菜 ICP-MS 离子组分分析与评价. 南京农业大学学报, 2023, 46(3): 454-463
Kang J T, Liu K P, Yang C, Quan C T, Dai C, Ma C Z. Analysis and evaluation of ionic components detected by ICP-MS in rapeseed bolting and common vegetables. Journal of Nanjing Agricultural University, 2023, 46(3): 454-463
- [14] 胡文诗, 李银水, 顾焱明, 代晶, 谢立华, 李小勇, 秦璐, 廖星. 不同油菜品种产量与含油量形成的矿质营养调控研究. 中国油料作物学报, 2023, 45(4): 756-765
Hu W S, Li Y S, Gu Z M, Dai J, Xie L H, Li X Y, Qin L, Liao X. Regulation of mineral nutrients on seed yield and oil content formation in different oilseed rape cultivars. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2023, 45(4): 756-765
- [15] Wu D, Tanaka R, Li X, Ramstein G P, Cu S, Hamilton J P, Buell C R, Stangoulis J, Rocheford T, Gore M A. High-resolution genome-wide association study pinpoints metal transporter and chelator genes involved in the genetic control of element levels in maize grain. G3 (Bethesda), 2021, 11(4): jkab059
- [16] Chen W, Li X, Zhang X, Chachar Z, Lu C, Qi Y, Chang H, Wang Q. Genome-wide association study of trace elements in maize kernels. BMC Plant Biology, 2024, 24(1): 724
- [17] Alcock T D, Havlickova L, He Z, Bancroft I, White P J, Broadley M R, Graham N S. Identification of candidate genes for calcium and magnesium accumulation in *Brassica napus* L. by Association Genetics. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 1968
- [18] Tang S, Zhao H, Lu S, Yu L, Zhang G, Zhang Y, Yang Q Y, Zhou Y, Wang X, Ma W, Xie W, Guo L. Genome- and transcriptome-wide association studies provide insights into the genetic basis of natural variation of seed oil content in *Brassica napus*. Molecular Plant, 2021, 14(3): 470-487
- [19] Chang C C, Chow C C, Tellier L C, Vattikuti S, Purcell S M, Lee J J. Second-generation PLINK: Rising to the challenge of larger and richer datasets. Gigascience, 2015, 4: 7
- [20] Yang J, Lee S H, Goddard M E, Visscher P M. GCTA: A tool for genome-wide complex trait analysis. American Journal of Human Genetics, 2011, 88(1): 76-82
- [21] Zhou X, Stephens M. Genome-wide efficient mixed-model analysis for association studies. Nature Genetics, 2012, 44(7): 821-824
- [22] Shen C, Yuan J, Ou X, Ren X, Li X. Genome-wide identification of alcohol dehydrogenase (*ADH*) gene family under waterlogging stress in wheat (*Triticum aestivum*). PeerJ, 2021, 9: e11861
- [23] Jin Y, Zhang C, Liu W, Tang Y, Qi H, Chen H, Cao S. The alcohol dehydrogenase gene family in melon (*Cucumis melo* L.): Bioinformatic analysis and expression patterns. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 670
- [24] Ryuichi T, Yasuhiro I, Hugo S. The OsHMA2 transporter is involved in root-to-shoot translocation of Zn and Cd in rice. Plant, Cell & Environment, 2012, 35(11): 1948-1957
- [25] Dennison K L, Robertson W R, Lewis B D, Hirsch R E, Sussman M R, Spalding E P. Functions of AKT1 and AKT2 potassium channels determined by studies of single and double mutants of Arabidopsis. Plant Physiology, 2001, 127(3): 1012-1019
- [26] 王琪, 许志茹, 陈瑾元, 张双, 黄佳欢, 刘关君. 杨树重金属相关异戊二烯化植物蛋白(*HIPPs*)基因的鉴定及表达分析. 植物研究, 2019, 39(6): 935-946
Wang Q, Xu Z R, Chen J Y, Zhang S, Huang J H, Liu G J. Identification and expression analysis of heavy metal-associated isoprene plant protein (*HIPPs*) genes in poplar. Plant Research, 2019, 39(6): 935-946
- [27] 吴一凡. 拟南芥 *BRCAL* 基因在干旱胁迫应答中的功能分析. 长春: 东北师范大学, 2019
Wu Y F. Functional analysis of *BRCAL* gene in *Arabidopsis thaliana* in response to drought stress. Changchun: Northeast Normal University, 2019
- [28] 刘敬婧. 拟南芥 RING-finger 家族成员 *RHF1a* 和 *RHF2a* 的功能研究. 北京: 北京大学, 2007
Liu J J. Functional study of *RHF1a* and *RHF2a* members of the *Arabidopsis* RING-finger family. Beijing: Peking University, 2007
- [29] Plinio G. The prolific ATL family of RING-H2 ubiquitin ligases. Plant Signaling & Behavior, 2012, 7(8): 1014-1021

- [30] 刘萍, 张林, 王涛, 王婧泽, 陈燕萍, 吴宇瑶, 龚永会, 秦利军, 代文东. 饲料油菜粗蛋白含量及其氨基酸组成. 草业科学, 2023, 40(12): 3150-3162
Liu P, Zhang L, Wang T, Wang J Z, Chen Y P, Wu Y Y, Gong Y H, Qin L J, Dai W D. Crude protein content and amino acid composition of feed rape. Pratacultural Science, 2023, 40(12): 3150-3162
- [31] 张占琴, 闫紫薇, 杨相昆, 桑志勤. 新疆地区麦后复种饲料油菜品种比试验. 新疆农垦科技, 2020, 43(8): 3-6
Zhang Z Q, Yan Z W, Yang X K, Sang Z Q. Experiment on ratio of forage rape to multiple cropping after wheat in Xinjiang region. Xinjiang Land Reclamation Science and Technology, 2020, 43(8): 3-6
- [32] 王洪超, 刘大森, 刘春龙, 陆欣春, 魏巍, 王秀秀. 饲料油菜及其饲用价值研究进展. 土壤与作物, 2016, 5(1): 60-64
Wang H C, Liu D S, Liu C L, Lu X C, Wei W, Wang X X. Research progress of forage rape and its feeding value. Soil and Crops, 2016, 5(1): 60-64
- [33] 杨雪贞, 许华森, 张月萌, 马文奇, 孙志梅. 河北省主栽山药品种矿质养分累积及矿质营养品质差异. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(9): 1734-1744
Yang X Z, Xu H S, Zhang Y M, Ma W Q, Sun Z M. Mineral nutrient accumulation and mineral nutrient quality difference of main yam varieties in Hebei province. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2019, 28(9): 1734-1744
- [34] 曾亚文, 刘家富, 汪禄祥, 申时全, 李自超, 王象坤, 文国松, 杨忠义. 云南稻核心种质矿质元素含量及其变种类型. 中国水稻科学, 2003, 17(1): 26-31
Zeng Y W, Liu J F, Wang L X, Shen S Q, Li Z C, Wang X K, Wen G S, Yang Z Y. Mineral element content and variety types of Yunnan rice core germplasm. Chinese Rice Science, 2003, 17(1): 26-31
- [35] 万何平, 何冰冰, 陈敬东, 戢强强, 曾长立. 一种高通量鉴定甘蓝型油菜耐低氮种质的方法及其应用. 江苏农业科学, 2021, 49(19): 78-83
Wan H P, He B B, Chen J D, Ji Q Q, Zeng C L. A high-throughput method for identification of low-nitrogen-tolerant germplasm of *Brassica napus* and its application. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(19): 78-83
- [36] Douvris C, Vaughan D, Bussan D, Bartzas G, Thomas R. How ICP-OES changed the face of trace element analysis: Review of the global application landscape. Science of the Total Environment, 2023, 905: 167242
- [37] 万何平. 甘蓝型油菜苗期耐盐相关性状的全基因组关联分析. 武汉: 华中农业大学, 2019
Wan H P. Genome-wide association analysis of salt-tolerant traits in *Brassica napus* seedlings. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019

附表1 供试材料信息与7种元素具体含量

Appendix 1 Information on test materials and specific contents of 7 elements

编号	材料名称	地区	Cu	Fe	Zn	Ca	K	Mg	Na
No.	Name	Area	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/g)	(mg/g)	(mg/g)	(mg/g)
L396	浙双 72	浙江 (中国)	6.67	91.67	46.67	32.88	74.00	5.64	4.59
L343	SWU70	重庆 (中国)	5.00	90.00	45.00	35.45	64.77	4.91	5.43
L309	陇油 4 号	甘肃 (中国)	4.00	63.00	33.00	33.07	71.57	5.16	3.62
L180	64 棚-10	湖北 (中国)	5.00	56.00	30.00	30.40	73.90	5.05	3.34
L383	沪油 21	上海 (中国)	7.00	64.00	29.00	37.16	66.03	5.77	3.64
L399	WH-399	湖北 (中国)	7.50	89.00	46.00	37.05	88.20	6.07	4.31
L312	天油 4 号	甘肃 (中国)	7.50	110.00	50.00	31.15	75.46	5.36	3.06
L384	浙双 3 号	浙江 (中国)	4.00	70.00	35.00	37.22	71.90	6.00	3.52
L341	SWU68	重庆 (中国)	2.00	66.67	33.00	34.72	50.81	5.07	2.88
L377	中油 589	湖北 (中国)	1.67	30.00	23.33	36.22	56.86	5.76	2.75
L344	SWU71	重庆 (中国)	5.00	65.00	35.00	35.12	69.15	5.21	3.03
L365	SWU104	重庆 (中国)	5.00	71.67	41.67	35.45	78.66	5.01	3.91
L394	沪油 17	上海 (中国)	5.00	63.00	41.00	36.10	66.85	5.65	3.39
L305	9801C	甘肃 (中国)	2.50	77.50	56.67	37.57	71.26	5.59	3.69
L345	SWU74	重庆 (中国)	5.00	82.50	47.50	36.18	84.02	4.53	3.29
L317	Sophia	未知	5.00	61.25	35.00	38.42	75.85	6.27	3.66
L357	SWU93	重庆 (中国)	11.25	85.00	35.00	30.78	69.04	6.07	4.39
L361	SWU99	重庆 (中国)	2.50	73.75	28.75	33.79	66.60	6.34	3.80
L372	SWU114	重庆 (中国)	7.50	70.00	36.25	34.76	94.12	6.16	5.45
L348	SWU77	重庆 (中国)	5.00	51.67	31.67	41.19	67.37	6.26	3.38
L356	SWU90	重庆 (中国)	5.00	66.67	33.33	35.37	63.52	5.60	2.76
L373	中双 10 号	湖北 (中国)	3.33	67.50	37.50	34.07	68.98	5.26	2.96
L320	Wesreo	澳大利亚	1.67	36.67	23.33	36.48	64.70	4.95	3.25
L339	SWU66	重庆 (中国)	10.00	108.75	36.25	35.43	71.45	5.38	4.70
L375	中双 7 号	湖北 (中国)	4.00	81.25	37.50	36.80	53.32	4.66	2.31
L303	03LF1	甘肃 (中国)	8.33	75.00	26.67	40.04	87.19	5.36	5.92
L363	SWU102	重庆 (中国)	5.00	62.50	33.75	38.35	61.84	4.91	2.81
L387	皖油 12	安徽 (中国)	5.00	82.50	42.00	36.40	68.42	5.38	2.95
L352	SWU85	重庆 (中国)	7.50	75.00	36.25	34.30	89.41	4.79	4.15
L335	SWU61	重庆 (中国)	5.00	72.50	28.00	34.89	74.78	4.42	4.18
L366	WH-366	湖北 (中国)	6.00	76.00	36.00	32.99	65.40	6.88	3.57
L420	宁油 12	江苏 (中国)	7.50	75.00	35.00	33.45	61.09	5.85	3.79
L471	WH-100	湖北 (中国)	2.00	66.00	37.00	39.64	62.36	5.36	3.11
L427	棉 96—203 (09)	青海(中国)	7.00	50.00	34.00	36.68	76.08	5.88	4.37
L482	胜利油菜	日本	3.33	51.67	33.33	42.37	72.36	5.26	3.12
L405	盐 6055	江苏 (中国)	6.67	50.00	43.33	37.12	76.44	5.44	3.60
L314	南川长角	重庆 (中国)	3.33	40.00	38.33	34.15	78.21	5.21	4.05
L466	WH-83	湖北 (中国)	7.00	81.67	33.00	40.77	86.58	5.81	4.67
L446	WH-446	湖北 (中国)	6.00	66.67	26.25	36.26	75.11	4.89	3.20
L484	Taisetsu	日本	1.25	63.33	31.67	32.80	69.14	4.81	3.24

L424	宁油 10 号	江苏 (中国)	5.00	55.00	35.00	40.04	59.15	5.16	3.20
L469	WH-93	湖北 (中国)	5.00	35.00	26.67	35.20	63.30	5.12	2.37
L403	华航 901	湖北 (中国)	6.25	67.50	38.75	33.27	78.42	5.09	3.66
L435	WH-17	湖北 (中国)	8.00	90.00	34.00	41.95	79.38	5.94	4.20
L491	WESBROOK	澳大利亚	5.00	59.00	31.25	42.84	66.80	6.15	3.72
L444	WH-29	湖北 (中国)	3.75	53.75	31.25	38.18	64.43	4.52	2.58
L442	WH-442	湖北 (中国)	7.50	106.25	28.75	34.58	87.84	5.49	4.11
L490	chuosenshu	韩国	2.00	50.00	28.00	37.76	64.29	5.35	3.07
L456	WH-55	湖北 (中国)	7.50	71.25	35.00	42.49	87.66	5.84	4.06
L449	WH-38	湖北 (中国)	3.75	33.75	33.75	40.14	66.16	4.72	3.22
L443	WH-28	湖北 (中国)	5.00	58.75	28.75	33.21	74.15	4.98	3.18
L400	中双 4 号	湖北 (中国)	2.00	48.00	27.00	35.03	67.74	5.18	2.75
L495	密角多头油菜	上海 (中国)	5.00	55.00	33.33	42.85	82.66	5.90	4.28
L402	阳光 198	湖北 (中国)	5.00	77.00	34.00	41.40	83.49	5.13	3.59
L499	勺叶青	上海 (中国)	5.00	87.50	28.00	35.84	72.73	5.70	3.40
L487	comet	瑞典	6.00	60.00	32.00	37.24	54.95	5.66	2.94
L433	WH-433	湖北 (中国)	5.00	75.00	25.00	34.09	75.29	5.63	4.06
L514	沛选 170	江苏 (中国)	6.25	91.25	47.50	40.78	61.99	6.35	5.07
L512	淮油 6 号	日本	5.00	85.00	37.00	34.17	66.98	5.79	4.30
L425	Helios	丹麦	5.00	63.33	26.67	35.75	80.89	5.25	2.92
L441	WH-26	湖北 (中国)	10.00	105.00	40.00	40.50	71.19	6.15	4.42
L437	WH-20	湖北 (中国)	2.50	82.50	25.00	39.83	51.03	6.10	3.04
L477	华油 6 号	湖北 (中国)	8.00	78.33	35.00	32.39	65.10	5.47	2.85
L407	希望 106	湖北 (中国)	10.00	107.50	30.00	34.48	68.02	6.79	4.57
L463	WH-62	湖北 (中国)	2.00	71.67	28.33	34.30	79.67	5.36	3.53
L419	WH-419	湖北 (中国)	2.00	56.00	30.00	36.46	55.74	5.23	3.00
L475	NY7	江苏 (中国)	5.00	55.00	40.00	33.55	67.93	5.69	3.61
L452	WH-43	湖北 (中国)	4.00	78.00	30.00	39.14	83.27	5.28	3.37
L467	WH-85	湖北 (中国)	4.00	45.00	29.00	35.98	82.93	4.88	3.22
L451	WH-42	湖北 (中国)	6.00	73.00	26.00	29.74	65.64	5.40	4.15
L464	WH-63	湖北 (中国)	7.50	80.00	30.00	39.77	60.66	6.41	4.08
L458	WH-57	湖北 (中国)	10.00	77.50	32.50	35.52	75.79	7.17	4.82
L498	沪油三号	上海 (中国)	8.33	100.00	52.50	37.42	74.79	5.38	4.74
L439	WH-24	湖北 (中国)	3.75	52.50	27.50	34.73	63.18	4.98	3.54
L440	WH-440	湖北 (中国)	11.25	112.50	38.75	35.80	68.81	6.58	4.06
L468	WH-88	湖北 (中国)	5.00	85.00	27.50	37.26	58.73	5.38	3.92
L421	宁油 14	江苏 (中国)	5.00	87.50	27.50	41.85	65.09	5.45	3.32
L503	沪油 16 号	上海 (中国)	5.00	68.00	32.00	36.93	71.69	5.54	3.70
L523	皖油早	安徽 (中国)	5.00	60.00	30.00	36.48	66.37	5.29	3.12
L346	SWU75	重庆 (中国)	6.25	70.00	36.25	40.26	71.35	4.87	3.33
L337	SWU63	重庆 (中国)	7.00	71.00	31.00	32.17	88.79	4.08	2.06
L308	武 164	甘肃 (中国)	5.00	55.00	40.00	34.32	69.76	4.63	2.51
L418	Monty	澳大利亚	6.25	70.00	40.00	34.06	52.29	5.03	3.33
L486	Daichousen	日本	3.00	50.00	34.00	37.91	61.21	4.70	3.13

L408	浙油 17 号	浙江 (中国)	5.00	82.50	42.50	41.56	53.35	5.30	3.02
L494	胜利青梗	上海 (中国)	10.00	83.75	32.50	32.10	50.24	5.25	3.27
L502	漕油 2 号	上海 (中国)	5.00	82.50	31.67	42.63	65.02	5.59	3.19
L506	大花球	江苏 (中国)	3.00	63.00	38.00	42.68	58.16	5.37	3.62
L501	沪激早	上海 (中国)	5.00	64.00	38.00	43.08	53.04	5.31	2.89
L507	荣选	江苏 (中国)	5.00	57.50	28.75	42.18	65.57	5.38	3.02
L143	华双 2 号	湖北 (中国)	5.00	78.75	38.75	35.44	74.60	5.68	4.08
L518	广德 761	安徽 (中国)	7.00	86.00	34.00	40.27	67.43	5.60	3.83
L508	宁油 10 号	江苏 (中国)	2.50	52.50	25.00	36.13	66.88	4.69	3.28
L509	宁油 8 号	江苏 (中国)	8.33	128.33	46.67	37.03	49.88	5.34	3.24
L520	滁 610	安徽 (中国)	9.00	96.67	34.00	43.08	64.48	5.13	3.13
L500	非洲油菜乳黄花	上海 (中国)	5.00	90.00	45.00	36.08	77.66	5.03	4.18
L505	全紫油菜	江苏 (中国)	5.00	96.67	23.00	39.54	74.88	4.90	3.00
L527	申黄 1 号	上海 (中国)	10.00	87.50	42.50	37.31	80.05	5.15	4.24
L102	2354	湖北 (中国)	4.00	90.00	37.00	36.27	66.03	5.35	3.15
L103	2359	湖北 (中国)	5.00	122.50	28.75	40.34	59.59	4.93	3.20
L199	甲预 05 棚	湖北 (中国)	6.67	132.50	36.67	39.26	66.20	5.31	3.38
L127	2012-9478	湖北 (中国)	7.50	112.50	47.50	39.77	59.45	4.46	4.19
L138	中双 7 号	湖北 (中国)	5.00	111.67	30.00	36.00	67.39	4.70	3.33
L145	华油 13 号	湖北 (中国)	11.25	83.33	33.00	38.66	66.91	6.51	3.41
L162	11-P67 东	湖北 (中国)	5.00	91.67	35.00	35.97	60.68	5.04	3.80
L169	10-崇 33	湖北 (中国)	5.00	95.00	35.00	37.42	77.60	5.37	3.66
L184	甲预 16 棚	湖北 (中国)	5.00	75.00	36.00	34.24	63.09	5.11	4.13
L144	Aurora	德国	5.00	91.25	40.00	35.21	73.84	6.12	4.44
L166	10-崇 25	湖北 (中国)	6.00	71.67	46.00	35.03	62.00	4.60	3.39
L183	甲预 25 棚	湖北 (中国)	5.00	81.67	36.67	36.43	64.52	5.84	4.17
L195	甲 951 棚	湖北 (中国)	3.75	46.25	23.75	36.51	67.46	5.96	3.74
L114	2012-11526	湖北 (中国)	5.00	85.00	26.25	33.33	78.90	5.18	3.89
L185	甲预 31 棚	湖北 (中国)	2.50	75.00	40.00	34.02	72.36	4.74	3.39
L113	2011-7103	湖北 (中国)	5.00	86.67	36.67	36.18	62.28	5.22	3.69
L101	1188	湖北 (中国)	5.00	82.50	37.50	37.49	55.01	5.49	4.02
L156	11-9-705	湖北 (中国)	6.00	88.33	41.67	35.87	58.08	5.04	3.26
L125	2012-9354	湖北 (中国)	4.00	67.00	40.00	36.79	72.41	5.24	3.22
L120	2012-8327	湖北 (中国)	5.00	101.67	48.00	31.04	62.79	4.73	3.75
L165	10-崇 24	湖北 (中国)	3.00	95.00	41.67	34.25	66.32	5.08	3.14
L279	B414	新疆 (中国)	5.00	100.00	50.00	34.61	59.99	4.86	5.00
L252	11-1184	青海(中国)	5.00	80.00	41.00	34.86	58.11	5.34	3.68
L142	major	法国	5.00	73.75	36.25	34.48	71.87	4.58	2.92
L285	08-P36	湖北 (中国)	5.00	85.00	57.50	38.09	71.05	6.28	4.76
L229	WH-229	湖北 (中国)	5.00	40.00	30.00	31.09	77.78	5.78	2.80
L288	09-P37	湖北 (中国)	5.00	71.00	44.00	34.26	72.40	5.64	3.04
L171	10-江棚 2	湖北 (中国)	5.00	60.00	26.00	32.69	73.51	5.56	3.34
L132	阳光 198	湖北 (中国)	5.00	70.00	45.00	35.07	79.73	5.35	4.57
L182	甲预 17 棚	湖北 (中国)	7.50	80.00	75.00	37.81	58.72	4.80	3.48

L133	阳光 2009	湖北 (中国)	7.00	115.00	46.00	33.06	66.42	4.34	3.37
L119	2012-5113	湖北 (中国)	3.75	83.33	50.00	29.51	65.80	4.38	3.22
L181	甲 920	湖北 (中国)	5.00	118.75	85.00	34.38	65.84	4.78	3.82
L130	R2	湖北 (中国)	4.00	80.00	68.33	31.46	52.68	4.12	3.04
L121	2012-8355	湖北 (中国)	5.00	120.00	48.33	38.45	55.98	5.29	2.94
L258	陕 2B	陕西(中国)	4.00	53.00	30.00	37.33	43.83	5.09	2.91
L208	史力佳	江苏 (中国)	3.00	65.00	31.00	34.30	68.27	4.44	2.66
L273	GY270	陕西(中国)	7.50	105.00	47.50	43.61	67.12	5.52	3.66
L205	宁油 16 号	江苏 (中国)	5.00	92.00	39.00	40.01	68.55	5.22	3.83
L262	P310	陕西(中国)	2.50	95.00	40.00	42.98	51.76	4.93	3.38
L245	D2	丹麦	5.00	80.00	40.00	39.56	66.69	4.70	3.81
L118	2012-5086	湖北 (中国)	5.00	76.25	32.50	34.67	64.75	4.78	3.45
L281	A97	四川 (中国)	5.00	75.00	34.00	35.60	78.75	5.40	3.19
L179	P18 父本-保持系	湖北 (中国)	5.00	102.50	42.50	37.04	65.56	5.25	4.37
L137	中双 6 号	湖北 (中国)	6.25	90.00	38.75	39.44	62.00	5.95	3.40
L146	rucabo	德国	5.00	70.00	43.33	36.44	66.37	5.49	3.07
L176	11-P74-8 父本	湖北 (中国)	5.00	81.50	41.25	32.92	70.05	5.71	3.29
L257	WH-257	湖北 (中国)	5.00	105.00	45.00	38.11	63.12	5.50	4.05
L231	WH-231	湖北 (中国)	2.00	50.00	32.00	39.50	58.08	5.98	3.02
L276	B262	河南 (中国)	5.00	58.33	30.00	34.69	71.24	4.53	2.74
L253	10-758	青海(中国)	5.00	61.00	35.00	34.92	64.49	4.20	2.64
L192	甲 PF190 棚	湖北 (中国)	6.67	93.33	38.33	36.24	41.89	5.70	3.07
L215	浙油 18	浙江 (中国)	2.50	105.00	43.75	35.74	70.12	5.47	4.26
L201	沪油 17 号	上海 (中国)	9.00	93.33	26.00	37.07	63.92	4.99	3.26
L283	B431	丹麦	4.00	67.50	38.00	37.71	71.39	4.54	2.69
L225	皖油 15 号	安徽 (中国)	7.50	92.50	38.33	44.86	69.32	5.95	3.82
L493	华油 4 号	湖北 (中国)	2.50	74.00	29.00	35.96	59.61	5.12	3.14
L41	CY12PXW-6	四川 (中国)	11.25	113.33	43.75	36.15	54.75	5.67	3.77
L255	10-847	青海(中国)	10.00	138.33	30.00	41.48	53.41	6.20	4.35
L190	甲 904	湖北 (中国)	5.00	96.00	31.00	39.17	55.04	5.74	3.31
L172	10-江棚 3	湖北 (中国)	6.67	115.00	50.00	38.74	63.61	5.08	3.13
L265	P685	陕西(中国)	7.50	103.33	45.00	36.48	74.08	5.68	3.41
L274	GY282	陕西(中国)	5.00	116.25	37.50	36.33	64.86	5.42	3.85
L164	10-崇 23	湖北 (中国)	3.33	67.50	33.33	34.53	70.48	4.80	2.51
L254	10-1230	青海(中国)	5.00	85.00	33.00	37.46	62.27	6.00	3.22
L277	A82	新疆(中国)	6.25	113.33	37.50	42.19	53.35	5.23	3.60
L230	WH-230	湖北 (中国)	6.00	62.00	23.00	35.52	55.83	5.15	3.34
L221	沪油 19	上海 (中国)	5.00	80.00	32.50	35.93	68.05	4.85	3.44
L203	沪油 12 号	上海 (中国)	6.67	97.50	45.00	33.62	63.68	5.59	4.08
L204	宁油 18 号	江苏 (中国)	5.00	88.33	45.00	35.63	72.25	4.01	2.49
L261	P158	陕西(中国)	8.75	125.00	37.50	36.98	71.79	6.53	5.22
L218	浙油 758	浙江 (中国)	5.00	80.00	33.00	30.27	65.36	5.10	3.78
L213	红油 3 号	江苏 (中国)	5.00	70.00	31.25	36.88	66.97	5.31	3.90
L220	沪油 18	上海 (中国)	8.00	107.50	40.00	34.91	51.87	5.03	4.62

L291	11-P30	湖北 (中国)	3.75	80.00	28.75	32.81	76.58	5.35	4.74
L228	皖油 29	安徽 (中国)	5.00	100.00	45.00	35.49	63.30	5.99	3.44
L242	四达	加拿大	5.00	90.00	35.00	36.98	73.62	5.15	3.86
L207	宁油 12 号	江苏 (中国)	7.50	105.00	42.50	42.80	74.25	6.28	4.90
L256	11-1124	青海(中国)	5.00	110.00	45.00	44.31	70.11	6.05	3.42
L260	P113	陕西(中国)	6.25	67.50	32.50	39.26	75.74	5.49	3.70
L211	扬油 5 号	江苏 (中国)	6.25	83.33	48.00	31.34	76.95	5.87	3.71
L264	P668	陕西(中国)	2.50	70.00	47.50	32.73	64.38	4.86	4.61
L447	WH-33	湖北 (中国)	3.75	84.00	46.25	36.34	67.15	5.30	3.12
L268	B250	陕西(中国)	5.00	87.00	40.00	37.78	78.07	5.39	3.97
L496	矮箕胜利	上海 (中国)	7.50	87.50	37.50	41.02	78.97	5.49	4.85
L290	10-P29	湖北 (中国)	5.00	73.75	35.00	33.57	68.49	5.81	3.30
L35	CY12Q8-7	四川 (中国)	6.67	97.50	45.00	36.53	83.20	6.13	4.96
L334	SWU60	重庆 (中国)	4.00	73.75	36.00	37.99	81.98	5.01	3.19
L147	华油 3 号	湖北 (中国)	6.25	81.67	45.00	39.28	68.40	5.82	3.47
L49	CY19PXW-65	四川 (中国)	6.25	78.75	36.25	42.44	73.18	5.73	3.71
L167	10-崇 29	湖北 (中国)	5.00	93.33	41.67	37.57	66.22	5.88	5.26
L106	93210	湖北 (中国)	3.75	77.50	30.00	38.60	62.88	5.20	3.30
L355	SWU89	重庆 (中国)	10.00	91.67	38.33	40.98	67.19	6.26	5.13
L395	沪油 18	上海 (中国)	5.00	76.67	35.00	38.44	60.66	5.11	4.17
L324	Cat.No.117	苏联	5.00	86.25	45.00	35.13	78.83	5.51	3.87
L330	SWU41	重庆 (中国)	3.75	71.25	36.25	38.56	80.96	5.40	4.18
L313	湖北白花油菜	湖北 (中国)	4.00	68.00	33.00	37.75	49.68	5.35	3.87
L326	农林 43	日本	6.25	85.00	30.00	37.99	78.90	5.96	4.89
L329	矮架早	四川 (中国)	6.25	68.33	33.75	33.31	70.57	5.40	3.26
L392	沪油 15	上海 (中国)	6.00	72.50	36.00	36.42	59.80	5.51	4.27
L331	SWU49	重庆 (中国)	5.00	75.00	30.00	42.08	73.79	6.35	4.28
L336	SWU62	重庆 (中国)	5.00	75.00	43.00	36.66	40.92	5.12	3.17
L338	SWU64	重庆 (中国)	7.00	113.00	32.00	25.34	73.93	5.31	3.63
L325	90750	重庆 (中国)	6.25	98.33	32.50	34.36	77.72	4.99	4.05
L322	Gogatsuna	日本	5.00	60.00	26.25	39.94	69.80	5.37	3.06
L217	浙双 8 号	浙江 (中国)	12.50	107.50	27.50	38.78	61.11	6.18	4.17
L210	杨油 6 号	江苏 (中国)	10.00	106.67	43.33	39.46	61.29	6.09	5.14
L223	浙油 21	浙江 (中国)	5.00	80.00	40.00	37.66	41.17	5.16	3.01
L240	cyclon	英国	7.00	78.33	42.50	34.91	51.05	5.28	3.64
L21	SWU53	重庆 (中国)	8.75	72.50	25.00	39.78	63.35	5.90	3.12
L269	B265	陕西(中国)	5.00	73.33	36.67	31.27	67.11	4.75	3.02
L224	浙双 6 号	浙江 (中国)	5.00	78.00	41.00	28.43	55.20	5.04	3.23
L214	苏油 1 号	江苏 (中国)	7.50	80.00	45.00	35.29	72.00	4.92	3.82
L298	DD1	甘肃 (中国)	8.33	116.67	50.00	40.11	61.49	6.68	4.66
L219	沪油 14	上海 (中国)	5.00	82.50	42.50	31.48	62.55	4.91	3.86
L122	2012-8380	湖北 (中国)	3.33	75.00	40.00	35.97	68.62	5.73	3.21
L154	11-9-703	湖北 (中国)	5.00	97.00	37.00	37.32	60.58	5.21	3.96
L266	A117	陕西(中国)	3.75	76.25	36.25	34.50	61.36	5.13	3.42

L131	希望 106	湖北 (中国)	7.00	83.00	37.00	38.40	69.54	5.54	3.97
L140	中油 821Q	湖北 (中国)	5.00	80.00	40.00	40.44	45.96	5.88	4.27
L168	10-崇 32	湖北 (中国)	5.00	98.33	53.75	36.16	57.24	4.67	3.80
L73	1360	湖南 (中国)	5.00	112.50	35.00	33.42	56.39	5.77	5.54
L126	2012-9380	湖北 (中国)	5.00	97.50	38.33	36.34	60.25	5.68	4.43
L226	皖油 16 号	安徽 (中国)	7.50	105.00	32.50	40.34	60.70	5.00	4.05
L323	Nakaee Chousen	日本	8.33	113.33	42.50	37.30	61.44	5.61	4.29
L354	SWU88	重庆 (中国)	7.00	142.50	33.00	40.96	70.64	6.59	4.49
L478	华油 12	湖北 (中国)	5.00	116.25	43.00	36.24	47.18	5.38	3.60
L504	封顶 240	江苏 (中国)	9.00	92.50	26.00	35.61	79.14	5.70	4.28
L193	甲 915	湖北 (中国)	10.00	107.50	30.00	39.03	58.47	6.66	3.52
L139	中油 589	湖北 (中国)	5.00	76.67	36.25	39.05	63.35	6.61	4.12
L62	10-1358	湖南 (中国)	7.50	102.50	42.50	35.88	64.14	5.40	3.26
L189	华双 128	湖北 (中国)	5.00	68.00	33.00	37.23	52.84	5.86	3.63
L178	7-7766-74 套帐	湖北 (中国)	7.50	113.33	42.00	41.40	46.32	6.31	4.44
L263	P312	陕西(中国)	5.00	85.00	42.50	45.11	67.35	5.31	4.20
L450	WH-41	湖北 (中国)	4.00	83.75	35.00	35.06	57.57	5.36	3.43
L515	广德 138	安徽 (中国)	8.33	91.67	40.00	44.40	41.79	6.82	4.17
L455	WH-50	湖北 (中国)	6.25	93.75	32.50	42.62	53.89	4.97	3.53
L445	WH-30	湖北 (中国)	10.00	90.00	35.00	39.05	66.26	6.64	5.00
L516	广德 8104	安徽 (中国)	5.00	80.00	31.67	42.41	54.94	6.04	3.60
L134	中双 10 号	湖北 (中国)	5.00	87.50	50.00	39.21	58.83	5.49	3.53
L115	2012-3448	湖北 (中国)	5.00	85.00	35.00	39.79	55.81	5.20	2.95
L52	CY12GJ-1	四川 (中国)	8.75	108.33	45.00	42.98	71.03	6.58	4.59
L94	RR002	澳大利亚	5.00	67.00	31.00	38.72	64.22	4.95	3.67
L63	1472	湖南 (中国)	5.00	96.67	37.50	36.68	58.86	4.97	3.67
L43	CY13PXW-17	四川 (中国)	5.00	115.00	35.00	33.39	45.09	4.04	2.15
L18	SWU47	重庆 (中国)	8.75	113.33	45.00	43.25	67.48	6.43	4.33
L40	CY12PXW-4	四川 (中国)	5.00	85.00	42.50	38.25	47.40	6.07	4.25
L11	WH-11	湖北 (中国)	5.00	90.00	43.00	37.91	56.82	5.07	3.32
L7	WH-7	湖北 (中国)	3.75	95.00	35.00	39.38	50.79	5.86	4.26
L90	7191	湖北 (中国)	11.00	117.50	42.00	39.70	70.83	5.69	4.17
L4	WH-4	湖北 (中国)	6.25	120.00	33.75	36.11	53.44	5.27	4.31
L93	RR009	澳大利亚	9.00	91.00	45.00	35.52	64.62	5.04	3.30
L2	WH-2	湖北 (中国)	6.67	82.50	37.50	39.41	73.16	5.85	5.54
L86	9F087	湖北 (中国)	6.00	86.25	37.00	37.80	59.95	5.52	3.64
L39	CY12Q21535-N3	四川 (中国)	5.00	83.33	35.00	37.42	70.09	5.56	3.86
L8	WH-8	湖北 (中国)	8.75	92.50	33.75	35.35	53.85	5.54	3.82
L50	CY20PXW-66	四川 (中国)	6.00	95.00	45.00	43.63	62.63	6.08	4.35
L70	783	湖南 (中国)	7.00	87.50	59.00	39.72	57.51	5.55	4.10
L61	10-804	湖南 (中国)	5.00	101.00	34.00	33.65	53.44	5.63	4.09
L24	SWU65	重庆 (中国)	5.00	120.00	35.00	33.73	67.09	5.68	4.15
L17	SWU46	重庆 (中国)	8.33	135.00	40.00	35.11	54.19	6.33	5.06
L99	1570	湖北 (中国)	10.00	118.33	30.00	39.82	69.17	6.40	5.32

L74	563	湖南 (中国)	2.50	66.25	25.00	37.31	68.48	5.11	3.56
L59	10-1061	湖南 (中国)	5.00	103.75	38.75	34.56	56.86	5.12	2.93
L76	santana	德国	13.33	111.67	45.00	36.49	78.69	7.11	4.79
L72	YB3	湖南 (中国)	2.00	57.00	27.00	37.96	62.60	5.48	3.58
L98	1111	湖北 (中国)	6.25	128.33	40.00	36.63	68.45	5.72	3.87
L71	782	湖南 (中国)	5.00	125.00	47.50	32.87	60.50	5.45	4.09
L6	28887	重庆 (中国)	6.67	95.00	35.00	33.59	60.82	5.13	3.34
L9	恩油 73-1-2	重庆 (中国)	7.50	80.00	35.00	41.68	57.33	5.58	3.66
L51	CY21PXW-84	四川 (中国)	5.00	88.75	41.25	35.61	49.61	5.73	2.95
L45	CY15PXW-31	四川 (中国)	5.00	103.33	42.00	36.06	50.68	5.59	4.44
L31	川油 20	四川 (中国)	5.00	85.00	41.67	41.45	49.31	6.30	3.82
L92	RQ011	澳大利亚	3.33	88.33	43.33	40.45	52.80	5.03	3.21
