

贾佳, 汪欢, 段明明, 等. 大豆核心种质籽粒铁、锌含量精准鉴定及相关性分析 [J]. 华南农业大学学报, 2023, 44(5): 760-768.
JIA Jia, WANG Huan, DUAN Mingming, et al. Accurate identification and correlation analysis of iron and zinc contents in soybean core accessions[J]. Journal of South China Agricultural University, 2023, 44(5): 760-768.

大豆核心种质籽粒铁、锌含量精准鉴定及相关性分析

贾 佳✉, 汪 欢, 段明明, 陈 博, 程艳波, 年 海✉

(华南农业大学 农学院/国家大豆中心 广东分中心, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】针对中国居民因铁、锌等微量元素摄取不足引发的营养不良问题,开展大豆核心种质籽粒铁、锌含量的精准鉴定。【方法】以国内外来源不同的 163 份大豆核心种质为材料,2019—2020 年种植于华南农业大学试验教学基地,采用火焰原子吸收光谱仪测定籽粒铁和锌的含量,并进行相关性分析。【结果】大豆种质籽粒铁、锌含量在年份间存在显著差异 ($P<0.05$);籽粒铁质量分数为 71.02~159.92 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均为 107.09 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;籽粒锌质量分数为 36.32~53.11 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均为 42.80 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。相关性分析发现,不同年份间籽粒铁与锌含量存在正相关关系,说明这 2 个元素在大豆籽粒吸收中存在较强的相互促进关系。利用概率分级法将 163 份大豆种质籽粒铁、锌元素含量分为 5 级(即极低、低、中、高和极高),综合分析筛选出 4 份高铁含量、4 份高锌含量、5 份低铁含量、6 份低锌含量和 2 份铁锌含量双高的大豆种质。【结论】鉴定出多份不同来源的高/低铁、锌含量的大豆种质,可用于富铁、锌大豆新品种的选育和种质创新,同时也为营养功能型新品种遗传基础解析提供基础材料,加快推动大豆核心种质在华南地区的开发与利用。

关键词: 大豆; 核心种质; 鉴定; 铁含量; 锌含量; 相关分析

中图分类号: S565.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2023)05-0760-09

Accurate identification and correlation analysis of iron and zinc contents in soybean core accessions

JIA Jia✉, WANG Huan, DUAN Mingming, CHEN Bo, CHENG Yanbo, NIAN Hai✉

(College of Agriculture, South China Agricultural University/Guangdong Subcenter of National Soybean Improvement Center, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】Aiming at the malnutrition problem caused by iron (Fe) and zinc (Zn) minerals deficiency for Chinese people, it is significant to conduct the accurate identification of Fe and Zn contents in soybean core accessions. 【Method】The 163 domestic and foreign soybean core accessions were planted in teaching base of South China Agricultural University consecutively in the early season from 2019 to 2020. The contents of two trace elements of Fe and Zn in the sample grains, were measured by flame atomic absorption spectrometer method, and the correlation analysis was carried out. 【Result】There were significant differences in the contents of two trace elements between the test years ($P<0.05$). The variation range of grain Fe content of soybean germplasm resources in two years was 71.02–147.91 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, the average Fe content was 107.09

收稿日期:2022-11-02 网络首发时间:2023-06-13 17:29:06

首发网址:<https://kns.cnki.net/kcms2/detail/44.1110.s.20230609.1308.002.html>

作者简介:贾 佳, 博士研究生, 主要从事大豆遗传育种研究, E-mail: 1456830603@qq.com; 通信作者: 年 海, 教授, 博士, 主要从事大豆遗传育种研究, E-mail: hnian@scau.edu.cn

基金项目:国家现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-04-PS11); 广东省花生大豆产业技术体系创新团队建设项目 (2022KJ136-03)

mg·kg⁻¹, and the variation range of grain Zn content was 36.32–53.11 mg·kg⁻¹, the average content of Zn was 42.80 mg·kg⁻¹. There was a positive correlation between Fe and Zn contents in grains of 163 soybean lines from different sources in different years, indicating that there was a strong mutual promotion between two elements. The mineral contents of 163 soybean accessions were divided into five grades by probability grading method, namely extremely low, low, medium, high and very high. And four soybean accessions with high Fe content, four with high Zn content, five with low Fe content, six with low Zn content and two with high Fe and Zn contents were screened out. 【Conclusion】 The soybean core accessions screened with high/low Fe and Zn content in this study can not only be used for breeding new accessions rich in Fe and Zn content, but also provide the valuable materials for elucidating the genetic basis of functional and new nutrition accessions, and accelerate the use of soybean core accessions and promote the development of soybean production in the South China area.

Key words: Soybean; Core accession; Identification; Iron content; Zinc content; Correlation analysis

大豆 *Glycine max* 起源于 5 000 多年前的古中国, 有报告预测, 2022/2023 年度世界大豆产量预计为 3.91 亿 t^[1-2]。大豆具有很高的营养价值, 富含蛋白质、维生素、矿质元素和很多生物活性物质等, 以其为原料产生的种类繁多的豆制品在许多亚洲国家的饮食中扮演着重要角色^[3-5]。在过去 25 年里, 随着世界各国人民对大豆营养价值的认识, 豆制品的消耗也在急剧增加^[6]。随着大豆在全球饮食结构中越来越受到重视和对其研究的深入, 科学家们在致力于提升大豆产量的同时, 也日益注重提升大豆籽粒的营养品质^[7-8]。

人类赖以生存的矿质元素有 22 种以上, 铁、锌等微量元素对人体健康不可或缺, 在人体新陈代谢和生物化学功能中占据着重要地位^[9]。由微量元素的摄入不足导致的营养不良问题长期影响着人类的健康, 这种现象被称为“隐性饥饿”^[10-12]。全球超过 30 亿人因为食物中铁、锌含量摄入不足而遭受各种健康问题^[13]。铁和锌是许多关键酶的辅助因子, 参与人体很多代谢过程。例如, 含铁酶参与氧化代谢和类固醇激素合成和电子传递, 除了作为许多酶的辅助因子外, 铁还是载氧血红蛋白的主要成分^{[14]375-392}。而含锌酶在碳水化合物、脂质、蛋白质和核酸的生物合成和降解中发挥重要作用^{[14]393-408}。人体摄入铁、锌含量不足会导致人体生长缓慢和发育不良, 造成视力和免疫能力下降, 还会影响人体的生殖功能, 甚至会导致死亡^[15]。

随着对“隐性饥饿”问题越来越重视, 铁、锌强化作物也越来越多。目前, 国内外已筛选、培育出多种铁、锌强化品种。如国际水稻所选育出高铁水稻品种 IR68144-3B-2-2-3, 其糙米铁质量分数达到 21 mg·kg⁻¹^[16]。2014 年, 印度审定了 6 个高锌含

量的小麦品种 (BHU1、BHU3、BHU5、BHU6、BHU7 和 BHU8), 2015 年在巴基斯坦, 4 个籽粒高锌含量的小麦品种也被审定 (NR419、NR42、NR421 和 Zincl); 扁豆 *Lablab purpureus* 属于旱地作物, 近些年来, 已有 15 个高铁、锌含量的扁豆被国际旱地农业研究中心先后在孟加拉、印度等国审定^[17]。在我国, 相继有高铁含量的小麦、富铁水稻、富铁玉米、铁锌强化小麦等品种被审定及推广^[18]。这些铁、锌强化作物的培育, 在缓解微量元素营养不良方面取得了实质性进展。

铁、锌在不同作物中含量相差甚远。我国小麦籽粒铁质量分数平均约为 45.4 mg·kg⁻¹, 锌质量分数平均约为 30.4 mg·kg⁻¹^[19-20], 水稻籽粒中铁、锌质量分数分别约为 17.69 和 21.5 mg·kg⁻¹^[21-22]。然而在大豆中, 董慕新等^[23]测定了来自我国大豆主要 8 省产区的 90 份大豆籽粒中的铁、锌含量, 发现我国 8 省产区中大豆籽粒的平均铁、锌质量分数分别为 93 和 41 mg·kg⁻¹, 且不同品种的铁、锌含量存在较大差异, 因此筛选、培育出富铁、锌大豆种质意义重大。

增加作物可食用部分中微量元素的含量是解决这些问题的一种比较有效的方法, 被称为“生物强化”。通过作物生物强化来提高大豆籽粒中铁、锌含量, 从而应对“隐性饥饿”, 是一个可行且高效的办法^[24]。本研究连续 2 年 (2019—2020) 在我国华南地区进行试验, 种植了 163 份来自不同国家和地区的大豆核心种质并在成熟期收获, 通过测定籽粒中铁、锌含量及数据分析, 得到大豆籽粒铁、锌含量的基本变异信息与分布规律, 以期为优化大豆微量元素营养品质提供理论支持与参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

来自国内外不同地区农艺性状优良的 163 份大豆核心种质, 由国家大豆改良中心广东分中心提供, 编号和名称见表 1。

1.2 主要仪器和试剂

电热鼓风干燥箱 (上海一恒), 植物样品粉碎机 (百信), 万分位电子天平 (岛津), HYP-340 消化炉 (上海纤检), 铁、锌空心阴极灯 (岛津), 火焰原子吸

收光谱仪 (岛津)。铁、锌标准溶液购于国家标准物质中心, 优级纯高氯酸、优级纯硝酸, 试验用水为超纯水。

1.3 试验设计

163 份大豆种质分别于 2019 年和 2020 年 6 月底种植于广州市华南农业大学试验教学基地 (23.17°N, 113.37°E)。试验用地均选择肥力均匀、土壤结构一致和地势平坦的地块。试验采用随机区组排列, 小区畦宽 2.50 m, 畦长 50.00 m, 行株距为 50 cm × 10 cm, 单粒播种, 每份材料种植 3 行重

表 1 163 份大豆种质的编号与名称
Table 1 Number and name of 163 soybean accessions

编号 No.	名称 Name	编号 No.	名称 Name	编号 No.	名称 Name	编号 No.	名称 Name	编号 No.	名称 Name
1	BX1	34	泉豆27	67	HX13	100	华春2号	133	耐荫黑豆
2	BX2	35	泉豆5号	68	HX14	101	HX3	134	新晃黑豆
3	BX3	36	圣豆40	69	HX16	102	2015-XT-23	135	永顺黑豆
4	BX4	37	M6-497	70	HX17	103	2015XT-35	136	徐豆20
5	BX5	38	M桂2-599	71	HX18	104	瓦窑黄豆	137	南农99-6
6	BX6	39	Y15	72	HX20	105	桂早1号	138	赣2016-7
7	BX7	40	Y16	73	HX21	106	桂0112-3	139	赣豆10
8	BX8	41	Y1697	74	HX22	107	桂0114-4	140	赣豆5
9	BX9	42	Y1800	75	HX23	108	桂0513-3	141	赣豆7
10	BX10	43	Y19	76	HX24	109	桂1605	142	S2
11	BX11	44	Y3	77	HX25	110	桂1701	143	S20
12	BX12	45	Y4	78	粤春2013-1	111	桂1702	144	Young
13	BX14	46	Y5	79	粤春2014-2	112	桂1703	145	S427/5/7
14	BX15	47	Y6	80	粤春2015-2	113	桂春16号	146	S519/6/14
15	BX16	48	本地2号	81	粤春2017-1	114	桂春1805	147	SOMA
16	BX17	49	华春1号	82	粤夏05-3	115	桂春1号	148	TGX1803-20E
17	BX18	50	华春3号	83	粤夏05-5	116	桂春5	149	TGX1903-3F
18	ICA-6-2	51	华春5	84	粤夏2012-1	117	桂春豆1号	150	TGX1908-89
19	BX13	52	华春6号	85	粤夏2013-1	118	桂夏1801	151	OPE-Para4
20	中黄24	53	华春7号	86	粤夏2013-2	119	桂夏1802	152	TGX48-30-20F
21	福豆12	54	华春8号	87	粤夏2013-4	120	桂夏7号	153	简阳五月黄
22	福豆15	55	华春10号	88	粤夏2014-3	121	桂夏豆109	154	贡秋豆5号
23	福豆234	56	华春11号	89	粤夏2014-6	122	桂夏豆116	155	贡夏6973
24	福豆310	57	华春12号	90	粤夏2016-1	123	桂夏豆117	156	贡夏7103
25	莆豆019	58	粤春2016-1	91	粤夏2016-2	124	桂夏豆118	157	贡夏8173
26	莆豆014	59	粤春2016-2	92	粤夏2016-4	125	桂夏豆119	158	贡选1号
27	莆豆041	60	HX1	93	粤夏2017-1	126	桂夏豆2号	159	滇86-5
28	莆豆5号	61	HX2	94	粤夏2017-2	127	黔豆6号	160	滇豆4号
29	莆豆611	62	HX4	95	粤夏2017-3	128	冀豆12	161	滇豆7号
30	莆豆704	63	HX5	96	粤夏2018-1	129	冀豆17	162	浙春3号
31	莆豆8008	64	HX6	97	粤夏2018-2	130	天隆1号	163	浙春4号
32	泉豆24	65	HX9	98	粤小黄粒1	131	中豆32		
33	泉豆26	66	HX10	99	粤小黄粒3	132	中豆41		

复。严格参照热带亚热带夏大豆区域试验管理方法进行田间管理^[25], 待大豆处于完熟期(R8)后按品系收获豆荚, 脱粒后晒干保存。

1.4 试验方法

1.4.1 籽粒铁、锌含量测定 每个材料挑选 100 粒饱满且无病害的种子, 清洗干净后放入恒温干燥箱内 37 ℃ 充分干燥, 随后使用粉碎机磨成粉末, 过 100 目筛, 暂存 4 ℃ 冰箱备用, 消化前将豆粉统一干燥。

籽粒铁、锌含量测定采用浓硝酸-高氯酸湿法消解法^[26-27]。具体过程: 准确称取 0.5000 g 豆粉(精确至 ± 0.000 5 g) 加入到消化管中, 加入现配的混合酸(HNO₃:HClO₄ 体积比=4:1) 10 mL, 避光静置冷消化 12 h。把消化管置于消化炉上, 120 ℃

进行消煮, 1 h 后温度调至 240 ℃, 待到有白烟产生时, 将温度调至 280 ℃, 直到管内白烟散尽, 此时溶液呈无色澄清透明状或者微带黄色, 预示着样品已充分消化。取下消化管, 静置冷却(此时体积大约为 1 mL)。将消化管中的溶液转移到 50 mL 容量瓶中, 期间使用超纯水进行 3~4 次润洗, 以确保消化样品全部转移, 并定容到 50 mL, 摇匀, 室温下静置, 准备进行微量元素的测定。为了验证试验的准确性, 每次消化过程设置 2 个空白对照。

1.4.2 仪器工作条件 本试验中, 铁和锌元素的测量均使用空气-乙炔火焰原子吸收分光光度法, 用一定浓度的铁、锌元素标准样品(试验样品浓度范围内) 上机测试并调试仪器, 从而得到最适测定参数, 工作条件如表 2。

表 2 仪器工作条件
Table 2 Working conditions of instrument

元素	λ/nm	I _k /mA	狭缝宽度/nm	燃头高度/mm	点灯方式	燃气流量/(L·min ⁻¹)	助燃气
Element	Wave length	Lamp current	Slit width	Burner height	Lighting method	Gas flow	Supporting gas
Fe	248.3	12	0.2	9.0	BGC-D ₂	2.2	空气
Zn	213.9	8	0.7	7.0	BGC-D ₂	2.0	空气

1.4.3 标准曲线的绘制 根据表 2 火焰原子吸收仪的参数操作, 分别配置一定浓度梯度(试验样品

浓度范围内) 的铁、锌标准溶液并进行检测, 然后绘制元素的标准曲线, 如图 1 所示:

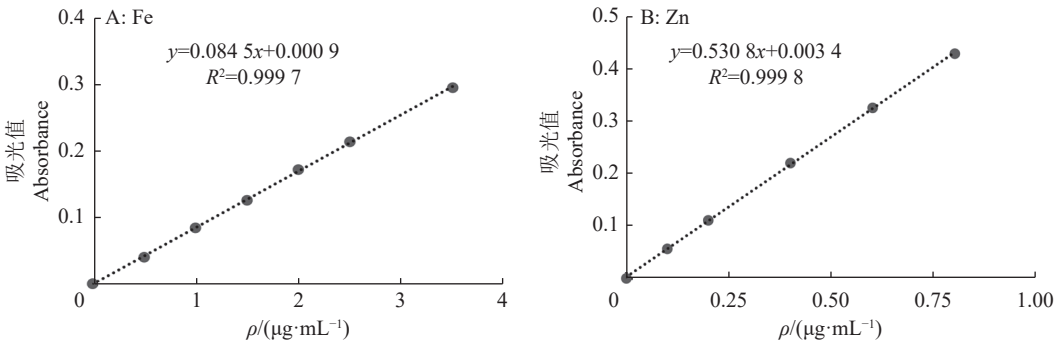


图 1 铁和锌元素的标准曲线
Fig. 1 Standard curves of Fe and Zn elements

1.5 数据统计与处理

将测定结果依次录入到 Excel 2016 表中, 同一样品 3 次测量值取平均值得到最终单个环境对应的表型数据。利用 SPSS 22.0 对各个环境的表型数据进行描述性统计、Kolmogorov-Smirnov 正态性分布检验(K-S 检验) 和方差分析, 使用 GraphPad Prism 8 软件对数据进行频率分布直方图绘制, 使用 Origin 22 对表型数据进行 Pearson 相关性分析。采用 K-S 检验法, 用 $(X-1.2818S)$ 、 $(X-0.5246S)$ 、 $(X+0.5246S)$ 和 $(X+1.2818S)$ 这 4 个点将性状分为 5 级, 其中 X 、 S 分别代表性状的平均值和标准

差^[28-29]。

2 结果与分析

2.1 大豆籽粒表型数据统计分析

利用火焰原子吸收光谱仪测定了 163 份大豆核心种质籽粒的铁和锌含量。对籽粒铁、锌含量描述性统计分析结果见表 3, 由表 3 可知, 2019 年不同来源大豆种质籽粒铁质量分数变化范围为 71.02~147.91 mg·kg⁻¹, 平均为 97.17 mg·kg⁻¹, 2020 年大豆籽粒铁质量分数变化范围为 90.19~159.92 mg·kg⁻¹, 平均为 117.02 mg·kg⁻¹; 2019 年不

表 3 不同年份 163 份大豆种质籽粒铁、锌含量的描述性统计

Table 3 Descriptive statistical of grain Fe and Zn content in 163 soybean accessions in two years

元素 Element	年份 Year	w/(mg·kg ⁻¹)				变异系数/% Coefficient of variation	K-S检验 K-S test			F ¹⁾
		最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 Standard deviation		偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	Sig. 值 Sig. value	
Fe	2019	71.02	147.91	97.17	16.02	16.49	1.01	0.63	0.00	12.09**
	2020	90.19	159.92	117.02	13.00	11.11	0.58	0.44	0.20	7.58**
	平均 Mean	84.14	144.86	107.09	11.22	10.48	0.65	0.51	0.20	2.02**
Zn	2019	34.62	53.11	42.41	3.48	8.21	0.11	-0.10	0.20	30.62**
	2020	36.32	51.47	43.41	3.06	7.05	0.03	-0.42	0.20	1.31*
	平均 Mean	37.03	49.51	42.80	2.45	6.43	0.00	-0.66	0.20	3.71**

1) “*” 和 “**” 分别表示数据在0.05和0.01水平上差异显著
1) “*” and “**” indicate there were significant difference at 0.05 and 0.01 levels, respectively

同来源大豆种质籽粒锌质量分数变化范围为 34.62~53.11 mg·kg⁻¹, 平均为 42.41 mg·kg⁻¹, 2020 年大豆籽粒锌质量分数变化范围为 36.32~51.47 mg·kg⁻¹, 平均为 43.41 mg·kg⁻¹。2019 年籽粒铁、锌质量分数的变异系数最大, 分别为 16.49% 和 8.21%, 但从两者整体比较来看, 籽粒锌含量的变化较小。此外, 从单因素方差分析可知, 不同年份下, 163 份大豆种质籽粒铁、锌含量均存在明显差异 ($P<0.05$)。

通过数据整体分布可知, 2019 年籽粒铁含量的偏度绝对值大于 1, 除此之外, 2020 年籽粒铁含

量以及 2019 和 2020 年籽粒锌含量的偏度和峰度的绝对值都小于 1; 经过 K-S 检验分析得知, 除 2019 年籽粒铁含量差异性显著的检验值 (Sig. 值) 小于 0.05 外, 其余年份下铁、锌含量表型 Sig. 值都大于 0.05, 表明除 2019 年籽粒铁含量外, 都符合正态分布, 这些结果与偏度、峰度的结果相一致。结合籽粒铁、锌含量频率分布直方图 (图 2) 可知, 2019 年中籽粒铁含量呈现一定程度的偏左移偏态分布, 但分布形态仍符合正态分布, 结合数量性状的遗传特点, 这一特殊情况仍可当做正态分布进行后续分析。

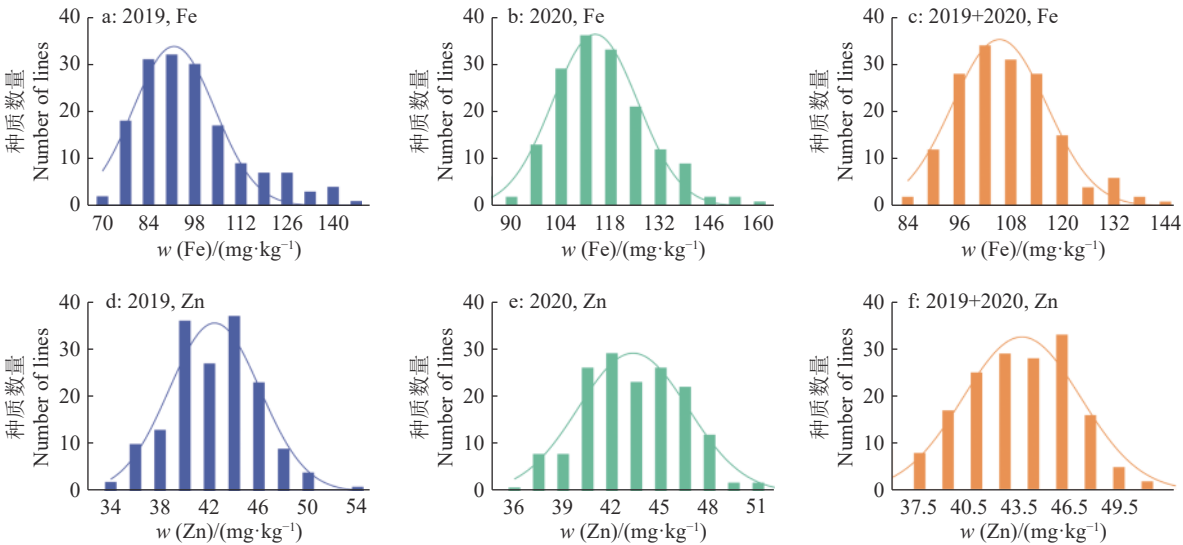


图 2 2019—2020 年 163 份大豆种质籽粒铁、锌含量频率分布直方图

Fig. 2 Histogram of frequency distribution of grain Fe and Zn contents of 163 soybean accessions in 2019 and 2020

2.2 大豆籽粒铁、锌含量间相关性分析

利用 Origin 22 对不同种质来源及种植年份的大豆籽粒铁、锌含量进行相关性分析。结果 (图 3) 表明, 总计的 15 对相关系数均表现为正相关, 相关

性达显著的有 11 对 ($P<0.05$), 占总数的 73.33%。2019 年籽粒铁含量与 2020 年籽粒铁含量、铁平均含量、2019 年籽粒锌含量、2020 年籽粒锌含量和锌平均含量的相关系数分别为 0.13、0.78、0.30、

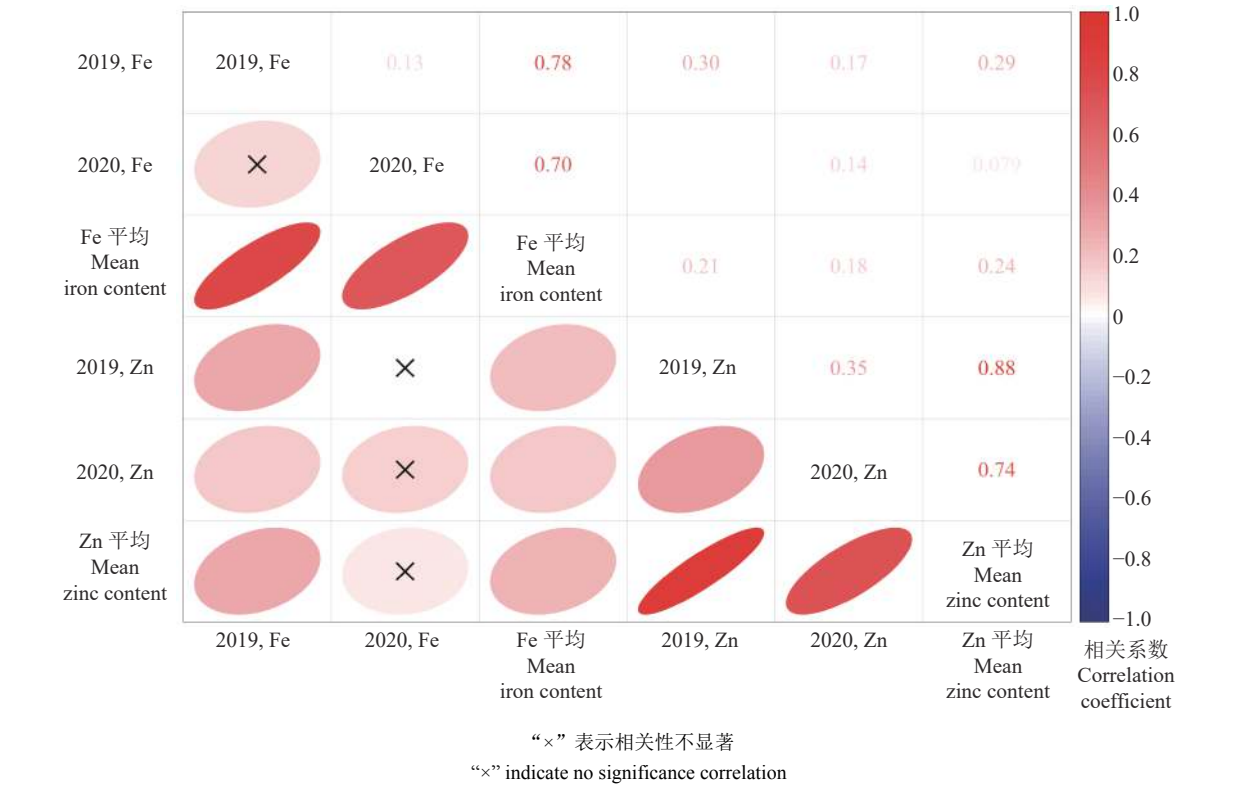


图 3 2019—2020 年 163 份大豆种质籽粒铁、锌含量相关性分析

Fig. 3 Correlation analyses of grain Fe and Zn contents of 163 soybean accessions in 2019 and 2020

0.17 和 0.29; 2020 年籽粒铁含量与铁平均含量、2019 年籽粒锌含量、2020 年籽粒锌含量和锌平均含量的相关系数分别为 0.70、0、0.14 和 0.079; 铁平均含量与 2019 年籽粒锌含量、2020 年籽粒锌含量和锌平均含量的相关系数分别为 0.21、0.18 和 0.24; 2019 年籽粒锌含量与 2020 年籽粒锌含量和锌平均含量的相关系数分别为 0.35 和 0.88; 2020 年籽粒锌含量与锌平均含量的相关系数为 0.74。由相关分析可以看出, 大豆籽粒铁含量越高, 伴随着籽粒锌含量也高, 说明籽粒铁含量和锌含量的吸收有一定的相互促进作用, 进一步说明大豆籽粒铁和锌的含量积累可能具有相似的相关遗传机制^[30]。

2.3 大豆籽粒铁、锌含量概率分级

根据 K-S 检验法, 按照 $(X-1.2816S)$ 、 $(X-0.5244S)$ 、 $(X+0.5244S)$ 、 $(X+1.2816S)$ 这 4 个分割点将不同种质来源及种植年份的大豆籽粒铁、锌含量性状从低到高顺序各分为 5 个等级, 以 1、2、3、4 和 5 级表示, 其分别代表极低、低、中、高和极高, 性状划分等级标准可以用来筛选评价大豆种质, 性状表现极高品质可作为大豆育种利用的基础亲本材料。

根据分级标准计算得出了各级分界点和每一级相应的具体大豆种质数量 (表 4)。由表 4 可知: 2019 年, 163 份大豆种质中, 铁质量分数 < 76.64

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为 1 级 (极低), 代表种质有粤春 2015-2、莆豆 8008、桂春 16 号等共 7 份, 铁质量分数 > 117.70 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为 5 级 (极高), 代表种质有华春 1 号、BX17、贡夏 8173 等共 22 份; 2020 年, 铁质量分数 < 100.36 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为 1 级 (极低), 代表种质有华夏 16、莆豆 5 号、华夏 25 等共 15 份, 铁质量分数 > 133.68 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为 5 级 (极高), 代表种质有桂早 1 号、BX17、莆豆 704 等共 16 份。2019 年, 163 份大豆种质中, 锌质量分数 < 37.95 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为 1 级 (极低), 代表种质有瓦窑黄豆、桂春 1 号、桂春 5 号等共 17 份, 锌质量分数 > 46.87 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为 5 级 (极高), 代表种质有桂夏 7 号、桂 1701、赣豆 7 号等共 14 份; 2020 年, 锌质量分数 < 39.49 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为 1 级 (极低), 代表种质有中豆 41、冀豆 12、桂春 16 等共 16 份, 锌质量分数 > 47.33 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为 5 级 (极高), 代表种质有赣豆 7 号、中黄 24、华春 3 号等共 16 份。从整体来看, 不同年份 163 份大豆种质铁、锌含量处在概率分级中级的数量均是最多的。

2.4 籽粒铁、锌含量表现突出的大豆种质筛选

通过 2 年大豆籽粒铁、锌含量数据分析和比较可知, 大豆籽粒铁、锌含量变异较大, 因此鉴定出环境稳定的富铁、锌大豆非常重要。由表 5 可知, 基于不同种质来源和两年平均铁、锌含量 K-S 检验概率分级, 粤夏 2018-2、BX7 和 TGX1803-20E 的籽粒

表 4 163 份大豆种质籽粒铁、锌含量概率分级¹⁾

Table 4 Probability classification of grain Fe and Zn contents of 163 soybean accessions w/(mg·kg⁻¹)

元素 Element	年份 Year	1/极低 1/Very low	2/低 2/Low	3/中级 3/Middle	4/高 4/High	5/极高 5/Very high
Fe	2019	<76.64(7)	76.64 ~ 88.77(50)	88.77 ~ 105.57(66)	105.57 ~ 117.70(16)	>117.70(22)
	2020	<100.36(15)	100.36 ~ 110.20(31)	110.2 ~ 123.84(19)	123.84 ~ 133.68(25)	>133.68(16)
	平均 Mean	<92.71(14)	92.71 ~ 101.20(40)	101.2 ~ 112.98(64)	112.98 ~ 121.47(32)	>121.47(13)
Zn	2019	<37.95(17)	37.95 ~ 40.58(31)	40.58 ~ 44.24(60)	44.24 ~ 46.87(40)	>46.87(14)
	2020	<39.49(16)	39.49 ~ 41.8(29)	41.8 ~ 45.02(58)	45.02 ~ 47.33(36)	>47.33(16)
	平均 Mean	<39.28(21)	39.28 ~ 41.36(29)	41.36 ~ 44.24(57)	44.24 ~ 46.32(38)	>46.32(18)

1) 括号中数据为相应概率等级的种质数量
1) Data in brackets represent the number of the soybean accessions in the corresponding probability classification

表 5 大豆种质籽粒铁、锌含量突出表现材料概要¹⁾

Table 5 Summary of soybean accessions with prominent grain Fe and Zn contents

类型 Type	Fe含量突出 Outstanding Fe content		Zn含量突出 Outstanding Zn content	
	名称 Name	w(Fe)/(mg·kg ⁻¹)	名称 Name	w(Zn)/(mg·kg ⁻¹)
高含量 High content	粤夏2018-2	144.86±23.10	桂夏豆116	49.51±1.64
	BX17	140.13±8.35	桂夏豆109	48.92±2.43
	TGX1803-20E	131.44±7.05	贡夏6973	47.85±4.40
	华夏24	130.76±9.50	赣豆7	47.74±2.19
	圣豆40	130.08±4.14	粤春2017-1	47.56±2.00
			桂夏豆117	47.11±1.62
			桂夏7号	47.10±0.70
			OPE-Para4	46.96±1.65
双高含量 Double high content	桂1701	136.30±13.67	桂1701	47.58±3.16
	桂夏豆109	127.33±6.02	桂夏豆109	48.92±2.43
低含量 Low content	粤春2015-2	84.14±12.12	S519/6/14	37.03±1.94
	TGX1908-89	84.38±6.96	中豆41	37.28±2.11
	S20	87.12±12.10	桂春5	37.47±2.55
	莆豆5号	88.77±10.81	Y4	37.62±2.43
	粤夏2017-2	90.63±5.63	Y6	37.83±2.89
			桂春1号	37.89±2.11
双低含量 Double low content	S20	87.12±12.10	S20	39.12±2.20
	瓦窑黄豆	90.91±14.39	瓦窑黄豆	38.44±5.49
	Y6	91.40±10.44	Y6	37.83±2.89
	BX5	91.62±15.66	BX5	38.97±0.96

1) 表中数据为3次重复的平均值±标准差
1) The data in the table show the mean ± standard deviation of three replicates

铁含量都处于极高类别, 粤春 2015-2 的籽粒铁含量都处于极低类别; 桂夏豆 116、桂夏豆 109、贡夏 6973 和赣豆 7 的籽粒锌含量都处于极高类别, 桂春 5、Y4 和桂春 1 号的籽粒锌含量都处于极低类别。此外, 华夏 24 和圣豆 40 虽然在 2020 年其籽粒铁含量不属于极高类型, 但是其 2019 年和两年平均铁

含量均属于极高类型, 并且其变异较小, 比较稳定, 粤春 2017-1、桂夏豆 117、桂夏 7 号和 OPE-Para4 的籽粒锌含量情况类似; TGX1908-89、S20、莆豆 5 号和粤夏 2017-2 的籽粒铁含量在 2019 年不属于极低类型, 但是其在 2020 年和两年的平均铁含量均属于极低类型, 且其变异较小和表现比较稳

定, 而 S519/6/14、中豆 41 和 Y6 的籽粒锌含量情况类似; 桂 1701 和桂夏豆 109 的两年平均铁、锌含量均属于极高类型, 其分别在不同年份中表现突出, 属于籽粒高铁高锌含量的双高大豆种质代表; S20、瓦窑黄豆、Y6 和 BX5 的两年平均铁、锌含量均属于极低类型, 其分别在不同年份中表现突出, 属于籽粒低铁、低锌含量的双低大豆种质代表。所以, 最终从 163 份核心种质中分别筛选到 5 份稳定的高铁材料和 8 份稳定的高锌材料; 5 份稳定的低铁材料和 6 份稳定的低锌材料; 2 份铁锌含量双高材料和 4 份双低材料。

3 讨论与结论

可摄入矿质元素的缺乏是人类正面临的又一挑战, 生物强化可能是一个解决此困境的有效方法。这一过程可以通过普通植物育种和现代生物技术极大地提高主食作物的矿质元素含量, 从而对人类健康产生显著的影响^[25]。铁和锌在全球公共健康上有一个重要的生物学相关性和临床意义^[31]。在人体中, 铁是红细胞中血红蛋白的形成所必需的, 也是能量代谢所需要的, 并且是细胞内电子的传输介质, 另外, 在各种组织重要的酶系统中, 铁有着不可或缺的作用; 锌同样有着重要的作用, 锌是许多酶结构中的重要组成部分, 也是蛋白和遗传物质的形成中所必需的, 锌在味觉感知、伤口愈合、精子产生、胎儿正常发育、性成熟和免疫系统健康等方面起着重要作用^[3]。

大豆不同种质间籽粒铁、锌含量存在很大的差异。本研究连续两年测定 163 份不同来源的大豆核心种质, 结果显示, 不同年份籽粒铁、锌含量存在显著差异, 且呈现偏正态分布, 籽粒铁、锌含量间存在显著正相关性。相同品种在不同年份下籽粒铁、锌含量也存在差异。通过概率分布检验分析, 分别筛选到 5 份稳定的高铁含量、8 份稳定的高锌含量、5 份稳定的低铁含量、6 份稳定的低锌含量、2 份铁锌含量双高和 4 份双低含量的大豆代表种质。桂 1701 和桂夏豆 109 籽粒铁和锌的含量都很高, 说明这两个品种自身对铁、锌的吸收能力较强。通过品种改良, 提高铁、锌微量元素含量, 利于营养功能型大豆新品种选育。桂夏豆 109 是由中豆 8 号和 BX13 杂交育成的夏大豆中熟品种, 作为母本的中豆系列品种和作为父本的巴西系列品种都表现出较强的铁、锌富集能力。这些材料都将为华南地区高铁、锌含量大豆品种选育、种质创新以及相关遗传解析提供材料支撑。

作物籽粒中铁和锌的含量同时受自身基因型 and 环境的交互影响。提高作物籽粒中的铁和锌元素的含量, 通常可通过常规育种、分子辅助育种和基因工程等手段来实现。对于常规育种, 选定出主干亲本, 将控制籽粒高铁、锌含量的基因与其他控制优异农艺性状基因聚合在一起, 培育出籽粒高铁、锌含量和产量高等品种, 是一种行之有效的办法。例如, 高铁水稻品种 IR68144-3B-2-2-3 和高铁、高锌小麦品种秦黑 1 号就是通过优异亲本杂交而成功选育的^[16, 32]。本研究所测定的 163 份国内外大豆资源中, 籽粒铁质量分数变化范围为 71.02 ~ 159.92 mg·kg⁻¹, 籽粒锌质量分数变化范围为 34.62 ~ 53.11 mg·kg⁻¹。说明参试大豆资源籽粒铁、锌质量分数存在丰富的遗传潜力, 生产上可根据需要选择不同的大豆资源作为基础亲本材料进行种植或者进行选择育种, 育成专有型品种。利用概率分级法分别将大豆籽粒铁、锌质量分数性状分为 5 级, 即极低、低、中、高和极高, 推荐极高品系作为大豆籽粒高铁、高锌含量育种利用的基础亲本材料。

目前我国在大豆的栽培育种上正在积极开展各项工作来提高籽粒矿质元素的积累。大豆含有非常丰富的营养物质和矿质元素, 是人体吸收铁和锌元素的重要食物来源^[33], 因此分析大豆种质资源籽粒中铁、锌含量可为培育富铁、锌大豆提供重要依据。本研究连续两年在华南农业大学试验基地进行试验, 163 份不同来源大豆种质资源籽粒铁、锌微量元素被鉴定。结果表明: 大豆籽粒铁、锌元素含量受到基因型 and 环境的共同影响, 相同品系在不同年份下由于气候和降雨等因素从而存在一定的差异, 不同品系由于基因型的影响, 对环境的敏感程度也不相同。不同来源大豆种质资源间的铁、锌含量也存在显著差异, 籽粒铁、锌质量分数变异系数分别为 10.48% ~ 16.49%、6.43% ~ 8.21%, 表现出丰富的遗传变异。鉴于目前大豆的生产环境, 研究大豆的矿质元素含量以及矿质元素之间的关系, 筛选出品质性状表现优良的品种是具有科学意义的。

参考文献:

[1] 梁勇. 2022 年 7 月世界农产品供需形势预测简报[J]. 世界农业, 2022(8): 127-132.

[2] 寇坤. 大豆 *SOC1a* 和 *SOC1b* 基因调控开花的功能研究[D]. 哈尔滨: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2021.

[3] SEDIVY E J, WU F Q, HANZAWA Y. Soybean domestication: The origin, genetic architecture and molecular bases[J]. The New Phytologist, 2017, 214(2): 539-553.

[4] 张东辉, 杨青春, 耿臻, 等. 有机大豆营养功效及栽培技

术[J]. 农业工程, 2017, 7(2): 136-137.

[5] DONG Y, YANG X, LIU J, et al. Pod shattering resistance associated with domestication is mediated by a NAC gene in soybean[J]. *Nature Communication*, 2014, 5: 3352. doi: 10.1038/necmms4352.

[6] MESSINA M, ROGERO M M, FISBERG M, et al. Health impact of childhood and adolescent soy consumption[J]. *Nutrition Reviews*, 2017, 75(7): 500-515.

[7] HUANG J H, MA Q B, CAI Z D, et al. Identification and mapping of stable QTLs for seed oil and protein content in soybean [*Glycine max* (L.) Merr.][J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(23): 6448-6460.

[8] RIZZO G, BARONI L. Soy, soy foods and their role in vegetarian diets[J]. *Nutrients*, 2018, 10(1): 43. doi: 10.3390/nu10010043.

[9] ZHANG Y, GLADYSHEV V N. Comparative genomics of trace element dependence in biology[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 2011, 286(27): 23623-23629.

[10] LIM K H, RIDDELL L J, NOWSON C A, et al. Iron and zinc nutrition in the economically-developed world: A review[J]. *Nutrients*, 2013, 5(8): 3184-3211.

[11] 孙汉青, 刘力宽, 刘韬, 等. 青海 23 份春小麦铁、锌含量分析[J]. 分子植物育种, 2019, 17(19): 6563-6569.

[12] ROY C, KUMAR S, RANJAN R D, et al. Genomic approaches for improving grain zinc and iron content in wheat[J]. *Frontiers in Genetics*, 2022, 13: 1045955. doi: 10.3389/fgene.2022.1045955.

[13] KRISHNA T P A, MAHARAJAN T, CEASAR S A. The role of membrane transporters in the biofortification of zinc and iron in plants[J]. *Biological Trace Element Research*, 2022, 201: 464-478.

[14] MARRIOTT B P, BIRT D F, STALLINGS V A, et al. Present Knowledge in Nutrition [M]. 11th Edition. London: Academic Press, 2020.

[15] WELCH R M, GRAHAM R D. Breeding crops for enhanced micronutrient content[J]. *Plant and Soil*, 2002, 245(1): 267-276.

[16] 朱行. 富含铁元素水稻新品种[J]. 粮食与油脂, 2006, 19(4): 31.

[17] GARG M, SHARMA N, SHARMA S, et al. Biofortified crops generated by breeding, agronomy, and transgenic approaches are improving lives of millions of people around the world[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2018, 5: 12. doi: 10.3389/fnut.2018.00012.

[18] 青平, 曾晶, 李剑, 等. 中国作物营养强化的现状与展望[J]. 农业经济问题, 2019, 40(8): 83-93.

[19] 刘慧. 我国主要麦区小麦籽粒产量和关键营养元素含量评价及调控[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.

[20] 张勇, 王德森, 张艳, 等. 北方冬麦区小麦品种籽粒主要矿物质元素含量分布及其相关性分析[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1871-1876.

[21] 杨治伟. 宁夏粳稻种质资源锌、铁含量的关联分析及地方品种籽粒锌含量的 QTL 定位[D]. 银川: 宁夏大学, 2019.

[22] 张标金, 聂根新, 魏益华, 等. 水稻子粒铁、锌和铜含量的基因型差异分析[J]. 作物杂志, 2014(5): 48-51.

[23] 董慕新, 张辉. 我国八省大豆主要矿质元素含量分布及相关性研究[J]. 作物学报, 1997, 23(5): 550-554.

[24] BOUIS H E, HOTZ C, MCCLAFFERTY B, et al. Biofortification: A new tool to reduce micronutrient malnutrition[J]. *Annals of Nutrition and Metabolism*, 2009(55): 57-58.

[25] 黄欢明. 国家热带亚热带地区夏大豆品种区域试验[J]. 福建农业科技, 2018(9): 37-41.

[26] 邓佑林, 陆婷婷, 黄秀香, 等. 原子吸收分光光度法测定柚子皮中的铜和钾[J]. 化工技术与开发, 2019, 48(9): 39-42.

[27] 叶发兵, 袁娇, 何彦斌, 等. 鄂东茯苓中重金属离子铜、镉含量的测定[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(16): 4269-4271.

[28] 王思琦, 宋记明, 曹敏, 等. 不同木薯种质资源主要矿物质元素差异性分析[J]. 热带作物学报, 2022, 43(8): 1577-1586.

[29] 聂继云, 李志霞, 李海飞, 等. 苹果理化品质评价指标研究[J]. 中国农业科学, 2012, 45(14): 2895-2903.

[30] WANG H, JIA J, CAI Z D, et al. Identification of quantitative trait loci (QTLs) and candidate genes of seed iron and zinc content in soybean [*Glycine max* (L.) Merr.][J]. *BMC Genomics*, 2022, 23(1): 1-14.

[31] GARCIA-OLIVEIRA A L, CHANDER S, ORTIZ R, et al. Genetic basis and breeding perspectives of grain iron and zinc enrichment in cereals[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 937. doi: 10.3389/fpls.2018.00937.

[32] 何一哲. 高铁锌食药兼用小麦: 秦黑 1 号[J]. 农家科技, 2007(10): 7.

[33] 余赛西. 大豆在萌发过程中的铁锌营养强化[D]. 海口: 海南大学, 2018.

【责任编辑 李晓卉】