

## “功能性小麦新品种及其研发利用” 特约专栏文章之三

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2021.02.003

王维, 郭红, 于慧, 等. 富含有益矿质元素小麦种质资源的筛选及育种利用[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(2): 15-24.

WANG W, GUO H, YU H, et al. Screening and breeding utilization of wheat germplasm resources rich in beneficial mineral elements[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(2): 15-24.

# 富含有益矿质元素小麦种质资源的 筛选及育种利用

王 维<sup>1</sup>, 郭 红<sup>1</sup>, 于 慧<sup>1</sup>, 吴崇宁<sup>1</sup>, 李小康<sup>1</sup>, 陈广凤<sup>2</sup>, 田纪春<sup>1</sup>, 邓志英<sup>1</sup>✉(1. 山东农业大学 农学院, 作物生物学国家重点实验室, 小麦品质育种研究室, 山东 泰安 271018;  
2. 德州学院 生态与资源环境学院, 山东 德州 253000)

**摘 要:** 有益矿质元素是人体中不可缺少的营养元素之一。伴随饮食结构的调整, 人们对小麦矿质元素营养方面的需求也越来越强烈。因此, 筛选低重金属含量高有益矿质元素的小麦种质资源对培育高营养矿质元素、低重金属含量的特色小麦新品种和保证农产品的质量安全具有重要的理论和现实意义。研究以 205 份小麦种质为材料, 对 3 年 2 个地点共四个环境下的小麦籽粒进行矿质元素含量的测定及高有益矿质元素和低重金属种质资源的筛选。结果表明, 矿质元素含量在不同环境下和不同的小麦品种中都有差异。总体来看, 各元素的含量均呈连续分布, 是典型的数量性状。小麦籽粒中钙、锰、铜、锌、硒五种矿质元素含量在德州点均显著高于泰安点, 而重金属含量总体上泰安点低于德州点。共筛选出单种有益矿质元素含量较高的材料 38 个, 如钙含量最高的材料为 B111、铁元素含量最高的材料为 B189 等; 多种有益矿质元素含量都比较高的材料有 24 个, 如 B45、B38 和 B21 三个品种的籽粒中同时含有 4 种高含量的有益矿质元素; 高有益矿质元素低有害矿质元素含量的材料共 33 个, 如 B125, Ca、Fe、Cu 的含量较高而 Pb 含量低。

**关键词:** 小麦; 有益矿质元素; 重金属; 种质筛选; 育种利用

中图分类号: TS202.1 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2021)02-0015-10

网络首发时间: 2021-02-07 15:46:58

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.ts.20210207.1341.006.html>

## Screening and Breeding Utilization of Wheat Germplasm Resources Rich in Beneficial Mineral Elements

WANG Wei<sup>1</sup>, GUO Hong<sup>1</sup>, YU Hui<sup>1</sup>, WU Chong-ning<sup>1</sup>, LI Xiao-kang<sup>1</sup>,  
CHEN Guang-feng<sup>2</sup>, TIAN Ji-chun<sup>1</sup>, DENG Zhi-ying<sup>1</sup>✉

(1. Agronomy college of Shandong Agricultural University, Stage Key Laboratory of Crop Biology,

收稿日期: 2020-12-31

基金项目: 山东省农业良种工程(2019LZGC017); 国家自然科学基金(31871613); 山东省高等学校科技计划项目(J17KA148; J17KB116); 山东省研究生教育导师能力提升计划; 山东省重点研发计划(2017GNC10102)

Supported by: Agriculture Liangzhong Project Foundation of Shandong Provincial, China (No.2019LZGC017); National Natural Science Foundation of China (No.31871613); Project of Shandong Province Higher Educational Science and Technology Program (No.J17KA148; No.J17KB116); Shandong Province Postgraduate Education Tutor Capacity Improvement Program; Key Research and Development Project of Shandong Province Plan (No.2017GNC10102)

作者简介: 王维, 女, 1995 年出生, 在读研究生, 研究方向为农艺与种业。E-mail: 1390256098@qq.com.

通讯作者: 邓志英, 女, 1976 年出生, 博士, 教授, 研究生导师, 研究方向为作物分子育种与品质改良。E-mail: deng868@163.com.

Group of Wheat Quality Breeding, Tai'an, Shandong 271018, China; 2. Dezhou University, College of Ecology, Resources and Environment, Dezhou, Shandong 253000, China)

**Abstract:** Beneficial mineral elements are one of the indispensable nutrients in human body. With the adjustment of diet structure, people's demand for mineral elements in wheat is becoming stronger and stronger. Therefore, screening wheat germplasm resources with low heavy metal content and high beneficial mineral elements has important theoretical and practical significance for cultivating new wheat varieties with high nutrient mineral elements and low heavy metal content and ensuring the quality and safety of agricultural products. In this study, 205 wheat germplasms from 2 areas were collected to determine the content of mineral elements and screen germplasm resources with high beneficial mineral elements and low heavy metals under four environments in three years. The results showed that the contents of mineral elements were different in different environments and different wheat varieties. In general, the content of each element showed continuous distribution, which was a typical quantitative character. The contents of calcium, manganese, copper, zinc and selenium in wheat grain in Dezhou point were significantly higher than those in Tai'an, while the contents of heavy metals in Tai'an were lower than those in De Zhou. A total of 38 varieties (lines) with high content of beneficial mineral elements were selected, such as B111 with the highest content of calcium, and the variety with the highest iron content, such as B189. There were 24 varieties (lines) with high contents of various beneficial mineral elements, such as B45, B38 and B21, whose grains contained 4 kinds of high contents of beneficial mineral elements. A total of 33 varieties (lines) with high beneficial mineral elements and low harmful mineral elements contents were identified, such as B125 with higher content of Ca, Fe, Cu and lower Pb.

**Key words:** wheat; beneficial mineral elements; heavy metal; germplasm screening; breeding utilization

人体矿物质元素与其生存的天然环境息息相关,包括常量元素、微量元素和有害元素。目前公认的人体必需的微量元素有 13 种:铁(Fe)、锌(Zn)、铜(Cu)、钼(Mo)、碘(I)、钴(Co)、锰(Mn)、钒(V)、硅(Si)、硒(Se)、氟(F)、镍(Ni)、锡(Sn)<sup>[1]</sup>。中国营养学会认为,人体每日摄取钙元素总量应不超过 2 000 mg;在正常人的膳食中, Mn 的需求量为每天 4~9 mg;推荐成人 Fe 摄入量为 17.5 mg 人/天,可耐受最高摄入量为 50 mg 人/天;成年人每天需要 Cu 0.05~2 mg;成人 Zn 摄入量为男性 15 mg 人/天,女性 11.5 mg 人/天,对锌的可耐受最高摄入量为男性 45 mg 人/天,女性 37 mg 人/天;成人推荐 Se 摄入量为 50 μg 人/天,可耐受最高摄入硒量男女均为 400 μg 人/天。砷(As)元素广泛存在于自然界,几乎在人类所有食品中都有,我国规定原粮中砷含量应低于 0.7 mg/kg<sup>[2]</sup>。

现代营养医学研究表明,矿物质元素在人体中有相当重要的生理作用,但是矿物质元素是人体自身无法合成的,必须要从日常食物当中获取<sup>[3]</sup>。

随着人们生活方式的变化,一部分居民营养失衡,也表现为摄入过量的常量元素、过少的微量元素及有益的非营养元素,这是对人们身体健康造成危害的重要原因。

小麦在我国北方民众生活中是最重要的食物以及矿物质来源,为人们提供了生命活动所需要的蛋白质及矿物质元素等物质,其营养品质跟人类健康有着密切的关系。小麦籽粒中有益矿物质元素的含量低并且生物有效性差,这是中国乃至全球各国尤其是发展中国家广泛存在的问题<sup>[4]</sup>。

小麦籽粒中矿物质元素含量会受到多种因素的影响,例如遗传因素和非遗传因素,包含小麦品种、种植区域的环境情况、施肥的种类以及数量、种植地气候条件等<sup>[5-7]</sup>。

从品种方面来讲,蓝粒小麦和紫粒小麦中的 Mn、Fe、Cu、Zn 的含量都显著高于普通小麦<sup>[8]</sup>。黑粒小麦中的钙(Ca)、Fe、Zn、Se 等元素含量以及蛋白质含量一般都要高于红粒或白粒小麦<sup>[9]</sup>。前人研究发现,小麦中存在可以控制其矿物质元素含量的基因。从野生小麦中克隆而来的 Gpc-B1

基因就是一种能提高小麦籽粒中蛋白质、锌和铁含量的基因<sup>[10]</sup>。

虽然小麦籽粒矿质元素的含量是由环境和基因共同决定的,但是遗传效应对其的影响仍旧很强<sup>[11]</sup>。对一种矿质元素而言,在不同基因型小麦籽粒中的含量差异也会比较大。张勇等从 240 份小麦中筛选出了含 Fe 元素较高的品种(系)8 份,筛选出含 Zn 比较高的品种(系)5 份<sup>[12]</sup>。石荣丽等对中国小麦微核心种质库籽粒矿质元素含量进行了分析,发现在我国小麦籽粒中,八种矿质元素含量都存在明显的基因型差异,小麦籽粒中的 Mn、Fe、Cu、Zn 四种元素含量之间也存在着显著的正相关关系<sup>[13]</sup>。

尽管前人对小麦种质资源进行了筛选,但多数考虑的是有益微量矿质元素,同时考虑有益矿质元素和低重金属元素的筛选,鲜见报道。因此,本研究利用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)对 205 份小麦种质资源 3 年 2 个地点进行了有益矿质元素和重金属含量的测定,以期筛选出高有益矿质元素低重金属含量的优异种质资源,为富含有益矿质元素小麦新品种的培育奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

实验涉及的元素的标准溶液(1 000  $\mu\text{g/mL}$ ): 国家标准物质研究中心。

205 份具有代表性的小麦种质:分别在 2013—2014 年(E1)于山东省德州市、2014—2015 年(E2)、2015—2016 年(E3)、2016—2017 年(E4)于山东省泰安市等两个不同地点种植。四个环境下均为随机区组设计,2 次重复,3 行区种植,均匀播种 40 粒,行长 1.3 m,行间距 0.25 m。将收获的籽粒储藏于 4  $^{\circ}\text{C}$  冷库中备用。

不同地点的土壤条件见表 1。两地土壤中矿质元素含量差异不大,由此可知,两地的土壤条件趋于一致,其对小麦籽粒中矿质元素的影响也趋于一致。

### 1.2 主要仪器

微波消解仪,Multiwave PRO:奥地利 Antonpaar 公司;3100 锤式实验粉碎磨:瑞典 Perten

仪器有限公司;电感耦合等离子体质谱仪,ICAP Q ICP-MS:美国 Thermo Fisher Scientific Inc。

表 1 不同种植环境的土壤条件  
Table 1 Soil conditions in different planting environments

			mg/kg		
地点	元素	均值	地点	元素	均值
德州	Mn	9.39	德州	As	11.91
泰安	Mn	10.68	泰安	As	10.04
德州	Fe	10.86	德州	Cd	0.30
泰安	Fe	13.56	泰安	Cd	0.11
德州	Cu	0.94	德州	Pb	26.43
泰安	Cu	0.83	泰安	Pb	15.33
德州	Zn	70.28			
泰安	Zn	65.55			

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 各元素混合标准溶液的配制

1.3.1.1 钙锰铁铜锌混合标准溶液 标准溶液由 Ca、Mn、Fe、Cu、Zn 五种单元素国家标准母液(国家标准物质研究中心)1 000  $\mu\text{g/mL}$  逐级稀释取得,溶液介质为 10% $\text{HNO}_3$  溶液。根据样品中 Ca、Mn、Fe、Cu、Zn 的含量,制备 5 个浓度梯度的标准工作溶液供检测时使用(表 2)。

表 2 Ca、Mn、Fe、Cu、Zn 混合标准溶液的配制

Table 2 The preparation of standard solution containing Calcium, Manganese, Iron, Copper and Zinc

标准溶液	Std1	Std2	Std3	Std4	Std5
Ca	500	1 000	1 500	2 000	3 000
Mn	50	100	150	200	300
Fe	50	100	150	200	300
Cu	8	16	24	30	40
Zn	40	80	120	200	300

注:混合标准溶液总体积为 100 mL。

Note: The total volume of mixed standard solution is 100 mL.

1.3.1.2 砷硒镉铅混合标准溶液 浓度为 1 000  $\mu\text{g/mL}$  的 As、Se、Cd、Pb 四种元素的单元素标准溶液(国家标准物质研究中心),使用时用先稀释到 1 000 倍,再分别稀释到 5 个浓度(表 3),溶液介质为 10% $\text{HNO}_3$  溶液。

1.3.1.3 内标溶液 将浓度为 1 000  $\mu\text{g/mL}$  的 Ge、Rh(国家标准物质研究中心)标准溶液用  $\text{HNO}_3$  溶液分别稀释为 0.50  $\mu\text{g/mL}$ 、0.50  $\mu\text{g/mL}$ ,作为内标溶液备用。

1.3.1.4 空白标准溶液 在 100 mL 容量瓶中加入

表 3 As、Se、Cd、Pb 混合标准溶液的配制

Table 3 The preparation of standard solution containing Arsenic Selenium Cadmium and Lead  $\mu\text{g/mL}$

标准溶液	Std1	Std2	Std3	Std4	Std5
As	0.04	0.06	0.08	0.10	0.20
Se	0.30	0.50	0.70	1.00	2.00
Cd	0.02	0.04	0.08	0.10	0.15
Pb	0.05	0.10	0.15	0.20	0.30

注：混合标准溶液总体积为 100 mL。

Note: The total volume of mixed standard solution is 100 mL.

入 10 mL 硝酸 ( $\text{HNO}_3$ )，然后用超纯水（电阻率为  $18.2 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$ ）定容到 100 mL，即为空白标准溶液，过滤并备用。

### 1.3.2 全麦粉制备

参考姬翔等方法<sup>[14]</sup>。

### 1.3.3 样品的微波消解

参照韩张雄等方法<sup>[15]</sup>。

### 1.3.4 样品中矿质元素的检测

参照马艳等方法<sup>[16]</sup>。

## 1.4 数据分析

利用 DPS DPS v7.05 和 SPSS Statistics 22 软件对数据进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 各元素标准曲线

各元素的标准曲线见图 1~9，各矿质元素的标准曲线相关线性值  $r$  值在 0.997 7~0.999 9 之间，说明各元素在一定质量浓度范围内与信号强度呈良好的线性关系。对全麦粉样品进行加标回收实验，各元素的回收率均在 80 %~120 % 之间，表明该方法重复性较好，能够应用于小麦籽粒中矿质元素的含量分析。

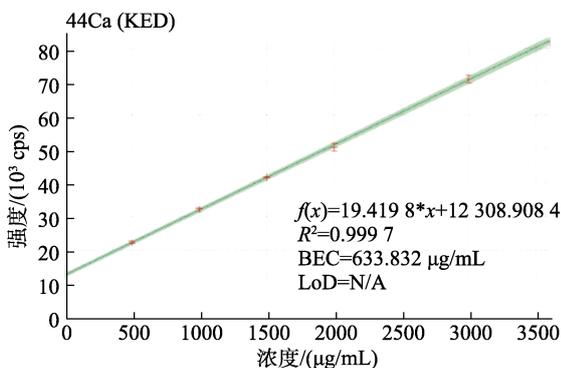


图 1 钙元素标准曲线  
Fig.1 Standard curve of calcium

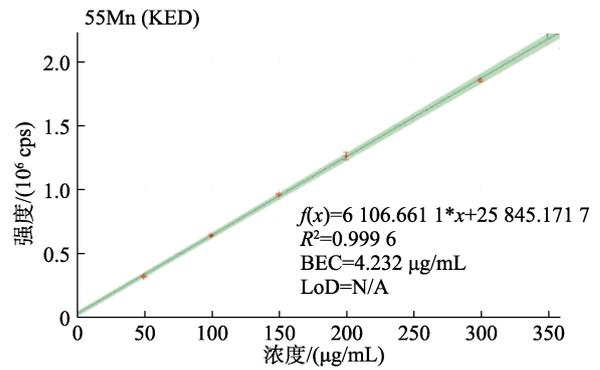


图 2 锰元素标准曲线  
Fig.2 Standard curves of manganese

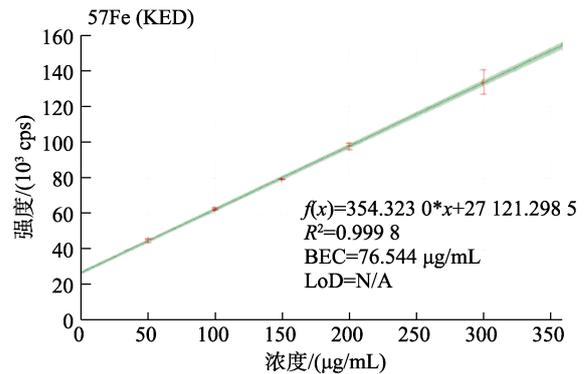


图 3 铁元素标准曲线  
Fig.3 Standard curve of iron

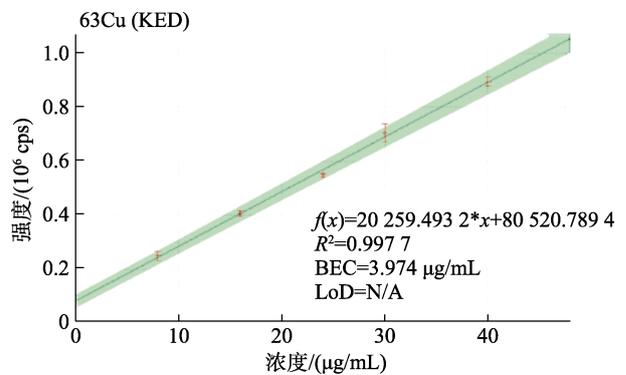


图 4 铜元素标准曲线  
Fig.4 Standard curve of copper

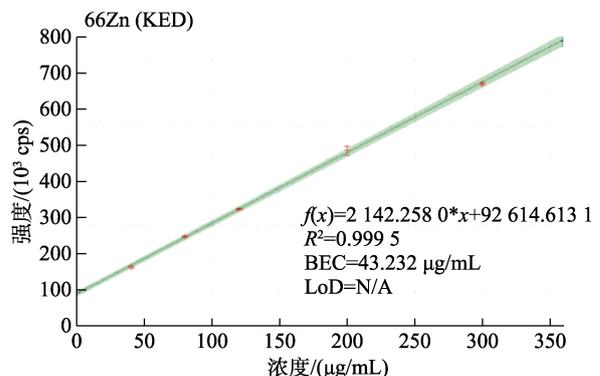


图 5 锌元素标准曲线  
Fig.5 Standard curve of zinc

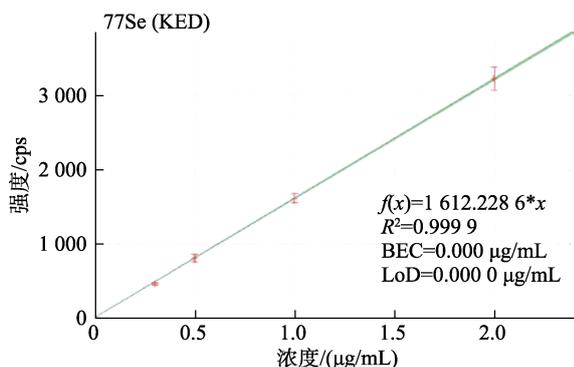


图 6 硒元素标准曲线  
Fig.6 Standard curve of selenium

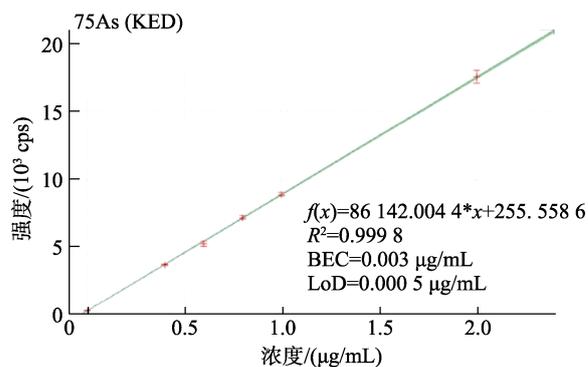


图 7 砷元素标准曲线  
Fig.7 Standard curve of arsenic

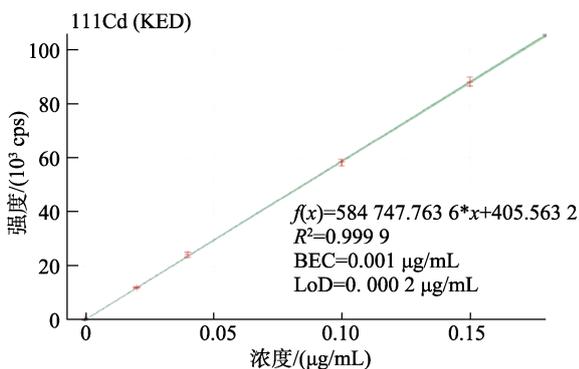


图 8 镉元素标准曲线  
Fig.8 Standard curve of cadmium

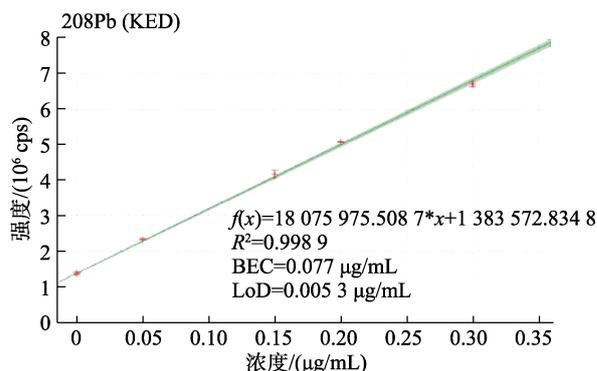


图 9 铅元素标准曲线  
Fig.9 Standard curve of lead

## 2.2 样品中矿质元素含量的表型分析

各品种同一矿质元素含量的极值在不同环境下差异较大,但是大致趋势相同(见表 4),不同矿质元素在不同的小麦品种中含量差异十分显著。各元素的含量均呈连续分布,为典型的数量性状,在遗传上是受多基因控制,可对其进行性状/标记之间的关联分析。

重金属元素含量相对较低(见表 5),从平均值来看镉元素含量最高,铅元素含量在 0~0.6926 μg/mL 之间,说明不同小麦种质资源遗传多样性差异较大。在 205 份材料中,硒元素的偏度和峰度、锰元素的偏度参数绝对值均在 1 左右,说明这些矿质元素含量在试验材料中呈正态分布。而其他元素含量的偏度、峰度值和锰元素含量的峰度值均大于 1,表明各元素含量分布倾向于高含量。

## 2.3 不同环境下各元素含量的差异分析

由表 4 可知,钙元素含量在 2014 年德州含量最高,与其他三个环境相比达极显著差异;在泰

安点,除 2016 年,其他两个年份没有显著性差异。锰元素含量在 2017 年泰安点最高,与其他两个年份相比达极显著差异,但与德州点相比未达显著性差异。铁元素含量在 2016 年泰安点最高,与其他两个年份和 2014 年德州相比,达显著性差异。铜元素含量在 2014 年德州点最高,与泰安点 3 个年份相比,达极显著性差异,且泰安点 3 个年份之间也达极显著差异。锌元素含量在 2014 年德州点最高,与 2017 年泰安点相比,达显著性差异,与其他两个年份相比,达极显著差异;泰安点,2017 年锌含量与其他两个年份相比,也都达极显著性差异。硒元素含量以 2014 年德州点最高,和其他环境相比达极显著差异。

由表 5 可知,重金属砷以 2017 年泰安点最高,与其环境达极显著差异,其次是 2015 年泰安点;重金属镉以 2014 年德州点最高,与其他环境达极显著差异,泰安点 2015 和 2016 年之间达极显著差异。由于绝大多数材料中未检测出铅含量,只有个别材料中检出,因此,未做详细分析。

表 4 小麦籽粒中各有益矿质元素含量的表型分析

Table 4 Phenotypic analysis of the content of beneficial mineral elements in wheat grain

元素	环境	峰度	偏度	最小值/( $\mu\text{g/mL}$ )	最大值/( $\mu\text{g/mL}$ )	均值	SD
Ca	2014DZ	0.342 9	0.487 9	1 305.341 2	3 494.334 9	2 057.703 3 aA	131.193 6
Ca	2015TA	4.233 2	1.429 6	943.268 1	3 851.026 7	1 671.181 2 cC	135.305 9
Ca	2016TA	0.911 6	0.832 5	1 041.368 2	3 571.288 4	1 904.142 4bB	142.117 6
Ca	2017TA	8.360 6	2.174 4	745.555 5	4 337.089 3	1 635.239 5cC	155.169 3
Mn	2014DZ	0.411 3	0.780 9	72.392 9	177.832 1	114.308 9abAB	7.170 7
Mn	2015TA	7.099 9	1.644 4	64.679 8	233.943 3	110.938 1bB	7.112 4
Mn	2016TA	0.320 1	0.443 5	71.567 9	170.755 6	110.751 4bB	6.072 6
Mn	2017TA	0.151 3	0.603 5	78.885 2	177.475 3	117.476 9aA	6.159 6
Fe	2014DZ	-0.377 8	0.528 8	49.433 0	275.962 4	122.362 9cC	14.895 5
Fe	2015TA	15.723 5	3.650 2	44.191 4	1 267.636 9	160.493 0bB	55.525 0
Fe	2016TA	9.590 7	3.047 8	60.090 6	1 226.409 9	195.083 0aA	72.516 1
Fe	2017TA	19.821 1	4.036 5	41.778 4	810.932 2	137.228 4bcBC	34.887 9
Cu	2014DZ	-0.537 2	0.230 7	8.789 5	20.809 0	14.541 1aA	0.854 3
Cu	2015TA	49.930 1	5.185 5	6.594 2	38.289 7	11.147 0dD	0.905 9
Cu	2016TA	0.905 7	0.495 6	6.452 0	19.370 1	12.105 5cC	0.718 3
Cu	2017TA	10.945 2	1.887 1	8.134 2	31.327 0	13.098 8bB	0.879 0
Zn	2014DZ	53.810 6	5.514 4	58.830 3	391.240 3	104.609 1aA	9.345 3
Zn	2015TA	3.050 4	1.448 9	40.104 5	166.760 3	81.535 0dC	7.031 0
Zn	2016TA	1.122 6	0.796 9	52.568 7	156.971 2	91.933 2cB	6.348 7
Zn	2017TA	19.452 2	3.620 9	61.455 9	275.946 8	99.299 3bA	8.670 5
Se	2014DZ	0.501 0	0.069 0	0	0.004 5	0.001 6aA	0.000 9
Se	2015TA	1.426 0	1.729 0	0	0.004 5	0.000 7cB	0.000 9
Se	2016TA	1.299 0	1.968 0	0	0.005 1	0.000 9bB	0.000 9
Se	2017TA	1.165 0	0.767 0	0	0.003 6	0.000 7cB	0.000 8

注：2014DZ: 2013—2014 德州，2015TA:2014—2015 泰安，2016TA:2015—2016 泰安，2017TA:2016—2017 泰安。

Note: 2014DZ shows planting point of Dezhou during 2013 to 2014, 2015TA shows planting point of Taian during 2014 to 2015, 2016TA shows planting point of Taian during 2015 to 2016, 2017TA shows planting point of Taian during 2016 to 2017.

表 5 小麦籽粒中各有害矿质元素含量的表型分析

Table 5 Phenotypic analysis of the content of harmful mineral elements in wheat grain

元素	环境	峰度	偏度	最小值/( $\mu\text{g/mL}$ )	最大值/( $\mu\text{g/mL}$ )	均值	SD
As	2014DZ	3.959 0	16.506 0	0	0.002 2	0.000 1cC	0.000 3
As	2015TA	3.397 0	15.058 0	0	0.010 2	0.000 8bB	0.001 5
As	2016TA	5.503 0	37.033 0	0	0.004 5	0.000 2cC	0.000 5
As	2017TA	1.156 0	1.248 0	0	0.008 2	0.001 9aA	0.001 8
Cd	2014DZ	102.407 0	8.848 0	0	0.017 9	0.001 3aA	0.001 4
Cd	2015TA	135.468 0	10.852 0	0	0.020 3	0.000 4cC	0.001 6
Cd	2016TA	73.888 0	7.348 0	0	0.014 4	0.000 8bB	0.001 2
Cd	2017TA	86.977 0	8.520 0	0	0.016 1	0.000 5cBC	0.001 4
Pb	2014DZ	-	-	0	0.213 3	-	-
Pb	2015TA	-	-	0	0.098 8	-	-
Pb	2016TA	-	-	0	0.214 8	-	-
Pb	2017TA	-	-	0	0.692 6	-	-

#### 2.4 环境对小麦籽粒中矿质元素含量的影响

由表 6 可知，德州点籽粒中钙元素含量比泰安点高 314.392 2  $\mu\text{g/mL}$ ，籽粒中锰元素含量比泰

安点高 1.351 5  $\mu\text{g/mL}$ ，籽粒中锌元素含量比泰安点高 13.496 6  $\mu\text{g/mL}$ ，德州点的小麦籽粒中钙、锰、铜、锌、硒五种矿质元素均高于泰安点，差

表 6 不同地点小麦籽粒中矿质元素含量  
Table 6 The content of mineral elements of wheat grain in different locations

地点	元素	均值 ( $\mu\text{g/mL}$ )	地点	元素	均值 ( $\mu\text{g/mL}$ )
泰安	Ca	1 743.311 1	泰安	Zn	91.112 5
德州	Ca	2 057.703 3	德州	Zn	104.609 1
泰安	Mn	112.957 4	泰安	Se	0.000 8
德州	Mn	114.308 9	德州	Se	0.001 6
泰安	Fe	165.115 3	泰安	As	0.001 0
德州	Fe	122.362 9	德州	As	0.000 1
泰安	Cu	12.133 3	泰安	Cd	0.000 6
德州	Cu	14.541 1	德州	Cd	0.001 3

异也十分显著,由此可知,德州试验点的环境更有利于上述五种元素的积累。可能由于德州环境污染,致使重金属含量总高于泰安点,可知泰安点环境条件优于德州点。

### 2.5 优异种质材料的筛选

籽粒中有益元素含量较高的材料共 38 个(表 7 和表 8)。其中, Ca 含量最高的材料为 B111, 平均值为 2 903.441 3  $\mu\text{g/mL}$ ; Mn 含量最高的小麦品种为 B21, 均值为 163.160 7  $\mu\text{g/mL}$ ; 含 Fe 最高的品种是 B189, 含量为 457.170 1  $\mu\text{g/mL}$ , 并且 Pb 含量也很低; B163 含铜量最高, 为 20.494 4  $\mu\text{g/mL}$ , B33 的籽粒含铜量比较高的同时, 镉含量也比较低; B14 的锌含量最高, 达 158.365 9  $\mu\text{g/mL}$ ; Se 含量最高的品种是 B38, 含量为 0.002 5  $\mu\text{g/mL}$ , B178 有较高的硒含量和较低的砷含量。

表 7 小麦籽粒中钙、锰、铁含量最高的材料

Table 7 The materials with the highest Ca, Mn and Fe concentration in wheat grain  $\mu\text{g/mL}$

样品编号	钙	样品编号	锰	样品编号	铁
B111	2 903.441 3	B21	163.160 7	B189	457.170 1
B202	2 505.166 8	B202	159.483 2	B44	381.835 8
B102	2 427.174 5	B114	156.380 3	B35	376.546 4
B125	2 411.479 2	B154	153.490 1	B38	375.532 1
B113	2 393.184 2	B148	148.616 2	B86	372.349 5
B106	2 361.420 8	B46	140.991 4	B168	365.210 6
B117	2 356.850 5	B7	138.206 8	B67	364.447 7
B100	2 349.830 8	B65	138.124 3	B141	360.725 3
B122	2 323.415 5	B36	137.985 1	B70	358.547 7
B203	2 298.785 9	B97	136.433 5	B205	340.350 9

多种矿质元素含量都比较高的材料共 24 个(表 9)。其中 B45、B38 和 B21 三个品种的籽粒中 4 种有益矿质元素的含量都较高; B111、B125、B202、B113、B36、B38、B114、B35 等八个品

表 8 小麦籽粒中铜、锌、硒含量最高的材料

Table 8 The materials with the highest Cu, Zn and Se concentration in wheat grain  $\mu\text{g/mL}$

样品编号	铜	样品编号	锌	样品编号	硒
B163	20.494 4	B14	158.365 9	B38	0.002 5
B140	17.483 0	B111	139.841 7	B106	0.002 2
B122	16.541 5	B131	139.289 3	B100	0.002 2
B111	16.399 3	B21	130.565 6	B12	0.002 0
B38	16.176 4	B140	125.136 2	B70	0.001 9
B45	16.049 1	B102	121.490 6	B36	0.001 9
B21	15.966 8	B113	120.868 8	B20	0.001 8
B33	15.855 5	B141	120.404 8	B178	0.001 7
B121	15.668 0	B199	120.143 4	B11	0.001 7
B124	15.506 4	B51	117.412 7	B43	0.001 7

表 9 小麦籽粒中多种有益矿质元素含量高的材料

Table 9 Variety with high mineral content in wheat grains  $\mu\text{g/mL}$

样品编号	元素	含量	样品编号	元素	含量
B111	Ca	2 903.441 3	B100	Ca	2 349.830 8
	Cu	16.399 3		Se	0.002 2
	Zn	139.841 7	B140	Cu	17.483 0
B125	Ca	2 411.479 2		Se	0.001 5
	Fe	315.909 5	B102	Ca	2 427.174 5
	Cu	14.505 1		Zn	121.490 6
B202	Ca	2 505.166 8	B106	Ca	2 361.420 8
	Mn	159.483 2		Se	0.002 2
	Zn	112.702 1		Mn	120.821 9
B65	Mn	138.124 2	B7	Ca	2 267.306 4
	Fe	330.026 3		Mn	138.206 8
B140	Cu	20.494 4	B67	Fe	364.447 8
	Zn	125.136 2		Se	0.001 6
B113	Ca	2 393.184 2	B45	Mn	132.555 8
	Cu	14.735 5		Cu	16.049 1
	Zn	120.868 7		Zn	116.386 4
B46	Mn	140.991 4		Se	0.001 4
	Se	0.001 7	B141	Fe	360.725 3
B36	Mn	137.985 2		Zn	120.404 8
	Cu	14.527 8	B14	Cu	14.517 6
	Se	0.001 9		Zn	158.365 8
B38	Mn	135.256 5	B12	Cu	14.550 0
	Fe	375.532 1		Se	0.002 0
	Cu	16.176 4	B122	Ca	2 323.415 5
	Se	0.002 5		Cu	16.541 4
B70	Fe	358.547 7	B35	Fe	376.546 4
	Se	0.001 9		Ca	2187.794 2
B21	Mn	163.160 7		Cu	15.427 3
	Fe	331.305 1	B114	Mn	156.380 2
	Zn	130.565 5		Cu	15.267 9
	Cu	15.966 7		Zn	112.693 4

种籽粒有 3 种含量都比较高的矿质元素。  
高有益矿质元素低重金属含量的材料共 33

个(表 10)。其中 B70 的砷含量比较低, B125 中的钙元素和铁元素含量高, 铅元素含量低。

表 10 高有益矿质元素含量低重金属含量的小麦材料  
Table 10 Variety with high mineral content and low heavy metal content in wheat grains μg/mL

样品编号	元素	含量	样品编号	元素	含量	样品编号	元素	含量	样品编号	元素	含量	
B125	Ca	2 411.479 1	B45	Cu	16.049 1	B117	Ca	2 356.850 5	B205	Ca	2 275.368 3	
	Fe	315.909 4		As	0.000 0		Fe	185.326 3		Mn	130.123 2	
	Cu	14.505 1		Se	0.001 3		Cd	0.000 0		Fe	340.350 9	
	Pb	0.000 0	Fe	190.475 8	Pb	0.000 0	Cu	13.878 3				
B113	Ca	2 393.184 1	B14	Zn	158.365 8	B114	Mn	156.380 2		Zn	102.112 2	
	Cu	14.735 5		Cu	14.517 6		Fe	278.871 6		As	0.001 2	
	Zn	120.868 7		Cd	0.000 2		Cu	15.2679 6		B20	Se	0.001 8
	Pb	0.000 0	B121	Ca	2 072.613 8	Zn	112.693 4	Fe	183.151 8			
B122	Ca	2 323.415 5	Mn	124.721 7	Pb	0.000 0	B154	Mn	153.490 0	B33	Cu	15.855 4
	Fe	181.233 6	Fe	217.950 3	B148	Cu		14.326 8	Zn		109.580 4	
	Cu	16.541 4	Cu	15.667 9		Zn		106.725 4	Cd		0.000 0	
	Zn	109.573 2	Zn	102.854 9		As		0.000 0	Pb		0.000 0	
	Pb	0.000 0	Se	0.001 2		Cd		0.000 2	B178		Se	0.001 7
B21	Mn	163.160 7	Pb	0.000 0		Pb	0.000 0	As	0.000 0			
B46	Fe	331.305 0	B4	Fe	199.361 2	B65	Mn	138.124 2	B16	As	0.000 0	
	Cu	15.966 7		Pb	0.000 0		Fe	330.026 3		Se	0.001 1	
	Zn	130.565 5		Cd	0.000 0		Cu	14.253 6		B116	Ca	1 971.335 6
	As	0.000 0	B145	Fe	215.202 9		Cd	0.000 1		Zn	101.919 4	
	Pb	0.000 0	Cd	0.000 0	As		0.000 0	Pb		0.000 0		
B7	Mn	140.991 4	B161	Zn	105.954 8	B168	Fe	365.210 6	B163	Ca	2 022.631 0	
	Zn	107.564 0		Se	0.001 3		Cd	0.000 2		Cu	20.494 4	
	Se	0.001 6		As	0.000 0		Pb	0.000 0		Zn	125.136 2	
	As	0.000 0	B72	Zn	102.817 7		B159	Ca		2 182.872 2		
B46	Ca	2 267.306 3	B72	As	0.000 0	B159		Cd	0.000 0			
	Mn	138.206 8		As	0.000 0			Pb	0.000 0			
	Cu	14.425 9		B129	Ca			2 098.618 9	As	0.000 0		
B189	Pb	0.000 0	B30	Pb	0.000 0			B106	Ca	2 361.420 7		
	Fe	457.170 1		As	0.000 0		B106		Mn	120.821 9		
	Mn	127.387 7		Se	0.001 3	Se			0.002 2			
B70	Pb	0.000 0	B106	Ca	2 361.420 7	As		0.000 0				
	Fe	358.547 7		Mn	120.821 9							
B70	As	0.000 0	B106	Se	0.002 2	B106	As	0.000 0				
	As	0.000 0		As	0.000 0							

### 3 讨论

不同类型的矿质元素在不同小麦材料中的含量差异也十分显著, 在所测的九种矿质元素中, 铁元素的含量变幅为从 41.778 4 μg/mL 到 1 267.636 9 μg/mL 之间, 变幅较大, 与前人研究

相比, 本研究的材料中具有相对较大的遗传多样性。

群体中不同品种之间的矿质元素含量存在比较大的差异, B111 品种的钙、铁、锌含量都比较高, B198 是铁含量较高的品种。如果利用这两个品种进行杂交, 累积优良性状, 有可能培育出富

含钙、铁、锌元素的小麦新品种，这也说明了通过生物育种提高小麦矿质元素含量的可行性。

前人研究发现施用氮肥能有效提高小麦籽粒中矿质元素的含量<sup>[17-19]</sup>。本研究表明，同一品种小麦在泰安和德州两个地区种植，所得到的小麦籽粒中的元素也会有差别，说明了小麦籽粒中微量元素含量受环境条件的影响。不同品种的小麦在同样的栽培环境下，矿质元素含量也会存在差异。张勇等测量了在相同环境下种植的来自 6 个省区 240 个小麦品种中一部分矿质元素的含量，结果表明，由于遗传背景不同，品种间各矿质元素含量存在着明显的差异<sup>[18]</sup>。本研究中，小麦籽粒中各矿质元素的含量在泰安点的三个环境下也有差异，不同矿质元素在不同的小麦品种中含量差异也十分显著。例如，钙元素在 4 个环境下的含量均值变幅在 1 635.239 5  $\mu\text{g}/\text{mL}$  到 2 057.703 3  $\mu\text{g}/\text{mL}$  之间，不同小麦种质资源遗传多样性差异较大。在 205 份材料中，除了硒元素的矿质元素含量呈正态分布，剩余其他元素含量分布都倾向于高含量。

由此可见，小麦籽粒中微量元素的含量不仅跟其本身基因型有关，与外部环境、养分等也有较密切的关联，因此，在小麦生产中要注意种植地的土壤环境条件并采取科学的管理措施，提供良好的外部环境来使小麦籽粒中有益矿质元素含量的增加。

#### 4 结论

共筛选出单种有益矿质元素含量较高的材料 38 个，其中钙、铁、锌、硒含量最高的材料分别为 B111、B189、B14 和 B38；多种有益矿质元素含量都比较高的材料有 24 个，如 B45、B38 和 B21 三个品种的籽粒中同时含有 4 种高含量的有益矿质元素；高有益矿质元素低有害矿质元素含量的材料共 33 个，如 B125，Ca、Fe、Cu 的含量较高而 Pb 含量低。这些材料为富含有益矿质元素功能性小麦品种的培育及研发利用奠定了良好的基础。

#### 参考文献：

[1] 郭岚. 环境中的微量元素与人体健康[J]. 甘肃科技, 2005,

21(8): 110-112.

GUO L. Trace elements in the environment and human health[J]. Gansu Science and Technology, 2005, 21(8): 110-112.

[2] 中国营养学会. 中国居民膳食营养素参考摄入量[J]. 营养学报, 2001, 23(3): 193-196.

Chinese Nutrition Society. Chinese Dietary reference intakes[J]. ACTA Nutrimenta SINICA, 2001, 23(3): 193-196.

[3] 江川, 王金英, 郑金贵. 稻米矿质营养元素含量受种植环境的影响研究[J]. 福建农业学报, 2004, 19(1): 1-6.

JIANG C, WANG J Y, ZHENG J G. Mineral nutrient contents in polished rice under different environments[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2004, 19(1): 1-6.

[4] SINGH B, NATESAN S K A, SINGH B K, et al. Improving zinc efficiency of cereals under zinc deficiency[J]. Currentence, 2005, 88(1): 36-44.

[5] 张小燕, 翟永功, 曹炜, 等. 秦巴山区食粮和水中微量元素含量的分析[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 1998(3): 263-268.

ZHANG X Y, ZHAI Y G, CAO W, et al. The analysis of the content of microelements in main crops and water in qinba mountain area[J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 1998(3): 263-268.

[6] 张杰, 王海玉. 食品安全性与保健功能[M]. 河南医科大学出版社, 1998.

ZHANG J, WANG H Y. Food safety and health function[M]. Henan Medical University Press, 1998.

[7] 顾奎琴. 现代营养知识全书[M]. 现代出版社, 1997.

GU K Q. Modern nutrition knowledge book[M]. Modern Press, 1997.

[8] 李杏普, 侯红军, 刘玉平, 等. 蓝、紫粒小麦的营养品质研究[J]. 华北农学报, 2002, 17(1): 21-24.

LI X P, HOU H J, LIU Y P, et al. Studies of grain nutritional quality on wheat with blue or purple kernels[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2002, 17(1): 21-24.

[9] 裴自友, 李爱霞, 庄丽芳, 等. 黑粒小麦漯珍 1 号的 C-分带及 GISH 和 PAGE 分析[J]. 麦类作物学报, 2005, 25(4): 15-18.

PEI Z Y, LI A X, ZHUANG L F, et al. C-banding, GISH and PAGE analysis on Black Kernel Wheat Luozhen 1[J]. Journal of Triticeae Crops, 2005, 25(4): 15-18.

[10] UAUY C, DISTELFELD A, FAHIMA T, et al. A NAC gene regulating senescence improves grain protein, Zn, and Fe content in wheat[J]. Science, 2006, 314(5803): 1298-1301.

[11] 张艳霞. 小麦籽粒不同矿质养分含量的关联分析及相关基因预测[D]. 山东农业大学, 2018.

ZHANG Y X. Association analysis and gene prediction of different mineral nutrients content in wheat grain[D]. Shandong Agricultural University, 2018.

[12] 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.
- ZHANG Y, WANG D S, ZHANG Y, et al. Variation of major mineral elements concentration and their relationships in grain of Chinese wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9): 1871-1876.
- [13] 石荣丽, 邹春琴, 芮玉奎, 等. ICP-AES 测定中国小麦微核心种质库籽粒矿质养分含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(4): 1104-1107.
- SHI R L, ZOU L Q, RUI Y K, et al. Application of ICP-AES to detecting nutrients in grain of wheat core collection of China[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(4): 1104-1107.
- [14] 姬翔. 全麦粉对面粉及面条品质的影响[D]. 河南工业大学, 2019.
- JI X. Effect of whole wheat flour on the quality of flour and noodles[D]. Henan University of Technology, 2019.
- [15] 韩张雄, 马娅妮, 陶秋丽, 等. 微波消解样品-电感耦合等离子体质谱法测定小麦中铜、锌、镉、镍和铅[J]. 理化检验(化学分册), 2013, 49(10): 1199-1201.
- HAN Z X, MA Y N, TAO Q L, et al. ICP-MS determination of Cu, Zn, Cd, Ni and Pb in wheat with microwave assisted sample digestion[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis)*, 2013, 49(10): 1199-1201.
- [16] 马艳. 利用等离子体质谱法测定不同产区葡萄酒矿质元素的特征研究[D]. 宁夏大学, 2015.
- MA Y. Using the plasma mass spectrometry to detection of characteristics research of mineral elements in different region of wine[D]. Ningxia University, 2015.
- [17] 姜丽娜, 郑冬云, 蒿宝珍, 等. 氮肥对小麦不同品种籽粒微量元素含量的影响[J]. 西北农业学报, 2009, 18(6): 97-102.
- JIANG L N, ZHENG D Y, HAO B Z, et al. Effects of nitrogen on micronutrient concentration and accumulation in grains of wheat[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2009, 18(6): 97-102.
- [18] 罗付香, 林超文, 庞良玉, 等. 氮肥运筹对不同小麦品种籽粒微量元素含量和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(4): 695-701.
- LUO F X, LIN C W, PANG L Y, et al. Effects of nitrogen fertilizer application on the microelement content in grains of different wheat varieties[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2011, 31(4): 695-701.
- [19] 常旭虹, 赵广才, 王德梅, 等. 生态环境与施氮量协同对小麦籽粒微量元素含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014(4): 885-895.
- CHANG X H, ZHAO G C, WANG D M, et al. Effects of ecological environment and nitrogen application rate on microelement contents of wheat grain[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014(4): 885-895.
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn/ch/index.aspx>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。