

363 份国内外小麦品种(系)籽粒 5 种矿质元素含量分析

尚旭阁¹,孟天琪¹,玉应罕¹,杨雨婷¹,杨其志¹,冯龙婷¹,
牟丽明²,张正茂¹,海江波¹,刘玉秀¹

(1.西北农林科技大学农学院,陕西杨凌 712100; 2.甘肃省定西市农业科学研究院,甘肃定西 743000)

摘要:小麦籽粒钙(Ca)、铁(Fe)、锌(Zn)、硒(Se)和镁(Mg)含量对维持人体健康具有重要意义。为了解不同小麦品种(系)中这 5 种矿质元素含量差异,采用电感耦合等离子质谱仪测定了 363 份国内外小麦籽粒 Ca、Fe、Zn、Se 和 Mg 含量,分析其不同来源小麦中的差异,并筛选 5 种矿质元素含量较高的品种(系)。结果表明,基于居民饮食习惯及《中国营养学会人体微量元素摄入标准》,供试材料中,Ca、Fe、Zn、Se 和 Mg 含量达到推荐标准的小麦占比分别为 11.84%、30.03%、1.93%、4.68% 和 1.38%。不同来源小麦 5 种矿质元素含量差异较大,变异系数为 27.26%~72.50%,其中来自哈萨克斯坦的小麦 Ca、Zn、Se 和 Mg 含量排名第一,来自澳大利亚的小麦 Fe 含量排名第一,来自中国的小麦 Fe 和 Se 含量较高。中国不同来源小麦 5 种矿质元素含量变异系数为 27.95%~68.00%,云南小麦的 Ca 和 Fe 含量、新疆小麦的 Zn 含量、山西小麦的 Se 含量、河北小麦的 Mg 含量排名第一。经相关性分析,小麦中 Ca、Mg 和 Zn 含量呈极显著正相关($P < 0.01$),说明可同时提高小麦籽粒 Ca、Mg 和 Zn 含量。1 种、2 种和 3 种矿质元素含量达到推荐标准的小麦品种(系)分别有 19、4 和 5 个。基于主成分分析及综合评价,筛选出 10 份 5 种矿质元素含量较高的小麦。高 Ca 含量的小麦蛋白质含量显著高于低 Ca 含量小麦($P < 0.05$)。

关键词:小麦籽粒;矿物质元素;主成分分析;综合评价

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)09-1258-10

Analysis of Five Mineral Elements Content in Grains of 363 Domestic and Foreign Wheat Varieties(Lines)

SHANG Xuge¹, MENG Tianqi¹, YU Yinghan¹, YANG Yuting¹, YANG Qizhi¹, FENG Longting¹,
MU Liming², ZHANG Zhengmao¹, HAI Jiangbo¹, LIU Yuxiu¹

(1. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Dingxi Academy of Agricultural Science, Dingxi, Gansu 743000, China)

Abstract: The contents of calcium(Ca), iron(Fe), zinc(Zn), selenium(Se), and magnesium(Mg) in wheat grains are of great significance for maintaining human health. In order to understand the differences in the content of these five mineral elements among different wheat varieties(lines), the contents of Ca, Fe, Zn, Se, and Mg in 363 domestic and foreign wheat grains were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry, and the differences in their contents in wheat grains from different sources were analyzed. The varieties(lines) with higher content of mineral elements were screened. The results showed that based on residents' eating habits and the "Human Trace Element Intake Standards of China Nutrition Society", the proportion of wheat with Ca, Fe, Zn, Se and Mg contents meeting the recommended standards was 11.84%, 30.03%, 1.93%, 4.68% and 1.38%.

收稿日期:2024-08-18 修回日期:2024-10-22

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(32101698);陕西省重点研发计划项目(2024GH-ZDXM-07);农业部项目(19221849);鲁甘科技合作项目(22CX8NJ152)

第一作者 E-mail:sxg13526939448@163.com(尚旭阁)

通讯作者 E-mail:yxliu@nwsuaf.edu.cn(刘玉秀);haijiangbo@126.com(海江波)

respectively. The five mineral element contents of wheat from different sources vary greatly, with a coefficient of variation from 27.26% to 72.50%. Among them, wheat from Kazakhstan ranks first in Ca, Zn, Se, and Mg contents; wheat from Australia ranks first in Fe content, and wheat from China has higher Fe and Se contents. The coefficient of variation of mineral element content measured in wheat from different sources in China was from 27.95% to 68.00%. The Ca and Fe content of wheat from Yunnan, the Zn content of wheat from Xinjiang, the Se content of wheat from Shanxi, and the Mg content of wheat from Hebei ranked first. Correlation analysis showed that the contents of Ca, Mg, and Zn in wheat were significantly correlated ($P < 0.01$), indicating that the contents of Ca, Mg, and Zn in wheat grains could be increased simultaneously. Based on the content of the five mineral elements, the number of wheat that met the recommended standards for 1, 2, and 3 mineral element content was selected to be 19, 4, and 5, respectively. Based on principal component analysis and comprehensive evaluation values, 10 wheat samples with high mineral element content were selected. The protein content of wheat with high Ca content was significantly higher than that of wheat with low Ca content ($P < 0.05$).

Keywords: Wheat grain; Mineral elements; Principal component analysis; Comprehensive evaluation

矿质元素对于维持人体的正常生理功能和健康至关重要,其中钙(Ca)、铁(Fe)、锌(Zn)、硒(Se)和镁(Mg)是人体健康必须的元素。缺Ca可能导致骨质疏松、小儿佝偻病等疾病^[1];Fe缺乏会导致缺铁性贫血及代谢紊乱^[2];Zn摄入不足导致发育不良、DNA损伤及不良妊娠^[3];Se缺乏会导致人体免疫功能和解毒能力降低^[4];Mg缺乏可增加糖尿病、心血管疾病的发病风险^[5]。中国72%地区居民日Se摄入量达不到成人推荐日摄入量($60 \sim 400 \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$)^[6];15个省份老年居民膳食Zn摄入不足率达46.1%^[7];居民膳食Mg摄入不足率达到了59.88%^[8];有70.2%居民膳食Ca摄入达不到推荐水平^[9];孕妇缺Fe性贫血患病率为17.2%^[10];陕、甘、宁等西北地区居民微量元素缺乏尤为严重^[11]。矿质元素缺乏一般可通过食物强化来解决,通过培育富含矿质元素的粮食作物是解决该问题最经济、有效的途径^[12]。

小麦是全球约35%~40%人口的主食,也是居民膳食中矿质元素、蛋白质和能量的主要来源,为人类提供了约20%的蛋白质和21%的热量^[13]。目前,有关小麦籽粒矿质元素含量已有较多报道。张勇等^[12]分析北方冬麦区6个省区240份小麦籽粒的9种元素含量,发现4种微量元素中Fe平均含量最高($41.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),5种常量元素中Ca平均含量最低($465 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。Shepelev等^[14]对37份CIMMYT及96份其他地区小麦在2个环境下的15种元素进行分析,发现Ca、Fe和

Zn含量变化范围为 $237 \sim 523 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $21.1 \sim 53.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 及 $23.9 \sim 77.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。王健胜等^[15]发现,不同小麦品种籽粒矿质元素含量存在较大差异,变异系数31.05%~67.46%。周让让等^[16]分析青海省富硒地区31份小麦新品系籽粒中矿质元素含量,发现Se与Zn元素含量呈极显著正相关,并筛选出高Fe和Zn含量品系18YZ351和18YZ348。前人研究大多是对相同地区小麦品种矿质元素含量进行分析,对多个矿质元素含量的综合评价及其与蛋白质、湿面筋含量关系的研究较少。本研究采用电感耦合等离子体质谱仪对国内外363份小麦品种(系)籽粒Ca、Fe、Zn、Se和Mg元素含量进行检测,分析元素间的相关性,利用主成分分析及综合评价(D)筛选富含多种矿质元素的小麦,分析富含Ca、Fe小麦与低Ca、Fe含量小麦间品质差异,以期小麦矿质元素改良育种提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

363份小麦品种(系)由本课题组收集并保存,分别来自墨西哥(49份)、哈萨克斯坦(46份)、澳大利亚(6份)和陕西(68份)、河南(56份)、山东(27份)、山西(21份)、北京(19份)、河北(19份)、宁夏(12份)、甘肃(11份)、黑龙江(10份)、江苏(7份)、安徽(6份)、新疆(3份)和云南(3份)共13个中国小麦种植区。试验材料2021—2022年度种植于西北农林科技大学农作一站(108.07°

E, 34.30°N, 海拔 408 m), 每个材料种植 2 行, 行长 1.5 m, 行距 0.25 m, 采用随机区组设计, 重复 2 次。田间管理同当地常规大田, 成熟期每个材料单独收获。

1.2 测定指标与方法

收获后的籽粒利用植物粉碎机研磨成粉, 过 80 目筛, 取 0.2 g 至消解管, 加入 6 mL 的 65% HNO₃ 和 2 mL 30% H₂O₂。将消解管放入 MULTIPREP-41 微波消解仪中, 程序设定: 加热消解 0~180 °C, 65 min; 冷却至 60 °C, 静置 25 min; 赶酸 140 °C, 1~1.5 h。蒸馏水定容至 50 mL 离心管中, 取 10 mL 采用电感耦合等离子质谱仪 (Thermo CAPRQ) ICP-MS 测定 Ca、Fe、Zn、Se 和 Mg 含量。重复 3 次。

使用瑞典波通公司的近红外品质分析仪 (DA-7250) 测定籽粒蛋白质含量和湿面筋含量。

1.3 小麦籽粒中 5 种元素推荐含量

根据中国居民膳食营养素参考摄入量 (2023 版)^[17], 成年人适宜 Ca 和 Mg 摄入量平均为 800 mg·d⁻¹ 和 320 mg·d⁻¹, Ca 可耐受最高摄入量 2 000 mg·d⁻¹。小麦面粉与麸皮的 Ca 和 Mg 含量比为 1:2.2 和 1:8.3^[18], 谷物类对中国居民日常 Ca 和 Mg 摄入量的贡献率为 18.1%^[19] 和 41.4%^[20]。参考籽粒元素推荐量计算公式^[21], 本研究中小麦籽粒 Ca 推荐量范围为 600~1 500 mg·kg⁻¹, Mg

推荐量下限为 1 000 mg·kg⁻¹, 一般从食物或者水中摄入的镁不会引起毒性反应, 本研究不制定镁的推荐上限。

小麦籽粒 Fe 和 Se 含量的推荐范围分别为 50~140 mg·kg⁻¹ 和 40~50 mg·kg⁻¹^[22]; 参照刘慧等^[23]的方法, 本研究 Se 含量标准: <0.05 mg·kg⁻¹ 为缺乏, 0.05~0.10 mg·kg⁻¹ 为偏低, 0.10~0.15 mg·kg⁻¹ 为中等, 0.15~0.30 mg·kg⁻¹ 为富 Se, 0.30~2.00 mg·kg⁻¹ 为可耐受, >2.00 mg·kg⁻¹ 可能中毒。

1.4 数据分析

数据采用 Excel 2016 整理, 采用 SPSS 26.0 进行相关性分析、显著性检验和主成分分析, 使用 Origin 2021 绘图。

2 结果与分析

2.1 小麦籽粒 5 种矿物质元素含量分析

由表 1 可知, 供试小麦的 Ca 和 Mg 平均含量分别为 429.20 mg·kg⁻¹、539.51 mg·kg⁻¹, 变异系数分别为 33.14% 和 27.26%。Fe、Zn 和 Se 平均含量分别为 46.11 mg·kg⁻¹、22.52 mg·kg⁻¹、0.040 mg·kg⁻¹, 变异系数为 30.18%~72.50%, 其中, Se 含量变异系数最大 (72.50%), 其次为 Fe 元素 (56.41%), 其余 3 种元素的变异系数均为 30% 左右。

表 1 小麦籽粒 5 种矿物质元素含量

Table 1 Content of the five mineral elements in wheat grains

元素 Element	最小值 Min./ (mg·kg ⁻¹)	最大值 Max./ (mg·kg ⁻¹)	平均值±标准差 Mean±SD/(mg·kg ⁻¹)	变异系数 CV/%
Ca	154.31	1 055.34	429.20±142.27	33.14
Mg	252.96	1 382.82	539.51±147.09	27.26
Fe	15.41	139.84	46.11±26.01	56.41
Zn	7.96	48.72	22.52±6.80	30.18
Se	0.011	0.290	0.040±0.029	72.50

供试小麦籽粒 Ca 含量为 154.31~1 055.34 mg·kg⁻¹, 主要分布在 200~400 mg·kg⁻¹、400~600 mg·kg⁻¹, 分别占比 50.41% 和 36.91% (图 1a); 达到 Ca 含量推荐范围的数量占总数的 11.84%, 所有样本 Ca 含量均低于推荐上限。

供试小麦籽粒 Fe 含量为 15.41~139.84 mg·kg⁻¹, 主要集中在 ≤30 mg·kg⁻¹、30~40 mg·kg⁻¹ 及 ≥60 mg·kg⁻¹, 分别占比 27.27%、31.13% 和 19.83% (图 1b); 达到 Fe 含量推荐范围的数量占比为 30.03%, 所有样本 Fe 含量均低于推荐上

限 140 mg·kg⁻¹。

供试小麦籽粒 Zn 含量为 7.96~48.72 mg·kg⁻¹, 主要分布在 10~20 mg·kg⁻¹ 和 20~30 mg·kg⁻¹, 其分别占比 37.74% 和 48.49% (图 1c); 达到 Zn 含量推荐范围 40~50 mg·kg⁻¹ 的数量仅占 1.93%, 所有样本 Zn 含量均低于推荐上限 50 mg·kg⁻¹。

供试小麦籽粒 Se 含量介于 0.011~0.290 mg·kg⁻¹, 其中 77.96% 的小麦 Se 含量处于缺乏水平, 17.36% 的小麦 Se 含量偏低, 达到 Se 含

量标准中等水平的小麦占比 3.86%,仅有 0.82% 的小麦种质达到富 Se 水平(图 1d)。

供试小麦籽粒 Mg 含量为 252.96~1 382.82 mg · kg⁻¹,其中达到 Mg 含量推荐下限的小麦仅占比为 1.38%,60.61%的小麦 Mg 含量在 400~600 mg · kg⁻¹ 间,其次分别是 600~800 mg · kg⁻¹、200~400 mg · kg⁻¹,分别占比 21.76%和 13.22%(图 1e)。

2.2 不同来源小麦籽粒 5 种矿质元素含量分析

2.2.1 国内不同地区比较

由表 2 可知,供试小麦籽粒 5 种元素含量变异系数均大于 28%,不同地区间存在显著差异($P < 0.05$)。云南小麦 Ca 含量显著高于黑龙江,其余地区间差异不显著。黑龙江小麦 Fe 含量最高(65.18 mg · kg⁻¹),显著高于来自于山西、陕西、山东、江苏、河北及北京地区的小麦;云南小麦 Fe 含量显著高于山西、江苏及河北的小麦。新疆小麦 Zn 含量最高,云南小麦 Zn 含量显著低于其他地区(除山东及安徽)。云南、山西、黑龙江及河北小麦的 Se 平均含量均大于 0.05 mg · kg⁻¹,而其他地区小麦的 Se 含量均处于缺乏水平。河北小麦的 Mg 平均含量最高(554.02 mg · kg⁻¹),显著高于江苏、甘肃和云南地区的小麦,其余地区小麦间无显著性差异。河南、河北小麦的 Ca、Zn 和 Mg 含量较高。不同地区小麦的 Se 和 Fe 含量变异系数较大,分别为 68.00%和 56.29%,

其次是 Ca 含量和 Zn 含量,Mg 含量变异系数最低。

2.2.2 不同国家比较

来自哈萨克斯坦和墨西哥的小麦籽粒 Ca 平均含量分别为 488.20 mg · kg⁻¹ 和 477.86 mg · kg⁻¹,显著高于中国和澳大利亚(最低,320.51 mg · kg⁻¹)的小麦($P < 0.05$);但澳大利亚小麦 Fe 平均含量最高(69.12 mg · kg⁻¹),显著高于其余 3 个国家(表 3)。哈萨克斯坦小麦除 Ca 平均含量排名第一外,其 Zn、Se 和 Mg 平均含量也最高,分别为 28.41 mg · kg⁻¹、0.052 mg · kg⁻¹、659.99 mg · kg⁻¹,均显著高于其余 3 个国家。综合来看,哈萨克斯坦小麦的 Ca、Zn、Se 和 Mg 含量排名第一;澳大利亚小麦 Fe 含量排名第一,中国小麦 Fe 和 Se 含量较高,墨西哥小麦 Ca 和 Mg 含量较高。

2.3 优异矿质元素含量小麦品种(系)筛选

筛选元素含量排名前 10 的小麦品种(系)发现,西农 865 Ca 含量最高(1 055.34 mg · kg⁻¹),其余依次是中麦 170、济麦 52、西高三号、机麦 20、W21、陕 319、航麦 6 号、郑麦 11 和 W9,Ca 含量排名前 10 的小麦均超过 600 mg · kg⁻¹(表 4)。甘南小麦 Fe 含量(139.84 mg · kg⁻¹)最高,其余依次是山农 611436、漯 9008、济麦 52、郑麦 11、宁春 55、陕 319、玉麦 18、澳新 106 和西高三号,其含量均超过了 130 mg · kg⁻¹。

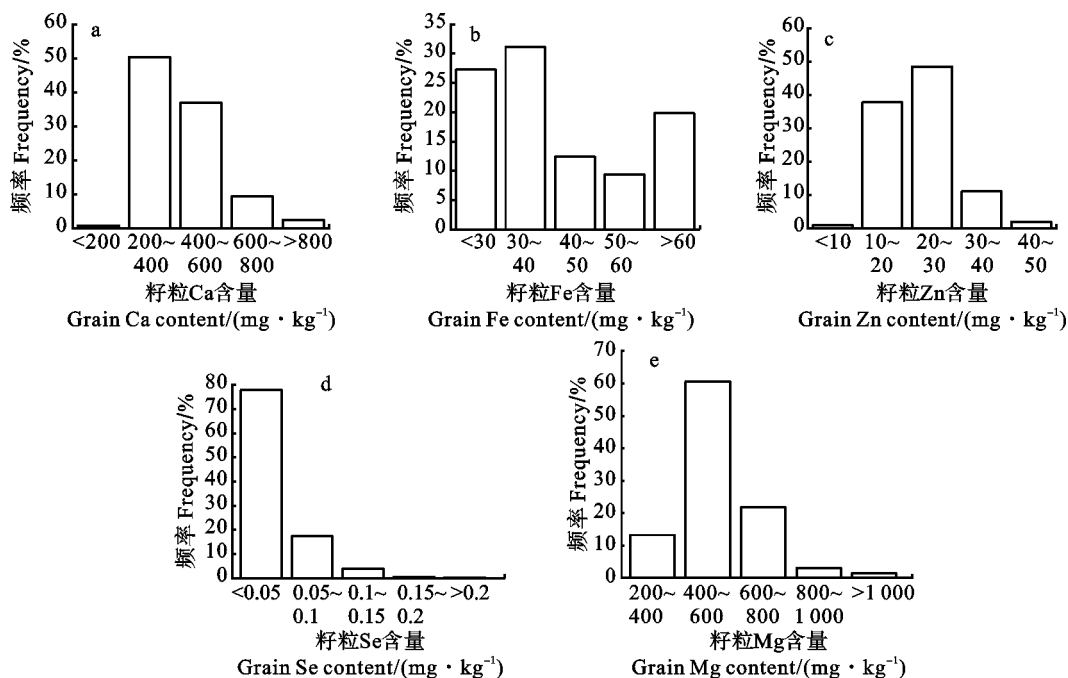


图 1 小麦籽粒不同矿物质元素含量分布频率

Fig. 1 Distribution frequency of different mineral element contents in wheat grain

表 2 国内不同地区小麦籽粒 5 种元素含量比较

Table 2 Comparison of the five element contents in wheat grains from different regions of China $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

地区 Region	钙 Ca	铁 Fe	锌 Zn	硒 Se	镁 Mg
云南 Yunnan	432.91±220.90a	61.32±54.94ab	15.19±2.86d	0.052±0.046abc	344.10±49.60c
新疆 Xinjiang	426.92±35.75ab	49.98±15.43abc	23.25±2.36a	0.040±0.010bcd	498.46±70.04ab
陕西 Shannxi	425.03±166.20ab	47.78±23.27bc	21.65±6.49abc	0.034±0.020d	543.12±178.53ab
山西 Shanxi	382.90±65.72ab	43.71±20.18c	20.14±5.55abc	0.057±0.037a	479.65±56.87ab
山东 Shandong	393.54±133.04ab	47.15±31.98bc	18.73±3.73bcd	0.036±0.029cd	495.76±72.11ab
宁夏 Ningxia	400.55±67.05ab	48.96±32.82abc	20.64±7.38abc	0.040±0.017bcd	506.34±85.00ab
江苏 Jiangsu	388.89±76.80ab	41.50±20.83c	20.99±5.72abc	0.035±0.015cd	461.51±83.69b
黑龙江 Heilongjiang	339.64±166.25b	65.18±27.94a	19.45±7.23abc	0.056±0.013a	477.72±143.06ab
河南 Henan	397.10±135.83ab	50.57±30.95abc	21.94±6.69abc	0.037±0.030cd	498.29±113.4ab
河北 Hebei	424.82±142.26ab	43.48±17.88c	22.70±7.45ab	0.056±0.038ab	554.02±180.39a
甘肃 Gansu	396.36±119.71ab	57.68±39.48abc	19.29±6.49abc	0.030±0.012d	455.31±132.10b
北京 Beijing	427.88±171.09ab	45.03±16.71bc	20.60±7.35abc	0.042±0.023abcd	533.60±178.50ab
安徽 Anhui	357.71±126.55ab	49.80±30.08abc	18.04±6.87cd	0.041±0.008abcd	501.28±187.77ab
变异系数 CV/%	34.98	56.29	31.05	68.00	27.95

同列数据后不同字母表示在 0.05 水平差异显著。表 3 和表 9 同。

Different letters in the same column mean significant difference at 0.05 level. The same in tables 3 and 9.

表 3 国内外不同地区小麦籽粒元素含量比较

Table 3 Comparison of element contents of wheat from different regions at home and abroad $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

国家 Country	钙 Ca	铁 Fe	锌 Zn	硒 Se	镁 Mg
中国 China	407.75±141.37b	48.20±27.33b	20.96±6.48c	0.040±0.028b	512.57±143.52b
哈萨克斯坦 Kazakhstan	488.20±113.02a	41.29±19.97b	28.41±6.19a	0.052±0.056a	659.99±153.18a
墨西哥 Mexico	477.86±143.33a	39.96±20.98b	24.17±5.61b	0.037±0.024b	558.87±107.47b
澳大利亚 Australia	320.51±47.75c	69.12±44.80a	22.90±7.46bc	0.028±0.011b	515.48±136.03b

表 4 籽粒中钙、铁元素含量排名前 10 的小麦

Table 4 Wheat with the top 10 contents of calcium and iron in grains

材料名称 Material name	钙含量 Calcium content/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	来源 Origin	材料名称 Material name	铁含量 Iron content/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	来源 Origin
西农 865 Xinong 865	1 055.34	陕西 Shannxi	甘南小麦 Gannanxiaomai	139.84	甘肃 Gansu
中麦 170 Zhongmai 170	970.26	北京 Beijing	山农 611436 Shannong 611436	138.89	山东 Shandong
济麦 52 Jimai 52	911.87	山东 Shandong	漯 9008 Luo 9008	138.66	河南 Henan
西高三号 Xigaosan hao	905.29	陕西 Shannxi	济麦 52 Jimai 52	137.44	山东 Shandong
机麦 20 Jimai 20	891.54	河南 Henan	郑麦 11 Zhengmai 11	136.05	河南 Henan
W21	882.64	墨西哥 Mexico	宁春 55 Ningchun 55	135.69	宁夏 Ningxia
陕 319 Shaan 319	859.20	陕西 Shaanxi	陕 319 Shaan 319	135.21	陕西 Shaanxi
航麦 6 号 Hangmai 6	844.36	陕西 Shaanxi	玉麦 18 Yumai 18	134.52	云南 Yunnan
郑麦 11 Zhengmai 11	835.46	河南 Henan	澳新 106 Aoxin 106	132.99	澳大利亚 Australia
W6	787.75	墨西哥 Mexico	西高三号 Xigaosan hao	131.05	陕西 Shaanxi

Zn 含量排名前 10 的小麦品种(系)依次是机麦 20($48.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、中麦 170、西农 865、西杂 12、邯 11-5278、19XS008、19XS032、19XWB08、航麦

6 号和 19XW004($38.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)，排名前 7 的小麦 Zn 含量均超过 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 5)。Se 含量排名前 10 的小麦品种(系)依次是 19XS008、兰

考 378、济麦 52、运早 1816、陕 319、冀麦 496、冀麦 142、长 7080、19XWB05 和郑麦 11、19XS008、兰考 378、济麦 52 和运早 1816 的 Se 含量均达到富 Se 标准,其余排名前 10 的小麦品种(系)Se 含量均达到中等标准。Mg 含量排名前 10 的小麦依次是西农 865、伟隆 169、邯 11-5278、中麦 170、哈麦有芒-4、哈麦 1、哈麦有芒-5、徽研 99 和哈麦有芒-7,排名前 5 的小麦 Mg 含量均超过

1 000 mg · kg⁻¹。

2 种及 3 种矿物质元素含量达到推荐标准的小麦品种(系)共 9 个(表 6);其中,济麦 52、郑麦 11 和陕 319 的 Ca、Fe 和 Se 含量达到推荐标准,西农 865 和中麦 170 的 Ca、Zn 和 Mg 含量达到推荐标准;邯 11-5278 的 Zn 和 Mg 含量、机麦 20 的 Ca 和 Zn 含量、西高三号的 Ca 和 Fe 含量及 19XS008 的 Zn 和 Se 含量达到推荐标准。

表 5 籽粒中锌、硒和镁含量排名前 10 的小麦

Table 5 Wheat with the top 10 contents of zinc, selenium, and magnesium in grains

材料名称 Material name	锌含量 Zinc content/ (mg · kg ⁻¹)	来源 Origin	材料名称 Material name	硒含量 Selenium content/ (mg · kg ⁻¹)	来源 Origin	材料名称 Material name	镁含量 Magnesium content/ (mg · kg ⁻¹)	来源 Origin
机麦 20 Jimai 20	48.72	河南 Henan	19XS008	0.290	哈萨克斯坦 Kazakhstan	西农 865 Xinong 865	1 382.82	陕西 Shaanxi
中麦 170 Zhongmai 170	44.40	北京 Beijing	兰考 378 Lankao 378	0.190	河南 Henan	伟隆 169 Weilong 169	1 269.14	陕西 Shaanxi
西农 865 Xinong 865	44.17	陕西 Shannxi	济麦 52 Jimai 52	0.161	山东 Shandong	邯 11-5278 Han 11-5278	1 215.02	河北 Hebei
西杂 12 Xiza 12	43.88	陕西 Shaanxi	运早 1816 Yunhan 1816	0.149	山西 Shaanxi	中麦 170 Zhongmai 170	1 093.89	北京 Beijing
邯 11-5278 Han 11-5278	43.79	河北 Hebei	陕 319 Shaan 319	0.133	陕西 Shaanxi	哈麦有芒-4 Hamaiyoumang-4	1 009.44	哈萨克斯坦 Kazakhstan
19XS008	42.95	哈萨克斯坦 Kazakhstan	冀麦 496 Jimai 496	0.132	河北 Hebei	哈麦 1 Hamai 1	991.13	哈萨克斯坦 Kazakhstan
19XS032	41.94	哈萨克斯坦 Kazakhstan	冀麦 142 Jimai 142	0.130	河北 Hebei	哈麦有芒-6 Hamaiyoumang-6	947.84	哈萨克斯坦 Kazakhstan
19XWB08	38.53	哈萨克斯坦 Kazakhstan	长 7080 Chang 7080	0.127	山西 Shannxi	哈麦有芒-5 Hamaiyoumang-5	913.32	哈萨克斯坦 Kazakhstan
航麦 6 号 Hangmai 6	38.38	陕西 Shaanxi	19XWB05	0.126	哈萨克斯坦 Kazakhstan	徽研 99 Huiyan 99	879.89	安徽 Anhui
19XW004	38.05	哈萨克斯坦 Kazakhstan	郑麦 11 Zhengmai 11	0.122	河南 Henan	哈麦有芒-7 Hamaiyoumang-7	855.32	哈萨克斯坦 Kazakhstan

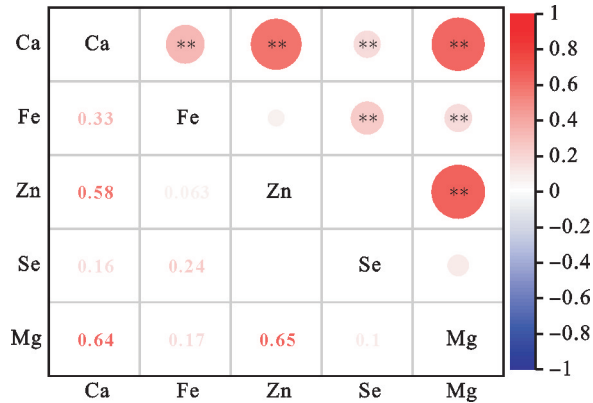
表 6 籽粒中多种矿物质元素含量达到推荐标准的小麦

Table 6 Wheat with multiple mineral elements in its grains meeting the recommended standards

材料名称 Material name	元素 Element	含量 Content/(mg · kg ⁻¹)	材料名称 Material name	元素 Element	含量 Content/(mg · kg ⁻¹)
济麦 52 Jimai 52	Ca	911.87	中麦 170 Zhongmai 170	Ca	970.26
郑麦 11 Zhengmai 11	Fe	137.44		Zn	44.40
	Se	0.161		Mg	1 093.89
	Ca	835.46	邯 11-5278 Han 11-5278	Zn	43.79
	Fe	136.05		Mg	1 215.02
	Se	0.122	机麦 20 Jimai 20	Ca	891.54
陕 319 Shaan 319	Ca	859.20		Zn	48.72
	Fe	135.21	西高三号 Xigaosan hao	Ca	905.29
	Se	0.133		Fe	131.05
西农 865 Xinong 865	Ca	1 055.34	19XS008	Zn	42.95
	Zn	44.17		Se	0.290
	Mg	1 382.82			

2.4 小麦籽粒被测元素含量间的相关性

由图 2 可知,小麦 Ca 含量与 Mg、Zn、Fe 和 Se 含量均呈极显著正相关($P < 0.01$),Fe 含量与 Se 和 Mg 含量呈极显著正相关,Zn 含量与 Mg 含量呈极显著正相关,其中 Ca、Zn 和 Mg 含量之间相关系数较大,分别为 0.64、0.58 和 0.65,说明 3 者间具有较强的协同性。



** : $P < 0.01$. 下图同。

** : $P < 0.01$. The same in below.

图 2 小麦籽粒 5 种元素含量相关性

Fig. 2 Correlation of the five elements in grains of wheat

2.5 小麦籽粒矿质元素含量主成分分析和综合评价

2.5.1 小麦籽粒矿质元素含量主成分分析

对 363 份小麦品种(系)籽粒 Ca、Fe、Zn、Se 和 Mg 含量进行主成分分析(表 7),按照特征值大于 1 的原则提取出 2 个主成分,第一主成分因子主要是 Ca、Mg 和 Zn 含量,第二主成分因子主

表 7 小麦籽粒 5 种元素含量主成分分析结果

Table 7 Principal component analysis of the five element contents in wheat grains

性状 Trait	主成分 Principle component	
	PC1	PC2
钙元素含量 Content of Ca	0.871	0.013
镁元素含量 Content of Mg	0.857	-0.210
锌元素含量 Content of Zn	0.806	-0.359
硒元素含量 Content of Se	0.259	0.729
铁元素含量 Content of Fe	0.399	0.676
特征值 Numerical value	2.369	1.161
贡献率 Contribution rate/%	47.38	23.22
累计贡献率 Cumulative percentage/%	47.38	70.60

要是 Fe 和 Se 含量,贡献率分别为 47.38% 和 23.22%,累计贡献率达到 70.60%,能够反映出被测指标的大部分信息。

2.5.2 小麦籽粒综合评价

根据特征值、成分矩阵的系数,将标准化后的原始数据代入主成分表达式计算各个样本的主成分得分。第一主成分方程为 $y_1 = 0.566x_1 + 0.557x_2 + 0.524x_3 + 0.168x_4 + 0.259x_5$,第二主成分方程为 $y_2 = 0.012x_1 - 0.195x_2 - 0.333x_3 + 0.677x_4 + 0.627x_5$,分别计算 y_1 、 y_2 的得分后,品种(系)综合得分 $y = 0.474y_1 + 0.232y_2$ 。筛选到综合得分排名前 10 的小麦依次是 19XS008、西农 865、中麦 170、济麦 52、陕 319、伟隆 169、郑麦 11、邯 11-5278、西高三号和 19XS035(表 8)。

表 8 籽粒元素含量综合排名前 10 的小麦

Table 8 The top 10 wheat in the comprehensive ranking of element content in grains

材料名称 Material name	来源 Origin	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y_1	y_2	y	排名 Ranking
19XS008	哈萨克斯坦 Kazakhstan	1.78	0.22	3.01	11.05	1.18	5.16	6.41	3.93	1
西农 865 Xinong 865	陕西 Shaanxi	4.40	1.06	3.18	-0.50	5.73	7.54	-1.80	3.16	2
中麦 170 Zhongmai 170	北京 Beijing	3.80	1.65	3.22	0.20	3.77	6.40	-0.59	2.90	3
济麦 52 Jimai 52	山东 Shandong	3.39	3.51	-0.91	3.81	0.77	3.42	4.98	2.78	4
陕 319 Shaan 319	陕西 Shaanxi	3.02	3.43	-0.74	2.92	0.37	2.91	4.33	2.38	5
伟隆 169 Weilong 169	陕西 Shaanxi	1.10	1.22	1.57	1.62	4.96	4.80	0.38	2.36	6
郑麦 11 Zhengmai 11	河南 Henan	2.86	3.46	-0.45	2.58	0.54	3.01	3.99	2.35	7
邯 11-5278 Han 11-5278	河北 Hebei	2.21	0.28	3.13	-0.07	4.59	5.51	-1.78	2.20	8
西高三号 Xigaosan hao	陕西 Shaanxi	3.35	3.27	-0.18	-0.21	1.76	3.59	1.66	2.09	9
19XS035	哈萨克斯坦 Kazakhstan	1.32	3.06	2.03	0.07	1.96	3.71	0.93	1.97	10

x_1 :Ca 含量; x_2 :Mg 含量; x_3 :Zn 含量; x_4 :Se 含量; x_5 :Fe 含量; y_1 :主成分 1 得分; y_2 :主成分 2 得分; y :综合得分。

x_1 : Ca content; x_2 : Mg content; x_3 : Zn content; x_4 : Se content; x_5 : Fe content; y_1 : Principal component 1 Score; y_2 : Principal component 2 Score; y : Aggregate score.

2.6 富含 Ca 和 Fe 小麦的品质性状分析

本研究中,籽粒 Zn、Se 和 Mg 含量达到推荐范围的小麦品种(系)较少,因此,仅分析 Ca 和 Fe 元素含量与品质性状的关系。将达到推荐标准的小麦品种(系)定为高 Ca 和高 Fe 小麦,低于供试材料平均值的小麦定为低 Ca 和低 Fe 小麦,共筛选出 9 个高 Ca、24 个高 Fe 小麦品种(系)。由表 9 可知,高 Ca 小麦蛋白质

含量(14.78%)显著高于低 Ca 小麦(13.78%) ($P < 0.05$),二者间湿面筋含量无显著差异;高 Fe 小麦与低 Fe 小麦蛋白质和湿面筋含量均无显著差异。相关性分析结果(图 3)显示,小麦籽粒蛋白质含量与 Ca、Fe 含量、湿面筋含量均呈极显著正相关($P < 0.01$),Ca 与 Fe 含量呈极显著正相关,说明小麦籽粒 Ca、Fe 含量增加可促进蛋白质含量升高。

表 9 高 Ca、低 Ca 及高 Fe、低 Fe 小麦品质对比

Table 9 Quality comparison of high Ca, low Ca, and high Fe, low Fe wheat

类型 Type	蛋白质含量 Protein content	湿面筋含量 Wet gluten content	类型 Type	蛋白质含量 Protein content	湿面筋含量 Wet gluten content
高 Ca 小麦 High Ca wheat	14.78a	31.08a	高 Fe 小麦 High Fe wheat	14.40a	31.15a
低 Ca 小麦 Low Ca wheat	13.78b	30.40a	低 Fe 小麦 Low Fe wheat	13.84a	30.46a

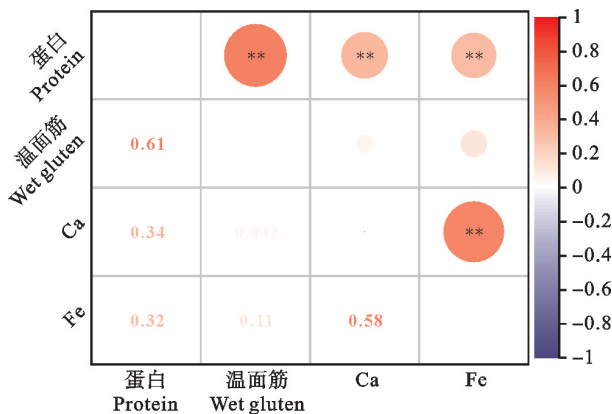


图 3 小麦籽粒元素含量与品质间的关系

Fig. 3 Relationship between grain element content and quality of wheat

3 讨论

小麦籽粒矿物质元素含量与人体健康密切相关,筛选和培育富含矿质元素的小麦对提高小麦营养品质具有重要意义。本研究将 363 份来自不同地域的小麦品种(系)种植于同一地,对籽粒中 5 种矿质元素含量进行分析,发现 5 种矿质元素含量的变异系数均较大,该结果与王健胜等^[15]、Shi 等^[24]和 Wang 等^[25]的研究结果一致;Zn、Se 和 Mg 含量低于张勇等^[12]、周让让等^[16]、石荣丽等^[26]及 Bhatta 等^[27]研究结果;Ca 含量高于王健胜等^[15]、Shi 等^[24]、Bhatta 等^[27]的研究结果,这可能与土壤条件、气候条件、栽培技术及遗传特性有关。本研究发现,小麦籽粒 Fe 含量变化范围较

大,与马振华等^[28]和刘佳等^[29]的研究结果一致。马振华等^[28]测得碱性土壤中小麦籽粒 Fe 含量范围为 25.0~255.1 mg · kg⁻¹,中酸性土壤中小麦籽粒 Fe 含量范围为 35.0~91.3 mg · kg⁻¹;刘佳等^[29]测得野生二粒小麦 D1 渗入系群体 Fe 含量范围为 92.69~115.47 mg · kg⁻¹。这说明小麦籽粒 Fe 含量与土壤类型和基因型关系密切。

本研究中,Ca、Fe、Zn、Se 和 Mg 含量达到推荐标准的小麦品种(系)占比分别为 11.84%、30.03%、1.93%、4.68%和 1.38%,大部分小麦品种(系)矿质元素含量有待提高,该结果与褚宏欣等^[22]和张媛菲等^[30]的研究结果一致。来源于国内不同地区小麦品种(系)矿质元素存在较大差异,来自河南和河北主产区的小麦 5 种矿质元素含量整体较高,这可能与主产区小麦改良程度有关;来自云南的小麦 Ca 和 Fe 含量及新疆小麦的 Zn 含量排名第一,但因本研究中这些地区的小麦材料数量较少,更准确结果有待进一步分析。

本研究发现,来自哈萨克斯坦小麦的 Ca、Zn、Se 和 Mg 含量均排名第一,澳大利亚的小麦 Fe 含量排名第一,墨西哥小麦 Ca、Zn 和 Mg 含量排名第二,中国小麦除 Fe 和 Se 含量以外其余元素含量相对较少。这可能与不同国家的育种目标及种质选择有关。

本研究中,Ca 与 Mg 和 Zn 含量、Mg 与 Zn 含量存在极显著正相关关系,这与张勇等^[12]、Bhatta 等^[27]和 Hocaolu 等^[31]的研究一致;Akcu-
ra 等^[32]和 Tiwari 等^[33]认为,小麦籽粒中 Fe 与

Zn 含量显著正相关,与本研究结果不同,这可能与所用材料、土壤、田间管理及气候有关。

Tiwari 等^[33]和 Morgounov 等^[34]研究发现,小麦籽粒 Fe 含量与粗蛋白和湿面筋含量间均呈极显著正相关关系;小麦籽粒 Ca 含量与粗蛋白和湿面筋含量间呈不显著正相关^[35]。本研究发现,籽粒 Ca 和 Fe 含量与蛋白质含量呈极显著正相关关系,与湿面筋含量间呈不显著正相关。具体原因有待进一步研究。

本研究采用主成分分析及综合评分对小麦矿元素含量进行评价,排名前 10 的小麦可以用于小麦品质育种,对多种矿物质含量较高的主栽种质加以推广利用。

参考文献:

- [1] LI K, WANG X F, LI D Y, *et al.* The good, the bad, and the ugly of calcium supplementation: A review of calcium intake on human health [J]. *Clinical Interventions in Aging*, 2018, 13:2443.
- [2] 马彦平, 石磊, 何源. 微量元素铁、锰、硼、锌、铜、钼营养与人体健康[J]. *肥料与健康*, 2020, 47(5):13.
MA Y P, SHI L, HE Y. Trace elements iron, manganese, boron, zinc, copper, molybdenum and human health [J]. *Fertilizer and Health*, 2020, 47(5):13.
- [3] PRAHARAJ S, SKALICKY M, MAITRA S, *et al.* Zinc biofortification in food crops could alleviate the zinc malnutrition in human health [J]. *Molecules*, 2021, 26(12):3.
- [4] 陈树娣, 汤璐, 张贵伟, 等. 深圳居民膳食中硒的测定及其摄入量评估[J]. *食品工业*, 2017, 38(2):298.
CHEN S D, TANG L, ZHANG G W, *et al.* Determination of selenium and assessment of dietary selenium intake in Shenzhen residents [J]. *The Food Industry*, 2017, 38(2):298.
- [5] ZHELTOVA A A, KHARITONOVA V M, IEZHITSA N I, *et al.* Low magnesium diet alters distribution of macro elements and trace elements in tissues and organs of female rats [J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2017, 39:37.
- [6] 尹雪斌, 牛珊珊, 赵其国, 等. 我国硒(Se)、锌(Zn)和钙(Ca)生物营养强化研究进展[J]. *科技促进发展*, 2021, 17(10):1825.
YIN X B, NIU S S, ZHAO Q G, *et al.* Development in functional agriculture innovation facing the hidden hunger problem in China [J]. *Science & Technology for Development*, 2021, 17(10):1825.
- [7] 汪云, 王志宏, 张继国, 等. 2015 年中国 15 省老年居民膳食锌元素摄入状况[J]. *中国健康教育*, 2018, 34(4):293.
WANG Y, WANG Z H, ZHANG J G, *et al.* Status of dietary zinc intake among elderly residents in 15 Provinces of China, 2015 [J]. *Chinese Journal of Health Education*, 2018, 34(4):293.
- [8] 曹秋野, 王志宏, 王柳森, 等. 1991—2018 年我国 15 个省份居民膳食镁摄入量的变化趋势[J]. *环境与职业医学*, 2022, 39(9):971.
CAO Q Y, WANG Z H, WANG L S, *et al.* Secular trends of dietary magnesium intakes among Chinese residents in 15 Provincial-level administrative regions from 1991 to 2018 [J]. *Journal of Environmental and Occupational Medicine*, 2022, 39(9):971.
- [9] 李颖, 魏春波, 赵艳. 中国居民钙摄入对人体健康影响的思考[J]. *中华预防医学杂志*, 2022, 56(4):534.
LI Y, WEI C B, ZHAO Y. Reflections on Chinese residents' calcium intake and human health [J]. *Chinese Journal of Preventive Medicine*, 2022, 56(4):534.
- [10] 张金磊, 李路平. 中国生物强化富铁小麦营养干预居民缺铁性贫血疾病负担分析[J]. *中国农业科技导报*, 2014, 16(6):133.
ZHANG J L, LI L P. The analysis on China's biofortified iron-rich wheat nutrition intervening Chinese people's disease burden of iron deficiency anemia [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2014, 16(6):133.
- [11] 姬虎太, 王敏, 曹勇, 等. 硬粒小麦与野生二粒小麦籽粒铁、锌、硒元素质量分数的相关性分析[J]. *西北农业学报*, 2018, 27(6):772.
JI H T, WANG M, CAO Y, *et al.* Correlation analysis of Fe, Zn, Se mass fraction in durum and Emmer wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2018, 27(6):772.
- [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):1874.
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):1874.
- [13] 何中虎, 庄巧生, 程顺和, 等. 中国小麦产业发展与科技进步[J]. *农学学报*, 2018, 8(1):99.
HE Z H, ZHUANG Q S, CHENG S H, *et al.* Wheat production and technology improvement in China [J]. *Journal of Agriculture*, 2018, 8(1):99.
- [14] SHEPELEV S, MORGOUNOV A, FLIS P, *et al.* Variation of macro- and microelements, and trace metals in spring wheat genetic resources in Siberia [J]. *Plants*, 2022, 11(2):6.
- [15] 王健胜, 吴政卿, 周正富, 等. 国内外小麦种质主要矿质元素含量的评价分析[J]. *分子植物育种*, 2018, 16(22):7552.
WANG J S, WU Z Q, ZHOU Z F, *et al.* Evaluation and analysis of major mineral elements content in domestic and foreign wheat germplasm [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2018, 16(22):7552.
- [16] 周让让, 刘韬, 陈红, 等. 青海富硒地区 31 份小麦新品系硒、铁、锌含量分析[J]. *分子植物育种*, 2022, 20(8):2725.
ZHOU R R, LIU T, CHEN H, *et al.* Analysis of selenium, iron and zinc contents in 31 new wheat lines in selenium-rich areas in Qinghai [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2022, 20(8):2725.
- [17] 中国营养学会. 中国居民膳食营养素参考摄入量(2023 版)

- [M].北京:人民卫生出版社,2023.
Chinese Nutrition Society. Dietary nutrient reference intake of Chinese residents (2023 edition) [M]. Beijing: People's Health Publishing House,2023.
- [18]王建武,刘新花,杨永亮. 麦麸中微量元素特征[J]. 微量元素与健康研究,2013,30(4):33.
WANG J W, LIU X H, YANG Y L. Analysis of trace elements in several flours [J]. *Studies of Trace Elements and Health*, 2013,30(4):33.
- [19]刘爱东,张兵,王惠君,等. 1991—2009年中国九省区膳食营养摄入状况及变化趋势(六)18~49岁成人膳食钙摄入量及变化趋势[J]. 营养学报,2012,34(1):12.
LIU A D, ZHANG B, WANG H J, *et al.* The nutrients intake trend of Chinese population in nine Provinces from 1991 to 2009 (VI) calcium intake trend in Chinese adults aged 18—49 years [J]. *Acta Nutrimenta Sinica*, 2012,34(1):12.
- [20]郝丽鑫,王柳森,王邵顺子,等. 2018年我国15个省份18~64岁成年人膳食镁摄入现状及其主要食物来源[J]. 环境与职业医学,2022,39(9):964.
HAO L X, WANG L S, WANG S S Z, *et al.* Dietary magnesium intake status and main food sources of adults aged 18—64 in 15 Provincial-level administrative regions in China, 2018 [J]. *Journal of Environmental and Occupational Medicine*, 2022,39(9):964.
- [21]LIU H, WANG Z H, LI F, *et al.* Grain iron and zinc concentrations of wheat and their relationships to yield in major wheat production areas in China [J]. *Field Crops Research*, 2014,156:153.
- [22]褚宏欣,牟文燕,张海燕,等. 我国主要麦区小麦籽粒微量元素含量及营养评价[J]. 作物学报,2022,48(11):2856.
CHU H X, MU W Y, DANG H Y, *et al.* Evaluation on concentration and nutrition of micro-elements in wheat grains in major wheat production regions of China [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022,48(11):2856.
- [23]刘慧,杨月娥,王朝辉,等. 中国不同麦区小麦籽粒硒的含量及调控[J]. 中国农业科学,2016,49(9):1718.
LIU H, YANG Y E, WANG Z H, *et al.* Selenium content of wheat grain and its regulation in different wheat production regions of China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016,49(9):1718.
- [24]SHI X, ZHOU Z, LI W, *et al.* Genome-wide association study reveals the genetic architecture for calcium accumulation in grains of hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *BMC Plant Biology*, 2022,22(1):3.
- [25]WANG J S, SHI X, ZHOU Z F, *et al.* Genetic dissection of grain iron concentration in hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.) using a genome-wide association analysis method [J]. *PeerJ*, 2022,10:e13625.
- [26]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):1105.
SHI R L, ZOU C 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):1105.
- [27]BHATTA M, BAENZIGER P S, WATERS B M, *et al.* Genome-wide association study reveals novel genomic regions associated with 10 grain minerals in synthetic hexaploid wheat [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018,19(10):2.
- [28]马振华. 耕地土壤小麦安全生产及区域预警研究[D]. 郑州:河南农业大学,2023.
MA Z H. Study on wheat safety-production in arable soil and regional warning [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2023.
- [29]刘佳. 野生二粒小麦营养品质及主要农艺特性融入普通小麦的全基因组关联分析[D]. 成都:四川农业大学,2020.
LIU J. Genome-wide association study for nutritional quality and agronomic traits in common wheat lines derived from wild emmer wheat [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2020.
- [30]张媛菲,吕树作,彭绍峰,等. 豫西地区102份小麦核心种质中铁、锌、硒含量的分析[J]. 农业灾害研究,2022,12(9):39.
ZHANG Y F, LV S Z, PENG S F, *et al.* Analysis of iron, zinc and selenium contents of 102 wheat core germplasm in western Henan [J]. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 2022,12(9):39.
- [31]HOCAOLU O, AKURA M, KAPLAN M. Changes in the grain element contents of Durum wheat varieties of Turkey registered between 1967—2010 [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2020,51(4):5.
- [32]AKCURA M, KOKTEN K. Variations in grain mineral concentrations of Turkish wheat landraces germplasm [J]. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 2017,9(2):155.
- [33]TIWARI C, WALLWORK H, ARUN B, *et al.* Molecular mapping of quantitative trait loci for zinc, iron and protein content in the grains of hexaploid wheat [J]. *Euphytica*, 2016,207(3):569.
- [34]MORGOUNOV A, GÓMEZ-BECERRA H F, ABUGA-LIEVA A, *et al.* Iron and zinc grain density in common wheat grown in Central Asia [J]. *Euphytica*, 2007,155(1):198.
- [35]季英苗. 不同小麦品种(系)中主要矿质元素的含量比较及与品质的关系[D]. 成都:中国科学院成都生物研究所,2009.
JI Y M. Study on the determination and correlation analysis with wheat quality of the contents of the main mineral elements in different species of wheat. [D]. Chengdu: Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, 2009.