

# 芝麻不同组织中矿物质元素分布特征及相关性分析

许方涛<sup>1</sup>, 崔向华<sup>2</sup>, 盛晨<sup>1</sup>, 游均<sup>1</sup>, 黎冬华<sup>1</sup>, 张艳欣<sup>1</sup>, 周榕<sup>1\*</sup>, 王林海<sup>1\*</sup>

(1. 中国农业科学院油料作物研究所 / 农业农村部油料作物生物学与遗传育种重点实验室, 湖北 武汉, 430062;  
2. 驻马店市农业科学院, 河南 驻马店, 463000)

**摘要:**为探明芝麻不同组织中矿物质元素含量的分布特征,本研究采用电感耦合等离子体发射光谱法对芝麻不同组织中、不同种皮色芝麻籽粒中Ca、Mg、Fe、Cu、Zn等矿物质元素的含量进行测定及分析。结果显示不同芝麻组织中矿物质元素含量水平差异显著,Ca在不同组织中含量相差最高可高达4倍,在叶中平均含量最高,为2151.61 mg/100g,其次为20 d籽粒,平均含量为984.18 mg/100g;Mg在叶和20d发育籽粒中含量较高,平均含量分别为390.23 mg/100g和300.01 mg/100g;Fe在叶中含量相对较高,为19.98 mg/100g;Cu和Zn在芝麻组织中相对其他矿物质含量较低,均小于5.00 mg/100g,以叶片中的Cu的含量最高。不同种皮色的芝麻成熟籽粒中矿物质元素含量结果显示,芝麻籽粒中Ca和Mg含量最高,平均含量分别为1133.64 mg/100g和382.85 mg/100g。褐色芝麻具有最高的Ca、Mg和Cu的平均含量,分别为1342.68 mg/100g、445.95 mg/100g和2.38 mg/100g;黑色芝麻具有最高的Fe含量,为11.77 mg/100g;浅褐色芝麻具有最高的Zn含量,为7.70 mg/100g。在不同组织和成熟籽粒中,Ca和Mg的含量分别具有极显著和显著的正向相关性,Cu和Ca、Mg的含量在不同组织中呈极显著正相关,在成熟籽粒中,Zn和Fe含量呈极显著正相关。明确矿物质元素含量在芝麻不同组织中的分布特征将为芝麻综合利用提供理论参考和数据支撑。

**关键词:**芝麻;组织;矿物质元素;相关性分析

中图分类号: S565.3 文献标识码: A 文章编号: 1007-9084(2023)05-1028-06

## Distribution characteristics and correlation analysis of mineral elements in different sesame tissues

XU Fang-tao<sup>1</sup>, CUI Xiang-hua<sup>2</sup>, SHENG Chen<sup>1</sup>, YOU Jun<sup>1</sup>, LI Dong-hua<sup>1</sup>, ZHANG Yan-xin<sup>1</sup>,  
ZHOU Rong<sup>1\*</sup>, WANG Lin-hai<sup>1\*</sup>

(1. Oil Crops Research Institute of the Chinese Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Oil Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430062, China; 2. Zhumadian Academy of Agricultural Sciences, Zhumadian 463000, China)

**Abstract:** This study was conducted in order to investigate the distribution characteristics of mineral elements in different sesame tissues. The content of Ca, Mg, Fe, Cu and Zn in different tissues was determined by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES). The results showed a significant variation of mineral elements content in the different sesame tissues. The highest average Ca content was in leaves (2151.61 mg/100g), followed by 20 d seeds (984.18 mg/100g). Mg was predominant in leaves and 20 d seeds with an average content of 390.23 mg/100g and 300.01 mg/100g, respectively. The content of Fe in leaves was the highest, with an average of 19.98 mg/100g. The Cu and Zn contents were the lowest in different tissues, both less than 5.00 mg/100g, and the highest Cu content in leaves. In mature seeds, Ca and Mg contents were the highest, with an average of 1133.64 mg/100g and 382.85 mg/100g, respectively. Regarding seed coat color, brown sesame seeds exhibited the highest Ca, Mg, and Cu contents with average values of 1342.68 mg/100g, 445.95 mg/100g and 2.38 mg/100g, respectively.

收稿日期: 2022-06-10

基金项目: 湖北省农业科技创新项目(2021-620-000-001-035); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y2022XK11); 农业农村部油料作物生物学与遗传育种重点实验室开放课题(KF2022002)

作者简介: 许方涛(1995-), 硕士研究生, 主要从事芝麻营养品质性状研究, E-mail: xufangtao521@163.com

\* 通讯作者: 周榕(1985-), 助理研究员, 主要从事芝麻营养品质性状研究, Email: rongzzzzzz@126.com;

王林海(1979-), 研究员, 主要从事芝麻品质分子改良研究, E-mail: wanglinhai@caas.cn

Black and light brown sesame seeds exhibited the highest content of Fe (11.77 mg/100g) and Zn (7.70 mg/100g), respectively. We observed a significant positive correlation ( $P < 0.01$ ) between the contents of Ca and Mg in both the different tissues and colored seeds. Moreover, a positive correlation was observed between Cu, Ca, and Mg contents in the different tissues and between Zn and Fe contents in mature seeds. Our findings may provide theoretical and technical guidance for sesame comprehensive utilization.

**Key words:** sesame; tissues; mineral elements; correlation analysis

矿物质元素是一切生命活动的物质基础, Ca元素在维持植物细胞壁和细胞膜结构稳定方面发挥着重要的作用<sup>[1]</sup>; Mg是叶绿素的组成成分, 参与光合作用及碳水化合物代谢, 是RNA酶、ATP酶等多种酶活反应的催化剂<sup>[2,3]</sup>; Fe、Cu、Zn等微量元素也是植物不可或缺的重要组成部分, 参与多种代谢活动和激素信号转导的生理过程, 也是细胞色素、氧化还原酶、过氧化物酶、辅酶等的成分或激活剂, 其含量过多过少都会影响植物的正常生命活动<sup>[4-6]</sup>。矿质元素在构成人体组织、维持生理功能和调节生化代谢等方面同样具有重要作用, 而人体内的矿物质元素必须从外界摄取。Ca不仅是骨骼和牙齿的重要组成部分, 而且在人体中参与骨骼肌和心肌的收缩、神经反应、免疫吞噬等重要的生理功能, 缺钙可引起骨质疏松症、骨关节病、小儿佝偻病等疾病<sup>[7,8]</sup>。Mg在人体中控制着300多个酶的活化, 在维持肌肉和神经功能等方面有重要影响, 长时间Mg摄入不足, 可能导致心血管疾病和骨质疏松等慢性疾病<sup>[3]</sup>。血液、肝脏、脾脏和骨髓等是Fe含量较丰富的组织器官, 60%~70%的Fe元素分布在血红蛋白中, 是血红素与氧气结合的部位<sup>[9,10]</sup>, 缺铁会产生小细胞低色素贫血, 也可导致免疫功能降低、发育延迟、胃肠道的消化和吸收功能下降等<sup>[11]</sup>。Cu是生物体内血浆铜蓝蛋白、超氧歧化酶(SOD)、细胞色素C氧化酶等13种酶以上的活性成分, 在维持生物体内的新陈代谢方面起着重要的作用<sup>[12]</sup>。Cu的缺乏会引起体内多种酶生物活性的降低, 免疫功能下降, 引起细胞性贫血, 还可能成为引发冠状动脉心脏病的因素之一<sup>[13]</sup>。Zn在人体微量元素中的含量仅次于Fe, 广泛存在于人体各个组织和器官中, Zn在成年人体内的总量为1.5~2.5 g, 在肝脏、肾脏、肌肉中的含量最高<sup>[14]</sup>。缺Zn会影响消化功能, 可能导致癌症以及增加妇科肿瘤的发病率, 缺Zn还可能会降低视力, 加速人体老化<sup>[6]</sup>。当前, 在全球范围内, 蛋白质-能量营养不良的问题已经逐渐消除, 而矿质元素摄入不足成为营养不良的主要问题之一<sup>[15]</sup>。在小麦、水稻、玉米等作物中已经通过生物强化技术来提高可食

用部分的人体所需微量元素的含量, 增加或补充人体对Fe、Zn等元素的摄入量<sup>[16-18]</sup>。

芝麻(*Sesamum indicum* L.)属胡麻科芝麻属, 是我国重要油料作物之一, 由于其高稳定的油脂和丰富的氨基酸、矿物质和维生素, 以芝麻油、芝麻酱和以芝麻种子为原材料的制品受到消费者的青睐<sup>[19]</sup>。随着人们生活水平的普遍提高和医疗保健意识的增强, 食物的品质营养状况越来越成为关注的焦点。近年来, 以芝麻叶、花、种子等组织为原材料的加工制品如食品、茶饮品、化妆品等逐渐走进人们的生活<sup>[20,21]</sup>, 芝麻花中的色苷类化合物以及种子中的芝麻素、芝麻酚、芝麻林素等抗氧化物质还被应用于医药和临床<sup>[22,23]</sup>。已有研究表明, 通过生物学手段提高植物对矿物质元素的吸收和利用, 在改善人类矿物质缺乏等方面具有较大的优势和潜力<sup>[24]</sup>。以往对芝麻的研究多注重含油量、蛋白质含量、脂肪酸等有机营养物质, 对矿物质元素含量差异的研究报道较少, 目前我国尚未开展对芝麻不同组织中矿物质元素含量的研究, 对芝麻不同品种(系)的矿物质元素含量特征的分析也知之甚少, 制约了芝麻经济价值的开发利用。为了探明矿物质元素在芝麻不同组织、不同种皮色的成熟籽粒中的分布特征, 本研究通过对芝麻不同组织中Ca、Mg、Fe、Cu和Zn这5种人体易缺乏的重要矿物质元素含量进行测定, 分析矿物质元素含量在芝麻不同组织、不同种皮色的成熟籽粒之间的差异以及矿物质元素之间的相关性, 为有针对性地开展芝麻产品开发和遗传改良提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料及试验设计

芝麻材料由中国农业科学院油料作物研究所芝麻与特色油料遗传育种创新团队和国家芝麻种质资源中期库(武汉)提供。供试的芝麻材料于2020年种植于河南驻马店, 5行区, 土壤类型为黄褐土, 底肥为30kg/666.7m<sup>2</sup>三元复合肥。盛花期对3份白花材料的花、叶片、发育20天籽粒、发育20天

心皮和3份紫花材料的花进行取样,液氮冷冻处理后低温保存备用(表1);用于籽粒分析的12份材料(白色、浅褐色、褐色、黑色各3个材料,表2),自然成熟后混收单株,清选干燥的种子,在同一容器中平衡水分后用于矿物质元素含量测定。

### 1.2 矿物质元素含量的测定

芝麻组织中矿物质元素检测参考GB 5009.268-2016《食品安全国家标准食品中多元素的测定》方法,并进行了优化。将保存的芝麻样品经105℃杀青15min,然后在80℃下烘干至恒重,称量0.2g左右的样品干重,在样品中加入5mL浓硝酸,2mL高氯酸在200℃消煮至澄清,将消煮液无损转入50mL容量瓶定容,用电感耦合等离子体发射光谱仪ICP-OES(Optima 8300,美国PerkinElmer公司)测定Ca、Mg、Fe、Cu、Zn等元素含量,每个样品测定2次,相差超过10%时进行复测,取平均值。

### 1.3 数据整理与统计分析

采用Excel 2010对数据进行整理,采用SPSS 20.0进行描述性统计、差异检验、相关分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 芝麻不同组织矿物质成分含量特征分析

对3份白花材料的花、叶片、20天发育籽粒、20天发育心皮和3份芝麻紫花材料的花组织中主要矿物质Ca、Mg、Fe、Cu、Zn的定量分析显示,不同组织间的各个矿物质成分含量存在较大差异(表1)。各组织中Ca元素含量最高,差异也最为明显,不同组织中Ca元素含量差异达2~4倍。其中,叶片中Ca平均含量高达2151.61 mg/100g,显著高于其他组织;其次为20D籽粒,含量为984.18 mg/100g;20D心皮中Ca元素含量最低为512.06 mg/100g,显著低于其他组织。Mg含量在叶片中最高,含量为390.23 mg/100g,显著高于其他组织;其次在20D籽粒中较高,含量为300.01 mg/100g;20D心皮中含量最低,为196.39 mg/100g,显著低于其他组织。Fe在各组织之间的含量没有显著性差异,在叶片中含量相对较高,为19.98 mg/100g,在白花中含量最低,平均为10.34 mg/g。Cu和Zn在芝麻组织中相对其他矿物质含量较低,均小于5.00 mg/100g,以叶片中的Cu的含量最高,显著高于其他组织。不同花色的花中矿物质成分没有截然的差别,相对而言紫色花朵的Fe、白色花朵的Zn含量较高。整体上,叶片是Ca、Mg、Cu、Fe含量最高组织,20D籽粒是Zn含量最高的组织。此外20D籽粒的Mg,紫花的Cu和白花中

的Zn含量也较高。在分析的材料中,材料WZM4223叶片、花和20天心皮都具有较高的Ca含量,其中叶片中达2458.00 mg/100g;中芝53的叶片和20D籽粒分别具有最高的Cu、Fe含量;材料6538花的锌含量最高,为5.92 mg/100g(表1)。

### 2.2 不同种皮色芝麻矿物质成分含量特征分析

对WZM4223等12个不同种皮色的芝麻成熟籽粒中矿物质Ca、Mg、Fe、Cu、Zn定量分析显示,不同颜色芝麻成熟籽粒的矿物质成分含量不同。以上5种矿物质成分中,芝麻籽粒中Ca含量最高,平均达到1133.64 mg/100g,其次为Mg,平均为382.85 mg/100g。从表2可以看出,不同颜色的芝麻中,褐色芝麻具有最高的Ca、Mg和Cu的平均含量,分别为1342.68 mg/100g、445.95 mg/100g和2.38 mg/100g;黑色芝麻具有最高的Fe含量,为11.77 mg/100g;浅褐色芝麻具有最高的Zn含量,为7.70 mg/100g,白色芝麻Zn含量低于其他颜色芝麻。总体上,相对于白色芝麻,其他颜色芝麻表现更高的矿物质成分含量,尤其是在Ca、Cu含量上较明显。从各个材料上看,褐色芝麻ZM3755具有最高的Ca、Mg含量,分别为1669.48 mg/100g和532.39 mg/100g;黑芝麻中芝33的Fe、Zn含量最高,分别为14.26 mg/100g和8.95 mg/100g;褐色芝麻ZM2118的Cu含量最高,为2.60 mg/100g。

### 2.3 芝麻不同组织、不同种皮色成熟籽粒矿物质含量相关性分析

对芝麻不同组织和不同种皮色成熟籽粒中Ca、Mg、Fe、Cu、Zn等5种矿物质含量进行相关性分析,发现这些矿物质元素在两组材料中相关性存在一定差异(表3和表4)。其中,Ca和Mg的含量在不同组织和成熟籽粒中分别具有极显著和显著的正向相关性,且在不同组织中的相关系数高达0.879;Cu和Ca、Mg的含量在不同组织呈极显著正相关,但在成熟籽粒中相关性不显著;在成熟籽粒中,Zn和Fe含量呈极显著正相关,但在不同组织中却表现一定的负相关,但不显著。

## 3 讨论

芝麻是我国传统的油料作物之一,不仅含有丰富的碳水化合物、蛋白质、脂肪和甾醇等,还富含多种矿物质元素,尤其Ca元素含量很高<sup>[25]</sup>。本研究发现,在芝麻不同组织和不同籽粒颜色的5种矿质元素的平均含量排序为Ca>Mg>Fe>Zn>Cu,这和Mohammed等<sup>[26]</sup>和Deme等<sup>[27]</sup>的研究结果一致。

表1 不同芝麻组织矿物质成分含量  
Table 1 Mineral contents of different sesame varieties and tissues /(mg/100g)

材料名 Material	组织 Tissue	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn
WZM4223	白花 White flower	887.68	257.03	8.88	1.88	4.28
6538	白花 White flower	755.18	253.92	12.80	1.67	5.92
中芝 53 Zhongzhi 53	白花 White flower	633.42	248.43	9.33	1.90	4.20
平均值 Mean value		758.76 bc	253.13 bc	10.34 a	1.82 b	4.80 a
H03	紫花 Purple flower	714.08	265.33	10.02	1.70	3.74
JG60	紫花 Purple flower	710.04	264.36	11.50	1.78	4.51
中芝 H16 Zhongzhi H16	紫花 Purple flower	802.25	176.26	17.32	2.06	3.79
平均值 Mean value		742.12 bc	235.31 bc	12.95 a	1.85 b	4.02 ab
WZM4223	叶片 Leaf	2458.00	414.14	20.11	2.16	4.81
6538	叶片 Leaf	2269.63	389.94	25.13	2.04	3.90
中芝 53 Zhongzhi 53	叶片 Leaf	1727.21	366.60	14.71	2.48	3.65
平均值 Mean value		2151.61 a	390.23 a	19.98 a	2.46 a	4.12 ab
WZM4223	20D籽粒 20D seed	1002.08	242.73	10.23	1.25	5.08
6538	20D籽粒 20D seed	1071.36	344.71	11.03	1.53	5.27
中芝 53 Zhongzhi 53	20D籽粒 20D seed	879.09	312.59	27.53	1.55	4.19
平均值 Mean value		984.18 b	300.01 b	16.26 a	1.45 b	4.85 a
WZM4223	20D心皮 20D carpel	534.84	214.36	11.33	0.78	3.59
6538	20D心皮 20D carpel	481.51	195.01	20.41	0.80	2.89
中芝 53 Zhongzhi 53	20D心皮 20D carpel	519.83	179.79	8.09	0.81	2.98
平均值 Mean value		512.06 c	196.39 c	13.28 a	0.80 c	3.15 b

注:同列均值后不同小写字母的值表示在  $P < 0.05$  水平上的差异显著

Note: Different lowercase letters in same column indicate significant difference at  $P < 0.05$  level

表2 不同颜色芝麻种籽矿物质成分含量  
Table 2 Mineral contents of sesames with different seed coat color /(mg/100g)

材料名 Material	籽粒颜色 Seed color	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn
WZM4223	白色 White	907.35	394.51	9.99	2.05	5.82
中芝 53 Zhongzhi 53	白色 White	1086.43	356.25	8.03	1.76	5.76
中芝 10 Zhongzhi 10	白色 White	936.67	374.62	11.47	2.09	7.14
平均值 Mean value		976.82 a	375.13 ab	9.83 a	1.97 b	6.24 a
ZZM1271	浅褐色 Light brown	1021.45	368.19	11.47	1.92	8.27
WZM3113	浅褐色 Light brown	1096.99	326.93	10.46	1.96	6.86
ZZM3357	浅褐色 Light brown	886.64	378.04	10.40	1.99	7.98
平均值 Mean value		1001.69 a	357.72 ab	10.78 a	1.96 b	7.70 a
ZZM2118	褐色 Brown	944.83	385.33	9.79	2.60	6.38
ZZM2599	褐色 Brown	1413.72	420.13	9.74	2.42	7.88
ZZM3755	褐色 Brown	1669.48	532.39	9.58	2.11	7.53
平均值 Mean value		1342.68 a	445.95 a	9.70 a	2.38 a	7.26 a
中芝 H16 Zhongzhi H16	黑色 Black	1349.88	382.54	11.06	2.51	7.04
中芝 33 Zhongzhi 33	黑色 Black	1187.34	373.17	14.26	2.38	8.95
ZZM2147	黑色 Black	1102.88	302.07	9.99	2.19	6.10
平均值 Mean value		1213.37 a	352.59 b	11.77 a	2.36 a	7.36 a

注:同列均值后不同小写字母的值表示在  $P < 0.05$  水平上的差异显著

Note: Different lowercase letters in same column indicate significant difference at  $P < 0.05$  level

表3 芝麻不同组织矿物质元素相关性分析

Table 3 Correlation analysis of mineral contents in different sesame tissue

成分Element	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn
Ca	1				
Mg	0.879**	1			
Fe	0.486	0.435	1		
Cu	0.743**	0.698**	0.252	1	
Zn	0.198	0.352	-0.124	0.326	1

注: \*表示0.05水平上的显著差异, \*\*表示0.01水平上的极显著差异  
Note: \* and \*\* indicate significant correlation at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively

表4 不同种皮颜色芝麻矿物质元素相关性分析

Table 4 Correlation analysis of mineral contents in sesames with different seed coat color

成分Element	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn
Ca	1				
Mg	0.663*	1			
Fe	-0.070	-0.132	1		
Cu	0.271	0.151	0.306	1	
Zn	0.267	0.266	0.714**	0.176	1

注: \*表示0.05水平上的显著差异, \*\*表示0.01水平上的极显著差异  
Note: \* and \*\* indicate significant correlation at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

其中, Ca元素含量均最高, 叶中Ca元素平均含量为2151.61mg/100g, 其次为芝麻种子, Ca元素平均含量为1133.64mg/100g, 目前我国居民钙摄入推荐量为800 mg/d<sup>[28]</sup>, 可以发现芝麻不同组织中的Ca元素含量处于较高水平。分析结果同时表明, 同一元素在芝麻的不同组织的含量也存在较大差异, 呈现出叶片>20D籽粒>花>20D新皮。叶片作为光合作用最主要的场所, 是植物制造、积累、储藏和提供养分的“源”器官, 而果实是光合产物的分配器官, 在一定程度上反映出植物不同组织中矿物质元素的积累分配特征。在日本、韩国、尼日利亚及热带地区, 芝麻叶已成为一种含有一些功能性成分的新型食品原料<sup>[29,30]</sup>, 因此, 芝麻叶可作为一种新型的食用型蔬菜对于儿童和中老年人补钙具有极佳的功效。此外, 不同组织中, 各矿物质元素含量间存在一定的相关性, 其中Ca、Mg和Cu这3个矿物质之间均达到极显著相关, 表明上述矿物质元素含量之间可能存在某种程度的依存关系。

本研究通过在不同颜色成熟籽粒中矿物质元素的含量得出, 相对于白色芝麻, 其他颜色芝麻表现更高的矿物质成分含量, 在Ca、Mg和Cu元素含量上, 高含量的材料均为褐色芝麻, 黑色芝麻中Fe元

素含量最高, 在浅褐色芝麻中Zn元素含量最高。不同籽粒颜色的芝麻材料中, 矿物质元素之间存在一定的相关性, 其中和芝麻不同组织的结果一样Ca和Mg的含量表现出显著正相关。Fe和Zn的含量表现出极显著正相关, 这个结果和Teboul等<sup>[31]</sup>研究结果相一致, 在野生种和栽培种的小麦和菜豆中, Fe和Zn均表现出显著正相关<sup>[32,33]</sup>, 表明Fe和Zn具有共同的调节机制, 在拟南芥中, 研究发现Fe调节转运蛋白(IRT1)同时吸收Zn<sup>[34]</sup>。育种中通过选择或选用合适的亲本是可以同时提高芝麻中不同矿物质元素的含量。进一步筛选中国现有品种特别是各地主栽品种中的高矿物质元素含量品种, 特别是与人体健康密切相关的Ca和Fe元素的含量, 对其含量高的主栽品种直接推广加以利用, 可进一步提高芝麻的营养应用价值。

## 4 结论

本试验分析了芝麻不同组织和不同颜色成熟籽粒中矿物质元素含量, 在芝麻不同组织中, Ca元素含量最高, 叶和20D籽粒中Mg元素含量较高, 叶中的Fe、Cu元素含量均高于其它组织, 20D籽粒中Zn元素含量较高, 同时Ca、Mg和Cu这3个矿物质含量之间均达到极显著相关。在不同颜色的芝麻籽粒中, 深色芝麻表现更高的矿物质成分含量, 褐色芝麻中的Ca、Mg和Cu元素含量最高, 黑色芝麻中Fe元素含量最高, 在浅褐色芝麻中Zn元素含量最高, 在矿物质元素含量相关性方面, Ca和Mg的含量表现出显著正相关, Fe和Zn的含量表现出极显著正相关。

## 参考文献:

- [1] Hepler P K. The cytoskeleton and its regulation by calcium and protons [J]. *Plant Physiol*, 2016, 170 (1): 3-22. DOI: 10.1104/pp.15.01506.
- [2] Marschner H. *Mineral Nutrition of Higher Plants* (Second Edition) [M]. Academic Press, 1995
- [3] Chen J H, Li Y P, Wen S L, et al. Magnesium fertilizer-induced increase of symbiotic microorganisms improves forage growth and quality [J]. *J Agric Food Chem*, 2017, 65 (16): 3253-3258. DOI: 10.1021/acs.jafc.6b05764.
- [4] Briat J F, Duc C, Ravet K, et al. Ferritins and iron storage in plants [J]. *Biochim Biophys Acta BBA Gen Subj*, 2010, 1800 (8): 806-814. DOI: 10.1016/j.bba-gen.2009.12.003.
- [5] 王子诚, 陈梦霞, 杨毓贤, 等. 铜胁迫对植物生长发育影响与植物耐铜机制的研究进展 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(10): 1849-1863.

- [6] 朱盼盼, 马彦平, 周忠雄, 等. 微量元素锌与植物营养和人体健康[J]. 肥料与健康, 2021, 48(5): 16–18, 23.
- [7] Kumssa D B, Joy E J M, Ander E L, et al. Dietary calcium and zinc deficiency risks are decreasing but remain prevalent[J]. Sci Rep, 2015, 5: 10974. DOI:10.1038/srep10974.
- [8] Weaver C, Heaney R P. Calcium in human health[M]. Totowa, NJ: Humana Press, 2006
- [9] Nairz M, Dichtl S, Schroll A, et al. Iron and innate antimicrobial immunity—depriving the pathogen, defending the host[J]. J Trace Elem Med Biol, 2018, 48: 118–133. DOI:10.1016/j.jtemb.2018.03.007.
- [10] Wang L, Erlandsen H, Haavik J, et al. Three-dimensional structure of human tryptophan hydroxylase and its implications for the biosynthesis of the neurotransmitters serotonin and melatonin[J]. Biochemistry, 2002, 41(42): 12569–12574. DOI:10.1021/bi026561f.
- [11] 叶钦松, 郝雯颖, 孙建新, 等. 学龄前儿童微量元素缺乏情况及影响因素分析[J]. 实用预防医学, 2019, 26(2): 205–207. DOI:10.3969/j.issn.1006–3110.2019.02.024.
- [12] 吴茂江, 涂长信. 铜与人体健康[J], 2005, 22(5): 64–65.
- [13] 何琍, 胡昌恒, 罗祖明, 等. 微量元素和脑动脉硬化症相互关系的初步探讨[J]. 中风与神经疾病杂志, 1990, 7(1): 7–8, 4.
- [14] 王丕玉, 刘海潮. 锌失衡与人体健康[J]. 中国食物与营养, 2007, 13(7): 50–51. DOI:10.3969/j.issn.1006–9577.2007.07.017.
- [15] 贾海先, 王竹天, 韩军花. 国内外强化食品对人群重点微量营养素的贡献率[J]. 卫生研究, 2015, 44(1): 137–142. DOI:10.19813/j.cnki.weishengyanjiu.2015.01.037.
- [16] Bouis H E, Hotz C, McClafferty B, et al. Biofortification: a new tool to reduce micronutrient malnutrition[J]. Food Nutr Bull, 2011, 32(1 Suppl): S31–S40. DOI:10.1177/15648265110321S105.
- [17] 郝元峰, 张勇, 何中虎. 作物锌生物强化研究进展[J]. 生命科学, 2015, 27(8): 1047–1054. DOI:10.13376/j.cbbs/2015144.
- [18] 岳向峰, 张健, 黄承钰. 生物强化谷物铁营养状况评价及品种筛选[J]. 现代预防医学, 2008, 35(5): 862–865. DOI:10.3969/j.issn.1003–8507.2008.05.029.
- [19] Makinde F M, Akinoso R. Comparison between the nutritional quality of flour obtained from raw, roasted and fermented sesame (*Sesamum indicum* L.) seed grown in Nigeria[J]. Acta Sci Pol Technol Aliment, 2014, 13(3): 309–319. DOI:10.17306/j.afs.2014.3.9.
- [20] 郑新艳, 胡坡, 姚汝贤, 等. 一种干芝麻叶提取物护肤面膜及其制备方法: CN109528585A[P]. 2019–03–29.
- [21] 王文望. 一种洗发水配方: CN112773746A[P]. 2021–05–11.
- [22] 王蕾, 黎冬华, 齐小琼, 等. 芝麻核心种质芝麻素和芝麻酚林的关联分析[J]. 中国油料作物学报, 2014, 36(1): 32–37. DOI:10.7505/j.issn.1007–9084.2014.01.005.
- [23] 胡华丽, 梅鸿猷, 刘日斌, 等. 芝麻种子发育过程中木酚素、脂肪及蛋白质积累量变化研究[J]. 华北农学报, 2014, 29(1): 190–194.
- [24] Zhao F J, McGrath S P. Biofortification and phytoremediation[J]. Curr Opin Plant Biol, 2009, 12(3): 373–380. DOI:10.1016/j.pbi.2009.04.005.
- [25] 孙建, 乐美旺, 何才和, 等. 中国主要黑芝麻品种的遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2015, 16(2): 269–276. DOI:10.13430/j.cnki.jpgr.2015.02.009.
- [26] Mohammed N Alyemeni, A Y Basahy, Hassan Sher. Physico-chemical analysis and mineral composition of some sesame seeds (*Sesamum indicum* L.) grown in the Gizan area of Saudi Arabia[J]. Journal of Medicinal Plants Research. 2011, 5(2): 270–274.
- [27] Deme T, Haki G D, Retta N, et al. Mineral and anti-nutritional contents of Niger seed (*Guizotia abyssinica* (L. f.) Cass., linseed (*linum usitatissimum* L.) and sesame (*sesamum indicum* L.) varieties grown in Ethiopia[J]. Foods, 2017, 6(4): 27. DOI:10.3390/foods6040027.
- [28] 王默涵, 雷蕾, 王俊, 等. 人体的钙吸收与钙营养状况评价[J]. 现代食品, 2020(24): 25–30, 47. DOI:10.16736/j.cnki.cn41–1434/ts.2020.24.007.
- [29] Hata N, Hayashi Y, Okazawa A, et al. Comparison of sesamin contents and *CYP81Q1* gene expressions in aboveground vegetative organs between two Japanese sesame (*Sesamum indicum* L.) varieties differing in seed sesamin contents[J]. Plant Sci, 2010, 178(6): 510–516. DOI:10.1016/j.plantsci.2010.02.020.
- [30] Auwalu B, Babatunde F. Analyses of growth, yield and fertilization of vegetable sesame (*Sesamum radiatum* schum)[J]. J Plant Sci, 2007, 2(1): 108–112.
- [31] Teboul N, Gadri Y, Berkovich Z, et al. Genetic architecture underpinning yield components and seed mineral-nutrients in sesame[J]. Genes, 2020, 11(10): 1221. DOI:10.3390/genes11101221.
- [32] Chatzav M, Peleg Z, Ozturk L, et al. Genetic diversity for grain nutrients in wild emmer wheat: potential for wheat improvement[J]. Ann Bot, 2010, 105(7): 1211–1220. DOI:10.1093/aob/mcq024.
- [33] Blair M W, Astudillo C, Grusak M A, et al. Inheritance of seed iron and zinc concentrations in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.)[J]. Mol Breed, 2009, 23(2): 197–207.
- [34] Ajeesh Krishna T P, Maharajan T, Victor Roch G, et al. Structure, function, regulation and phylogenetic relationship of ZIP family transporters of plants[J]. Front Plant Sci, 2020, 11: 662. DOI:10.3389/fpls.2020.00662.