

燕麦种质资源矿质元素的多样性分析

齐冰洁¹ 王敏¹ 张智勇² 贺鑫¹ 刘景辉¹

(¹ 内蒙古农业大学协同创新中心/全国农业科研杰出人才及创新团队, 010019, 内蒙古呼和浩特;

² 内蒙古农牧业科学院, 010031, 内蒙古呼和浩特)

摘要 为了明确燕麦种质资源矿质元素含量的多样性, 采用原子吸收分光光度法测定了燕麦种质铜 (Cu)、铁 (Fe)、锌 (Zn)、镁 (Mg) 和钙 (Ca) 元素的含量, 进行遗传变异、聚类和相关分析。结果表明: 供试材料的 Cu、Fe、Zn、Mg 和 Ca 元素含量具有丰富的多样性, 平均多样性指数为 2.022, 平均变异系数为 29.775%。筛选到 Cu 含量高的种质有休眠燕麦、加 5、坝苽 1 号、YS0404、v5 和 v18; Fe 含量高的种质有太丰、夏苽麦、9418、蒙燕 2 号和 shadow; Zn 含量高的种质有ハヤテ和坝苽 9 号; Mg 含量高的种质有ハヤテ和苽麦 4400; Ca 含量高的种质有 v18、鉴 19 和白燕 7 号。Zn、Fe、Mg 的含量均较高的种质有ハヤテ、6518、加 9、MARION、坝苽 8 号、晋燕 2004、坝苽 9 号和品五。燕麦种质 Cu 与 Zn 含量呈显著正相关, Ca 与 Fe 含量间呈极显著负相关。

关键词 燕麦; 种质资源; 矿质元素; 多样性

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



钙 (Ca)、镁 (Mg)、铁 (Fe)、铜 (Cu) 和锌 (Zn) 等元素含量的高低直接关系到作物的生长发育和营养品质, 且与人类的饮食健康密切相关^[1]。矿质离子只能通过食物摄入, 不能在体内合成^[2]。全球许多人面临着潜在营养元素缺乏症——“隐性饥饿”的威胁, 增加了社会医疗保健的开支, 给国民经济发展带来沉重负担^[3]。随着人们生活水平的提高, 杂粮作物越来越受到人们的喜爱^[4], 燕麦作为杂粮作物代表, 其籽粒中含有丰富的营养元素和矿质元素^[5-10]。燕麦 (*Avena sativa* L.) 属禾本科燕麦属^[11], 裸燕麦 (*Avena nuda* L.) 起源于中国, 是我国第五大粮食作物^[12], 世界种植面积及产量位居第六位^[13]。燕麦营养价值较高, Ca、Zn、Fe、赖氨酸和维生素含量均较其他谷类作物高^[14]。对燕麦营养品质的研究大多集中在蛋白质、 β -葡聚糖和脂肪含量鉴定等方面^[15-18], 对燕麦种质资源矿质元素的研究较少。

本研究采用原子吸收分光光度法, 测定 100 份国内外燕麦种质资源主要矿质元素含量, 分析燕麦矿质元素含量的差异与多样性, 为燕麦种质资源的

有效利用和品种选育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

100 份燕麦种质包括皮燕麦 42 份 (人工脱皮)、裸燕麦 58 份 (表 1), 由内蒙古农业大学燕麦课题组提供。

1.2 试验地概况及试验设计

试验于 2018 年在呼和浩特市园艺示范中心基地 (N40°48', E110°42') 进行, 该地属温带大陆性气候。全年日照时数达 2 970.5h, 生长季节平均温度 10℃以上, 年降水量 417.5mm, 无霜期 135d。土壤类型为沙壤土, 前茬作物为马铃薯。土壤有机质含量 24.65g/kg, pH 值 8.26, 碱解氮 107.50mg/kg、速效钾 196.00mg/kg、速效磷 20.16mg/kg。

于 4 月 16 日播种, 随机区组设计, 3 次重复, 小区面积 2m², 各材料生长期栽培管理措施一致, 于成熟期收获、脱粒。

1.3 试验方法

1.3.1 样品制备 将燕麦籽粒用自来水冲洗, 再用

作者简介: 齐冰洁, 研究方向为种质资源创新与利用, E-mail: qbjzy@126.com; 王敏为共同第一作者, 研究方向为燕麦种质资源创新与利用, E-mail: 15771396377@163.com

刘景辉为通信作者, 研究方向为燕麦荞麦等杂粮作物研究与开发, E-mail: cauljh@163.com

基金项目: 国家自然科学基金 (31460328); 国家燕麦荞麦产业技术体系 (CARS-08-B-5); 内蒙古自然科学基金 (2018MS03051)

收稿日期: 2019-12-16; 修回日期: 2020-04-19; 网络出版日期: 2020-07-27

表 1 供试的 100 份燕麦材料
Table 1 The materials of 100 oats for testing

编号 Number	品种 (系) Variety (Line)	原产地 Origin	编号 Number	品种 (系) Variety (Line)	原产地 Origin
1	休眠燕麦	加拿大	51	YS0404	不详
2	3465	不详	52	张燕 7 号	中国
3	Onyllian	丹麦	53	坝燕 4 号	中国
4	阿贾克斯	加拿大	54	H44	不详
5	Nidar	丹麦	55	2004R-7	不详
6	SvalØf03410	丹麦	56	燕 2008	不详
7	苏维埃	苏联	57	坝莠 10 号	中国
8	永 118	日本	58	坝莠 8 号	中国
9	苏维埃 339	苏联	59	加 1	加拿大
10	Bl1xtl-EighlingBlit	瑞典	60	晋燕 2004	中国
11	温泉燕麦	中国	61	白燕 10 号	中国
12	燕麦 (3)	中国	62	白燕 8 号	中国
13	Sibisiae	丹麦	63	v2	加拿大
14	Express	丹麦	64	v3	加拿大
15	Victory record	丹麦	65	v4	加拿大
16	内农莠 1 号	中国	66	v5	加拿大
17	内燕 3 号	中国	67	v6	加拿大
18	保罗	美国	68	v8	加拿大
19	925	中国	69	v9	加拿大
20	6583	不详	70	v11	加拿大
21	太丰	日本	71	v14	加拿大
22	原 33	中国	72	v16	加拿大
23	6218	不详	73	v17	加拿大
24	ハヤテ	日本	74	v18	加拿大
25	大燕麦	中国	75	v19	加拿大
26	野燕麦	中国	76	v20	加拿大
27	莠麦	中国	77	v22	加拿大
28	6518	不详	78	v25	加拿大
29	白铃铛麦	中国	79	蒙燕 7202	中国
30	加 7	加拿大	80	蒙燕 7407	中国
31	加 9	加拿大	81	蒙燕 8498	中国
32	加 8	加拿大	82	鉴 19	不详
33	加 5	加拿大	83	蒙农大 1 号	中国
34	加 6	加拿大	84	蒙农大 2 号	中国
35	加 3	加拿大	85	坝莠 6 号	中国
36	夏莠麦	中国	86	坝莠 9 号	中国
37	白燕 2 号	中国	87	坝莠 18 号	中国
38	燕科 1 号	中国	88	蒙燕 1 号	中国
39	CAPTTAL	加拿大	89	蒙燕 2 号	中国
40	NOVA	加拿大	90	蒙燕 3 号	中国
41	MARION	加拿大	91	加燕 7 号	加拿大
42	LAMAR	加拿大	92	白燕 7 号	中国
43	SYLVA	加拿大	93	青引 1 号	中国
44	APPALLACHES	加拿大	94	林纳	中国
45	莠麦 4400	中国	95	Bia	加拿大
46	9418	不详	96	小粒燕麦	中国
47	草莠 1 号	中国	97	shadow	加拿大
48	YS0404	不详	98	8202	中国
49	坝莠 1 号	中国	99	黍穗	中国
50	白燕 4 号	中国	100	品五	中国

蒸馏水洗涤 2 次, 除去样品表面附着的杂质及金属离子, 置于 85℃烘箱中烘干至恒重, 用粉碎机将烘干的样品粉碎, 装于密封袋中, 放在干燥通风处备用。

1.3.2 样品处理 采用国家标准 GB/T 14609-2008 试样消解法中的微波消解法^[19]进行样品处理。称样时每份种质 3 次重复, 分别称取样品 0.3000g (精确至 0.0001) 置于聚四氟乙烯消解罐中, 加入 5mL

硝酸，浸泡 30min，再加入 2mL 过氧化氢，放置 5min，将消解罐放入微波消解仪中消解，消解结束后，取出内罐，移至赶酸仪上加热至溶液近干，冷却后，用 0.1% 硝酸少量多次洗涤消解罐并转移消解液于 50mL 容量瓶中，定容，混匀，同时做空白试剂。

1.3.3 矿质元素含量测定 按照国家标准 GB/T 14609-2008，采用火焰原子吸收光谱法^[9]测定 Mg、Ca、Fe、Zn 和 Cu 的含量，3 次重复。

1.4 数据处理

用 Excel 2010 和 SPSS Statistics 软件进行数据处理。

2 结果与分析

2.1 燕麦种质资源主要矿质元素含量的差异分析

由表 2 可以看出，不同燕麦种质均含有丰富的矿质元素，但含量具有显著差异。不同燕麦种质均以 Mg 平均含量最高为 1 112.309mg/kg；Cu 平均含量最低为 6.672mg/kg，Ca、Fe 和 Zn 的平均含量分别为 246.419、82.171 和 31.484mg/kg。5 种矿质元素含量的平均多样性指数为 2.022，表明供试种质各矿质元素含量遗传差异大，具有丰富的遗传多样性。

燕麦种质 5 种矿质元素含量平均变异系数为

表 2 100 份燕麦种质资源 5 种矿质元素含量的差异与改良潜力
Table 2 Diversity and improvement potential of five mineral elements content in 100 oat germplasm resources

矿质元素 Mineral element	均值 Mean (mg/kg)	最小值 Minimum (mg/kg)	最大值 Maximum (mg/kg)	标准差 Standard deviation (mg/kg)	变异系数 Coefficient of variation (%)	多样性指数 Diversity index	改良潜力 Potential for improvement (%)
Cu	6.672	1.217	17.152	3.566	53.448	1.981	157.074
Fe	82.171	45.430	147.998	23.140	28.161	2.038	80.110
Zn	31.484	16.361	53.884	6.670	21.187	1.849	71.147
Mg	1 112.309	561.398	1 528.926	190.002	17.082	2.176	37.455
Ca	246.419	110.241	415.690	71.460	28.999	2.065	68.692
平均 Mean	-	-	-	-	29.775	2.022	82.896

29.775%，表明供试材料间在 5 种矿质元素存在丰富的变异类型，选择的范围较大。改良潜力是指供试品种（系）测定指标的最高值与平均值之差占平均值的百分数，代表在育种过程中可以把该指标含量提高的潜力^[15]。Cu、Fe、Zn、Mg 和 Ca 含量改良潜力较高，分别为 157.074%、80.110%、

71.147%、37.455% 和 68.692%（表 2），说明不同燕麦籽粒矿质元素含量有不同程度的改良潜力。

2.2 燕麦种质资源各矿质元素含量的聚类分析

采用系统聚类法的中间距离法，对 100 份燕麦种质资源的 5 种矿质元素含量分别进行聚类，将所有参试材料分为不同的种质群（表 3）。

表 3 100 份燕麦种质资源各种矿质元素含量的聚类结果
Table 3 Clustering results of various mineral elements in 100 oat germplasm resources

矿质元素 Mineral element	种质群 Germplasm group	品种（系）编号 Variety (Line) number	均值 Mean (mg/kg)	变异系数 Coefficient of variation (%)
Cu	I	16、28、29、30、31、32、38、39、41、45、46、47、54、56、57、58、59、60、62、64、65、67、68、71、76、82、83、84、85、86、90、92、95、98、99、100	3.369	30.009
	II	13、19、24、34、36、43、48、52、61、69、70、73、75、77、78、79、80、81、87、89、96、97	10.285	11.094
	III	2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12、14、15、17、18、20、21、22、23、25、26、27、35、37、40、42、44、50、53、55、63、72、88、91、93、94	6.279	13.785
	IV	1、33、49、51、66、74	15.601	6.870
Fe	I	28、44、58、65、70、81、86、94	118.539	4.456
	II	21、36、46、89、97	135.559	5.549
	III	3、4、7、9、10、13、15、17、22、23、24、25、29、31、34、41、45、51、52、60、61、62、63、76、77、78、84、85、93、100	95.415	6.953
	IV	5、6、12、14、16、35、39、42、50、59、73、80、83、88、90、91、95、96	54.414	8.463

续表 3 Table 3 (continued)

矿质元素 Mineral element	种质群 Germplasm group	品种（系）编号 Variety (Line) number	均值 Mean (mg/kg)	变异系数 Coefficient of variation (%)
Zn	V	1、2、8、11、18、19、20、26、27、30、32、33、37、38、40、43、47、48、49、53、54、55、56、57、64、66、67、68、69、71、72、74、75、79、82、87、92、98、99	70.489	9.401
		24、86	53.600	7.500
	II	8、28、31、33、41、60、78、100	43.755	4.082
	III	10、11、46、65、67、82、83、85、90、92、95	21.130	10.211
	IV	4、6、12、13、14、15、16、17、19、20、25、26、27、32、35、36、37、38、40、42、43、48、49、50、52、57、58、61、66、70、72、73、74、75、77、79、80、87、97	34.104	5.727
Mg	V	1、2、3、5、7、9、18、21、22、23、29、30、34、39、44、45、47、51、53、54、55、56、59、62、63、64、68、69、71、76、81、84、88、89、91、93、94、96、98、99	28.217	6.576
		30、34、47、51、73	617.867	8.707
	II	10、25、29、38、70	792.511	3.952
	III	24、45	1 522.229	0.622
	IV	5、8、12、14、19、22、31、40、41、46、58、59、61、63、74、78、81、90、97	1 323.899	3.879
Ca	V	2、3、4、9、11、13、15、18、28、36、44、48、49、53、54、55、56、57、60、62、65、69、76、77、82、83、84、88、89、91、92、95	1 185.450	3.842
	VI	1、6、7、16、17、20、21、23、26、27、32、33、35、37、39、42、43、50、52、64、66、67、68、71、72、75、79、80、85、86、87、93、94、96、98、99、100	1 028.271	4.961
	I	74、82、92	410.733	1.049
	II	16、18、19、24、35、36、59、66、67、95	345.245	4.282
	III	6、9、12、22、23、29、30、31、33、38、40、52、60、62、68、71、72、76、81、87、97	235.837	5.624
	IV	2、5、14、20、25、27、34、37、42、43、45、47、49、50、51、53、55、56、61、65、70、73、79、80、83、85、88、91、96、99、100	291.798	6.497
	V	15、44、46、93	121.862	6.388
	VI	1、3、4、7、8、10、11、13、17、21、26、28、32、39、41、48、54、57、58、63、64、69、75、77、78、84、86、94、98	169.156	11.501

注：1~100 为种质编号，对应品种（系）名见表 1
Note: 1-100 is serial numbers of germplasms, the corresponding variety (line) names of materials in table 1

根据 Cu 含量，可将供试材料分为 4 个种质群，第 I 类 Cu 平均含量最低为 3.369mg/kg，包括 26 份裸燕麦，10 份皮燕麦；第 IV 类 Cu 平均含量最高为 15.601mg/kg，包括 5 份裸燕麦（休眠燕麦、加 5、坝蓼 1 号、YS0404 和 v5）和 1 份皮燕麦（v18）。根据 Fe 含量，可将供试材料分为 5 个种质群，第 II 类 Fe 平均含量最大为 135.559mg/kg，包括 4 份裸燕麦（太丰、夏蓼麦、9418 和蒙燕 2 号）和 1 份皮燕麦（shadow）；第 IV 类 Fe 平均含量最小为 54.414mg/kg，包括 7 份裸燕麦和 11 份皮燕麦。根据 Zn 含量，可将供试材料分为 5 个种质群，第 I 类 Zn 平均含量最大为 53.600mg/kg，包括 1 份皮燕麦（ハヤテ）和 1 份裸燕麦（坝蓼 9 号）；第

III 类 Zn 平均含量最小为 21.130mg/kg，包括 7 份均皮燕麦和 4 份裸燕麦。根据 Mg 含量，可将供试材料分为 6 个种质群，第 I 类 Mg 平均含量最小为 617.867mg/kg，包括 4 份裸燕麦和 1 份皮燕麦；第 III 类 Mg 平均含量最大为 1 522.229mg/kg，包括 1 份皮燕麦（ハヤテ）和 1 份裸燕麦（蓼麦 4400）。由 Ca 含量，可将供试材料分为 6 个种质群，第 I 类 Ca 平均含量最大为 410.733mg/kg，包括 2 份裸燕麦（v18 和鉴 19）和 1 份皮燕麦（白燕 7 号）；第 V 类 Ca 平均含量最小为 121.862mg/kg，包括 3 份皮燕麦和 1 份裸燕麦。

2.3 燕麦籽粒中 5 种矿质元素含量的相关性分析
由燕麦籽粒 5 种矿质元素含量相关性分析（表

4) 可知, Cu 与 Zn 含量呈显著正相关, Ca 与 Fe 含量呈极显著负相关。表明燕麦籽粒中 Cu 含量越高, 则 Zn 含量就越高; 籽粒中 Ca 含量越高, 则 Fe 含量越低, 反之亦然。

表 4 燕麦籽粒中 5 种矿质元素含量的相关性分析
Table 4 Correlation analysis of contents
of five mineral elements in oat grain

矿质元素 Mineral element	Cu	Fe	Zn	Mg	Ca
Cu	1				
Fe	0.028	1			
Zn	0.201*	0.131	1		
Mg	-0.127	0.174	0.097	1	
Ca	0.160	-0.345**	-0.126	-0.090	1

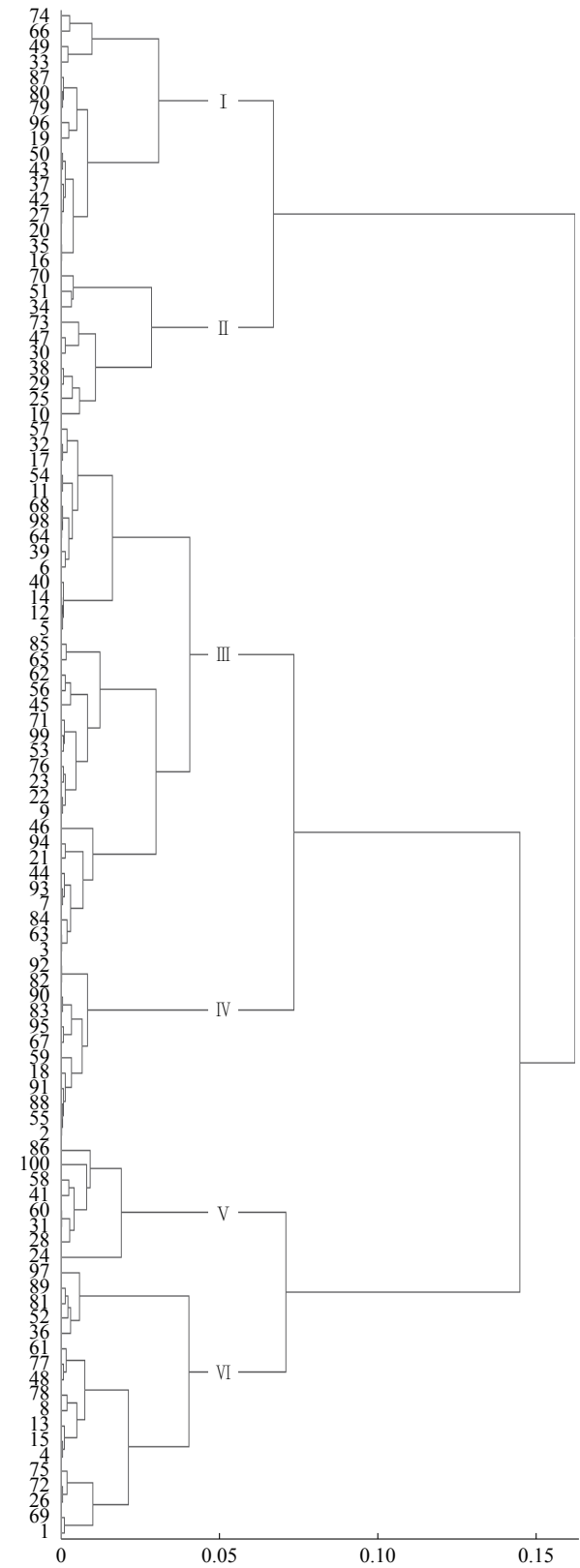
注: “*” 表示在 0.05 水平上显著相关, “**” 表示在 0.01 水平上极显著相关

Note: “*” means significant correlation at 0.05 level, “**” means extremely significant correlation at 0.01 level

2.4 基于 5 种矿质元素含量的燕麦种质资源的聚类分析

采用离差平方和法对 5 种矿质元素含量进行聚类 (图 1), 阈值是 0.05 时, 供试材料可分为 6 个种质群, 各种质群矿质元素含量特征见表 5。

种质群 I 包括 16、19、20、27、33、35、37、42、43、49、50、66、74、79、80、87 和 96, 其中有 15 份裸燕麦, 2 份皮燕麦, Fe 平均含量最低为 62.237mg/kg。种质群 II 包括 10、25、29、30、34、38、47、51、70 和 73, 其中有 8 份裸燕麦, 2 份皮燕麦, Mg 平均含量最低为 705.189mg/kg。种质群 III 包括 3、5、6、7、9、11、12、14、17、21、22、23、32、39、40、44、45、46、53、54、56、57、62、63、64、65、68、71、76、84、85、93、94、98 和 99, 其中有 12 份裸燕麦, 23 份皮燕麦, 各元素平均含量均属中等水平。种质群 IV 包括 2、18、55、59、67、82、83、88、90、91、92 和 95, 其中有 4 份裸燕麦, 8 份皮燕麦, Ca 平均含量最高为 329.419mg/kg, 此类群种质可作为高 Ca 含量燕麦的育种材料和杂交亲本。种质群 V 包括 24、28、31、41、58、60、86 和 100, 其中有 7 份裸燕麦, 1 份皮燕麦, Zn、Fe 和 Mg 含量均最高, 分别为 45.831、105.276 和 1 253.030mg/kg, Cu 的含量最低为 3.795mg/kg, 此类群种质可以作高 Zn、高 Fe 和高 Mg 含量燕麦的育种材料和杂交亲本。种质群 VI 包括 1、4、8、13、15、26、36、48、52、61、69、72、75、77、78、81、89 和 97, 其中有 12 份裸燕麦, 6 份皮燕麦, Cu 平均含量最高为 9.878mg/kg, Ca



1~100 为种质编号, 对应品种 (系) 名见表 1
1-100 is serial numbers of germplasms, the corresponding varieties (lines) name of materials in table 1

图 1 基于 5 种矿质元素含量的燕麦种质资源聚类图
Fig.1 Clustering diagram of oat germplasm resources with the contents of five mineral elements

表 5 燕麦种质资源各种质群矿质元素含量特征
Table 5 The feature of mineral elements in various groups of oat germplasm resources

矿质元素 Mineral element	统计数 Statistic	种质群 Germplasm group					
		I	II	III	IV	V	VI
Cu	均值 Mean (mg/kg)	9.835	7.268	4.745	4.423	3.795	9.878
	变异系数 Coefficient of variation (%)	38.800	62.549	34.564	26.752	62.402	21.711
Fe	均值 Mean (mg/kg)	62.237	83.682	85.065	63.862	105.276	96.466
	变异系数 Coefficient of variation (%)	13.358	24.395	26.617	13.935	12.486	24.636
Zn	均值 Mean (mg/kg)	34.331	31.050	28.072	24.385	45.831	34.027
	变异系数 Coefficient of variation (%)	7.500	12.783	13.806	15.392	12.322	13.497
Mg	均值 Mean (mg/kg)	1 048.327	705.189	1 162.889	1 189.956	1 253.030	1 186.254
	变异系数 Coefficient of variation (%)	10.747	14.318	10.198	7.663	13.833	12.153
Ca	均值 Mean (mg/kg)	310.658	265.704	207.782	329.419	217.537	207.664
	变异系数 Coefficient of variation (%)	14.441	19.077	25.321	13.528	32.634	27.757

平均含量最低，为 207.664mg/kg，此类群种质可作为高 Cu 含量燕麦的育种材料和杂交亲本。

3 讨论

作物籽粒中 Fe、Mg 和 Zn 等矿质元素含量较低^[3]，而缺乏矿质元素会影响人类健康。籽粒富集矿质元素育种是克服矿质元素营养缺失的有效途径^[20-22]。本试验通过原子吸收分光光度计法对 100 份燕麦种质资源的 5 种主要矿质元素含量进行测定，发现各矿质元素含量存在显著差异且变幅较大，Mg 含量最高为 1 112.309mg/kg，Cu 含量最低为 6.672mg/kg。主要矿质元素含量由高到低排序为 Mg>Ca>Fe>Zn>Cu，这与张勇等^[23]研究小麦籽粒中矿质元素含量的大小表现一致。5 种矿质元素含量的变异系数均较大，表明种质间存在较大差异，其中 Cu、Fe、Zn 和 Ca 含量的改良潜力较大，表明供试燕麦种质矿质元素含量的遗传背景和变异类型丰富，可为富含 Cu、Fe、Zn 和 Ca 的个体选择和良种培育提供亲本材料。由于作物矿质元素含量易受环境条件的影响，尚需对供试燕麦种质各矿质元素含量进行多年多点的试验进行评价。

通过对燕麦各矿质元素含量的聚类分析，筛选到 Fe 含量较高的燕麦种质 5 份，Zn 含量较高的燕麦种质 2 份，Mg 含量较高的燕麦种质 2 份，Ca 含量较高的燕麦种质 3 份。矿质元素含量较高的多为裸燕麦，这些优异种质为培育高矿质元素含量个体选择提供了物质基础。基于 5 种矿质元素含量综合聚类分析，第 V 类燕麦种质ハヤテ、6518、加 9、MARION、坝莪 8 号、晋燕 2004、坝莪 9 号和品五的 Zn、Fe、Mg 平均含量最高，可作为 Zn、Fe 和 Mg 元素高含量燕麦新品种育种材料。针对供试燕麦种质矿质元素含量有丰富的多态性，应利用分

子生物学方法发掘有用基因，进行基因定位，为燕麦矿质元素的遗传改良提供依据。2 种聚类结果均发现同一皮、裸性状的种质并没有聚类在一起，说明燕麦种质矿质元素含量的差异与燕麦的皮、裸无关。基于燕麦籽粒矿质元素间相关性性质和相关程度的不同，使得 5 种矿质元素含量综合聚类与每种矿质元素含量分别聚类的结果不一致。

作物籽粒不同矿质元素含量间存在一定的相关性，Jiang 等^[24]对水稻的研究表明，Cu 与 Mg 含量间呈显著负相关，Fe 与 Ca、Mg 含量间呈显著正相关；刘宪虎等^[25]认为，糙米中 Zn 与 Ca 含量呈极显著正相关；鲁璐等^[26]发现，小麦籽粒中 Fe 与 Zn 含量呈极显著正相关。本研究 Cu 与 Zn 含量呈显著正相关，这与陈秀晨等^[27]和曾亚文等^[28]研究水稻籽粒中矿质元素含量表现一致。Ca 与 Fe 含量间呈极显著负相关，与 Jiang 等^[24]的研究结果不同。

4 结论

5 种矿质元素含量在 100 份燕麦种质间遗传差异较大，种质类型丰富，选择的范围广，且 Cu、Fe、Zn 和 Ca 含量的改良潜力较大。燕麦籽粒矿质元素 Cu 与 Zn 含量呈显著正相关，Ca 与 Fe 含量呈极显著负相关。

筛选出 6 份 Cu 含量高的燕麦种质：休眠燕麦、加 5、坝莪 1 号、YS0404、v5 和 v18；5 份 Fe 含量高的种质：太丰、夏莪麦、9418、蒙燕 2 号和 shadow；2 份 Zn 含量高的种质：ハヤテ和坝莪 9 号；2 份 Mg 含量高的种质：ハヤテ和莪麦 4400；3 份 Ca 含量高的种质：v18、鉴 19 和白燕 7 号。Zn、Fe 和 Mg 含量均较高的种质 8 份：ハヤテ、6518、加 9、MARION、坝莪 8 号、晋燕 2004、坝莪 9 号和品五，这些种质可为燕麦籽粒富集矿质元素育种的亲

本选择及遗传改良提供依据。

参考文献

- [1] Bouis H E. Micronutrient fortification of plants through plant breeding: Can it improve nutrition in man at low cost?. *Proceedings of the Nutrition Society*, 2003, 62(2): 403-411.
- [2] 邵源海, 李少明, 杨天丽, 等. 水稻不同基因型矿质元素含量差异及分布研究. *西南农业学报*, 2016, 29(5): 1006-1011.
- [3] Lin Z H, Wang H Y, Wang X E, et al. Genotypic and spike positional difference in grain phytase activity, phytate, inorganic phosphorus, iron, and zinc contents in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Cereal Science*, 2006, 44(2): 212-219.
- [4] 包蕊, 滕文锋, 杜景娇, 等. 辽宁省朝阳地区八种小杂粮中必需微量元素的测定分析. *保鲜与加工*, 2015, 15(1): 54-57.
- [5] 杨葵华, 黎国兰, 谢丽, 等. 火焰原子吸收分光光谱法测定燕麦片中铁、锰、铜、锌含量. *绵阳师范学院学报*, 2011, 30(8): 49-51.
- [6] 李桂荣, 赵宝平, 胡跃高, 等. 不同灌溉条件下燕麦籽粒植酸、总磷、蛋白质及矿质元素含量变化特征研究. *中国农学通报*, 2006, 22(16): 103-107.
- [7] 马占玲. 微波消解-ICP-AES法测定粮食中的金属元素. *安徽农业科学*, 2012, 40(10): 6186, 6218.
- [8] 周郭军, 杜士杰, 孙艳红, 等. 燕麦微量元素的测定. *河北农业科学*, 2009, 13(4): 165-166.
- [9] 金烈. 原子吸收分光光度法测定燕麦中微量元素. *应用化工*, 2015, 44(1): 187-190.
- [10] 吕琳琳, 罗维巍, 张咏梅. 微波消解-ICP-AES法测定荞麦、燕麦、大麦中多种微量元素. *食品科学*, 2009, 30(8): 187-189.
- [11] 杨海鹏, 孙泽民. *中国燕麦*. 北京: 农业出版社. 1989: 1-5.
- [12] 马艳明, 刘志勇, 白玉亭, 等. 新疆燕麦地方品种资源多样性分析. *新疆农业科学*, 2006(6): 510-513.
- [13] 马晓凤, 刘森. 燕麦品质分析与产业化开发途径的思考. *农业工程学报*, 2005(S1): 242-244.
- [14] 孟凡艳. 张家口地区燕麦生产现状及可持续发展建议. *河北北方学院学报 (自然科学版)*, 2008, 24(6): 77-79.
- [15] 郑殿升, 吕耀昌, 田长叶, 等. 中国裸燕麦 β -葡聚糖含量的鉴定研究. *植物遗传资源学报*, 2006, 6(1): 56-60.
- [16] 胡新中. 燕麦食品加工及功能特性研究进展. *麦类作物学报*, 2005, 25(5): 122-124.
- [17] Bindu A. S, Eden T. Identification of discrepancies in grain quality and grain protein composition through avenin proteins of oat after an effort to increase protein content. *Agriculture & Food Security*, 2016, 5(1): 1-6.
- [18] 龚海, 李成雄, 王雁丽. 燕麦品种资源品质分析. *山西农业科学*, 1999, 27(2): 16-19.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 中华人民共和国国家标准: GB/T 14609-2008 粮油检验 谷物及其制品中铜、铁、锰、锌、钙、镁的测定 火焰原子吸收光谱法. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [20] 杨莉琳, 刘小京, 徐进, 等. 小麦籽粒微量元素含量的研究进展. *麦类作物学报*, 2008, 28(6): 1113-1117.
- [21] 傅兆麟, 王海燕, 郭孙黎, 等. 黄淮麦区主要小麦种质资源钙含量测定. *淮北煤炭师范学院学报 (自然科学版)*, 2008, 29(1): 41-44.
- [22] Gregorio, Glenn B. Progress in breeding for trace minerals in staple crops. *The Journal of Nutrition*, 2002, 132(3): 500-502.
- [23] 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. *中国农业科学*, 2007, 40(9): 1871-1876.
- [24] Jiang S L, Wu J G, Feng Y. Correlation analysis of mineral element contents and quality traits in milled rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(23): 9608-9613.
- [25] 刘宪虎, 孙传清, 王象坤. 我国不同地区稻种资源的铁、锌、钙、硒四种元素的含量初析. *北京农业大学学报*, 1995, 21(2): 138-142.
- [26] 鲁璐, 季英苗, 李莉蓉, 等. 不同地区、不同品种(系)小麦锌、铁和硒含量分析. *应用与环境生物学报*, 2010, 16(5): 646-649.
- [27] 陈秀晨, 王士梅, 王海娟, 等. 水稻籽粒矿质元素含量遗传及主要农艺性状相关性分析. *植物遗传资源学报*, 2015, 16(3): 460-466.
- [28] 曾亚文, 申时全, 汪禄祥, 等. 云南稻种矿质元素含量与形态及品质性状的关系. *中国水稻科学*, 2005, 19(2): 128-129.

Diversity Analysis of Mineral Elements in Oat Germplasm Resources

Qi Bingjie¹, Wang Min¹, Zhang Zhiyong², He Xin¹, Liu Jinghui¹

(¹ Collaborative Innovation Center of Inner Mongolia Agricultural University/National Outstanding Talents and Innovation Team in Agricultural Scientific Research, Hohhot 010019, Inner Mongolia, China; ² Inner Mongolia Academy of Agriculture and Animal Husbandry, Hohhot 010031, Inner Mongolia, China)

Abstract To determine the diversity of mineral elements in oat germplasm resources, the contents of copper (Cu), iron (Fe), zinc (Zn), magnesium (Mg) and calcium (Ca) elements in oat germplasm resources were determined by atomic absorption spectrophotometers to analyze the genetic variation, correlation and clustering analysis. The results showed that the contents of Cu, Fe, Zn, Mg and Ca showed maximum diversity, the average diversity index was 2.022, and the average coefficient of variation was 29.775%. Xiumianyanmai, Jia 5, Bayou 1, YS0404, v5 and v18 varieties had high Cu content; Taifeng, Xiayoumai, 9418, Mengyan 2 and shadow had high Fe content; ハヤテ and Bayou 9 had high Zn content; ハヤテ and Youmai 4400 were varieties with high Mg content; v18, Jian 19 and Baiyan 7 were varieties with higher Ca content; ハヤテ, 6518, Jia 9, MARION, Bayou 8, Jinyan 2004, Bayou 9 and Pinwu were varieties with high content of Zn, Fe and Mg. the contents of Cu and Zn showed positive correlation, whereas Ca and Fe showed negative correlation.

Key words Oat; Germplasm resources; Mineral element; Diversity