

韦娜,王诗雅,邢力文,等. 黑龙江省引进的燕麦品种籽粒品质分析与综合评价[J]. 江苏农业科学,2023,51(9):175-185.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.09.024

# 黑龙江省引进的燕麦品种籽粒品质分析与综合评价

韦娜<sup>1</sup>,王诗雅<sup>1</sup>,邢力文<sup>1</sup>,孔德庸<sup>1</sup>,郭伟<sup>1,2</sup>

(1. 黑龙江八一农垦大学农学院,黑龙江大庆 163319; 2. 黑龙江省现代农业栽培技术与作物种质改良重点实验室,黑龙江大庆 163319)

**摘要:**为筛选黑龙江省适宜种植营养品质优良的燕麦品种,以来源 9 个产地的 64 份燕麦品种为研究对象,测定了燕麦籽粒的 11 个营养成分,通过相关性、主成分分析、聚类分析及 PCA 得分制图,对燕麦籽粒营养成分的差异性进行分析与综合评价。结果表明,锌、铜、钙、 $\beta$ -葡聚糖、粗淀粉和黄酮含量可作为评价本地燕麦籽粒营养品质的核心指标;据此综合评价确定在研究的 64 份燕麦品种中营养品质较好的皮燕麦品种为加拿大引进的 XY-2019-1 和 Canada 黑,美国引进的 V.S. 2832,及河北省的张燕 8 号和张燕 7 号,甘肃省的定燕 2 号,黑龙江省的农家燕麦;营养品质较好的裸燕麦品种为美国引进的 74-N-28,河北省的坝蓓 1 号,山西省的 Yy11-18;不同来源地燕麦籽粒营养品质优劣顺序为黑龙江、甘肃、澳大利亚、山西、美国、河北、内蒙古、吉林、加拿大。本研究结果可为黑龙江地区燕麦籽粒营养品质加工及特异种质资源利用等提供参考。

**关键词:**燕麦;营养成分;综合评价;营养品质

**中图分类号:**S512.603.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)09-0175-11

燕麦(*Avena sativa* L.)是禾本科(Gramineae)燕麦属(*Avena* L.)一年草本植物。燕麦被广泛种植,就种植面积和产量而言,在世界范围内禾本科作物中排名第 6 位,仅次于水稻、小麦和玉米等<sup>[1-2]</sup>。尤其是在北纬 40°以北的燕麦带和南半球地区,如澳大利亚和新西兰<sup>[3]</sup>。皮燕麦在欧洲和美洲占主导地位,而在中国则种植裸燕麦居多<sup>[4]</sup>。燕麦不仅是重要的粮食兼饲料作物,也是重要的全价营养谷类食品之一<sup>[5-6]</sup>。燕麦富含丰富的膳食纤维特别是  $\beta$ -葡聚糖、矿物质和其他营养物质<sup>[7]</sup>。燕麦籽粒中的营养成分具有减肥降脂、美容、抗氧化、预防心脏病和控制糖尿病等作用<sup>[8-10]</sup>。目前,黑龙江省燕麦加工企业,能够加工很多丰富的食品种类,包括减脂代餐食品燕麦片、燕麦饼干和高膳食纤维燕麦牛奶等食品。因此,燕麦对人类的营养价值和保健作用起着重要作用,所以燕麦食品加工业在黑龙江省有很大发展潜力。想要获得优质的燕麦种质资源,可通过筛选出燕麦籽粒营养成分含量丰富、遗传稳定且适宜黑龙江地区栽培的燕麦品种<sup>[11]</sup>。

主成分分析在燕麦食品领域及品质加工方面已被广泛应用,许多研究也有类似报道<sup>[12-13]</sup>。倪香艳、陈子叶等利用主成分分析法筛选了燕麦籽粒营养价值含量高和食用品质相结合加工的燕麦品种<sup>[9,14]</sup>。PCA 评分图已被广泛应用于反映样本和品质之间的总体分布变化趋势<sup>[16-18]</sup>,以期明确营养成分和客观准确地评价其品质,为燕麦品质的判定、选育品种及加工过程品质调控提供理论依据。

燕麦营养成分及保健功能<sup>[2,19]</sup>、施肥与栽培技术<sup>[20-21]</sup>等方面是国内外主要研究对象,而针对黑龙江省高寒地区的气候特点和燕麦生育特性,其籽粒营养成分综合品质评价相关研究至今鲜见报道,因此,本研究以黑龙江省不同来源地的 64 份燕麦品种为试验材料,比较不同燕麦籽粒中营养成分差异及相关性,并进行综合评价,为黑龙江地区燕麦品种的引进、选育及加工应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试的 64 份不同来源的燕麦品种,均由黑龙江省黑龙江八一农垦大学现代农业栽培技术与作物种质改良重点实验室所提供(表 1)。

### 1.2 试验地状况

田间试验于 2020 年 4—8 月在黑龙江八一农垦大学安达试验基地(47°01'N,125°55'E)进行,该试

收稿日期:2022-07-12

基金项目:国家重点研发计划(编号:2020YFD1001402-05)。

作者简介:韦娜(1997—),女,安徽蒙城人,硕士研究生,研究方向  
麦类作物品质生理生态。E-mail:1874483899@qq.com。

通信作者:郭伟,教授,博士生导师,研究方向作物生理生态。

E-mail:agrigw@163.com。

验区域属于中纬度大陆季风气候,年平均气温 4.2 ℃,年平均无霜期 142 d,年平均降水量为 432.4 mm。该试验地土属黑钙土,土壤基础养分含量:碱解氮 175.0 mg/kg、速效磷 60.3 mg/kg、速效钾 214 mg/kg、全氮 1.80 g/kg、全磷 0.69 g/kg、全钾 0.43 g/kg、有机质 28.9 g/kg、pH 值为 8.08。

表 1 供试燕麦品种

编号	品种名称	类型	来源	编号	品种名称	类型	来源	编号	品种名称	类型	来源
Y1	T02	皮燕麦	加拿大	Y23	Arzusw-2621	皮燕麦	美国	Y45	坝苡 1 号	裸燕麦	河北
Y2	T07	皮燕麦	加拿大	Y24	Bankuti553	皮燕麦	美国	Y46	坝苡 3 号	裸燕麦	河北
Y3	T08	皮燕麦	加拿大	Y25	Nobgennavie	皮燕麦	美国	Y47	坝苡 4 号	裸燕麦	河北
Y4	T09	皮燕麦	加拿大	Y26	7613-25-2	皮燕麦	美国	Y48	坝苡 12 号	裸燕麦	河北
Y5	T10	皮燕麦	加拿大	Y27	澳麦	皮燕麦	澳大利亚	Y49	坝苡 13 号	裸燕麦	河北
Y6	T11	皮燕麦	加拿大	Y28	坝苡 6 号	皮燕麦	河北	Y50	坝苡 14 号	裸燕麦	河北
Y7	T12	皮燕麦	加拿大	Y29	张燕 8 号	皮燕麦	河北	Y51	晋燕 8 号	裸燕麦	山西
Y8	T13	皮燕麦	加拿大	Y30	张燕 7 号	皮燕麦	河北	Y52	晋燕 9 号	裸燕麦	山西
Y9	T14	皮燕麦	加拿大	Y31	冀张燕 4	皮燕麦	河北	Y53	同燕 2 号	裸燕麦	山西
Y10	T15	皮燕麦	加拿大	Y32	农家燕麦	皮燕麦	黑龙江	Y54	都 3	裸燕麦	山西
Y11	T16	皮燕麦	加拿大	Y33	卡斯喀特	皮燕麦	黑龙江	Y55	远杂 2 号	裸燕麦	山西
Y12	T17	皮燕麦	加拿大	Y34	定燕 2 号	皮燕麦	甘肃	Y56	Yy11-18	裸燕麦	山西
Y13	T20	皮燕麦	加拿大	Y35	白燕 7 号	皮燕麦	吉林	Y57	2013	裸燕麦	山西
Y14	Canada 黑	皮燕麦	加拿大	Y36	FL-NOVA	裸燕麦	美国	Y58	xhy-1	裸燕麦	山西
Y15	XY-2019-1	皮燕麦	加拿大	Y37	1-6-553	裸燕麦	美国	Y59	xhy-6	裸燕麦	山西
Y16	XY-2019-2	皮燕麦	加拿大	Y38	1-6-572	裸燕麦	美国	Y60	白燕 2 号	裸燕麦	吉林
Y17	Aust-14876	皮燕麦	加拿大	Y39	74-N-18	裸燕麦	美国	Y61	白燕 3 号	裸燕麦	吉林
Y18	引 3399	皮燕麦	美国	Y40	74-N-25	裸燕麦	美国	Y62	白燕 5 号	裸燕麦	吉林
Y19	7633-11-21	皮燕麦	美国	Y41	74-N-28	裸燕麦	美国	Y63	燕科 2 号	裸燕麦	内蒙古
Y20	Ah22ewangc. 13821	皮燕麦	美国	Y42	74-N-29	裸燕麦	美国	Y64	Tihor oats	裸燕麦	黑龙江
Y21	Heacharrelyngby	皮燕麦	美国	Y43	大铃早	裸燕麦	河北				
Y22	V.S. 2832	皮燕麦	美国	Y44	三分三	裸燕麦	河北				

1.3 试验方法

2020 年 4 月 26 日播种,采用随机区组设计,小区面积为 54 m<sup>2</sup>(3 m×18 m),人工开沟条播,行距 30 cm,共 3 次重复。收获后取各品种 3 个重复的样品混合后进行筛选、除杂,得到清洁、完整籽粒。籽粒经粉碎过 40 目筛用于品质测定。

1.4 测定方法

参照 GB/T 5511—2008 测定粗脂肪含量、粗蛋白含量;参照 GB/T 5006—1985 测定粗淀粉含量;Megazyme Mixed-linkage  $\beta$ -glucan 试剂盒测定  $\beta$ -葡聚糖含量,参照 AOAC99 5.16 方法;参照 GB 5009.91—2003 第一法测定 K 和 Na 含量;参照 GB 5009.92—2016 第一法测定 Ca 含量;参照 GB 5009.241—2017 第一法测定 Mg 含量;参照 GB 5009.90—2016 第一法测定 Fe 含量;参照 GB 5009.14—2017 第一法测定 Zn 和 Cu 含量;参考任宇鹏等的方法<sup>[22]</sup>以没食子酸为标准物,Folin-Ciocalteu 比色法

测定总酚含量;用 NaNO<sub>2</sub>-Al(NO)<sub>3</sub> 比色法测定总黄酮含量<sup>[23]</sup>。

1.5 数据分析

采用 Excel 2016 进行数据处理,SPSS 26.0 软件进行数据统计和分析,Origin 2.0 软件绘制聚类热图和 PCA 得分图。

2 结果与分析

2.1 不同品种燕麦籽粒中营养成分性状分析

对 64 份燕麦品种籽粒中营养成分进行统计分析(表 2),粗淀粉平均含量最高,为 51.68%;粗脂肪平均含量最低,为 5.12%,其中,粗淀粉含量最高的是裸燕麦 Y57,含量最低的是皮燕麦 Y26;在抗氧化物含量中,总酚的平均值含量最高,为 19.98%,黄酮平均含量相对较低,为 13.15%,总酚含量最高的是皮燕麦 Y17,含量最低的是皮燕麦 Y5 和裸燕麦 Y43; $\beta$ -葡聚糖含量最高的是裸燕麦品种 Y51(含

量为 7.88%) ; 矿质元素平均含量最高的是镁, 为 1 579 mg/kg, 平均含量最低的是铜, 为 10.25 mg/kg, 其中, 燕麦籽粒中镁含量最高的是裸燕麦 Y48(2 237 mg/kg), 含量最低的是皮燕麦 Y6 (1 149 mg/kg)。

供试的 64 份燕麦品种籽粒中营养成分变异系数较小的为镁、粗淀粉和粗蛋白含量, 其含量值分别为 1 149 ~ 2 237 mg/kg、38.78% ~ 63.55% 和 10% ~ 16%。变异系数最大的为铜和黄酮含量, 其

含量值为 0.18 ~ 37.80 mg/kg 和 1.2 ~ 32 mg/kg, 变异系数达 66.95%、51.57%。由此说明, 64 份燕麦品种籽粒中矿质元素铜和抗氧化物黄酮含量差别较为明显, 品种间变异系数较大, 以镁、粗淀粉和粗蛋白的变异系数小, 数据离散程度小, 3 种营养成分在黑龙江地区 64 份品种间的含量差异较小。燕麦籽粒中矿质元素铜变异系数最大, 镁变异系数最小, 5 种矿质元素含量性状的变异系数均大于 10%, 说明供试材料遗传多样性丰富。

表 2 不同燕麦品种籽粒中营养成分分析

编号	钙含量 (mg/kg)	镁含量 (mg/kg)	铜含量 (mg/kg)	锌含量 (mg/kg)	铁含量 (mg/kg)	黄酮含量 (mg/kg)	总酚含量 (mg/kg)	$\beta$ -葡聚糖 含量 (mg/kg)	粗淀粉 含量 (%)	粗蛋白 含量 (%)	粗脂肪 含量 (%)
Y1	255	1 479	4.90	27.60	82.80	12.00	18.40	6.67	47.84	12.60	4.70
Y2	318	1 365	3.57	30.40	42.30	9.80	23.60	7.68	51.07	11.70	4.60
Y3	664	1 454	2.62	30.60	48.10	4.30	18.00	6.29	56.51	10.00	3.30
Y4	492	1 422	3.84	17.90	36.60	8.30	19.30	6.86	55.79	10.70	5.70
Y5	304	1 481	9.86	28.10	50.10	10.00	14.50	5.90	51.17	10.80	4.80
Y6	658	1 149	14.20	31.30	47.20	8.40	16.10	6.14	49.21	10.40	4.10
Y7	540	1 364	10.00	18.20	28.30	7.00	17.70	6.55	54.95	11.70	3.60
Y8	607	1 534	21.70	26.40	65.60	11.00	20.50	6.20	48.38	11.80	6.50
Y9	687	1 504	12.70	24.30	58.00	6.20	19.00	6.59	52.52	12.30	3.10
Y10	296	1 624	5.91	21.80	41.70	7.40	22.00	7.01	51.14	11.10	4.60
Y11	552	1 415	5.55	27.20	51.00	9.50	20.70	6.76	46.58	11.80	4.60
Y12	579	1 269	4.44	21.30	85.10	11.00	20.10	6.09	45.06	11.20	5.20
Y13	642	1 625	4.91	28.20	38.90	10.00	18.30	6.58	46.62	12.50	4.90
Y14	637	1 584	27.90	40.30	167.00	9.00	24.20	5.44	58.08	15.10	7.10
Y15	344	1 837	19.60	44.20	167.00	12.00	22.50	6.89	43.27	15.90	5.00
Y16	278	1 840	4.58	18.70	53.60	8.30	19.90	6.70	48.94	14.70	4.80
Y17	291	1 762	8.69	36.10	45.30	14.00	34.20	5.01	49.84	15.30	7.00
Y18	320	1 605	5.60	32.80	65.00	9.80	20.90	6.11	59.32	13.00	5.70
Y19	579	1 537	37.80	37.50	108.00	10.00	20.00	6.92	59.47	12.80	5.20
Y20	524	1 517	10.30	35.20	66.30	9.50	15.50	6.17	42.70	14.00	4.50
Y21	272	1 691	8.52	28.90	78.50	30.00	22.80	6.88	44.06	14.70	4.80
Y22	496	1 722	21.50	29.10	105.00	24.00	21.10	7.08	44.02	15.30	4.00
Y23	318	1 348	14.20	28.70	77.00	20.00	20.10	6.71	53.17	13.80	4.40
Y24	526	1 469	5.27	23.30	74.10	24.00	16.70	7.03	48.55	11.70	5.40
Y25	525	1 370	8.98	23.80	69.00	18.00	16.20	6.78	54.91	14.20	4.20
Y26	477	1 509	14.20	31.60	89.30	9.80	14.60	7.04	38.78	14.20	4.30
Y27	537	1 428	21.90	29.80	65.70	12.00	16.30	7.14	48.43	11.10	6.20
Y28	351	1 508	11.10	33.60	80.50	8.80	20.10	7.47	48.96	12.90	5.10
Y29	256	1 518	26.40	45.20	99.40	11.00	20.70	7.17	50.66	14.70	5.10
Y30	301	1 654	10.70	52.00	81.70	12.00	21.20	5.70	57.12	14.70	4.40
Y31	562	1 557	13.80	27.20	70.30	20.00	17.30	6.32	58.86	12.90	3.40
Y32	795	2 094	21.40	27.90	149.00	6.70	19.50	4.76	40.80	15.00	7.00
Y33	664	1 601	13.20	30.60	97.90	25.00	18.80	6.11	51.64	14.20	6.00
Y34	307	1 971	12.40	46.30	94.20	13.00	21.70	6.60	51.10	16.00	5.60

表 2(续)

编号	钙含量 (mg/kg)	镁含量 (mg/kg)	铜含量 (mg/kg)	锌含量 (mg/kg)	铁含量 (mg/kg)	黄酮含量 (mg/kg)	总酚含量 (mg/kg)	$\beta$ -葡聚糖 含量 (mg/kg)	粗淀粉 含量 (%)	粗蛋白 含量 (%)	粗脂肪 含量 (%)
Y35	545	1 467	10.50	30.50	70.30	8.40	30.70	6.51	51.84	11.70	4.60
Y36	535	1 741	7.93	31.90	49.20	15.00	15.70	4.78	48.60	14.40	6.30
Y37	509	1 755	3.76	31.40	78.90	6.50	16.30	4.89	58.06	15.10	5.80
Y38	279	1 630	3.12	35.30	70.70	8.90	22.50	6.25	55.85	15.00	4.00
Y39	468	1 619	8.58	32.00	74.50	5.80	15.10	6.89	56.32	12.80	3.60
Y40	655	1 440	10.20	26.20	65.20	22.00	16.70	5.94	51.64	14.10	5.20
Y41	318	1 465	15.00	37.70	212.00	14.00	21.00	7.14	42.28	14.60	7.40
Y42	402	1 323	7.64	34.70	34.00	14.00	19.10	7.38	54.24	13.90	5.50
Y43	286	1 705	8.04	39.80	50.50	8.70	14.50	5.18	55.57	14.80	5.50
Y44	318	1 881	6.31	43.20	62.90	17.00	23.80	5.00	52.84	14.90	6.00
Y45	538	1 659	15.00	44.20	139.00	10.00	17.10	5.80	56.27	14.00	5.40
Y46	204	1 462	7.36	32.70	61.70	21.00	19.90	7.73	51.72	15.60	4.60
Y47	388	1 510	6.60	32.60	87.20	19.00	23.30	6.52	49.76	14.10	5.40
Y48	658	2 237	7.28	39.00	41.50	8.50	22.80	3.95	54.40	14.70	4.80
Y49	201	1 704	5.50	30.20	43.10	7.70	21.10	6.39	57.43	15.60	3.40
Y50	319	1 632	4.41	34.30	57.60	1.20	25.80	5.33	48.76	13.80	6.20
Y51	303	1 457	7.70	30.10	58.40	26.00	19.10	7.88	51.70	14.90	5.00
Y52	239	1 611	7.89	27.20	46.90	10.00	22.00	5.25	51.67	14.70	6.00
Y53	514	1 511	10.20	18.70	30.80	24.00	16.10	6.91	54.80	13.00	5.40
Y54	255	1 452	9.41	28.20	69.70	12.00	16.70	6.94	56.84	14.60	3.10
Y55	674	1 632	7.89	45.90	81.00	13.00	30.40	6.83	51.74	15.40	7.30
Y56	348	1 568	9.16	34.90	72.60	31.00	17.40	6.42	50.42	14.60	5.10
Y57	596	1 611	3.91	28.50	65.10	7.60	23.60	6.63	63.55	12.20	4.70
Y58	537	1 449	11.30	36.50	66.10	32.00	17.20	6.34	58.26	13.70	5.20
Y59	259	1 621	0.18	23.50	40.00	10.00	18.80	6.87	55.06	12.60	5.00
Y60	358	1 751	1.14	34.30	82.80	12.00	21.00	6.35	51.04	13.40	6.50
Y61	610	1 343	7.43	28.20	61.40	22.00	15.00	6.53	50.34	15.20	5.30
Y62	290	1 706	8.20	41.00	79.50	9.40	18.40	7.25	54.97	14.50	5.60
Y63	456	1 501	5.22	31.60	37.60	12.00	21.00	6.42	52.93	12.30	5.30
Y64	484	1 818	17.20	29.90	91.00	11.00	24.30	6.56	49.19	14.70	5.80
最大值	795.00	2 237.00	37.80	52.00	212.00	32.00	34.20	7.88	63.55	16.00	7.40
最小值	201.00	1 149.00	0.18	17.90	28.30	1.20	14.50	3.95	38.78	10.00	3.10
平均值	445	1 579	10.25	31.72	72.82	13.15	19.98	6.41	51.68	13.59	5.12
标准偏差	153.00	188.00	6.87	7.27	34.09	6.78	3.84	0.79	4.97	1.54	1.01
变异系数(%)	34.26	11.91	66.95	22.93	46.81	51.57	19.22	12.25	9.61	11.32	19.71

2.2 不同品种燕麦籽粒中营养成分相关性分析

对 64 份燕麦品种的 11 种营养成分进行 Pearson 相关系数分析,结果(表 3)表明,11 种营养成分之间相关性存在一定差异,其中,钙与铜呈显著正相关,与  $\beta$ -葡聚糖和粗蛋白呈显著负相关;铜与锌呈显著正相关,与铁呈极显著正相关;锌与总酚和粗脂肪呈显著正相关,与铁和粗蛋白呈极显著

正相关;铁与粗蛋白和粗脂肪呈极显著正相关,与粗淀粉呈显著负相关;黄酮与粗蛋白呈显著正相关;总酚与粗脂肪呈极显著正相关; $\beta$ -葡聚糖与粗脂肪呈显著负相关;粗蛋白与粗脂肪呈显著正相关;镁与锌和粗蛋白呈极显著正相关,与总酚和粗脂肪呈显著正相关,与  $\beta$ -葡聚糖呈极显著负相关。综上所述,在燕麦栽培过程中应注重微量元素的施

用,尤其镁矿质元素的施用,有利于改善燕麦籽粒中营养品质。

相关性分析结果表明,燕麦籽粒中各营养指标间的相关性不同,可能是由于不同生长环境及栽培

条件导致燕麦品质营养成分之间的差异,通过单一指标来评价不同燕麦品种籽粒营养成分含量的优劣是不全面的。因此,本研究可采取主成分分析法对燕麦籽粒的营养指标进行筛选和优化。

表 3 64 份燕麦品种籽粒营养成分相关性分析

指标	相关系数										
	钙	镁	铜	锌	铁	黄酮	总酚	β- 葡聚糖	粗淀粉	粗蛋白	粗脂肪
钙	1.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
镁	-0.065	1.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-
铜	0.272 *	0.039	1.000	-	-	-	-	-	-	-	-
锌	-0.176	0.358 **	0.279 *	1.000	-	-	-	-	-	-	-
铁	0.085	0.208	0.566 **	0.433 **	1.000	-	-	-	-	-	-
黄酮	-0.044	-0.153	0.050	-0.037	0.043	1.000	-	-	-	-	-
总酚	-0.138	0.289 *	-0.011	0.278 *	0.104	-0.137	1.000	-	-	-	-
β- 葡聚糖	-0.249 *	-0.518 **	0.044	-0.198	0.010	0.225	-0.109	1.000	-	-	-
粗淀粉	-0.030	-0.052	-0.126	0.082	-0.288 *	-0.094	-0.017	-0.096	1.000	-	-
粗蛋白	-0.300 *	0.534 **	0.148	0.516 **	0.381 **	0.284 *	0.203	-0.190	-0.087	1.000	-
粗脂肪	0.076	0.279 *	0.171	0.282 *	0.366 **	0.055	0.343 **	-0.300 *	-0.219	0.257 *	1.000

注: \*\* 表示在 0.01 水平( 双侧)极显著相关; \* 表示在 0.05 水平( 双侧)显著相关。

2.3 不同品种燕麦籽粒中营养成分主成分分析及综合评价

2.3.1 主成分提取 对 64 份不同燕麦品种籽粒的 11 个品质指标进行主成分分析,结果( 表 4) 表明,其  $K_{mo}=0.610>0.5$ ,显著性满足主成分分析要求。得到前 5 个主成分特征值  $>1$ ,累计贡献率 75.309%,综合反映 64 份燕麦品种籽粒的营养品质状况。

由主成分旋转后因子的成分矩阵和特征向量分析结果( 表 4) 可知,5 个主成分中反映燕麦籽粒中营养指标分别是第一主成分(PC1)代表了燕麦籽粒营养成分总信息的 26.792%,其中,锌和粗蛋白特征向量绝对值均大于其他品质指标,且指标间皆显著相关,PC1 的特征值越高,说明供试材料的营养成分越高。第二主成分(PC2)贡献率为 15.580%,铜、铁和β- 葡聚糖的特征向量绝对值大于其他品质指标,说明 PC2 主要由铜、铁和β- 葡聚糖组成。第三主成分(PC3)贡献率为 13.736%,钙含量特征向量绝对值大于其他品质指标,说明 PC3 主成分主要由钙组成。第四主成分(PC4)贡献率为 9.833%,粗淀粉的特征向量绝对值大于其他营养成分,说明 PC4 主要由粗淀粉组成。第五主成分(PC5)贡献率为 9.368%,黄酮和总酚的特征向量绝对值最大,说明 PC5 主要是由黄酮和总酚含量组成,与燕麦籽粒抗氧化含量密切相关,PC5 特征值越高,供试材料籽

粒抗氧化物含量越高。

综上所述,供试材料中的 11 个营养成分中,锌、粗蛋白、铜、铁、β- 葡聚糖、钙、粗淀粉、黄酮和总酚含量为重要品质营养成分,其中,锌、粗蛋白、铜、钙、β- 葡聚糖、粗淀粉和黄酮为重要的构成品质营养成分指标,在综合考量不同燕麦籽粒品质表现时应着重考察这 7 个指标。

2.3.2 综合评价 64 份燕麦品种籽粒中 11 个营养指标进行综合评价,得出 5 个主成分因子关系式:

$$F_1 = -0.039X_1 + 0.400X_2 + 0.240X_3 + 0.420X_4 + 0.386X_5 + 0.007X_6 + 0.264X_7 - 0.242X_8 - 0.116X_9 + 0.426X_{10} + 0.364X_{11};$$

$$F_2 = 0.188X_1 - 0.333X_2 + 0.481X_3 - 0.041X_4 + 0.414X_5 + 0.331X_6 - 0.242X_7 + 0.403X_8 - 0.341X_9 - 0.027X_{10} + 0.036X_{11};$$

$$F_3 = -0.666X_1 - 0.056X_2 - 0.234X_3 + 0.143X_4 - 0.066X_5 + 0.380X_6 + 0.068X_7 + 0.409X_8 + 0.019X_9 + 0.365X_{10} - 0.155X_{11};$$

$$F_4 = 0.024X_1 - 0.041X_2 + 0.347X_3 + 0.385X_4 + 0.110X_5 - 0.121X_6 - 0.271X_7 + 0.016X_8 + 0.674X_9 + 0.078X_{10} - 0.410X_{11};$$

$$F_5 = 0.237X_1 + 0.211X_2 - 0.123X_3 - 0.149X_4 - 0.158X_5 + 0.583X_6 - 0.508X_7 - 0.375X_8 + 0.033X_9 + 0.309X_{10} - 0.032X_{11}。$$

表 4 主成分在各营养品质指标上旋转后因子的成分矩阵、特征向量及贡献率

指标	主成分					特征向量				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
钙( $X_1$ )	-0.066	0.246	-0.819	0.025	0.24	-0.039	0.188	-0.666	0.024	0.237
镁( $X_2$ )	0.686	-0.436	-0.069	-0.043	0.214	0.400	-0.333	-0.056	-0.041	0.211
铜( $X_3$ )	0.412	0.630	-0.287	0.361	-0.125	0.240	0.481	-0.234	0.347	-0.123
锌( $X_4$ )	0.721	-0.054	0.175	0.401	-0.151	0.420	-0.041	0.143	0.385	-0.149
铁( $X_5$ )	0.663	0.543	-0.081	0.114	-0.16	0.386	0.414	-0.066	0.110	-0.158
黄酮( $X_6$ )	0.013	0.433	0.467	-0.126	0.592	0.007	0.331	0.380	-0.121	0.583
总酚( $X_7$ )	0.453	-0.316	0.084	-0.282	-0.516	0.264	-0.242	0.068	-0.271	-0.508
$\beta$ -葡萄糖( $X_8$ )	-0.416	0.527	0.503	0.017	-0.381	-0.242	0.403	0.409	0.016	-0.375
粗淀粉( $X_9$ )	-0.199	-0.446	0.023	0.701	0.033	-0.116	-0.341	0.019	0.674	0.033
粗蛋白( $X_{10}$ )	0.731	-0.035	0.448	0.082	0.314	0.426	-0.027	0.365	0.078	0.309
粗脂肪( $X_{11}$ )	0.624	0.047	-0.190	-0.426	-0.032	0.364	0.036	-0.155	-0.410	-0.032
特征值	2.947	1.714	1.511	1.082	1.030	2.947	1.714	1.511	1.082	1.030
方差贡献率(%)	26.792	15.580	13.736	9.833	9.368	26.792	15.580	13.736	9.833	9.368
累积方差贡献率(%)	26.792	42.372	56.108	65.941	75.309	26.792	42.372	56.108	65.941	75.309

通过主成分分析,利用得分  $F$  值可获得 5 个主成分中各燕麦品种得分排序结果。由表 5 可知,排名前 5 的第 1 主成分值较高的品种有 Y32、Y14、Y15、Y41、Y34,第 2 主成分值较高的品种有 Y41、Y22、Y19、Y26、Y27,第 3 主成分高的品种有 Y46、Y51、Y21、Y56、Y49,第 4 主成分值较高的品种有 Y19、Y30、Y45、Y31、Y39,第 5 主成分值较高的品种有 Y36、Y58、Y56、Y40、Y61。

由于各主成分方差贡献率不同,因此在进行燕

麦籽粒品质综合评价时,以 5 个主成分因子得分公式和方差贡献率为权重,得到 64 份燕麦品种籽粒营养成分综合评价函数,即:

$$F_{\text{综合}}=0.268F_1+0.156F_2+0.137F_3+0.098F_4+0.094F_5;$$

通过该函数得出 64 份燕麦品种的综合得分并进行排序(表 5),综合排名前 5 的是 Y15、Y41、Y14、Y34、Y29。

表 5 64 份燕麦品种籽粒营养成分的主成分分析及排序

编号	F <sub>1</sub>		F <sub>2</sub>		F <sub>3</sub>		F <sub>4</sub>		F <sub>5</sub>		F <sub>综合</sub>	
	得分	排名	得分	排名	得分	排名	得分	排名	得分	排名	得分	排名
Y1	-1.00	43	0.16	33	0.80	19	-0.73	46	-0.50	46	-0.25	44
Y2	-1.92	58	-0.29	38	1.05	13	-0.62	44	-1.89	63	-0.66	56
Y3	-2.81	63	-1.04	50	-1.78	59	1.04	13	-0.60	47	-1.11	64
Y4	-2.66	62	-0.65	45	-0.95	50	-0.81	49	-0.65	49	-1.08	63
Y5	-1.75	56	-0.28	37	-0.52	43	0.07	27	0.00	28	-0.58	53
Y6	-2.53	61	1.05	14	-1.98	60	0.49	21	-0.49	44	-0.78	60
Y7	-3.13	64	-0.31	40	-1.03	51	0.43	23	-0.21	34	-1.01	62
Y8	0.05	28	1.09	13	-2.04	62	-0.79	48	-0.44	42	-0.22	43
Y9	-1.97	60	0.17	31	-1.54	57	0.80	15	-0.27	37	-0.66	57
Y10	-1.86	57	-0.93	48	0.17	33	-0.89	53	-1.29	58	-0.83	61
Y11	-1.68	53	0.17	32	-0.68	46	-1.04	55	-0.69	51	-0.68	58
Y12	-1.74	55	0.74	22	-1.41	56	-1.74	63	-0.45	43	-0.76	59
Y13	-1.16	47	-0.21	36	-1.05	52	-1.02	54	0.31	20	-0.56	52
Y14	3.71	2	1.20	10	-2.04	63	1.58	7	-0.79	53	0.98	3
Y15	3.50	3	1.71	6	0.88	17	0.24	25	-0.98	55	1.26	1
Y16	-0.42	37	-1.15	51	0.81	18	-1.21	58	0.16	22	-0.28	46
Y17	2.92	6	-2.39	63	0.49	25	-1.97	64	-0.84	54	0.20	21

表 5(续)

编号	F <sub>1</sub>		F <sub>2</sub>		F <sub>3</sub>		F <sub>4</sub>		F <sub>5</sub>		F <sub>综合</sub>	
	得分	排名	得分	排名	得分	排名	得分	排名	得分	排名	得分	排名
Y18	-0.08	29	-1.50	54	0.21	30	0.53	20	-0.42	41	-0.21	42
Y19	1.04	15	2.15	3	-1.54	58	2.89	1	-1.24	57	0.57	11
Y20	-0.16	30	0.68	23	-0.50	42	-0.38	39	0.45	19	0.00	32
Y21	0.56	24	0.93	16	2.24	3	-1.61	62	0.95	14	0.53	12
Y22	1.03	16	2.26	2	0.77	20	-0.25	34	0.74	17	0.78	6
Y23	-0.76	40	0.95	15	1.13	10	0.47	22	0.02	26	0.15	25
Y24	-1.66	52	1.32	8	0.05	34	-1.24	59	0.92	15	-0.27	45
Y25	-1.62	51	0.78	21	0.31	28	0.59	18	1.01	13	-0.12	39
Y26	-0.23	31	1.99	4	-0.02	35	-0.67	45	0.01	27	0.18	24
Y27	-0.83	42	1.98	5	-1.29	55	-0.20	31	-0.68	50	-0.18	41
Y28	-0.36	33	0.67	24	0.57	24	-0.14	29	-1.37	60	-0.06	35
Y29	1.70	12	1.54	7	1.06	11	1.53	8	-1.48	61	0.85	5
Y30	1.70	11	-1.20	52	0.96	14	2.09	2	-0.24	35	0.58	10
Y31	-1.37	49	0.34	28	-0.29	39	1.66	4	1.15	10	-0.08	36
Y32	3.83	1	0.91	18	-3.51	64	-1.50	61	1.10	11	0.64	7
Y33	0.82	22	1.27	9	-0.63	44	-0.27	36	1.63	7	0.46	15
Y34	2.94	5	-0.54	43	1.28	8	0.58	19	-0.08	29	0.93	4
Y35	-0.37	34	-0.54	44	-0.82	47	-0.55	43	-2.17	64	-0.55	51
Y36	0.91	17	-0.86	47	-1.13	54	-0.82	50	2.08	1	0.07	27
Y37	0.90	18	-1.92	59	-1.08	53	0.66	17	1.36	9	-0.01	33
Y38	0.19	27	-1.64	57	1.28	7	0.77	16	-0.41	40	0.01	30
Y39	-1.31	48	-0.30	39	-0.24	38	1.62	5	-0.20	33	-0.29	47
Y40	-0.66	38	0.83	20	-0.66	45	-0.20	32	1.84	4	0.02	29
Y41	3.04	4	3.10	1	0.58	22	-1.21	57	-1.52	62	1.12	2
Y42	-1.09	45	0.16	34	1.05	12	0.23	26	-0.39	39	-0.14	40
Y43	0.82	21	-1.67	58	0.19	31	1.07	10	1.06	12	0.19	23
Y44	2.44	8	-2.00	60	0.58	23	-0.21	33	0.77	16	0.47	13
Y45	1.87	10	0.44	27	-0.95	49	1.89	3	0.09	23	0.64	8
Y46	-0.40	36	0.58	26	2.91	1	0.07	28	0.05	25	0.39	17
Y47	0.44	25	0.23	29	0.90	15	-0.77	47	-0.09	30	0.19	22
Y48	2.38	9	-3.42	64	-1.99	61	0.41	24	1.77	6	0.04	28
Y49	-0.38	35	-2.05	61	1.69	5	1.12	9	-0.10	31	-0.09	37
Y50	1.15	14	-2.13	62	-0.44	41	-1.28	60	-1.31	59	-0.33	49
Y51	-0.75	39	1.11	12	2.54	2	-0.28	37	0.57	18	0.35	18
Y52	0.60	23	-1.63	56	0.32	27	-0.89	52	0.18	21	-0.12	38
Y53	-1.94	59	0.60	25	0.18	32	-0.43	40	1.59	8	-0.29	48
Y54	-1.45	50	-0.11	35	1.56	6	1.59	6	0.05	24	-0.03	34
Y55	2.75	7	-0.36	41	-0.18	37	-0.83	51	-1.17	56	0.47	14
Y56	0.28	26	0.91	19	1.73	4	-0.15	30	1.86	3	0.61	9
Y57	-1.11	46	-1.58	55	-0.85	48	1.06	11	-0.76	52	-0.63	55
Y58	-0.31	32	0.92	17	0.72	21	1.05	12	2.00	2	0.45	16
Y59	-1.69	54	-1.42	53	0.89	16	-0.48	41	-0.25	36	-0.62	54
Y60	0.88	19	-1.00	49	0.34	26	-1.05	56	-0.17	32	0.01	31
Y61	-0.81	41	1.18	11	0.22	29	-0.26	35	1.84	5	0.15	26
Y62	0.82	20	-0.41	42	1.24	9	0.85	14	-0.61	48	0.35	19
Y63	-1.01	44	-0.80	46	-0.16	36	-0.37	38	-0.31	38	-0.48	50
Y64	1.70	13	0.22	30	-0.36	40	-0.55	42	-0.49	45	0.34	20

由 PCA 得分图(图 1)可知,64 份燕麦品种分布于不同象限,综合得分较高的 Y41、Y22、Y19 等 24

个品种与其他品种有明显区分,均在 PC1 的正向区间,具有较好的聚集性,证明它们间的品质较为接

近,铜、铁、黄酮及粗脂肪营养成分含量较高。而 Y27、Y51、Y12 等 10 个品种在 PC1 的负向区间和 PC2 的正向区间,这些品种的  $\beta$ -葡聚糖和钙含量较高。总体而言,燕麦品质相似聚集在一起,不同

的品种及产地可能影响着燕麦籽粒的品质,因此位于 PC1 正向区间的品种品质综合性状较好,作为食品加工原料在当地种植较为适宜。

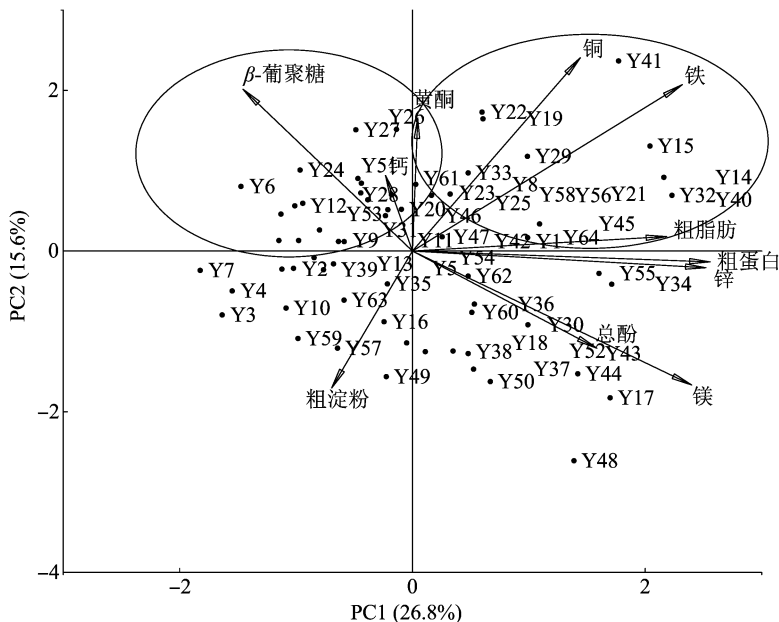


图1 燕麦品质 PCA 得分

## 2.4 不同燕麦品种聚类分析

本试验通过组间联接的方法对 64 份燕麦样本进行系统聚类分析,结果(图 2)表明,以欧氏距离 330 为划分标准,按照变量(钙、镁、铜、锌、铁、黄酮、总酚、 $\beta$ -葡聚糖、粗淀粉、粗蛋白、粗脂肪)可将 64 份供试燕麦品种划分成 4 类,第 I 类包含 2 份供试材料,该类群籽粒品质供试特征:总酚、镁、锌、粗蛋白、粗脂肪、铜、黄酮和铁含量较高,营养成分含量丰富,可作为黑龙江地区食品加工原料种植的高产、优质型燕麦材料;第 II 类包含 1 份供试材料,该类群籽粒品质特征:钙和  $\beta$ -葡聚糖含量最高,具有降血脂、降血糖和提高免疫力等功效;第 III 类包含 25 份供试材料,属于综合品质不良的一类;第 IV 类包含 36 份供试材料,属于综合品质中等的一类。

## 2.5 不同来源地燕麦品种热图聚类分析

将不同来源地燕麦品种按照籽粒营养成分取平均值的方式,绘制聚类热图,热图可以简单地聚合大量数据,填充颜色的深浅,体现出各产地中营养成分及矿质元素含量的高低。由图 3 可知,对 9 个产地的 11 种营养成分含量进行分析,按照各营养成分含量的高低,可将 9 个产地划分为 5 类。第一类(I)是澳大利亚,该产地钙、粗脂肪、铜、 $\beta$ -葡聚糖含量较高;第二类(II)是黑龙江,该产地钙、粗脂

肪、铜、铁、镁、粗蛋白、总酚和黄酮含量较高,是 9 个产地中营养成分含量最为丰富的地区,其中粗脂肪和粗蛋白含量最高;第三类(III)是甘肃,该产地粗脂肪、铜、铁、镁、粗蛋白、锌、总酚和  $\beta$ -葡聚糖含量较高;第四类(IV)包含山西和美国 2 个产地,该产地粗蛋白、黄酮、 $\beta$ -葡聚糖和粗淀粉含量较高,但矿质元素含量相对较低;第五类(V)包含河北、内蒙古、吉林和加拿大 4 个产地,该产地营养成分含量较低,不同产地营养成分含量不同,可能与土壤和气候等环境因素影响有关。因此,本试验采用热图聚类分析是可行的,可为地方特色燕麦栽培种植、功效成分的利用及籽粒营养价值提供一定参考依据。

## 3 讨论

我国黑龙江省作为农业发展具有种植面积广、土地辽阔和农产品生产集中高度等特点,并在新品种产量和粮食输出方面具有较强的竞争优势<sup>[24-26]</sup>。同时,也是燕麦利用黑龙江垦区生产基地优势<sup>[20]</sup>,对黑龙江省燕麦品质加工及栽培种植具有重要指导性意义。

燕麦具有优质的谷物蛋白质,其含量在所有谷物作物中居于首位<sup>[27]</sup>,在促进人体生长发育、提高免疫力等方面具有重要作用<sup>[28]</sup>。欧阳韶晖等研究



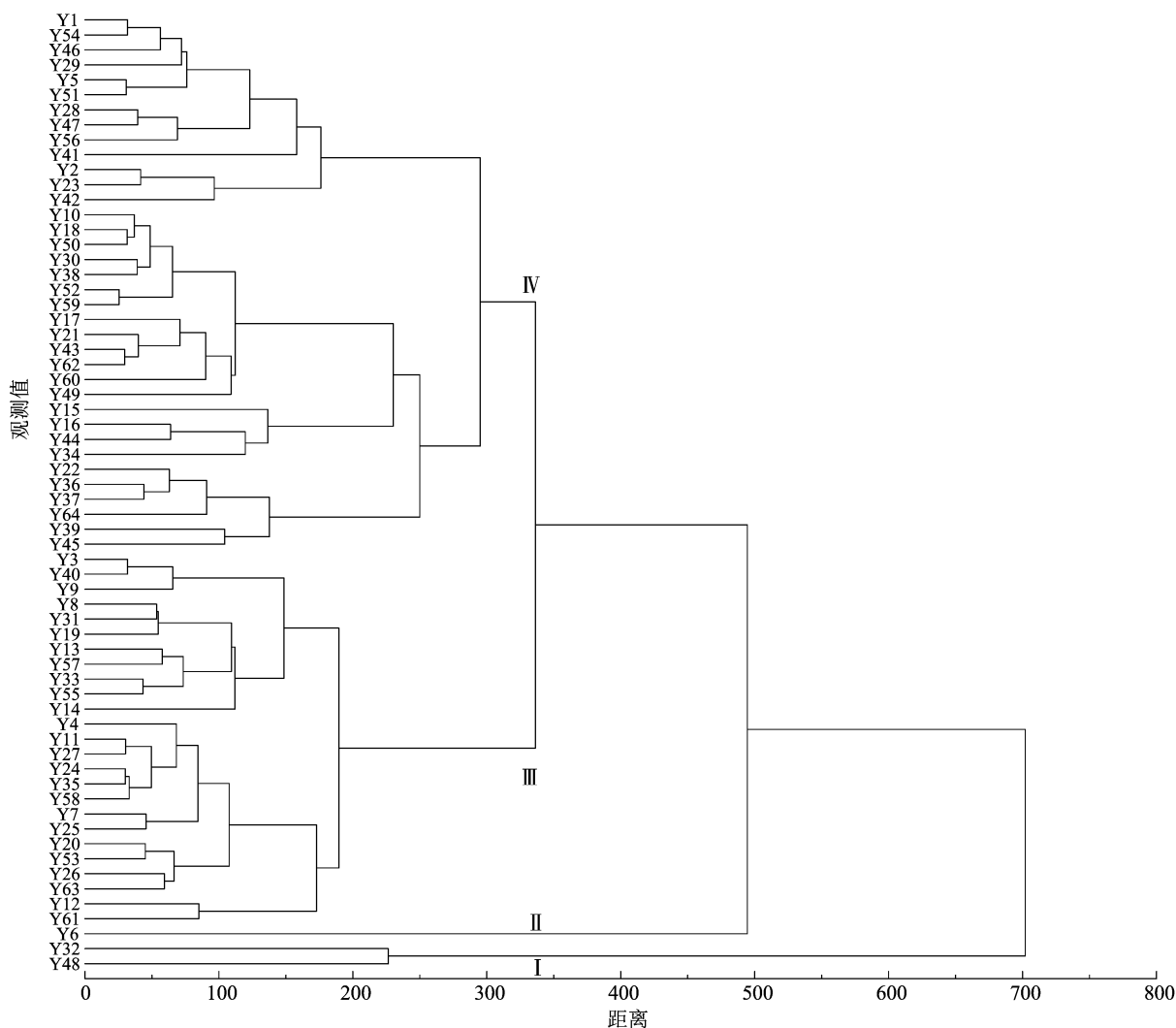


图2 64 份燕麦品种聚类分析谱系

指出,燕麦粗蛋白平均含量为 14.07%<sup>[29]</sup>,本研究结果与之相似,燕麦粗蛋白平均含量为 13.59%,但本研究粗蛋白平均含量低于杨才等统计值 (15.53%)<sup>[30]</sup>,这可能是由于不同地区不同燕麦品种粗蛋白含量不同,且年间差别所致。燕麦中的碳水化合物主要为淀粉和膳食纤维,本研究发现粗淀粉平均含量为 51.68%,Hoover 等研究粗淀粉含量为 50.0%~60.0%<sup>[31]</sup>,本研究结果与之相似。有研究表明,燕麦籽粒最重要的营养成分  $\beta$ -葡聚糖含量为 2.5%~8.3%<sup>[32]</sup>。国外学者 Ajithkunar 等调查了来自不同国家的燕麦籽粒中  $\beta$ -葡聚糖含量在 0.76%~3.68%<sup>[33]</sup>。邓万和等检测了  $\beta$ -葡聚糖含量变幅在 3.14%~7.43%<sup>[34]</sup>。张海芳等研究对不同产地种植的 16 个燕麦品种籽粒进行了  $\beta$ -葡聚糖含量的检测,结果表明,来源地及品种不同对燕麦籽粒中  $\beta$ -葡聚糖含量有显著性差异,变幅

在 4.75%~7.12%<sup>[35]</sup>。周凡等对来自国内外不同燕麦品种进行测定,结果表明, $\beta$ -葡聚糖含量介于 1.76%~8.72%之间<sup>[36]</sup>,本研究测定燕麦  $\beta$ -葡聚糖含量在 3.95%~7.88%,与其存在一定差异,这可能是由于燕麦检测方法、产地、品种及栽培条件等影响  $\beta$ -葡聚糖含量<sup>[37]</sup>。燕麦主要矿物质以磷钾为主,但燕麦中也存在微量的矿物质钙、铁、镁和锌等。该研究发现,不同燕麦品种籽粒中其矿质元素含量存在不同差异, Mg 含量最高,为 2 237 mg/kg, Cu 含量最低,为 0.18 mg/kg,这与任长忠等的研究结论<sup>[38]</sup>基本一致。燕麦籽粒中富含总酚和黄酮等,其含量虽较少,但具有很多生物活性,如抗氧化、改善血液循环和抗炎等作用<sup>[39-40]</sup>。王健芳等研究指出,燕麦营养品质黄酮和总酚的平均鲜质量含量为 1.70、7.99 mg/g<sup>[41]</sup>,本研究中黄酮和总酚的平均含量分别为 13.15、19.98 mg/kg,本

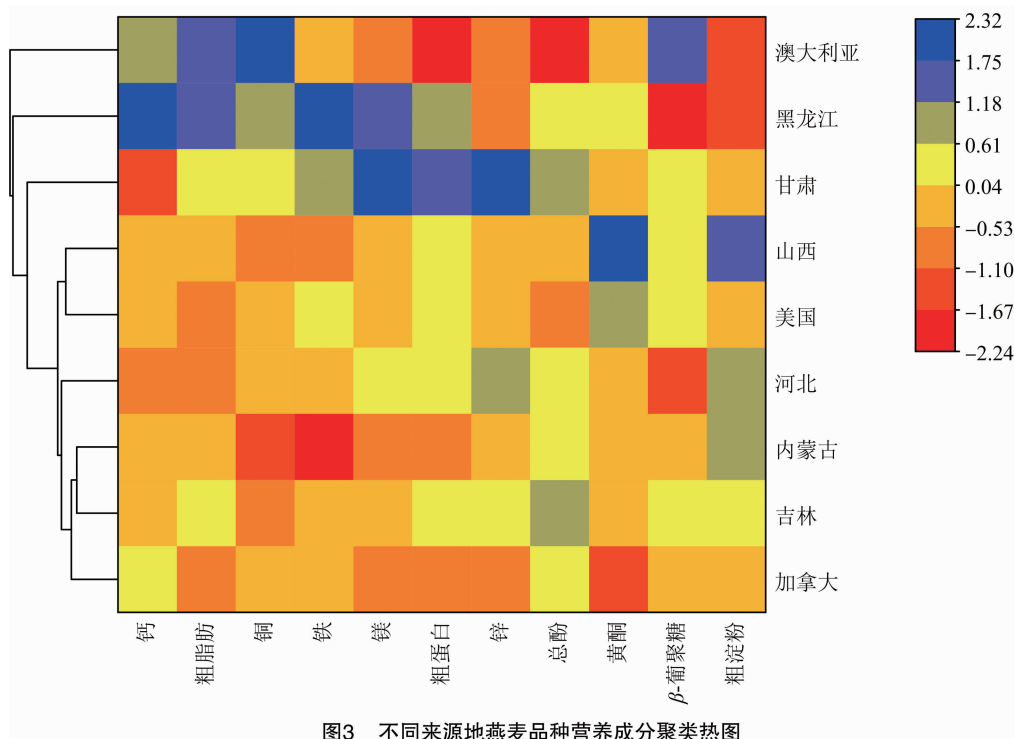


图3 不同来源地燕麦品种营养成分聚类热图

研究结果与之存在较大差异,可能是源自不同品种、不同种植环境等因素影响燕麦营养品质之间的差异。

本研究采用主成分分析法创建燕麦品质特性综合的评价模型<sup>[42]</sup>。选取与品质直接相关的 11 个营养品质指标进行主成分分析,燕麦籽粒营养指标中提取出 5 个主成分,累计贡献率达 75.309%,可较好地反映燕麦品质的综合信息。通过主成分分析及 PCA 得分制图最终筛选燕麦籽粒中营养成分归纳为锌、铜、钙、 $\beta$ -葡聚糖、粗淀粉和黄酮含量。聚类分析可反映不同燕麦品种的差异,使燕麦品种营养成分相似的聚为一类,为更好地发展寒地不同燕麦籽粒品质综合潜力提供理论依据。

燕麦具有品种多、种植面积广和营养成分含量丰富等优势,但影响燕麦籽粒中营养品质的因素有很多,如遗传性状、品种、来源地及气候条件等<sup>[43]</sup>。龚海等研究了不同地区的燕麦品种营养成分,认为山西燕麦籽粒中蛋白质含量较高,河北燕麦籽粒中蛋白质含量相对较低<sup>[44]</sup>;本研究发现甘肃产地的燕麦籽粒蛋白质含量高于其他产地,这与林伟静等的研究结果<sup>[45]</sup>一致。周海涛等研究发现燕麦淀粉含量山西的最低<sup>[46]</sup>,本研究与之相反,可能是由于不同燕麦品种及不同产地导致其营养品质不同。

#### 4 结论

通过主成分分析、聚类分析及 PCA 得分制图综

合评价,最终确定营养成分锌、铜、钙、 $\beta$ -葡聚糖、粗淀粉和黄酮含量可作为评价黑龙江省燕麦籽粒营养成分的核心指标,供试的 64 份燕麦品种中综合评价营养品质较好的皮燕麦品种为加拿大引进的 XY-2019-1 和 Canada 黑,美国引进的 V. S. 2832,河北省的张燕 8 号和张燕 7 号,甘肃省的定燕 2 号,黑龙江省的农家燕麦;营养品质较好的裸燕麦品种为美国引进的 74-N-28,河北省的坝蓓 1 号,山西省的 Yy11-18;供试的 9 个产地燕麦营养成分含量丰富的为黑龙江省、澳大利亚和甘肃省。因此,本研究结果可为黑龙江地区引种、营养品质加工及特异种质资源利用等提供参考。本试验中仅 9 个来源地 64 份燕麦品种的 11 个品质指标进行比较,尚有不足之处。研究结果可为黑龙江省燕麦品种的引进、选育及营养品质加工应用提供一定的参考。

#### 参考文献:

- [1] 章海燕,张 晖,王 立,等. 燕麦研究进展[J]. 粮食与油脂, 2009,22(8):7-9.
- [2] 南 铭,赵桂琴,李 晶,等. 西北半干旱区引种燕麦品种产量与品质的关联分析及评价[J]. 草地学报,2018,26(1):125-133.
- [3] 李庆华,南金生,王跃飞,等. 裸燕麦籽粒和主要燕麦产品中  $\beta$ -葡聚糖含量的检测与分析[J]. 现代农业科技,2021(12):223-226,229.
- [4] 路长喜,周素梅,王岸娜. 燕麦的营养与加工[J]. 粮油加工, 2008(1):89-92.
- [5] 薛竹慧. 不同品种和施氮量对燕麦生产性能和品质的影响[D].

- 太谷:山西农业大学,2018:1-37.
- [6] 任长忠,胡跃高. 中国燕麦学[M]. 北京:中国农业出版社,2013:7.
  - [7] 王双慧,梅群芳,冯晓汀. 燕麦 $\beta$ -葡聚糖、多酚及黄酮的抑菌活性研究[J]. 食品研究与开发,2020,41(12):96-102.
  - [8] 谢佳颖,韩滢仪,任虹. 燕麦生物碱研究进展[J]. 食品安全质量检测学报,2016,7(11):4536-4541.
  - [9] 倪香艳,顾军强,钟葵,等. 燕麦品种的品质性状及聚类分析[J]. 中国粮油学报,2016,31(10):18-24.
  - [10] 刘婷玉,佟立涛,王丽丽,等. 燕麦籽粒不同灭酶方式对燕麦乳稳定性和营养物质的影响[J]. 中国粮油学报,2021,36(10):22-28.
  - [11] 史京京,姬铭泽,于立河,等. 运用灰色关联度分析法对黑龙江西部地区引进燕麦品种的综合评价[J]. 江苏农业科学,2020,48(2):97-103.
  - [12] Gao B Y, Lu Y J, Sheng Y, et al. Differentiating organic and conventional sage by chromatographic and mass spectrometry flow injection fingerprints combined with principal component analysis[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2013,61(12):2957-2963.
  - [13] 荆瑞勇,卫佳琪,王丽艳,等. 基于主成分分析的不同水稻品种品质综合评价[J]. 食品科学,2020,41(24):179-184.
  - [14] 陈子叶,王丽娟,李再贵. 燕麦籽粒与燕麦片品质的相关性分析与主成分分析[J]. 中国粮油学报,2017,32(12):19-24.
  - [15] 安会敏,熊一帆,张杨波,等. 临沧工夫红茶季节判定模型及风味轮的构建[J]. 食品工业科技,2019,40(23):199-206.
  - [16] 张春岭,刘慧,刘杰超,等. 基于主成分分析与聚类分析的中、早熟桃品种制汁品质评价[J]. 食品科学,2019,40(17):141-149.
  - [17] Ai Z Y, Zhang B B, Chen Y Q, et al. Impact of light irradiation on black tea quality during withering[J]. Journal of Food Science and Technology,2017,54(5):1212-1227.
  - [18] Liu P P, Yin J F, Chen G S, et al. Flavor characteristics and chemical compositions of oolong tea processed using different semi-fermentation times[J]. Journal of Food Science and Technology,2018,55(3):1185-1195.
  - [19] 沈国伟,李建设,任长忠,等. 中加燕麦种质的遗传多样性和群体结构分析[J]. 麦类作物学报,2010,30(4):617-624.
  - [20] 王娟,李荫藩,梁秀芝,等. 北方主栽燕麦品种种质资源形态多样性分析[J]. 作物杂志,2017(4):27-32.
  - [21] 武永祯,张斌,王霞,等. 华北燕麦主栽品种生产性能评价与遗传多样性分析[J]. 西南农业学报,2018,31(3):448-456.
  - [22] 任宇鹏,刘加艳,范乃胤. 超声辅助提取山楂总酚的因素分析[J]. 广州化工,2015,43(15):122-123,143.
  - [23] 封易成,牟德华. 体外模拟胃肠消化过程中山楂的活性成分及抗氧化性规律[J]. 食品科学,2018,39(7):139-145.
  - [24] 关勇,李博. 黑龙江省发展燕麦产业的潜力与对策[J]. 现代化农业,2014(9):23-25.
  - [25] 方丽娟,陈莉,覃雪,等. 近50年黑龙江省作物生长季农业气候资源的变化分析[J]. 中国农业气象,2012,33(3):340-347.
  - [26] 齐冰洁,何竹青,孙艳楠,等. 燕麦不同锌效率品种苗期耐低锌胁迫的根系形态差异[J]. 江苏农业学报,2021,37(5):1119-1124.
  - [27] 徐超,胡新中,罗勤贵,等. 燕麦对小鼠抗疲劳作用的研究[J]. 中国粮油学报,2009,24(9):36-39.
  - [28] 胡新中. 燕麦食品加工及功能特性研究进展[J]. 麦类作物学报,2005,25(5):122-124.
  - [29] 欧阳昭晖,米雅清,王青,等. 2013年中国燕麦区试品种(系)主要营养品质分析[J]. 麦类作物学报,2016,36(4):455-459.
  - [30] 杨才,周海涛,李天亮,等. 大粒裸燕麦与普通栽培燕麦主要营养成分的比较[J]. 农产品加工(创新版),2010(9):53-54.
  - [31] Hoover R, Smith C, Zhou Y, et al. Physicochemical properties of Canadian oat starches[J]. Carbohydrate Polymers,2003,52(3):253-261.
  - [32] Berski W, Ptaszek A, Ptaszek P, et al. Pasting and rheological properties of oat starch and its derivatives[J]. Carbohydrate Polymers,2011,83(2):665-671.
  - [33] Ajithkumar A, Andersson R, Åman P. Content and molecular weight of extractable  $\beta$ -glucan in American and Swedish oat samples[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2005,53(4):1205-1209.
  - [34] 邓万和,王强,吕耀昌,周素梅. 品种和环境效应对燕麦 $\beta$ -葡聚糖含量的影响[J]. 中国粮油学报,2005,20(2):30-32.
  - [35] 张海芳,赵丽芹,苏晓燕,等. 品种和地区效应对燕麦 $\beta$ -葡聚糖含量的影响[J]. 粮食与饲料工业,2013(8):34-36.
  - [36] 周凡,阮景军,赵丽那,等. 两个群体燕麦资源 $\beta$ -葡聚糖含量的相关分析[J]. 云南大学学报(自然科学版),2018,40(2):382-388.
  - [37] Andersson A A M, Börjesdotter D. Effects of environment and variety on content and molecular weight of  $\beta$ -glucan in oats[J]. Journal of Cereal Science,2011,54(1):122-128.
  - [38] 任长忠,闫金婷,董锐,等. 燕麦营养成分、功能特性及其产品的研究进展[J]. 食品工业科技,2022,43(12):438-446.
  - [39] Wang H Z, Yang L, Zu Y G, et al. Microwave-assisted simultaneous extraction of luteolin and apigenin from tree peony pod and evaluation of its antioxidant activity[J]. The Scientific World Journal,2014,2014:506971.
  - [40] Butt M S, Tahir - Nadeem M, Khan M K I, et al. Oat:unique among the cereals[J]. European Journal of Nutrition,2008,47(2):68-79.
  - [41] 王建芳,高山,牟德华. 基于主成分分析和聚类分析的不同品种燕麦品质评价[J]. 食品工业科技,2020,41(13):85-91.
  - [42] 于秋竹,孔宇,陈东升,等. 基于主成分及聚类分析的黑龙江省水稻产量与品质的综合评价[J]. 沈阳农业大学学报,2015,46(2):219-224.
  - [43] 王慧,杨富,姜超,等. 燕麦品种(系)的营养品质综合评价[J]. 麦类作物学报,2021,41(2):203-211.
  - [44] 龚海,李成雄,王雁丽. 燕麦品种资源品质分析[J]. 山西农业科学,1999,27(2):16-19.
  - [45] 林伟静,吴广枫,李春红,等. 品种与环境对我国裸燕麦营养品质的影响[J]. 作物学报,2011,37(6):1087-1092.
  - [46] 周海涛. 不同生态环境对裸燕麦籽实营养品质影响的研究[D]. 北京:中国农业科学院,2014:1-23.