

不同品种燕麦的营养成分分析

范昱^{1,2} 冯亮³ 王俊珍⁴ 杨乔惠¹ 任远航¹
张凯旋² 邹亮¹ 周美亮² 向达兵¹

(¹成都大学食品与生物工程学院/农业农村部杂粮加工重点实验室/四川省杂粮产业化工程技术研究中心, 610106, 四川成都;

²中国农业科学院作物科学研究所, 100081, 北京; ³成都市食品药品检测研究院/国家市场监管重点实验室(营养与健康化学计量及应用), 610106, 四川成都; ⁴凉山彝族自治州农业科学研究院, 615000, 四川西昌)

摘要 对来自国内外的 30 份燕麦品种的基础营养成分、氨基酸以及各矿质元素进行测定及研究, 结合灰色关联度分析方法综合评价了其营养组成。结果显示, 不同品种成分差异显著, 说明燕麦具有丰富的遗传多样性。其中, 粗蛋白含量最高的是定莜 1 号 (23.76%), 粗淀粉含量最高的是坝莜 6 号 (73.16%), 粗脂肪含量最高的是白燕 8 号 (10.03%)。功能性营养指标中, 总黄酮含量范围为 420.08 (晋燕 9 号)~3395.12 mg/kg (坝莜 9 号); 总酚含量范围为 1516.02 (坝莜 5 号)~5463.71 mg/kg (ITAO-63); 植酸含量变化范围为 8.74 (Shadow)~25.91 mg/kg (科燕 1 号)。30 份材料的谷氨酸、亮氨酸、天冬氨酸和精氨酸含量较高, 而胱氨酸和蛋氨酸的含量较低。总氨基酸 (TAA) 含量最高的是 ITAO-63, 达 16.29%; 最低的是坝莜 1 号, 仅为 11.57%。其中来自意大利的材料必需氨基酸 (EAA) 总体较高, 最高的为 ITAO-27 (3.94%)。燕麦不同资源的矿质元素存在丰富的遗传多样性, 其中大量元素含量顺序为钾>镁>钙>钠, 微量元素顺序为锰>锌>铁>铜>镍>硒。最后通过等权关联度和加权关联度分析, 发现 30 个燕麦品种的综合营养品质居前三位的分别为坝莜 8 号、ITAO-63 和白燕 6 号, 可作为优质燕麦品种选育的骨干材料或功能性食品开发利用的专用品种。

关键词 燕麦; 营养成分; 氨基酸; 矿质元素; 灰色关联分析

燕麦 (*Avena sativa* L.) 是起源于我国的一种主要杂粮作物, 为一年生粮饲兼用型草本作物, 播种面积和总产量仅次于小麦、水稻、玉米、大麦和高粱, 居第六位^[1-2]。栽培燕麦一般分为裸粒型和带稃型两大类, 即裸燕麦 (naked oats) 和皮燕麦 (hulled oats)^[2-3]。裸燕麦的别名颇多, 在我国华北地区称为莜麦, 西北地区称为玉麦, 西南地区称为燕麦或莜麦, 东北地区也称为铃铛麦^[4]。国外主要栽培的是带稃型的皮燕麦, 美国、俄罗斯以及加拿大等都是燕麦种植大国, 我国燕麦的种植以裸燕麦为主, 其栽培面积达燕麦总种植面积的 85% 以上^[5-6]。燕麦抗寒、抗旱、耐瘠薄, 同时兼具草产量大、粗蛋白和可消化纤维含量高和家畜喜食的优点, 因此, 燕麦是典型的粮饲兼用型作物^[7-8]。

燕麦具有较高的营养价值, 其粗蛋白和脂肪含量均高于玉米、水稻、小麦和高粱^[8]。张杰等^[9]

发现, 燕麦淀粉的凝沉性、膨润力、透明度低于马铃薯、玉米和小麦淀粉, 其溶解度远高于此 3 种淀粉, 其糊化特性与小麦淀粉最为接近。顾军强等^[10]对国内燕麦的淀粉含量和酶解稳定性进行了研究, 发现燕麦的总淀粉和直链淀粉质量分数变化范围分别为 54.00%~65.85% 和 8.26%~15.49%; 其中白燕 2 号、定莜 7 号和盐源 1 号等品种适合用于加工燕麦饮料产品。Tong 等^[11]研究表明, 燕麦脂质降低可以显著降低实验小鼠的肝脏和血液中的胆固醇浓度。王燕^[12]研究发现燕麦的脂质对人体有良好的保湿、锁水效果, 并推测这与燕麦的油酸含量有关。另外, 燕麦籽粒中含有多酚类化合物, 如 Mallory 等^[13]研究显示燕麦中富含阿魏酸、类黄酮类以及燕麦蒽胺等, 其中燕麦蒽胺是燕麦特有的 N-肉桂酸衍生物, 具有较高的生物活性。黄酮类化合物也是燕麦主要生物活

作者简介: 范昱, 研究方向为杂粮作物的代谢调控机理, E-mail: fandavi@163.com

向达兵为通信作者, 研究方向为燕麦荞麦栽培生理, E-mail: Dabingxiang@163.com; 周美亮为共同通信作者, 研究方向为燕麦荞麦功能基因挖掘及其分子机理解析, E-mail: zhoumeiliang@caas.cn

基金项目: 成都大学人才引进项目 (2081923007); 四川省辐照保藏技术重点实验室开放项目 (FZBC206704); 成都市农业科技英才培育项目高水平创新团队 (ZY23); 横向技术开发 (委托) 项目 (H2423); 四川省科技厅计划 (2023NSFSC0214); 国家燕麦荞麦产业技术体系 (CARS-07-B-1)

收稿日期: 2023-10-16; 修回日期: 2023-12-17; 网络出版日期: 2024-03-26

性物质之一，其具有较好的抗氧化、抗肿瘤和抗癌活性^[14]。另外，在组成蛋白质的 18 种氨基酸中，燕麦籽粒中含有的人体 8 种必需氨基酸含量也较其他作物丰富且组成均衡，其赖氨酸约为大米和小麦粉的 2 倍，亮氨酸、色氨酸和缬氨酸也比一般谷物含量多^[15-16]。钠、钾、钙、铁、镁、铜和锌等元素含量的高低不仅关系到作物的生长发育，也与人们的营养健康密切相关^[17]。燕麦籽粒中富含丰富的矿质元素，在调节人体发育、预防骨质疏松和保护心血管器官等方面有着重要的作用^[18-19]。然而，前人针对燕麦籽粒营养组分的研

究很少，特别是缺乏品种间相互对比和全面性营养品质的系统分析。

本研究以来自国内外的 30 个燕麦品种为研究材料，对基础营养成分、氨基酸以及各矿质元素进行测定，结合灰色关联度分析比较其营养组成，为燕麦良种选育及产品开发提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

30 份燕麦材料信息见表 1，材料由成都大学严俊教授提供。ITAO 为意大利引进燕麦群体，选

表 1 供试品种信息
Table 1 The information of cultivars

编号 Code	品种 Cultivar	来源 Source	编号 Code	品种 Cultivar	来源 Source
X1	坝菽 1 号	中国河北省张家口市农业科学院	X16	冀张菽四号	中国河北省张家口市农业科学院
X2	坝菽 3 号	中国河北省张家口市农业科学院	X17	VAO 2	中国吉林省白城市农业科学院
X3	坝菽 5 号	中国河北省张家口市农业科学院	X18	Navan	加拿大
X4	坝菽 6 号	中国河北省张家口市农业科学院	X19	Shadow	加拿大
X5	坝菽 8 号	中国河北省张家口市农业科学院	X20	晋燕 6 号	中国山西省农业科学院高寒区作物研究所
X6	坝菽 9 号	中国河北省张家口市农业科学院	X21	晋燕 9 号	中国山西省农业科学院高寒区作物研究所
X7	白燕 2 号	中国吉林省白城市农业科学院	X22	定菽 1 号	中国甘肃省定西地区旱农中心
X8	白燕 3 号	中国吉林省白城市农业科学院	X23	燕科 1 号	中国内蒙古自治区农牧业科学院
X9	白燕 5 号	中国吉林省白城市农业科学院	X24	蒙燕 1 号	中国内蒙古自治区农牧业科学院
X10	白燕 6 号	中国吉林省白城市农业科学院	X25	蒙燕 2 号	中国内蒙古自治区农牧业科学院
X11	白燕 7 号	中国吉林省白城市农业科学院	X26	ITAO-3	意大利
X12	白燕 8 号	中国吉林省白城市农业科学院	X27	ITAO-6	意大利
X13	白燕 9 号	中国吉林省白城市农业科学院	X28	ITAO-18	意大利
X14	白燕 10 号	中国吉林省白城市农业科学院	X29	ITAO-27	意大利
X15	白燕 11 号	中国吉林省白城市农业科学院	X30	ITAO-63	意大利

择其中 5 份种质资源进行测定分析。

1.2 样品采集

2022 年 4 月，于四川省成都市金堂县试验基地种植 30 份燕麦材料。采取随机区组设计，穴播，每穴播种 3 粒，每行 5 穴，穴深 3~5 cm，行长 3.0 m，行宽 30.0 cm，设置 3 个重复，并设置保护行。试验地土壤肥力中等，pH 7.21，含有机质 1.88%、全氮 2.28 g/kg、全磷 0.91 g/kg、全钾 16.3 g/kg、水解氮 57.4 mg/kg、有效磷 31.3 mg/kg、有效钾 139.1 mg/kg、铜 38.3 mg/k、锌 107.3 mg/kg、锰 556.7 mg/kg、硒 0.153 mg/kg、铁 4.03%。待燕麦幼苗长出，每行定苗 5 株。所有燕麦籽粒收获后均自然阴干，在 4℃冷柜中低温避光贮藏。

1.3 试剂与仪器

甲醇、盐酸、乙醇、甲酸、氢氧化钠、石油醚、葡萄糖、氢氧化钾等试剂均为分析纯，购于成都宏

盛新科技有限公司。

电子分析天平（ME104E）：瑞士梅特勒—托利多公司；电热恒温鼓风干燥箱（DHG-9070A）：北京合众日盛科技有限公司；多功能高速粉碎机（BJ-150）：德清拜杰电器有限公司；超声波清洗机（PS-30）：东莞市洁康超声波设备有限公司；K9860 型自动凯氏定氮仪：上海通微分析技术有限公司；L-8900 型氨基酸分析仪和紫外可见分光光度计（U-T3）：屹谱仪器制造（上海）有限公司；PF6-2 型荧光分光光度计：北京普析通用仪器有限公司；AA-3800G 型原子吸收光谱仪：株式会社日立制作所。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 营养成分含量 按照 GB/T 5009.6-2003 中索氏抽提法测定粗脂肪含量；按照 GB/T 5009.5-2003 中第一法测定蛋白质含量；采用蒽酮比色法测

定可溶性糖含量，具体参考冯亮等^[20]的方法；参考范昱等^[21]的方法测定植酸、无机磷、氨基和黄色素含量；参照周月霞等^[22]的方法测定抗氧化类物质总类黄酮和总酚的含量。

1.4.2 氨基酸含量 参照国标 GB 5009.124-2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定》，采用自动氨基酸分析仪法（茚三酮柱后衍生离子交换色谱仪）测定燕麦籽粒的 17 种氨基酸含量，具体参照陈晶华等^[23]的方法。

1.4.3 矿物质含量 按照国家标准 GB 5009.268-2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》进行矿质元素含量测定，其中使用电感耦合等离子光谱仪测定 Fe、Mn、Na、K、Mg、Ca 等元素含量，使用电感耦合等离子体质谱法（ICP-MS）测定 Ni 含量，具体参考齐冰洁等^[19]的方法。

1.5 数据处理

用 JMP 6.0 软件（SAS Institute）进行方差分析，数据以平均值±标准差表示。采用（ $P<0.05$ ）Tukey-Kramer HSD 检验显著性差异。

2 结果与分析

2.1 不同燕麦品种主要营养成分含量分析

如表 2 所示，30 份燕麦材料的粗蛋白含量平均为 15.32%，其中最高的是定菰 1 号，达 23.76%；最低的是 ITAO-3，仅 9.42%。粗淀粉含量为 53.05%~73.16%，平均含量 60.19%。坝菰系列品种中，坝菰 9 号（66.14%）、1 号（66.26%）、8 号（67.98%）、3 号（68.26%）和 6 号有较高的粗淀粉含量，Shadow 的粗淀粉含量较低。粗脂肪含量范围为 3.62%（蒙燕 2 号）~10.03%（白燕 8 号），平均含量 6.91%，

表 2 不同品种燕麦基础营养成分含量
Table 2 Contents of basic nutrients in different varieties of oats

材料 Material	粗蛋白 Crude protein (%)	粗淀粉 Crude starch (%)	粗脂肪 Crude fat (%)	无机磷 Inorganic phosphoric (mg/kg)	氨基 Amido (mg/kg)
X1	15.01±0.22ghij	66.26±3.84abcde	6.72±0.41defgh	3.38±0.04efg	3.56±0.04no
X2	18.88±1.03cde	68.26±2.10abc	7.46±0.28cdefg	3.38±0.01efg	3.70±0.06mn
X3	10.65±0.28kl	63.10±4.76abcdef	9.33±0.14ab	3.29±0.16efgh	3.95±0.23lmn
X4	16.46±5.54defghi	73.16±9.81a	8.46±0.32bc	2.89±0.20hijkl	4.66±0.32hijk
X5	17.96±0.52cdefg	67.98±1.36abcd	8.13±0.06bcd	2.47±0.18l	2.72±0.04q
X6	17.09±0.53defgh	66.14±3.46abcde	7.29±0.46cdefgh	2.92±0.15hijk	2.85±0.09pq
X7	15.30±0.64efghij	59.15±0.90bcdef	7.29±0.42cdefgh	2.89±0.06hijkl	3.09±0.08opq
X8	10.60±0.07kl	62.72±2.67abcdef	7.87±0.07bcde	2.78±0.01ijkl	3.55±0.12no
X9	14.74±0.21ghij	54.69±1.89ef	5.79±0.46hijkl	3.19±0.06ghi	3.42±0.06nop
X10	15.25±0.13fghij	60.60±0.97abcdef	9.10±0.27ab	2.95±0.12ghij	4.66±0.14hijk
X11	16.04±0.95defghi	56.15±1.82cdef	9.21±0.18ab	3.24±0.02fgh	6.05±0.05de
X12	19.08±1.32bcd	58.72±0.94bcdef	10.03±0.20a	3.31±0.02efgh	6.24±0.05d
X13	12.02±0.04jkl	64.96±0.90abcdef	9.12±0.36ab	3.33±0.02efgh	6.40±0.05cd
X14	12.24±0.34jkl	64.99±2.36abcdef	9.26±0.10ab	4.84±0.01b	6.93±0.07bc
X15	13.43±0.33ijk	57.62±3.48bcdef	6.25±0.28fghij	4.74±0.13bc	5.31±0.11fg
X16	14.41±0.33ghij	54.98±1.56ef	5.12±0.16ijklm	3.24±0.10fgh	4.21±0.13klm
X17	13.75±0.14hijk	53.35±1.59f	7.54±1.19cdef	4.85±0.19b	5.33±0.18fg
X18	18.70±0.76cdef	60.16±3.70bcdef	8.14±0.50bcd	2.50±0.17kl	5.19±0.37fgh
X19	20.95±0.17abc	53.05±5.17f	6.49±0.27efghi	1.60±0.15m	1.31±0.04r
X20	21.57±0.21abc	55.22±6.76def	6.27±0.31fghij	3.14±0.36ghi	4.58±0.58ijk
X21	22.55±0.25ab	59.04±3.47bcdef	6.26±0.55fghij	2.66±0.08jkl	5.63±0.13ef
X22	23.76±0.20a	61.50±2.92abcdef	6.07±0.23fghijk	2.94±0.12ghijk	5.33±0.07fg
X23	9.74±0.15l	70.21±1.79ab	5.98±0.36ghijkl	3.29±0.15efgh	5.13±0.14fghi
X24	10.45±0.15kl	57.30±12.27cdef	4.52±0.84lm	3.71±0.14e	4.66±0.17hijk
X25	13.73±0.45hijk	53.33±0.94f	3.62±0.21m	4.37±0.22cd	4.30±0.18jkl
X26	9.42±0.68l	55.51±1.48cdef	5.08±1.52ijklm	1.94±0.15m	2.52±0.02q
X27	14.28±0.70hij	59.01±4.20bcdef	5.18±0.15ijkl	3.64±0.18ef	4.85±0.23ghij
X28	11.74±0.06jkl	56.54±0.56cdef	4.57±0.16klm	4.18±0.02d	5.12±0.04fghi
X29	14.58±0.20ghij	55.22±0.28def	4.84±0.07jklm	5.02±0.07b	7.13±0.05b
X30	15.21±0.10fghij	56.85±0.56cdef	6.18±0.25fghij	5.47±0.09a	7.78±0.30a

续表 2 Table 2 (continued)

材料 Material	植酸 Phytate (mg/kg)	总黄酮 Total flavones (mg/kg)	总酚 Total phenols (mg/kg)	黄色素 Xins (mg/kg)	可溶性糖 Soluble sugar (%)
X1	20.49±0.10fgh	1004.59±51.78rs	1717.52±7.22a	15.50±0.13d	10.65±0.45st
X2	16.00±0.13no	1789.37±14.46hij	1986.56±12.88a	8.95±0.17jk	13.79±0.06opq
X3	12.71±0.53st	2049.82±16.48efg	1516.02±56.93a	7.40±0.08mno	17.73±0.07hij
X4	9.60±0.09vw	1643.85±22.42jk	2194.37±12.01a	6.07±0.08q	12.75±0.13pqr
X5	21.79±0.17cde	3208.70±198.51a	2709.80±54.36a	11.28±0.27fg	40.76±0.94a
X6	24.23±0.87b	3395.12±36.02a	1904.95±21.71a	10.28±0.17ghi	20.06±0.20fg
X7	17.80±0.11kl	2293.89±33.60cd	2358.56±7.45a	7.29±0.05no	17.28±0.09ijk
X8	16.49±0.07mno	1734.22±31.72ij	3767.57±78.44a	8.07±0.14klmn	16.15±0.09klm
X9	13.89±0.42qr	2110.51±24.11def	2029.69±8.51a	5.49±0.22qr	14.22±0.14nop
X10	16.34±0.06no	2718.40±189.89b	1598.93±15.79a	3.19±0.05s	12.40±0.01qr
X11	17.49±0.14klm	1375.39±0.49mno	1780.22±2.69a	8.32±0.08klm	14.91±0.11mno
X12	19.69±0.19hi	1535.67±20.85klm	1924.85±1.40a	9.98±0.17hi	16.96±0.10jkl
X13	21.19±0.11def	596.61±49.48uvw	2006.11±4.62a	14.03±0.99e	18.56±0.10ghi
X14	22.75±0.38c	763.74±69.22tu	2294.35±28.92a	23.81±0.81a	12.00±0.35rs
X15	20.90±0.21efg	1333.46±33.53nop	2561.54±58.56a	5.90±0.00qr	16.33±0.03jklm
X16	17.05±0.35lmn	1599.52±31.34jkl	2151.20±24.00a	5.82±0.08qr	17.51±0.09ijk
X17	15.61±0.06op	1921.24±4.39fghi	1960.97±2.25a	7.12±0.13nop	8.85±0.27u
X18	10.65±0.72uv	2485.07±71.84c	3115.58±150.43a	7.68±0.1lmn	11.40±0.15rst
X19	8.74±0.57w	1495.45±15.06klmn	2433.25±32.49a	4.88±0.05r	23.18±1.32e
X20	18.50±0.22jk	672.94±36.55uv	1734.72±5.20a	9.67±0.10ij	15.50±0.20lmn
X21	20.10±0.17ghi	420.08±3.04w	1867.22±8.76a	11.89±0.33f	21.23±0.01f
X22	18.07±0.11kl	903.90±7.35st	1942.34±12.80a	19.32±0.46b	31.66±0.57b
X23	25.91±0.71a	1961.59±27.19fgh	2094.01±27.36a	17.41±0.85c	13.70±0.03opq
X24	15.75±0.03op	1853.01±28.77ghi	2343.02±9.64a	7.82±0.10mn	19.19±0.05gh
X25	19.30±0.21ij	2182.34±33.03de	1971.14±0.23a	9.48±0.08ij	29.38±1.44c
X26	21.43±0.16def	1434.44±36.98lmno	2234.18±28.66a	10.81±0.08gh	16.61±0.17jkl
X27	22.21±0.23cd	1141.39±26.78pqr	2498.87±11.27a	6.43±0.10opq	12.89±0.08pqr
X28	13.28±0.13rs	478.67±16.15vw	1812.86±13.52a	2.17±0.09s	9.85±0.49tu
X29	11.67±0.15tu	1108.98±5.13qr	1656.48±21.92a	6.26±0.05pq	26.43±1.03d
X30	14.72±0.15pq	1260.63±60.29opq	5463.71±7139.26a	8.68±0.10jkl	19.58±0.20g

不同小写字母表示显著差异 ($P < 0.05$)。下同。
Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$). The same below.

坝莠 5 号 (9.33%)、白燕系列中白燕 6 号 (9.10%)、9 号 (9.12%)、7 号 (9.21%)、10 号 (9.26%) 和 8 号均有较高的脂肪含量,是高油脂燕麦材料;而蒙燕 1 号和 2 号以及 ITAO 群体粗脂肪含量较少。30 个燕麦品种的总黄酮含量为 420.08 (晋燕 9 号)~3395.12 mg/kg (坝莠 9 号),平均为 1615.75 mg/kg;总酚含量为 1516.02 (坝莠 5 号)~5463.71 mg/kg (ITAO-63),平均 2254.35 mg/kg。无机磷、氨基、植酸、黄色素和可溶性糖含量在部分材料之间呈现出显著差异性 ($P < 0.05$)。

2.2 不同品种燕麦的氨基酸含量分析

供试燕麦材料 17 种氨基酸见表 3,其中谷氨酸、亮氨酸、天冬氨酸、精氨酸含量较高,而胱氨酸和蛋氨酸含量较低。总氨基酸 (TAA) 含量

最高的是 ITAO-63,可达 16.29%;最低的是坝莠 1 号,仅为 11.57%。来自意大利的材料必需氨基酸 (EAA) 含量总体较高,分别为 ITAO-27 (3.94%)、ITAO-3 (3.82%)、ITAO-63 (3.82%)、ITAO-18 (3.81%)和 ITAO-6 (3.80%);坝莠系列品种的 EAA 含量较低,分别是坝莠 8 号 (2.94%)、坝莠 9 号 (2.88%),坝莠 6 号 (2.81%)、坝莠 3 号 (2.75%)、坝莠 5 号 (2.71%)和坝莠 1 号 (2.71%)。ITAO-63 (8.52%)、ITAO-27 (8.08%)和 ITAO-6 (7.69%)的非必需氨基酸 (NEAA) 含量也较高,而坝莠 3 号 (6.35%)和坝莠 1 号 (6.0%)的 NEAA 较低。总体来看,燕麦支链氨基酸 (branched chain amino acids, BCAA) 含量尤为丰富。30 份燕麦中的亮氨酸

表 3 不同品种燕麦的氨基酸含量
Table 3 Amino acid contents in different varieties of oats

材料 Material	苏氨酸* Thr	缬氨酸* Val	蛋氨酸* Met	异亮氨酸* Ile	亮氨酸* Leu	苯丙氨酸* Phe
X1	0.40±0.02abcdefg	0.42±0.01e	0.09±0.00a	0.33±0.00g	0.66±0.02l	0.49±0.01klm
X2	0.32±0.01hijk	0.45±0.06de	0.10±0.00a	0.35±0.03g	0.77±0.00ijkl	0.44±0.01lm
X3	0.32±0.01hijk	0.46±0.01cde	0.11±0.02a	0.35±0.01g	0.69±0.01kl	0.44±0.03m
X4	0.33±0.04hijk	0.48±0.03bcde	0.12±0.01a	0.34±0.02g	0.75±0.04jkl	0.46±0.01lm
X5	0.32±0.00hijk	0.48±0.02bcde	0.11±0.01a	0.35±0.04g	0.81±0.01ghijk	0.54±0.03hijk
X6	0.33±0.00hijk	0.48±0.05bcde	0.11±0.01a	0.35±0.01g	0.72±0.04kl	0.55±0.03ghijk
X7	0.32±0.03hijk	0.47±0.04cde	0.10±0.01a	0.36±0.02fg	0.76±0.03jkl	0.51±0.02jkl
X8	0.34±0.01ghijk	0.51±0.03bcde	0.11±0.01a	0.34±0.00g	0.80±0.02hijk	0.51±0.01jkl
X9	0.30±0.01jk	0.57±0.05abcde	0.11±0.02a	0.43±0.01bcd	0.84±0.06ghij	0.54±0.02ijk
X10	0.37±0.02cdefghi	0.56±0.06abcde	0.11±0.02a	0.43±0.03bcd	0.80±0.02hijk	0.63±0.02def
X11	0.32±0.02hijk	0.54±0.03abcde	0.12±0.01a	0.42±0.02bcdef	0.76±0.02jkl	0.55±0.01ghijk
X12	0.35±0.02ghijk	0.54±0.02abcde	0.12±0.01a	0.43±0.01bcde	0.80±0.03hijk	0.55±0.01ghijk
X13	0.31±0.04ijk	0.52±0.06bcde	0.11±0.01a	0.36±0.02efg	0.89±0.03defghi	0.64±0.01cde
X14	0.36±0.01defghi	0.54±0.10abcde	0.12±0.01a	0.36±0.02efg	0.84±0.04ghij	0.56±0.01fghijk
X15	0.33±0.04hijk	0.62±0.07abcde	0.12±0.01a	0.36±0.02fg	0.86±0.02efghij	0.56±0.01fghijk
X16	0.35±0.03ghijk	0.51±0.08bcde	0.12±0.00a	0.34±0.01g	0.92±0.03cdefg	0.57±0.02efghij
X17	0.35±0.04fghij	0.62±0.02abcde	0.11±0.01a	0.44±0.03bcd	0.85±0.03fghij	0.60±0.02defghi
X18	0.36±0.03fghij	0.54±0.06abcde	0.12±0.01a	0.46±0.02b	0.92±0.02cdefgh	0.63±0.04def
X19	0.29±0.01k	0.62±0.04abcde	0.13±0.02a	0.44±0.04bcd	0.99±0.03abcd	0.71±0.02abc
X20	0.34±0.02ghijk	0.58±0.05abcde	0.14±0.01a	0.46±0.01b	1.08±0.10ab	0.65±0.04bcd
X21	0.33±0.01hijk	0.53±0.08bcde	0.12±0.00a	0.43±0.02bcd	0.78±0.02ijkl	0.62±0.02defg
X22	0.36±0.00efghij	0.59±0.03abcde	0.12±0.02a	0.45±0.02bc	1.02±0.02abc	0.62±0.03defgh
X23	0.35±0.02ghijk	0.66±0.09abcd	0.10±0.01a	0.46±0.02b	1.03±0.04abc	0.61±0.04defghi
X24	0.38±0.00bcdefgh	0.60±0.02abcde	0.12±0.03a	0.39±0.01cdefg	0.98±0.03abcde	0.65±0.01bcd
X25	0.43±0.01abcd	0.64±0.14abcd	0.12±0.03a	0.39±0.03cdefg	0.97±0.03bcdef	0.67±0.02abcd
X26	0.44±0.02ab	0.65±0.07abcd	0.12±0.02a	0.37±0.02defg	1.03±0.06abc	0.72±0.04ab
X27	0.42±0.01abcde	0.64±0.10abcd	0.12±0.00a	0.44±0.01bcd	1.10±0.07a	0.73±0.03a
X28	0.42±0.02abcdef	0.68±0.08abc	0.11±0.01a	0.39±0.01cdefg	1.04±0.04abc	0.66±0.01abcd
X29	0.43±0.01abc	0.74±0.15a	0.11±0.01a	0.44±0.01bcd	1.02±0.04abc	0.57±0.02fghijk
X30	0.45±0.01a	0.68±0.03ab	0.12±0.01a	0.54±0.03a	1.01±0.03abc	0.67±0.03abcd
材料 Material	赖氨酸* Lys	天冬氨酸 Asp	丝氨酸 Ser	谷氨酸 Glu	甘氨酸 Gly	丙氨酸 Ala
X1	0.32±0.01j	0.71±0.01abcdefg	0.41±0.02h	2.26±0.06de	0.40±0.02i	0.38±0.02a
X2	0.32±0.02j	0.77±0.00abcdef	0.44±0.01gh	2.22±0.22de	0.45±0.02ghi	0.40±0.01a
X3	0.34±0.04hij	0.74±0.02abcdef	0.46±0.01fgh	2.60±0.09abcde	0.47±0.03fghi	0.49±0.10a
X4	0.33±0.05hij	0.73±0.01abcdefg	0.46±0.02fgh	2.27±0.07de	0.47±0.03fghi	0.43±0.05a
X5	0.33±0.02hij	0.79±0.02abcd	0.61±0.02abcd	2.34±0.02cde	0.48±0.02fghi	0.44±0.06a
X6	0.34±0.03ghij	0.73±0.03abcdef	0.55±0.02abcdefg	2.32±0.06cde	0.46±0.01ghi	0.45±0.06a
X7	0.31±0.03j	0.81±0.02ab	0.46±0.02fgh	2.45±0.12bcde	0.46±0.01ghi	0.40±0.02a
X8	0.34±0.04ghij	0.80±0.01ab	0.52±0.03defgh	2.35±0.13bcde	0.47±0.03fghi	0.45±0.04a
X9	0.35±0.03ghij	0.65±0.01fg	0.47±0.05efgh	2.41±0.1bcde	0.45±0.03hi	0.47±0.09a
X10	0.34±0.01hij	0.67±0.01defg	0.49±0.08efgh	2.35±0.11bcde	0.52±0.01efgh	0.46±0.10a
X11	0.33±0.01ij	0.76±0.01abcdef	0.55±0.00abcdefg	2.35±0.32bcde	0.53±0.02defgh	0.52±0.04a
X12	0.35±0.02ghij	0.80±0.02ab	0.54±0.02bcdefg	2.67±0.11abcde	0.52±0.05defgh	0.45±0.03a
X13	0.43±0.05efgh	0.62±0.01g	0.54±0.04bcdefg	2.23±0.14de	0.44±0.01hi	0.27±0.19a
X14	0.43±0.02defg	0.75±0.02abcdef	0.49±0.02efgh	2.49±0.22bcde	0.61±0.04bcde	0.46±0.05a
X15	0.41±0.05fghi	0.74±0.03abcdef	0.52±0.01cdefgh	2.11±0.06e	0.51±0.05efghi	0.47±0.04a
X16	0.35±0.01ghij	0.75±0.01abcdef	0.54±0.03abcdefg	2.54±0.13bcde	0.45±0.01ghi	0.50±0.16a
X17	0.32±0.04j	0.79±0.02abcd	0.46±0.01fgh	2.49±0.22bcde	0.46±0.01fghi	0.46±0.05a

续表 3 Table 3 (continued)

材料 Material	赖氨酸* Lys	天冬氨酸 Asp	丝氨酸 Ser	谷氨酸 Glu	甘氨酸 Gly	丙氨酸 Ala
X18	0.43±0.02efgh	0.81±0.05a	0.53±0.03bcdefg	2.81±0.07abcd	0.47±0.08fghi	0.45±0.11a
X19	0.40±0.03fghij	0.70±0.05abcdefg	0.48±0.10efgh	2.24±0.14de	0.58±0.03cdef	0.51±0.15a
X20	0.31±0.04j	0.79±0.01abc	0.53±0.03bcdefgh	2.41±0.07bcde	0.54±0.02defgh	0.52±0.08a
X21	0.35±0.04ghij	0.77±0.02abcdef	0.52±0.05defgh	2.34±0.29cde	0.55±0.04defgh	0.53±0.06a
X22	0.52±0.02cd	0.73±0.05abcdefg	0.56±0.01abcdef	3.23±0.27a	0.68±0.04ab	0.39±0.30a
X23	0.71±0.02a	0.69±0.08bcdefg	0.56±0.02abcdef	2.54±0.02bcde	0.55±0.03cdefgh	0.38±0.29a
X24	0.56±0.03bc	0.68±0.11cdefg	0.57±0.07abcdef	2.63±0.50abcde	0.63±0.06bcd	0.37±0.28a
X25	0.56±0.02bc	0.67±0.07efg	0.59±0.03abcd	2.23±0.19de	0.62±0.03bcde	0.34±0.26a
X26	0.49±0.03cdef	0.77±0.01abcdef	0.63±0.04abcd	2.09±0.01e	0.76±0.02a	0.18±0.23a
X27	0.35±0.00ghij	0.80±0.06ab	0.47±0.01fgh	2.72±0.19abcde	0.44±0.02hi	0.33±0.23a
X28	0.51±0.03cde	0.77±0.01abcde	0.64±0.03ab	2.36±0.07bcde	0.57±0.07cdef	0.35±0.27a
X29	0.63±0.01ab	0.78±0.01abcde	0.63±0.05abc	2.99±0.55ab	0.66±0.04abc	0.38±0.29a
X30	0.35±0.01ghij	0.80±0.00ab	0.66±0.01a	2.92±0.07abc	0.56±0.02cdefg	0.20±0.25a

材料 Material	胱氨酸 Cys	酪氨酸 Tyr	组氨酸 His	精氨酸 Arg	脯氨酸 Pro	氨基酸总量 TAA (%)
X1	0.15±0.00ab	0.21±0.01j	0.29±0.00efg	0.77±0.02efghi	0.42±0.00h	11.57±4.81l
X2	0.12±0.00b	0.22±0.00ij	0.28±0.01fg	0.79±0.17defghi	0.66±0.03def	12.10±5.04kl
X3	0.13±0.02b	0.25±0.02ghij	0.26±0.01g	0.56±0.02i	0.66±0.01def	12.38±5.29jkl
X4	0.47±0.56a	0.23±0.02hij	0.28±0.02fg	0.76±0.01efghi	0.54±0.05fgh	12.72±6.26ijkl
X5	0.14±0.01ab	0.24±0.02ghij	0.27±0.04g	0.75±0.04efghi	0.66±0.01def	12.80±5.37hijkl
X6	0.16±0.00ab	0.24±0.00hij	0.29±0.02efg	0.84±0.02defgh	0.64±0.03defg	12.66±5.50hijkl
X7	0.15±0.00ab	0.23±0.00hij	0.31±0.04defg	0.96±0.03bcdef	0.64±0.02efg	12.84±5.53hijkl
X8	0.14±0.02ab	0.24±0.00hij	0.26±0.03g	0.95±0.01bcdef	0.66±0.02def	12.97±5.57ghijk
X9	0.17±0.02ab	0.26±0.04fghij	0.33±0.02cdefg	0.94±0.05bcdefg	0.60±0.12fg	13.21±5.65ghijk
X10	0.19±0.01ab	0.29±0.01defgh	0.33±0.01cdefg	0.98±0.04bcde	0.67±0.02cdef	13.53±5.72fghij
X11	0.15±0.01ab	0.23±0.01hij	0.43±0.00abc	0.67±0.04ghi	0.66±0.02def	13.16±5.62ghijk
X12	0.16±0.02ab	0.27±0.02efghi	0.31±0.02defg	0.82±0.26defghi	0.66±0.01def	13.77±5.89efghij
X13	0.15±0.02ab	0.31±0.01bcdef	0.36±0.05bcdefg	0.97±0.16bcde	0.69±0.01bcdef	13.17±5.70ghijk
X14	0.12±0.02b	0.23±0.00hij	0.35±0.03bcdefg	0.74±0.04efghi	0.69±0.07bcdef	13.54±5.62fghij
X15	0.16±0.02ab	0.27±0.02fghi	0.34±0.02bcdefg	0.94±0.05bcdefg	0.68±0.01cdef	13.29±5.80fghijk
X16	0.17±0.02ab	0.24±0.02hij	0.31±0.02defg	0.98±0.03bcde	0.70±0.07bcdef	13.76±6.05efghij
X17	0.15±0.01ab	0.27±0.01fghi	0.38±0.01bcde	1.06±0.11bcd	0.67±0.01bcdef	13.96±5.96defgh
X18	0.14±0.02ab	0.33±0.01bcd	0.34±0.03cdefg	0.96±0.04bcdef	0.66±0.01def	14.60±6.61cdef
X19	0.14±0.02ab	0.33±0.01bcd	0.36±0.00bcdefg	1.04±0.05bcd	0.83±0.05bc	14.34±5.76cdefg
X20	0.15±0.00ab	0.33±0.01bcd	0.43±0.02bc	0.88±0.02cdefgh	0.64±0.05fg	14.31±6.25cdefg
X21	0.15±0.02ab	0.31±0.02bcdef	0.33±0.01cdefg	0.97±0.03bcde	0.81±0.04bcd	13.87±6.09defghi
X22	0.16±0.01ab	0.32±0.01bcde	0.33±0.01cdefg	0.77±0.01efghi	0.49±0.09gh	15.26±6.45abcd
X23	0.15±0.01ab	0.29±0.04cdefg	0.36±0.03bcdefg	1.34±0.01a	0.80±0.06bcde	15.41±6.41abc
X24	0.15±0.02ab	0.33±0.02bcd	0.45±0.01ab	0.67±0.03hi	0.83±0.02b	14.79±6.63cdef
X25	0.15±0.00ab	0.34±0.03bc	0.40±0.09bcd	1.06±0.05bcd	1.07±0.11a	15.00±6.54bcde
X26	0.15±0.00ab	0.35±0.01b	0.41±0.03bcd	1.13±0.01abc	1.01±0.01a	14.93±6.45bcde
X27	0.16±0.01ab	0.33±0.03bcd	0.38±0.08bcdef	1.06±0.07bcd	1.00±0.05a	15.30±6.65abc
X28	0.15±0.01ab	0.34±0.01bcd	0.40±0.05bcd	0.95±0.21bcdef	1.03±0.04a	15.10±6.32abcd
X29	0.16±0.01ab	0.33±0.02bcd	0.39±0.03bcde	0.70±0.02fghi	1.06±0.04a	16.08±6.25ab
X30	0.15±0.01ab	0.43±0.01a	0.53±0.03a	1.19±0.05ab	1.08±0.06a	16.29±6.85a

“*”表示必需氨基酸（EAA）。
“*” indicates the essential amino acid (EAA).

（Leu）含量平均为 0.88%，晋燕 6 号和 ITAO-6 有较高的含量，是良好的支链氨基酸来源品种。坝苲系列中坝苲 1 号、3 号有较低的缬氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸、亮氨酸和苯丙氨酸含量；ITAO-3、ITAO-6、ITAO-63、Shadow 和晋燕 6 号等品种的含量较高。

2.3 不同燕麦品种的矿物质含量分析

燕麦籽粒中含有丰富的矿质元素（表 4），包括钠、钾、镁、钙常量元素，也含有锰、铁、镍、铜、锌、硒微量元素。在常量元素中，钠含量最高的是白燕 2 号，为 144.03 mg/kg，最低的是白燕 3 号，为 68.47 mg/kg。钾含量最高的是坝菽 8 号，为 5135.02 mg/kg，最低的是白燕 7 号，为 3018.76 mg/kg。

镁含量最高的是白燕 6 号，为 2114.39 mg/kg，最低的是晋燕 9 号，为 1183.88 mg/kg。钙含量最高的是白燕 6 号，为 1064.55 mg/kg，最低的是坝菽 8 号，为 570.73 mg/kg。晋燕 9 号、Navan 和白燕 2 号的硒元素含量较高。总体而言，燕麦的多种矿质元素分布较为均匀，国内外不同品种间没有发现显著的分

表 4 不同燕麦品种矿物质含量
Table 4 Mineral contents of different oat varieties

材料 Material	Na	K	Mg	Ca	Mn*
X1	98.68±0.05ef	4008.63±1.96mn	1294.37±6.89uv	762.96±2.03hij	37.80±0.21ijk
X2	99.45±0.04ef	3442.41±19.00st	1507.57±1.74mno	620.69±2.03qr	51.14±1.52a
X3	102.88±0.31e	4307.18±13.89hi	1606.39±10.09hi	690.54±4.99lmn	34.29±0.16no
X4	70.62±0.56l	4532.70±46.63ef	1788.17±13.81cd	602.00±7.86qrs	26.60±0.91u
X5	131.96±2.84b	5135.02±121.73a	1254.98±15.73v	570.73±23.10s	30.13±0.16st
X6	110.05±1.16d	4141.77±14.16jkl	1480.18±4.52op	681.82±2.49mno	22.72±0.28v
X7	144.03±0.94a	4417.66±31.76fgh	1565.86±3.74ijkl	725.93±5.65jkl	35.36±0.03mn
X8	68.47±2.24l	4714.74±72.44cd	1672.88±11.05fg	798.05±2.13fgh	38.34±0.21hij
X9	76.57±0.38jk	4948.99±24.40b	1812.04±8.18c	871.40±3.15de	40.64±0.47ef
X10	82.50±0.87hi	3972.30±27.58mno	2114.39±16.53a	1064.55±55.14a	43.88±0.23c
X11	98.44±0.09ef	3018.76±21.37v	1391.45±15.22rs	900.38±9.43cd	39.71±0.04fgh
X12	87.06±0.62gh	3498.19±28.48s	1471.78±5.88op	802.57±1.75fgh	37.41±0.09jk
X13	99.04±0.10ef	3344.21±51.89tu	1317.88±13.03tu	744.11±2.94ijk	35.76±0.21lmn
X14	99.32±0.11ef	3786.41±21.28qr	1493.74±5.46no	704.12±6.27lmn	31.67±0.28qr
X15	100.47±0.81ef	3920.34±3.06nop	1635.28±14.56gh	592.49±3.40rs	33.65±0.04op
X16	114.25±0.81d	4087.53±30.75klm	1742.78±14.50de	626.88±2.63pqr	37.09±0.16jkl
X17	140.43±1.56a	3836.35±1.97pq	1880.44±71.54b	770.66±3.02hi	39.41±0.24fgh
X18	71.38±0.21l	3230.30±67.39u	1572.33±0.62ijk	947.09±8.56b	41.34±0.15de
X19	83.71±0.25hi	3933.52±1.89nop	1514.10±2.95lmno	832.82±15.26ef	45.49±0.48b
X20	91.61±3.52g	4032.64±19.15lmn	1417.86±1.24qr	815.82±2.43fg	28.00±0.58u
X21	97.86±0.20f	3705.03±33.44r	1183.88±5.09w	922.19±4.16bc	30.36±0.09rst
X22	99.14±0.03ef	3875.89±28.27opq	1356.34±10.24st	645.71±6.38opq	34.89±0.26no
X23	99.89±0.14ef	4191.87±3.79ijk	1443.17±4.98pq	716.85±4.26klm	36.61±0.22klm
X24	123.76±5.30c	4213.18±4.80ij	1501.65±0.45no	672.65±4.49no	38.97±0.24ghi
X25	99.69±0.02ef	4347.10±21.12gh	1535.99±3.86klmn	665.57±1.81nop	40.18±0.16efg
X26	98.83±0.07ef	4459.66±12.76fg	1522.50±5.28klmno	615.33±1.72qr	24.21±1.09v
X27	96.71±1.40f	4817.45±51.64c	1552.92±8.00jklm	777.89±3.21ghi	29.51±0.32t
X28	85.75±0.50h	4603.39±5.67de	1586.51±10.40hij	753.73±4.02ijk	31.13±0.25rs
X29	79.76±1.44ij	4202.32±1.73ijk	1689.02±6.35f	857.66±7.66de	32.71±0.24pq
X30	73.21±0.15kl	4184.28±2.41jk	1707.41±13.84ef	935.82±6.90bc	42.81±0.70cd
材料 Material	Fe*	Ni*	Cu*	Zn*	Se*
X1	18.51±0.32nopq	1.76±0.04e	2.62±0.01nop	25.15±0.05jklmn	0.24±0.01rs
X2	12.42±1.10u	0.57±0.01jklm	3.37±0.02fgh	24.20±0.15klmnop	0.30±0.00jk
X3	18.17±0.03pq	0.45±0.00klmnopq	1.70±0.05u	22.66±0.12opqr	0.27±0.01t
X4	22.81±0.32hijk	2.74±0.07a	3.83±0.08cd	20.31±0.89s	0.26±0.00kl
X5	32.96±0.77c	0.56±0.01jklmn	5.58±0.24a	27.18±0.60ghij	0.29±0.00nop
X6	27.64±0.49de	0.50±0.01klmnopq	2.68±0.01no	29.56±0.26cdef	0.35±0.01opqr
X7	37.46±3.71b	0.59±0.01jkl	2.96±0.01kl	31.35±1.02c	0.59±0.01lm
X8	20.22±0.22lmnop	1.31±0.01h	3.11±0.05ijk	56.32±3.03a	0.46±0.02hi
X9	45.79±0.69a	1.63±0.04ef	3.33±0.01gh	25.33±0.08jklm	0.41±0.10a

续表 4 Table 4 (continued)

材料 Material	Fe*	Ni*	Cu*	Zn*	Se*
X10	20.69±0.08klmno	2.38±0.15b	4.21±0.10b	24.62±0.08klmno	0.29±0.01e
X11	16.19±0.09qrst	0.93±0.16i	2.15±0.03s	25.71±0.22ijkl	0.28±0.00g
X12	15.05±0.19st	0.54±0.00jklmno	2.38±0.03qr	27.74±0.16fghi	0.32±0.01lm
X13	18.27±0.04opq	0.42±0.00mnopqr	2.54±0.01opq	30.52±0.17cd	0.22±0.00mno
X14	20.91±0.09klmn	0.34±0.01qr	2.76±0.02mn	34.26±0.95b	0.28±0.00st
X15	24.51±0.30fghi	0.37±0.01pqr	3.26±0.03ghi	24.50±0.01klmno	0.30±0.00mno
X16	26.93±0.11def	0.43±0.00lmnopqr	2.49±0.01pq	23.52±0.07mnopqr	0.43±0.01kl
X17	34.64±0.37c	0.52±0.01jklmnop	2.65±0.00nop	21.98±0.06qrs	0.51±0.01f
X18	23.92±0.26ghij	0.61±0.01jk	2.42±0.01qr	23.89±0.03lmnopq	0.57±0.01c
X19	21.68±0.13jklm	1.93±0.11d	1.94±0.06t	23.12±0.30nopqr	0.49±0.01b
X20	17.84±0.20pqr	1.40±0.03gh	3.18±0.01hij	24.96±0.08klmn	0.50±0.01d
X21	15.48±0.13rst	1.54±0.05fg	2.72±0.01no	28.94±0.21defg	0.55±0.02cd
X22	14.05±0.16tu	2.11±0.05c	2.28±0.06rs	24.78±0.05klmno	0.20±0.01b
X23	17.09±0.08qrs	1.45±0.03gh	3.04±0.02jk	26.26±0.10hijk	0.21±0.00t
X24	19.85±0.12mnop	0.47±0.01klmnopq	2.81±0.01lmn	30.01±0.11cde	0.25±0.01pqr
X25	16.82±0.19qrs	0.36±0.00qr	3.68±0.03de	28.14±0.14efgh	0.29±0.00mn
X26	29.13±0.30d	0.40±0.01nopqr	3.43±0.03fg	23.39±0.06mnopqr	0.26±0.00opq
X27	25.65±0.17efg	0.39±0.00opqr	3.97±0.03c	17.85±0.85t	0.24±0.01qr
X28	25.06±0.10fgh	0.29±0.01r	3.54±0.07ef	22.20±0.25pqrs	0.33±0.01ij
X29	22.29±0.08ijkl	0.53±0.00jklmnop	3.00±0.01jkl	21.71±0.14rs	0.37±0.00h
X30	26.42±0.19ef	0.67±0.05j	2.93±0.02klm	23.78±0.04lmnopqr	0.44±0.01ef

“*” 为微量元素，其余为常量元素。
“*” indicates trace elements, and the rest are constant elements.

2.4 不同燕麦品种的营养品质灰色关联度分析

采用等权关联度和加权关联度分析，结果如表 5 所示。30 种燕麦品种的营养品质的等权关联

度排序和加权关联度排序差异较小，表明结果真实可信。最佳综合营养品质居前 3 位的分别为坝蓼 8 号、ITAO-63 和白燕 6 号，说明这些品种在四

表 5 30 个燕麦品种灰色关联度及排序
Table 5 Grey correlative degree and order of 30 oat varieties

材料 Material	等权关联度 Equal weight correlation degree	排序 Ranking	加权关联度 Weighted correlation degree	排序 Ranking	材料 Material	等权关联度 Equal weight correlation degree	排序 Ranking	加权关联度 Weighted correlation degree	排序 Ranking
X1	0.5419	25	0.5552	26	X16	0.5333	27	0.5488	28
X2	0.5548	20	0.5718	20	X17	0.5889	7	0.6055	7
X3	0.5314	28	0.5491	27	X18	0.5712	14	0.5863	14
X4	0.5757	11	0.5886	12	X19	0.5621	17	0.5750	18
X5	0.6490	1	0.6579	1	X20	0.5546	21	0.5695	21
X6	0.5769	10	0.5895	11	X21	0.5714	13	0.5850	15
X7	0.5752	12	0.5895	10	X22	0.6056	4	0.6155	5
X8	0.5814	9	0.5923	9	X23	0.5818	8	0.6002	8
X9	0.6053	5	0.6175	4	X24	0.5408	26	0.5566	25
X10	0.6275	3	0.6432	3	X25	0.5588	18	0.5728	19
X11	0.5536	23	0.5687	23	X26	0.5241	30	0.5399	30
X12	0.5673	16	0.5843	16	X27	0.5550	19	0.5753	17
X13	0.5538	22	0.5692	22	X28	0.5276	29	0.5469	29
X14	0.6017	6	0.6137	6	X29	0.5693	15	0.5871	13
X15	0.5464	24	0.5611	24	X30	0.6414	2	0.6555	2

川省成都平原地区种植下品质较好。

3 讨论

3.1 不同燕麦品种的主要营养成分

前人^[24-25]研究表明, 燕麦籽粒的蛋白质含量在禾谷类作物中较高, 因此在改性蛋白的生产加工上具有独特的优势。如定莠 1 号的粗蛋白含量达 23.76%, 该品种可能是优质的谷物蛋白来源。此外, 不同品种的蛋白差异较大, 这说明燕麦蛋白质含量可能受到品种和产地的影响。相较于其他谷类作物, 燕麦淀粉具有较好的溶解度和较低的膨润力^[9]。因此, 燕麦粉在食品加工和化工原料上被广泛使用, 如用于制造淀粉膜层和植物凝胶, 也是植物抗性淀粉的良好来源^[26-27]。总体来说, 坝莠系列品种的粗淀粉含量较高, 坝莠 6 号的粗淀粉 (73.16%) 最高, 可能是燕麦淀粉加工的优质品种。燕麦的油脂在我国的应用开发仍较为缓慢, 但其良好的降低胆固醇和生理锁水效果说明其有巨大应用潜力^[11-12]。王燕^[12]研究表明裸燕麦的油脂和脂肪酸受产地和年份影响显著, 其含量范围为 2.60%~10.97%, 这与本研究的结果较为相似。本研究表明, 白燕 10 号和 8 号具有较高的油脂含量, 可能是燕麦胚芽油提取加工的优质来源。此外, 燕麦富含的多酚、黄酮和植酸等物质具有良好生物活性, 其营养价值被越来越多的人所认可^[28-29]。前人^[11-13]研究表明, 燕麦多酚具有良好的抗氧化和预防急性肝损伤的功效, 而燕麦黄酮是膳食营养成分, 具有较好的抗衰老、抗氧化和抗肿瘤活性^[14]。不同燕麦品种的总酚和黄酮类物质的差异较大, 其中高总酚和高黄酮品种可以作为燕麦功能成分原料进行开发。

3.2 不同燕麦品种的氨基酸和矿质营养

氨基酸是构成蛋白质的基本单位, 也是进行燕麦营养开发和研究利用的重要考察指标。王婧等^[30]研究发现, 在 6 种粮食作物中, 燕麦总氨基酸含量最高, 表现为燕麦>小麦>荞麦>大麦>水稻。本研究发现, 来自意大利的材料的必需氨基酸含量总体较高。如 ITAO-27 的必需氨基酸含量可达 3.94%, 可能是重要的品质育种的亲本来源。研究^[31]表明, 支链氨基酸是人体必需的重要功能性氨基酸, 可以帮助人体调节生理功能和改善机体代谢等, 如亮氨酸可以促进人体对蛋白质的合成和能量代谢, 从而帮助生长发育。总体而言, 30 份燕麦的亮氨酸平均

含量为 0.88%, 范围为 0.66% (坝莠 1 号)~1.10% (ITAO-6), 这与王婧等^[30]研究结果类似。本研究表明, ITAO-3、ITAO-6、ITAO-63 和 Shadow 等材料氨基酸含量较高, 这说明氨基酸含量可能与品种的来源和生长环境密切相关。值得一提的是, 尽管脯氨酸是一种非必需氨基酸, 却与植物逆境胁迫和环境适应密切相关, 如干旱^[32]、盐碱^[33]、高温^[34]、铝离子^[35]和重金属^[36]胁迫等。

30 个燕麦品种中, ITAO-27、蒙燕 2 号和 ITAO-63 有较高的脯氨酸含量。矿质元素只能通过食物摄取, 不能通过人体合成。目前, 大量人群面临潜在的矿质元素缺乏症^[37]。杂粮作物是主要粮食作物的重要组成, 燕麦作为杂粮作物重要代表, 其籽粒中含有丰富的矿质元素^[17]。目前, 国内外对不同燕麦资源矿质元素的研究仍较少。这些矿质元素在一些品种之间差异较大, 说明燕麦种质资源在矿质元素上仍存在丰富的遗传多样性。常量元素含量总体是钾>镁>钙>钠, 微量元素总体是锰>锌>铁>铜>镍>硒, 这与王敏^[38]和冯亮等^[20]的研究结果类似。值得一提的是, 中国是世界卫生组织认定的全球 40 个低硒国家之一, 我国 72% 的地区仍处于低硒或缺硒的状态^[39]。富含硒元素的农产品食品被认为是最安全、最有效的补硒办法^[40], 燕麦食品是应对我国硒缺乏的重要来源之一。本研究表明, 白燕 2 号等品种可能作为富含微量元素品种的骨干亲本, 也可以将之籽粒作为优质高微量元素原料进行开发利用。

3.3 灰色关联度综合评价

近年来, 我国燕麦种植面积和产量不断加大, 特别是随着人们日常饮食结构的调整, 大量燕麦产品日益丰富, 如燕麦粉、燕麦片和燕麦饮品等产品的需求量急剧增加^[41]。因此, 燕麦产业将朝向选育优质燕麦品种、改良燕麦营养品质和深入开发燕麦保健功能等方向不断推进。本研究显示, 在评价指标同等重要的情况下, 等权关联度分析可以用于评价不同品种 (资源) 的总体性状, 然而实际上不同指标的占比并不完全一致^[42]。因此本研究引入了加权灰色关联度的分析方法对这些资源进行系统评价。前五的排序仅定莠 1 号和白燕 5 号稍有变化, 提示这 2 种分析方法均有价值, 可以相互参考。本研究利用 2 种灰色关联度分析, 评价了 30 份种植在成都平原燕麦的品质, 得出坝莠 8 号、ITAO-63

和白燕6号的综合评分较高且稳定,提示这3个品种适合在成都平原环境下种植的品质较好。

4 结论

30个不同来源的燕麦品种(材料)各营养指标、氨基酸含量以及矿质元素在品种间营养成分差异显著,遗传多样性十分丰富。通过灰色关联度分析,认为坝蓓8号、ITAO-63和白燕6号的综合营养指标较好,可作为功能性食品开发燕麦栽培的优质品种或品种培育的骨干亲本。

参考文献

- [1] 张君,段玉,刘亚红,等.不同施肥处理对燕麦产量、养分吸收和水肥利用效率的影响.北方农业学报,2020,48(5):62-68.
- [2] 耿小丽,张榕,张少平,等.130份燕麦种质表型性状多样性分析及评价.草业科学,2020,37(10):2022-2034.
- [3] 贾志锋,马祥,雷生春,等.燕麦种质资源在青海生态区的形态多样性评价.种子,2019,38(12):58-63.
- [4] 张向前,刘景辉,齐冰洁,等.燕麦种质资源主要农艺性状的遗传多样性分析.植物遗传资源学报,2010,11(2):168-174.
- [5] 王伟伟,赵攀衡,齐冰洁,等.钾肥对不同燕麦品种产量和品质的影响.北方农业学报,2017,45(2):42-45.
- [6] 史京京,薛盈文,郭伟,等.引进燕麦种质资源饲草产量与饲用营养价值评价.麦类作物学报,2019,39(9):1063-1071.
- [7] 智勇,齐冰洁,邢义莹,等.不同燕麦品种产量和品质性状的差异分析.内蒙古农业科技,2014(6):7-8,37.
- [8] 刘文婷,张新军,杨才,等.裸燕麦营养品质的差异性及其形成因子解析.作物杂志,2020(5):140-147.
- [9] 张杰,何义萍,韩小贤,等.燕麦淀粉与常见淀粉的性质对比研究.粮食与饲料工业,2012(11):20-22,28.
- [10] 顾军强,钟葵,王立,等.品种对燕麦淀粉性质及加工稳定性影响.中国粮油学报,2014,29(8):44-49.
- [11] Tong L T, Zhong K, Liu L, et al. Oat oil lowers the plasma and liver cholesterol concentrations by promoting the excretion of faecal lipids in hypercholesterolemic rats. Food Chemistry, 2014, 142: 129-134.
- [12] 王燕.燕麦品种品质分析及油脂、多酚性质研究.北京:中国农业科学院,2012.
- [13] Mallory W, Ana P L R, Farah H, et al. Phenolic acids, avenanthramides, and antioxidant activity of oats defatted with hexane or supercritical fluid. Journal of Cereal Science, 2018, 79: 21-26.
- [14] Rodríguez-García C, Sánchez-Quesada C, Gaforio J. Dietary flavonoids as cancer chemopreventive agents: An updated review of human studies. Antioxidants (Basel), 2019, 8(5): 137.
- [15] Kumar A, Jaiswal R S, Verma M L, et al. Effect of nitrogen level and cutting management on yield and quality of different varieties of oat fodder. Indian Journal of Animal Nutrition, 2001, 18(3): 262-266.
- [16] 赵丽那,严俊,薛文韬,等.燕麦籽粒多组分营养性状的相关性分析.江西农业大学学报,2016,38(4):623-630.
- [17] 齐冰洁,王敏,张智勇,等.燕麦种质资源矿质元素的多样性分析.作物杂志,2020(4):72-78.
- [18] 张敏明,袁林喜,尹雪斌,等.人体发硒水平影响因素研究进展.生物技术进展,2017,7(3):187-192.
- [19] Watanabe L M, Barbosa Júnior F, Jordão A A, et al. Influence of HIV infection and the use of antiretroviral therapy on selenium and selenomethionine concentrations and antioxidant protection. Nutrition, 2016, 32(11/12): 1238-1242.
- [20] 冯亮,兰航,涂松林,等.燕麦籽粒中污染元素检测分析.种子,2020,39(9):80-83,88.
- [21] 范昱,赖弟利,王佳俊,等.以色列野生燕麦物候及农艺性状与起源生态地理因素的相关性.麦类作物学报,2019,39(1):56-63.
- [22] 周月霞,范昱,阮景军,等.燕麦籽粒营养与农艺性状相关性分析.作物杂志,2021(2):165-172.
- [23] 陈晶华,陈瑾,范艳丽,等.宁夏地区不同品种马铃薯的营养组成分析.食品研究与开发,2020,41(17):156-160,171.
- [24] 刘会省,王彦明,任文秀.燕麦营养成分研究进展.现代食品,2021(6):127-130,141.
- [25] 徐向英,王岸娜,林伟静,等.不同燕麦品种的蛋白质营养品质评价.麦类作物学报,2012,32(2):356-360.
- [26] 田斌强,赵莉君,谢笔钧.燕麦淀粉研究进展.食品科学,2014,35(21):287-291.
- [27] 邢明.燕麦淀粉为基质的脂肪替代品的研究.武汉:武汉工业学院,2011.
- [28] Qi B, Gong C, Lu F J, et al. Enzymatic action mechanism of phenolic mobilization in oats (*Avena sativa* L.) during solid-state fermentation with *Monascus anka*. Food Chemistry, 2018, 245: 297-304.
- [29] 武娇,任祎,孙希平,等.微波辅助提取燕麦总酚及其抗氧化能力评价.中国农学通报,2015,31(7):229-234.
- [30] 王婧,李小平,刘柳,等.燕麦等五种谷物的氨基酸含量综合评价.麦类作物学报,2019,39(4):438-445.
- [31] Duan Y, Li F, Li Y, et al. The role of leucine and its metabolites in protein and energy metabolism. Amino Acids, 2016, 48(1): 41-51.
- [32] 孙明伟,徐月乔,王贵,等.松嫩草地两种生态型羊草根际效应和光合生理对干旱胁迫的响应.中国草地学报,2021,43(5):8-17.
- [33] 胡甜,叶苏梅,吴美燕,等.乌柏幼苗耐盐碱胁迫能力研究.安徽农学通报,2021,27(8):17-19,68.
- [34] 田茂燕,向婷颖,钟川,等.番茄砧木耐热性评价及热胁迫生理响应研究.中国蔬菜,2021(5):39-47.
- [35] 肖家旭,郑开敏,马俊英,等.外源NO对铝胁迫下西瓜幼苗生长及生理特性的影响.农业环境科学学报:1-12.
- [36] 韩淑梅,陈琳,刘玉婷,等.外源水杨酸对镉胁迫下孔雀草生理特性的影响.北方园艺,2021(9):68-73.
- [37] Liu 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.
- [38] 王敏.燕麦种质资源主要微量元素含量的多样性及硒富集效应研究.呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.
- [39] Li N, Gao Z, Luo D, et al. Selenium level in the environment and the population of Zhoukoudian area, Beijing, China. Science of the Total Environment, 2007, 381(1/3): 105-111.
- [40] 袁丽君,袁林喜,尹雪斌,等.硒的生理功能、摄入现状与对策研究进展.生物技术进展,2016,6(6):396-405.
- [41] 杜忠.燕麦在中国的利用现状综述.安徽农学通报,2018,24(20):54-57.
- [42] 柴华,杨翌,申忠宝,等.9个燕麦品种在齐齐哈尔地区的农艺性状及饲草品质评价.麦类作物学报,2023,43(11):1426-1433.

Nutritional Composition Analysis of Different Oats Varieties

Fan Yu^{1,2}, Feng Liang³, Wang Junzhen⁴, Yang Qiaohui¹, Ren Yuanhang¹,
Zhang Kaixuan², Zou Liang¹, Zhou Meiliang², Xiang Dabing¹

(¹College of Food and Biological Engineering, Chengdu University/Key Laboratory of Coarse Cereal Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Sichuan Engineering & Technology Research Center of Coarse Cereal Industrialization, Chengdu 610106, Sichuan, China; ²Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; ³Chengdu Institute of Food Inspection/National Key Laboratory for Market Regulation (Nutrition and Health Chemometrics and Applications), Chengdu 610106, Sichuan, China; ⁴Liangshan Yi Autonomous Prefecture Agricultural Science Research Institute, Xichang 615000, Sichuan, China)

Abstract Thirty domestic and international oat cultivars were analyzed for their essential nutrients, amino acids, and mineral contents. The technique of grey correlation degree analysis was used to thoroughly assess their nutritional composition. The findings demonstrated that compositions of some cultivars differed significantly, indicating that oats possessed a high degree of genetic variation. The highest crude protein content was found in Dingyou 1 (23.76%), the highest crude starch content was found in Bayou 6 (73.16%), and the highest crude fat content was found in Baiyan 8 (10.03%). Among the functional nutrition indexes, the contents of total flavonoids ranged from 420.08 (Jinyan 9) to 3395.12mg/kg(Bayou 9). Total phenol content ranged from 1516.02 (Bayou 5) to 5463.71 mg/kg (ITAO-63). Phytic acid content ranged from 8.74 (Shadow) to 25.91 mg/kg (Keyan 1). Compared with other amino acids, the contents of Glu, Leu, Asp, Arg were higher, while the contents of Cys and Met were lower. The highest content of total amino acid was ITAO-63 (16.29%), the lowest was Bayou 1 (11.57%). Among them, the essential amino acid of the materials from Italy was generally higher, and the content of ITAO-27 (3.94%) was the highest. The mineral elements of different resources of oats had particularly rich genetic diversity. The order of major elements content was K > Mg > Ca > Na, while the order of trace elements was Mn > Zn > Fe > Cu > Ni > Se. Ultimately, the equal-weight correlation degree and weighted correlation degree research revealed that Bayou 8, ITAO-63, and Baiyan 6 were the top three comprehensive nutritional attributes among 30 oat types. These cultivars can serve as the foundation for superior oat variety breeding or as specialty cultivars for the creation and application of beneficial foods.

Key words Oat; Nutrient composition; Amino acid; Mineral elements; Grey correlation analysis