

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.03.007

刘纯汐, 何锐, 刘伟, 等. 重庆地产高粱理化性质分析及抗消化品种筛选[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(3): 75-83.

LIU C X, HE R, LIU W, et al. Analysis of physicochemical properties and screening of digestible resistant varieties of sorghum in Chongqing[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(3): 75-83.

重庆地产高粱理化性质分析及 抗消化品种筛选

刘纯汐¹, 何锐¹, 刘伟², 刘丽², 周斌³, 钟耕¹✉

(1. 西南大学 食品科学学院, 重庆 400715;

2. 重庆市农业技术推广总站, 重庆 400020;

3. 重庆市粮油质量监督检验站, 重庆 400040)

摘要: 为了解重庆地产高粱品质并对当地高粱产业发展提供理论和应用指导, 实验收集了12个重庆主栽高粱品种, 以市购我国东北、西北两个地区的主产高粱各两个品种作对比, 对其理化成分进行了测定和主成分分析。同时, 测定高粱淀粉消化性, 筛选出抗消化高粱品种。结果表明, 16种高粱理化性质差异显著 ($P < 0.05$), 千粒重在 9.86~30.14 g 之间, 淀粉、蛋白质和脂肪含量范围分别为 39.41%~84.86%、7.21%~12.44%、1.80%~4.92%, 单宁和植酸含量范围是 0.19%~2.12% 和 8.42%~15.61%, 含有丰富的氨基酸和矿物质。通过对高粱进行体外消化研究, 表明云阳茅台红2号、市购东北高粱2号、垫江红缨子等品种淀粉消化率 (C_{∞}) 较低, 抗性淀粉 (RS) 含量较高, 可用于制作低GI食品、低热值食品, 满足特殊消费人群的食谱需求。本研究可为重庆高粱品质评价和应用提供一定参考。

关键词: 高粱; 理化性质; 淀粉消化; 主成分分析

中图分类号: TS210.2; S-3 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2024)03-0075-09

网络首发时间: 2024-03-15 08:59:40

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20240314.1650.002>

Analysis of Physicochemical Properties and Screening of Digestible Resistant Varieties of Sorghum in Chongqing

LIU Chun-xi¹, HE Rui¹, LIU Wei², LIU Li², ZHOU Bin³, ZHONG Geng¹✉

(1. School of Food Science and Engineering, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Chongqing Agricultural Technology Extension Station, Chongqing 400020, China;

3. Chongqing Grain and Oil Quality Supervision and Inspection Station, Chongqing 400040, China)

Abstract: In order to understand the quality of local sorghum in Chongqing and provide theoretical and

收稿日期: 2024-01-11

基金项目: 川粮油加工关键技术及产品开发 (2020YFN0148); 重庆市研究生教育教学改革研究项目 (yjg202009); 重庆市现代山地特色高效农业产业技术体系(创新团队 2021[4]号); 重庆市技术创新与应用发展专项 (cstc2021jscx-gksbX0014)

Supported by: Sichuan Grain and Oil Processing Key Technology and Product Development (No.2020YFN0148); Postgraduate Education and Teaching Reform Research Project in Chongqing(No.yjg202009); Modern Mountain Characteristic and Efficient Agricultural Industrial Technology System of Chongqing (No. 2021[4]); Chongqing Technical Innovation and Application Development Special Project (No. cstc2021jscx-gksbX0014)

作者简介: 刘纯汐, 女, 2000年出生, 在读硕士生, 研究方向为粮食加工。E-mail: chunxi0824@163.com

通讯作者: 钟耕, 男, 1964年出生, 博士, 教授, 研究方向为粮食工程、油脂与植物蛋白。E-mail: zhongdg@126.com

applied guidance for the development of local sorghum industry, 12 main sorghum varieties in Chongqing were collected in the experiment. The physical and chemical components of the two main sorghum varieties in the northeast and northwest were measured and analyzed by principal component analysis, and their components and uses were correlated. At the same time, the digestibility of sorghum starch was determined to screen out the anti-digestible sorghum varieties. The results showed that there were significant differences in the physical and chemical properties of 16 sorghum varieties ($P < 0.05$). The 1 000-grain weight ranged from 9.86 to 30.14 g. The contents of starch, protein and fat ranged from 39.41% to 84.86%, 7.21% to 12.44% and 1.80% to 4.92%, respectively. The contents of tannin and phytic acid ranged from 0.19% to 2.12% and 8.42% to 15.61%, respectively. They were rich in amino acids and minerals. Through the study of in vitro digestion of sorghum, it was shown that the starch digestibility (C_{∞}) of Yunyang Maotaihong 2, Northeast Sorghum 2, Dianjianghongyingzi and other varieties was lower, and their resistant starch (RS) content was higher, indicating that these varieties were suitable for making low GI food and low calorific value food to meet the recipes of special consumers. This study can provide a reference for the quality evaluation and application of sorghum in Chongqing.

Key words: sorghum; physical and chemical properties; starch digestion; principal component analysis

高粱 (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) 是禾本科的一种谷类作物, 距今已有 3 700 年以上的历史^[1]。高粱是世界上种植量居第五位的谷物, 也是亚洲和非洲国家重要的食粮和加工用粮。重庆地区热量丰富、雨量充沛的气候条件综合其土壤和生态环境, 使高粱成为其常见农作物之一。

当前, 亚健康人群增多, 健康产业发展到新阶段, 全方位健康饮食成为人们关注的焦点^[2]。基于高粱富含抗营养因子、抗性淀粉等, 除用于酿酒外, 亦可用于制作馒头、面包、饼干和粥等健康食物^[3]。但目前重庆地产高粱的应用研究主要集中在酿酒, 大量文献对酿酒高粱的性质进行测定, 测定指标也集中在营养物质、单宁等^[4], 但对高粱植酸的测定及高粱抗消化性研究鲜有涉及。谭斌^[5]讨论了食用高粱的用途, 主要是制作传统食品、休闲食品和烘焙食品三大类, 同时高粱麸皮含有多种丰富的生物素, 基于其生理活性, 可单独分离出来制作食品。

改革开放以来, 随着温饱问题的解决, 中国高粱食用消费量开始由增转降^[6], 含淀粉原料的工业化食品加工原料大多集中在玉米、稻米和小麦等, 尽管高粱消化性差且含有多种类、高含量的抗营养因子^[7], 但将高粱作为食材的研究和应用仍远远滞后于其他谷物, 且对重庆地产品种消化性利用与开发较少。重庆地区高粱产量高, 用

于酿酒、饲养家禽家畜和食用等。随着人们生活品质和饮食习惯的变化, 重庆高粱的用途逐渐转变为酿酒为主, 但高粱的食用品质和其潜在的生理活性具有重要的应用价值, 不可忽视。因此本实验收集重庆市不同区县主产高粱品种为研究对象, 以市购东北、西北主产高粱各两种为对照, 测定理化成分并分析, 总结特色, 凝炼价值, 为重庆地产高粱增值利用寻求方向和提供理论依据, 以期促进重庆和周边高粱产业发展。

1 材料与方法

1.1 实验材料

选取生产上被普遍推广的重庆地产高粱 12 种和市购东北、西北产高粱各 2 种, 共 16 种, 高粱经粉碎过 40 目筛储存备用, 品种、名称见表 1。

表 1 实验高粱品种
 Tabel 1 Sorghum varieties for test

序号	品种	序号	品种
1	云阳茅台红 2 号	9	綦江红缨子
2	垫江永平红缨子	10	秀山晋杂 22 号
3	云阳晋渝糯 3 号	11	秀山红梁丰 1 号
4	江小白沪糯 8 号	12	垫江红缨子
5	江小白金皮糯 1 号	13	市购东北高粱 1 号
6	忠县独珠村红缨子	14	市购东北高粱 2 号
7	忠县双桂大塘冀酿 3 号	15	市购西北高粱 1 号
8	荣昌红缨子	16	市购西北高粱 2 号

氢氧化钠、硼酸、石油醚等试剂均为分析纯：重庆钛新化工有限公司；植酸钠、淀粉葡萄糖苷酶(100 000 U/mL)：上海源叶生物科技有限公司； α -淀粉酶(40 000 U/g)：广州罗恩生物科技有限公司；总淀粉含量测试盒：南京建成生物工程研究所；直链淀粉测试盒：苏州格锐思生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

Centrifuge 5804r 离心机：德国 Eppendorf 公司；FD-C20002 型电子天平：昆山优科维特电子科技有限公司；K9860 自动凯氏定氮仪：济南海能仪器股份有限公司；全自动滤袋式脂肪仪：上海晟声自动化分析仪器有限公司；LA8080 氨基酸分析仪：美国 Agilent 公司；DHG-9070A 电热恒温鼓风干燥箱：上海齐欣科学仪器有限公司；SX2-8-10N 箱式电阻炉：上海一恒科学仪器有限公司；759 系列紫外可见分光光度计：上海菁华科技仪器有限公司；Biotek 酶标仪：美国伯腾仪器有限公司；iCAP7000 电感耦合等离子体发射光谱仪：美国 Thermo Scientific 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 高粱千粒重和不完善率测定

高粱千粒重参照食品安全国家标准 GB/T 5519—2018《谷物与豆类 千粒重的测定》测定；不完善率参照食品安全国家标准 GB/T 5494—2019《粮油检验 粮食、油料的杂质、不完善粒检验》测定。

1.3.2 高粱化学成分含量测定

灰分参照食品安全国家标准 GB 5009.4—2016《食品中灰分的测定》测定；水分参照食品安全国家标准 GB 5009.3—2016《食品中水分的测定》测定；粗脂肪参照食品安全国家标准 GB 5009.6—2016《食品中脂肪的测定》测定；粗蛋白参照食品安全国家标准 GB 5009.5—2016《食品中蛋白质的测定》测定；单宁参照 GB/T 15686—2008《高粱 单宁含量的测定》测定；淀粉利用总淀粉含量测试盒，直链淀粉利用直链淀粉测试盒测定；矿物质含量参照食品安全国家标准 GB 5009.124—

2016《食品中多元素的测定》压力罐消解法、电感耦合等离子体(ICP-OES)发射光谱法；植酸含量参照褚西宁^[8]的硫酸铁铵-双吡啶法测定。可见分光光度计波长为 519 nm，根据吸光度绘制标准曲线计算得到高粱粉中植酸含量。

1.3.3 高粱氨基酸含量测定

参照食品安全国家标准 GB 5009.124—2016《食品中氨基酸的测定》，以脱脂绝干高粱粉水解后用全自动氨基酸分析仪测定高粱样品中的 17 种氨基酸(色氨酸被破坏未测出)。

1.3.4 高粱粉体外消化特性的测定

参照 Englyst 等^[9]方法测定。

基于淀粉消化速度，淀粉可分为：20 min 内水解的为快速消化淀粉(Rapid digestible Starch, RDS)；120 min 后没有水解的为抗性淀粉(Resistant starch, RS)；20~120 min 之间水解的为慢速消化淀粉(Slowly digestible starch, SDS)。计算公式如下：

$$RDS=(G_{20}-G_0) \times 0.9 \times 100\% \quad \text{式(1)}$$

$$SDS=(G_{120}-G_{20}) \times 0.9 \times 100\% \quad \text{式(2)}$$

$$RS=100\%-RDS-SDS \quad \text{式(3)}$$

G_0 、 G_{20} 和 G_{120} ——淀粉经酶水解反应 0 min、20 min 和 120 min 后的消化程度。淀粉水解率/%=样品中被消化淀粉含量/总淀粉含量 $\times 100\%$ 。

1.4 数据处理

本实验重复测定 3 次，用 Excel 对数据统计学计算，用 OriginPro 2021 对数据进行分析 and 绘图，并用 SPSS Statistics Version 27 显著性分析($P<0.05$)和多重比较。

2 结果与讨论

2.1 高粱千粒重、不完善率

通过对供试 16 个高粱样品千粒重和不完善率的研究，发现高粱籽粒间千粒重存在显著差异($P<0.05$)。表 2 显示重庆地产高粱千粒重普遍比西北、东北高粱千粒重低，和田晓红^[10]等研究结果较为一致。千粒重受外界因素和品种基因差异等因素的影响^[11]，气候、耕作方法等通过影响干物质养分积累过程进而影响千粒重^[12]。16 个高粱

表 2 16 种高粱的千粒重、不完善率
 Table 2 Thousand grain weight and imperfection rate of 16 sorghum varieties

品种	千粒重/g	不完善率/%
1	18.24±0.58 ^h	2.47±0.58 ^e
2	18.49±0.39 ^h	2.72±0.38 ^c
3	27.50±0.62 ^c	0.53±0.60 ^{hi}
4	23.66±0.07 ^f	2.60±0.22 ^e
5	18.79±0.67 ^h	5.78±0.74 ^b
6	13.43±0.72 ^j	4.21±0.63 ^{cd}
7	21.61±0.59 ^g	4.21±0.37 ^{cd}
8	18.03±0.69 ^h	2.34±0.01 ^{ef}
9	10.07±0.31 ^k	1.18±0.39 ^{gh}
10	25.36±0.30 ^c	4.82±0.91 ^c
11	15.02±0.28 ⁱ	1.57±0.78 ^{fg}
12	9.86±0.30 ^k	1.57±0.39 ^{fg}
13	27.36±0.59 ^c	6.83±0.53 ^a
14	29.28±1.12 ^b	3.85±0.37 ^d
15	26.20±0.14 ^d	1.45±0.22 ^g
16	30.14±0.03 ^a	0.40±0.40 ⁱ

注：表中数值为平均值±标准偏差，同一列中不同字母表示显著性差异 ($P<0.05$)，a 代表最大值，测试取 3 次平均值。

Note: The values in the table were the means ± standard deviation. Different letters in the same column indicated significant differences ($P<0.05$). Letter a represented the maximum value. All tests were performed at three replicates.

样品不完善率也存在显著差异 ($P<0.05$)，不完善率衡量的是高粱受损颗粒占比。

2.2 高粱化学组分

本研究对 16 种高粱的水分、蛋白质、粗脂肪、灰分含量分别进行了测定，其结果如表 3 所示。

本研究供试的 16 个高粱样品水分含量均符合国家标准对高粱水分含量的要求 ($\leq 14.0\%$)，可以有效防止高粱霉变，样品间水分含量存在显著差异 ($P<0.05$)，可能归因于重庆的气候、土壤、种植条件和保藏条件等因素^[13]。

16 个高粱样品蛋白质含量范围存在显著差异 ($P<0.05$)，有研究表明酿酒高粱蛋白质含量应在 8%~10%^[14]。16 个高粱样品脂肪含量存在显著差异 ($P<0.05$)。酿酒高粱脂肪含量不宜过高，否则发酵时微生物和酶会将高粱脂肪分解带入酒体，产生酸败气味^[15]。同时脂肪与淀粉形成复合物提高了淀粉糊化温度，故一般要求低于 4%^[16]。

支链淀粉含量高的高粱，糖化和发酵性质更好^[16]。16 个高粱样品直链淀粉和支链淀粉均存在显著差异 ($P<0.05$)，除秀山晋杂 22 号外，重庆高粱直链淀粉占总淀粉的比例均低于东北、西北高粱直链淀粉占总淀粉比例。

16 个高粱样品植酸含量存在显著差异 ($P<0.05$)，在 8.42%~15.61% 之间。植酸较高的高粱有降低消化率的功能，难消化的机理是：植酸

表 3 16 种高粱的化学组分表 (干基)
 Table 3 Chemical constituents of 16 sorghum varieties (dry basis)

品种	水分	蛋白质	粗脂肪	灰分	品种	直链淀粉	支链淀粉	单宁	植酸
1	12.32±0.05 ^b	8.31±0.10 ^{efg}	4.66±0.26 ^a	1.81±0.07 ^g	1	7.38±0.01 ^{ef}	73.92±0.11 ^b	1.50±0.03 ^{cd}	11.95±0.65 ^c
2	11.75±0.01 ^f	8.51±0.30 ^c	4.68±0.45 ^a	2.32±0.13 ^c	2	10.11±0.70 ^c	68.98±0.08 ^{de}	1.58±0.03 ^c	11.90±0.10 ^e
3	12.14±0.02 ^c	8.09±0.17 ^{feh}	4.92±0.62 ^a	2.07±0.02 ^{def}	3	3.42±0.32 ^h	72.45±0.10 ^{bc}	0.81±0.07 ^f	12.19±0.29 ^c
4	11.22±0.05 ^h	7.66±0.10 ⁱ	4.91±0.36 ^a	1.82±0.07 ^g	4	5.42±0.35 ^g	77.21±0.45 ^a	0.90±0.02 ^f	9.57±0.08 ^f
5	11.94±0.14 ^d	12.28±0.36 ^a	3.82±0.72 ^{bc}	2.18±0.07 ^{cde}	5	6.64±0.14 ^{fg}	67.20±0.42 ^{ef}	0.86±0.05 ^f	15.61±0.35 ^a
6	10.68±0.08 ^k	8.39±0.18 ^{ef}	4.16±0.30 ^b	1.98±0.02 ^{fg}	6	6.06±0.19 ^{fg}	71.02±0.08 ^{cd}	1.61±0.05 ^c	13.64±1.00 ^{bcd}
7	10.61±0.01 ^k	7.21±0.17 ^j	3.86±0.02 ^{bc}	1.82±0.03 ^g	7	6.32±0.81 ^{fg}	78.53±0.94 ^a	0.41±0.02 ^g	13.67±0.12 ^{bcd}
8	11.05±0.06 ⁱ	9.71±0.16 ^d	3.66±0.07 ^{cde}	3.27±0.21 ^a	8	8.01±0.91 ^{de}	72.76±0.81 ^{bc}	2.12±0.03 ^a	12.63±0.52 ^{de}
9	10.92±0.04 ^j	9.66±0.38 ^d	3.45±0.11 ^{cdef}	2.55±0.17 ^b	9	3.86±0.07 ^h	65.10±0.77 ^f	1.94±0.01 ^b	14.57±0.17 ^{ab}
10	11.05±0.07 ⁱ	8.00±0.18 ^{gh}	3.17±0.25 ^{ef}	2.19±0.03 ^{cde}	10	13.84±0.98 ^a	48.40±0.85 ^b	0.98±0.01 ^f	8.42±0.35 ^g
11	11.49±0.08 ^g	7.91±0.20 ^{hi}	3.21±0.22 ^{def}	2.04±0.05 ^{ef}	11	3.77±0.03 ^h	77.62±0.13 ^a	1.59±0.06 ^c	13.47±0.23 ^{cd}
12	11.87±0.04 ^{de}	12.44±0.09 ^a	2.42±0.27 ^h	2.23±0.06 ^{cd}	12	3.61±0.05 ^h	71.63±0.49 ^c	1.28±0.46 ^e	11.88±0.67 ^c
13	11.77±0.05 ^f	9.80±0.15 ^d	2.57±0.13 ^{gh}	1.35±0.11 ^h	13	12.11±0.25 ^b	38.48±0.70 ⁱ	0.19±0.02 ^h	8.73±0.16 ^{fg}
14	11.83±0.07 ^{ef}	10.82±0.10 ^b	1.80±0.10 ⁱ	1.38±0.16 ^h	14	12.47±0.83 ^b	66.10±0.92 ^f	0.19±0.02 ^h	14.34±0.43 ^{bc}
15	11.40±0.11 ^g	10.29±0.34 ^c	3.68±0.16 ^{bcd}	1.91±0.16 ^{fg}	15	9.02±0.56 ^{cd}	59.75±0.08 ^g	1.40±0.01 ^{de}	11.83±1.20 ^c
16	13.45±0.05 ^a	8.01±0.05 ^{gh}	3.04±0.16 ^{fg}	1.47±0.26 ^h	16	12.75±0.15 ^{ab}	26.67±0.20 ^j	1.58±0.01 ^c	9.73±0.94 ^f

注：表中数值为平均值±标准偏差，同一列中不同字母表示显著性差异 ($P<0.05$)，a 代表最大值，测试取 3 次平均值。

Note: The values in the table were the means ± standard deviation. Different letters in the same column indicated significant differences ($P<0.05$). Letter a represented the maximum value. All tests were performed at three replicates.

与矿物质结合先形成盐, 再与蛋白形成具膜泡状小球, 导致难吸收^[17], 另一方面, 植酸通过抑制多种消化酶活性影响营养物质吸收和利用^[18]。

单宁与淀粉和消化酶结合, 影响蛋白质、淀粉消化吸收^[19]。单宁含量存在显著差异 ($P < 0.05$), 在 0.19%~2.12% 之间。研究报道, 单宁含量大于 3% 时, 酿酒不能正常糖化, 使得白酒有苦涩味^[20]。

综合以上理化指标, 荣昌红缨子、綦江红缨

子是符合酿酒基本理化指标的两个品种。东北、西北高粱及秀山晋杂 22 号具有较高直链淀粉, 更易形成抗性淀粉, 抗性淀粉能降低血清胆固醇, 因此它们可能适合于制作具有低热值的休闲食品、烘焙食品和粥等。南、北方高粱灰分含量相近, 灰分基本反映了样品中的矿物质含量。

2.3 高粱氨基酸含量

本研究对 16 种高粱的必需氨基酸和非必需氨基酸含量进行了测定, 其结果如表 4、5 所示。

表 4 16 种高粱的必需氨基酸含量

Table 4 The contents of essential amino acids of 16 sorghum varieties

g/100 g 干物质

	1	2	3	4		5	6	7	8
Thr	0.19±0.01 ^{cd}	0.18±0.01 ^{cd}	0.16±0.01 ^{efgh}	0.19±0.01 ^{cd}	Thr	0.16±0.01 ^{fgh}	0.23±0.01 ^a	0.18±0.01 ^{cde}	0.15±0.01 ^{gh}
Val	0.26±0.02 ^{cd}	0.24±0.02 ^{cde}	0.22±0.02 ^{efg}	0.27±0.01 ^{bc}	Val	0.20±0.01 ^{fg}	0.32±0.01 ^a	0.23±0.01 ^{def}	0.20±0.01 ^{fg}
Met	0.09±0.01 ^{bc}	0.08±0.01 ^{bcd}	0.07±0.01 ^{cde}	0.06±0.01 ^{de}	Met	0.07±0.01 ^{cde}	0.11±0.01 ^a	0.08±0.01 ^{bcd}	0.08±0.01 ^{bcd}
Ile	0.20±0.01 ^{cd}	0.19±0.01 ^{de}	0.16±0.01 ^{fg}	0.21±0.01 ^{cd}	Ile	0.15±0.01 ^{gh}	0.24±0.01 ^b	0.18±0.01 ^{ef}	0.14±0.01 ^h
Leu	0.77±0.14 ^{abc}	0.74±0.15 ^{abc}	0.63±0.12 ^{bc}	0.90 ± 0.18 ^{abc}	Leu	0.59±0.12 ^{bc}	0.97±0.15 ^{ab}	0.73±0.14 ^{abc}	0.54±0.11 ^c
Phe	0.27±0.01 ^{defg}	0.26±0.01 ^{efg}	0.23±0.01 ^{ghi}	0.29±0.01 ^{cde}	Phe	0.21±0.01 ^{hi}	0.35±0.02 ^b	0.26±0.01 ^{efg}	0.20 ± 0.01 ⁱ
Lys	0.13±0.01 ^{bc}	0.13±0.01 ^{bcd}	0.12±0.01 ^{cde}	0.13±0.01 ^{bcd}	Lys	0.11±0.01 ^{ef}	0.17±0.02 ^a	0.12±0.01 ^{cde}	0.11±0.01 ^{ef}
	9	10	11	12		13	14	15	16
Thr	0.20±0.01 ^{bc}	0.19±0.01 ^{cd}	0.17±0.01 ^{defgh}	0.15±0.01 ^h	Thr	0.22±0.01 ^{ab}	0.24±0.01 ^a	0.17±0.02 ^{cdefg}	0.18±0.03 ^{cdef}
Val	0.26±0.01 ^{cd}	0.25±0.02 ^{cde}	0.23±0.01 ^{cdef}	0.19±0.01 ^g	Val	0.30±0.01 ^{ab}	0.34±0.01 ^a	0.25±0.04 ^{cde}	0.25±0.05 ^{cde}
Met	0.08±0.01 ^{bcd}	0.08±0.01 ^{bcd}	0.09±0.01 ^{ab}	0.05±0.01 ^e	Met	0.09±0.01 ^{ab}	0.11±0.01 ^a	0.07±0.02 ^{cde}	0.07±0.02 ^{cde}
Ile	0.20 ± 0.01 ^{de}	0.19±0.01 ^{de}	0.16±0.01 ^{fg}	0.14±0.01 ^{gh}	Ile	0.22±0.01 ^{bc}	0.27±0.01 ^a	0.19±0.03 ^{de}	0.19±0.03 ^{de}
Leu	0.75±0.15 ^{abc}	0.74±0.13 ^{abc}	0.61±0.12 ^{bc}	0.54±0.11 ^{bc}	Leu	0.88±0.17 ^{abc}	1.12±0.22 ^a	0.77±0.30 ^{abc}	0.75±0.01 ^{abc}
Phe	0.32±0.01 ^{bc}	0.27±0.01 ^{def}	0.24±0.01 ^{fgh}	0.20±0.01 ⁱ	Phe	0.31±0.01 ^{cd}	0.42±0.01 ^a	0.26±0.06 ^{efg}	0.26±0.04 ^{efg}
Lys	0.16±0.01 ^a	0.12±0.01 ^{de}	0.12±0.01 ^{cde}	0.09±0.01 ^g	Lys	0.14±0.01 ^b	0.17±0.01 ^a	0.10±0.01 ^{fg}	0.10±0.01 ^{fg}

注: 表中数值为平均值±标准偏差, 同一列中不同字母表示显著性差异 ($P < 0.05$), a 代表最大值, 测试取 3 次平均值。

Note: The values in the table were the means ± standard deviation. Different letters in the same column indicated significant differences ($P < 0.05$). Letter a represented the maximum value. All tests were performed at three replicates.

表 5 16 种高粱的非必需氨基酸含量

Table 5 The contents of non-essential amino acids of 16 sorghum varieties

g/100 g 干物质

	1	2	3	4		5	6	7	8
Asp	0.39±0.01 ^{def}	0.38±0.01 ^{def}	0.35±0.01 ^{fg}	0.42±0.01 ^{cd}	Asp	0.31±0.01 ^{gh}	0.49±0.01 ^{ab}	0.37±0.01 ^{ef}	0.32±0.01 ^g
Ser	0.26±0.01 ^{de}	0.25±0.01 ^{de}	0.23±0.01 ^{efg}	0.27±0.01 ^{cd}	Ser	0.21±0.01 ^{fgh}	0.33±0.01 ^{ab}	0.25±0.01 ^{de}	0.20±0.01 ^{gh}
Glu	1.09±0.02 ^{cde}	1.05±0.01 ^{def}	0.90 ± 0.01 ^{fgh}	1.25±0.02 ^{bc}	Glu	0.85±0.01 ^h	1.37±0.02 ^{ab}	1.02±0.02 ^{efg}	0.80±0.01 ^{hi}
Gly	0.19±0.01 ^{def}	0.19±0.01 ^{defg}	0.18±0.01 ^{efg}	0.19±0.01 ^{defg}	Gly	0.17±0.01 ^{fg}	0.24±0.01 ^a	0.19±0.01 ^{defg}	0.17±0.01 ^{efg}
Ala	0.47±0.02 ^d	0.46±0.02 ^d	0.40±0.01 ^f	0.54±0.01 ^c	Ala	0.38±0.01 ^f	0.62±0.01 ^{ab}	0.46±0.01 ^{de}	0.36±0.01 ^f
Cys	0.04±0.01 ^{abcd}	0.04±0.01 ^{cd}	0.03±0.01 ^d	0.04±0.01 ^{abcd}	Cys	0.04±0.01 ^{bcd}	0.05±0.01 ^a	0.03±0.01 ^d	0.04±0.01 ^{cd}
Tyr	0.18±0.01 ^{cde}	0.15±0.01 ^{defg}	0.16±0.01 ^{cdefg}	0.13±0.01 ^g	Tyr	0.15±0.01 ^{defg}	0.24±0.04 ^b	0.18±0.01 ^{cd}	0.14±0.01 ^{fg}
His	0.11±0.01 ^{bcd}	0.11±0.01 ^{bcd}	0.11±0.01 ^{bcd}	0.12±0.01 ^{bc}	His	0.10±0.01 ^{cde}	0.15±0.01 ^a	0.12±0.01 ^{bc}	0.10±0.01 ^{de}
Arg	0.23±0.02 ^{bcd}	0.22±0.02 ^{cde}	0.22±0.02 ^{cde}	0.21±0.02 ^{def}	Arg	0.19±0.01 ^{ef}	0.28±0.02 ^a	0.21±0.02 ^{cdef}	0.19±0.01 ^{ef}
Pro	1.14±0.02 ^{de}	1.09±0.02 ^f	0.97±0.01 ^{gh}	1.29±0.02 ^c	Pro	0.95±0.01 ^h	1.41±0.02 ^b	1.12±0.02 ^{ef}	0.87±0.01 ⁱ

续表 5

	9	10	11	12		13	14	15	16
Asp	0.40±0.01 ^{de}	0.39±0.01 ^{de}	0.35±0.01 ^{fg}	0.28±0.01 ^h	Asp	0.46±0.01 ^{bc}	0.51±0.01 ^a	0.37±0.07 ^{ef}	0.37±0.05 ^{ef}
Ser	0.27±0.01 ^{cd}	0.27±0.01 ^{cd}	0.23±0.01 ^{efg}	0.18±0.01 ^h	Ser	0.30±0.01 ^{bc}	0.34±0.01 ^a	0.24±0.04 ^{def}	0.25±0.05 ^{def}
Glu	1.06±0.01 ^{def}	1.06±0.02 ^{def}	0.85±0.01 ^{gh}	0.63±0.01 ⁱ	Glu	1.21±0.01 ^{bcd}	1.50±0.01 ^a	1.04±0.23 ^{def}	1.05±0.25 ^{def}
Gly	0.23±0.01 ^{abc}	0.21±0.01 ^{bcd}	0.20±0.01 ^{cde}	0.16±0.01 ^e	Gly	0.23±0.01 ^{ab}	0.23±0.01 ^{ab}	0.18±0.04 ^{efg}	0.18±0.01 ^{efg}
Ala	0.48±0.01 ^d	0.48±0.01 ^d	0.40±0.01 ^{ef}	0.30±0.01 ^g	Ala	0.56±0.01 ^{bc}	0.66±0.01 ^a	0.47±0.09 ^d	0.47±0.08 ^d
Cys	0.04±0.00 ^{abcd}	0.03±0.01 ^d	0.04±0.00 ^{bcd}	0.03±0.01 ^d	Cys	0.04±0.01 ^{abc}	0.05±0.01 ^{ab}	0.04±0.01 ^{cd}	0.04±0.01 ^{cd}
Tyr	0.22±0.01 ^b	0.18±0.02 ^{cde}	0.18±0.01 ^{cde}	0.15±0.01 ^{efg}	Tyr	0.17±0.01 ^{cdef}	0.30±0.01 ^a	0.18±0.04 ^{cd}	0.18±0.03 ^c
His	0.14±0.01 ^{ab}	0.12±0.01 ^{bc}	0.11±0.01 ^{bcd}	0.09±0.01 ^c	His	0.12±0.01 ^{bc}	0.16±0.01 ^a	0.12±0.03 ^{bcd}	0.12±0.03 ^{bcd}
Arg	0.28±0.02 ^{ab}	0.24±0.02 ^{abcd}	0.24±0.02 ^{bcd}	0.17±0.01 ^f	Arg	0.25±0.02 ^{abc}	0.28±0.02 ^a	0.21±0.04 ^{def}	0.21±0.01 ^{def}
Pro	1.13±0.02 ^{de}	1.15±0.02 ^d	0.96±0.01 ^h	0.84±0.01 ⁱ	Pro	1.30±0.02 ^c	1.56±0.02 ^a	0.99±0.01 ^e	1.31±0.02 ^c

注：表中数值为平均值±标准偏差，同一列中不同字母表示显著性差异 ($P<0.05$)，a 代表最大值，测试取 3 次平均值。

Note: The values in the table were the means ± standard deviation. Different letters in the same column indicated significant differences ($P<0.05$). Letter a represented the maximum value. All tests were performed at three replicates.

本研究对 16 种高粱的必需氨基酸和非必需氨基酸总含量及必需氨基酸、非必需氨基酸比值结果如表 6 所示。

16 种高粱所含氨基酸种类齐全，均含有儿童必需氨基酸（组氨酸和精氨酸）。品种间氨基酸含

量差异显著 ($P<0.05$)。脯氨酸和亮氨酸是高粱中含量最丰富的必需和非必需氨基酸，16 种高粱 TAA 含量在 4.20~8.26 g/100g 之间。市购东北高粱 2 号的必需氨基酸含量最高 (2.67 g/100g)。垫江红缨子的必需氨基酸比值最高 (0.33)。

表 6 16 种高粱的必需氨基酸、非必需氨基酸、总氨基酸 (g/100 g 干物质)、E/T、E/N 值

Table 6 The contents of essential amino acids, non-essential amino acids, total amino acids (g/100 g, dry basis), E/T and E/N values of essential amino acids in Sorghum

品种	EAA	NEAA	TAA	E/T	E/N	品种	EAA	NEAA	TAA	E/T	E/N
1	1.91	4.10	6.01	0.32	0.47	9	1.97	4.24	6.21	0.32	0.46
2	1.83	3.93	5.76	0.32	0.47	10	1.84	4.14	5.98	0.31	0.44
3	1.59	3.54	5.12	0.31	0.45	11	1.63	3.55	5.18	0.31	0.46
4	2.05	4.47	6.52	0.32	0.46	12	1.37	2.83	4.20	0.33	0.48
5	1.49	3.36	4.84	0.31	0.44	13	2.17	4.65	6.82	0.32	0.47
6	2.40	5.19	7.58	0.32	0.46	14	2.67	5.59	8.26	0.32	0.48
7	1.79	3.94	5.73	0.31	0.45	15	1.81	3.84	5.65	0.32	0.47
8	1.42	3.18	4.59	0.31	0.45	16	1.79	4.17	5.96	0.30	0.43

注：EAA：必需氨基酸 (essential amino acids)；NEAA：非必需氨基酸 (non-essential amino acids)；TAA：总氨基酸 (total amino acids)；E/T：必需氨基酸/总氨基酸 (EAA/TAA, essential amino acids/total amino acids)；E/N：必需氨基酸/非必需氨基酸 (EAA/NEAA, essential amino acids/non-essential amino acids)。

2.4 高粱矿物质含量

本研究分析了 16 种高粱中的钾、钙、镁、钠、铜、铁、锰、锌，见表 7。重庆高粱中宏量矿质元素含量呈现出钾 > 镁 > 钙 > 钠的特征，微量矿质元素含量顺序为铁 > 锌 > 锰 > 铜。钾、钙和镁是高粱含量最丰富的元素，修复受损体细胞都需要钾、钙和镁，重庆地产高粱的钾含量高于市购东北西北高粱；钙含量在 3.11~80.31 mg/100 g 干

物质之间，钙调控多种生物过程；镁含量在 21.94~49.70 mg/100 g 干物质之间。有研究报道，高粱宏量矿质元素含量钾 > 镁 > 钙的特征，微量元素含量顺序为铁 > 锌 > 铜^[21]，本研究与其一致。

2.5 高粱淀粉体外消化特性

16 种高粱淀粉粉水解曲线如图 1 所示，曲线直观反映了消化情况，趋势大体一致，消化进程均符合一阶动力学方程。在前 60 min 淀粉消化速

表 7 16 种高粱的矿物质含量

Table 7 The contents of non-essential amino acids of 16 sorghum varieties

mg/100 g 干物质

品种	Ca	K	Mg	Na	品种	Cu	Fe	Mn	Zn
1	4.46±0.01 ^k	72.37±0.58 ^l	25.82±0.15 ⁱ	0.64±0.02 ^k	1	0.07±0.01 ^d	0.76±0.01 ^{efg}	0.24±0.01 ^l	0.41±0.01 ^h
2	6.28±0.02 ⁱ	83.24±0.36 ⁱ	26.49±0.13 ^h	0.56±0.01 ^l	2	0.08±0.01 ^d	1.24±0.08 ^{defg}	0.28±0.01 ⁱ	0.45±0.01 ^g
3	8.67±0.05 ^h	86.72±0.19 ^g	27.28±0.20 ^g	0.79±0.01 ^h	3	0.06±0.01 ^d	1.38±0.01 ^{cd}	0.32±0.01 ^g	0.50±0.01 ^e
4	5.72±0.05 ^j	91.12±1.19 ^c	21.94±0.27 ^l	0.79±0.01 ^h	4	0.05±0.01 ^d	0.87±0.01 ^{defg}	0.42±0.01 ^e	0.45±0.01 ^g
5	65.48±0.48 ^b	96.23±0.65 ^d	49.70±0.33 ^a	2.04±0.03 ^b	5	0.65±0.01 ^a	2.22±0.02 ^a	0.67±0.01 ^a	0.70±0.01 ^b
6	80.31±0.56 ^a	90.20±0.47 ^c	39.41±0.16 ^c	1.81±0.01 ^c	6	0.60±0.01 ^{ab}	1.34±0.01 ^{cd}	0.30±0.01 ^h	0.40±0.01 ⁱ
7	4.67±0.03 ^k	87.94±1.33 ^f	22.51±0.17 ^k	1.44±0.02 ^c	7	0.07±0.01 ^d	0.90±0.01 ^{defg}	0.35±0.01 ^f	0.33±0.01 ^l
8	16.20±0.08 ^e	101.20±0.50 ^a	39.19±0.19 ^c	1.08±0.02 ^f	8	0.40±0.52 ^{bc}	2.12±1.57 ^{ab}	0.48±0.01 ^c	0.62±0.01 ^d
9	12.96±0.18 ^f	97.86±1.19 ^c	33.57±0.35 ^e	0.67±0.01 ^j	9	0.11±0.01 ^d	1.93±0.05 ^{abc}	0.65±0.01 ^b	0.65±0.01 ^e
10	43.44±0.42 ^d	100.04±1.09 ^b	42.79±0.47 ^b	2.46±0.02 ^a	10	0.34±0.01 ^c	1.43±0.01 ^{cd}	0.25±0.01 ^k	0.47±0.01 ^f
11	8.34±0.05 ^h	84.56±0.60 ^h	26.24±0.15 ^h	0.41±0.01 ^m	11	0.07±0.01 ^d	0.93±0.01 ^{defg}	0.17±0.01 ^m	0.35±0.01 ^k
12	9.99±0.11 ^g	79.16±0.96 ^j	33.53±0.31 ^e	0.82±0.01 ^g	12	0.12±0.01 ^d	1.43±0.01 ^{cd}	0.43±0.01 ^d	0.72±0.01 ^a
13	4.50±0.03 ^k	78.12±0.34 ^j	28.92±0.01 ^f	0.68±0.02 ^j	13	0.06±0.01 ^d	1.00±0.01 ^{defg}	0.31±0.01 ^h	0.40±0.01 ⁱ
14	58.27±0.24 ^c	55.33±0.35 ^m	35.60±0.39 ^d	1.72±0.01 ^d	14	0.36±0.01 ^c	1.46±0.01 ^{bcd}	0.28±0.01 ⁱ	0.33±0.01 ^l
15	3.11±0.02 ^l	53.96±0.48 ⁿ	24.03±0.18 ^j	0.74±0.01 ⁱ	15	0.07±0.01 ^d	0.75±0.02 ^{fg}	0.26±0.01 ^j	0.33±0.01 ^l
16	4.69±0.06 ^k	74.42±0.94 ^k	22.81±0.22 ^k	0.77±0.01 ^h	16	0.07±0.01 ^d	0.66±0.02 ^g	0.24±0.01 ^{kl}	0.35±0.01 ^l

注：表中数值为平均值±标准偏差，同一列中不同字母表示显著性差异 ($P < 0.05$)，a 代表最大值，测试取 3 次平均值。

Note: The values in the table were the means ± standard deviation. Different letters in the same column indicated significant differences ($P < 0.05$). Letter a represented the maximum value. All tests were performed at three replicates.

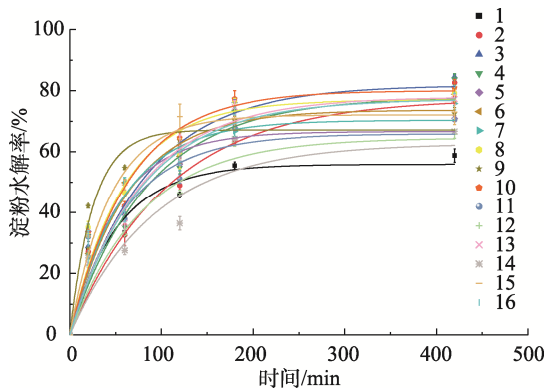
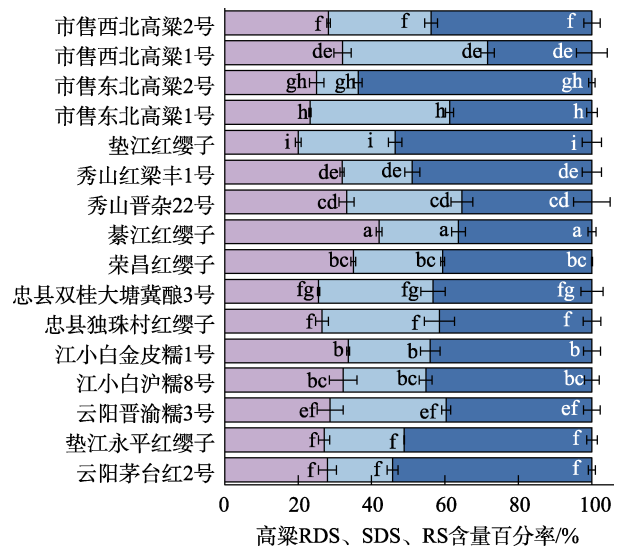


图 1 16 种高粱消化动力学模型拟合曲线

Fig.1 Fitting curve of digestion kinetics model with 16 sorghum varieties

率非常快，随后水解率仍然在上升但速度减缓，直到 180 min 时，淀粉水解率基本达到平衡状态。

从图 1、图 2 高粱粉体外消化结果看，16 种高粱消化过程曲线拟合性较好 ($R^2 > 0.88$)，水解动力学速率常数 K 为 $0.0093 \sim 0.0389 \text{ min}^{-1}$ ， K 值越高，高粱淀粉消化速率越快。云阳茅台红 2 号、市购东北高粱 2 号、垫江红缨子消化率 C_{∞} 值较小且 K 值较小，RDS、SDS 含量较低而 RS 含量高，表明它们消化速率较慢，以其制作食品可产生饱腹感，利于减肥食品开发。有研究表明蒸煮后的高粱单宁可能与支链淀粉相互作用，单宁可



注：RDS、SDS、RS 分别标注不同字母表示差异达到显著水平 ($P < 0.05$)，相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)。

Note: RDS, SDS, and RS were marked with different letters to indicate a significant difference ($P < 0.05$).

图 2 16 种高粱淀粉体外消化特性

Fig.2 Digestive properties of 16 sorghum varieties

降低消化率，支链淀粉可提高消化率^[22]。本研究表 8 相关性分析中单宁与消化性并无显著相关关系，这可能是因为单宁和淀粉相互作用关系复杂。相关性分析中也得到 16 种高粱植酸和直链淀粉含量呈显著正相关，这显示了植酸和直链淀粉在

消化上可能的协同作用。

表 8 各指标相关系数值
Table 8 Correlation coefficient values for each indicator

	单宁	植酸	直链淀粉	SDS
植酸	0.102			
直链淀粉	-0.040	0.431*		
SDS	-0.060	-0.421*	-0.279	
RS	-0.267	0.199	0.198	-0.717**

注: **表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关, *表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

Note: **indicated a significant correlation at the 0.01 level (bilateral), and *indicated a significant correlation at the 0.05 level (bilateral).

表 9 显示了 16 种高粱体外消化模型参数, 包含消化率 C_{∞} 、水解动力学速率常数 K 、水解速率与时间关系拟合曲线的相关系数 R^2 。

表 9 16 种高粱体外消化模型参数
Table 9 Digestion model parameters of sorghum starch from 16 varieties

品种	$C_{\infty}/\%$	K/min^{-1}	R^2
1	55.84	0.019 3	0.933 4
2	77.57	0.009 3	0.940 9
3	81.83	0.012 2	0.968 0
4	77.98	0.011 6	0.923 9
5	66.60	0.019 3	0.938 9
6	73.70	0.015 8	0.974 4
7	70.32	0.017 4	0.975 1
8	76.97	0.016 9	0.943 7
9	67.14	0.038 9	0.968 8
10	80.02	0.015 5	0.958 9
11	65.83	0.016 1	0.918 1
12	64.62	0.012 5	0.975 9
13	77.94	0.012 7	0.983 1
14	62.78	0.010 7	0.880 2
15	72.08	0.022 6	0.982 8
16	77.18	0.012 6	0.961 9

2.6 高粱理化成分和消化性主成分分析

研究中涉及的理化指标和消化性指标较多, 故本实验对高粱进行理化成分和消化性主成分分析, 将多个变量通过线性变换选出具有代表性的 3 个主成分, 主成分分析如图 3。第一主成分主要由 Fe、Mg、Mn、Zn、K、灰分、Cu、植酸、单宁构成, 归纳为抗营养主成分; 第二主成分主要由脂肪、蛋白质、Ca、Na 构成, 归纳为营养主成

分; 第三主成分主要由淀粉、支链淀粉、RS 构成, 归纳为淀粉主成分。三者累积贡献率 67.09%, 说明 PCA 分析能够反映整体信息, 将前 3 个特征值作为新的变量而代替原有的若干个指标。

PCA 可以有效区分不同高粱品种, 图 3 市购东北、西北高粱在 PC2 方向较接近, 但是在 PC1 方向表现出了较大的成分差异性。推测 PC1 方向上的差异性是由品种差异导致的, 而 PC2 方向上的相似性是由相同产地导致的。

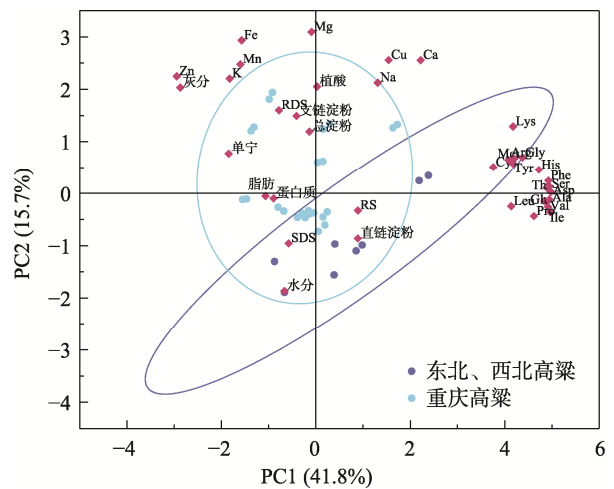


图 3 16 种高粱理化指标主成分分析图


Fig.3 Principal component analysis of 16 sorghum varieties

3 结论

本研究测定了 12 种重庆高粱和东北西北高粱各 2 种的理化和消化特性, 发现其在理化成分、消化性质方面存在显著差异 ($P < 0.05$)。千粒重在 9.86~30.14 g 之间, 淀粉、蛋白质和脂肪含量范围分别为 39.41%~84.86%、7.21%~12.44%、1.80%~4.92%, 单宁和植酸含量范围是 0.19%~2.12%和 8.42%~15.61%, 含有丰富的氨基酸和矿物质。通过对高粱进行体外消化研究, 云阳茅台红 2 号、市购东北高粱 2 号、垫江红缨子等品种淀粉消化率 (C_{∞}) 较低, 抗性淀粉 (RS) 含量较高, 可以用来制作低 GI 食品。

参考文献:

[1] XIONG Y, ZHANG P, WARNER R D, et al. Sorghum grain: From genotype, nutrition, and phenolic profile to its health benefits and food applications[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2019, 18(6): 2025-2046.

- [2] 海青山, 金亚菊. 大健康概念的内涵和基本特征[J]. 中医杂志, 2017, 58(13): 1085-1088.
 HAI Q S, JIN Y J. Connotation and basic features of the concept of great health[J]. Chinese Medicine, 2017, 58(13): 1085-1088.
- [3] ROONEY L W, MURTY D S, MERTIN J V. Proceedings of the International Symposium on Sorghum Grain Quality[J]. 1982.
- [4] 高旭, 徐建霞, 丁延庆, 等. 酿酒高粱籽粒理化品质及蒸煮特性分析[J]. 食品科技, 2023, 48(1): 159-166.
 GAO X, XU J X, DING Y Q, et al. Physicochemical quality and cooking characteristics of brewing sorghum seeds[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(1): 159-166.
- [5] 谭斌. 粒用高粱的特性及其在食品工业中开发利用前景[J]. 粮食与饲料工业, 2007, (7): 16-19.
 TAN B. Properties of grain sorghum and its prospects of utilization in food industry[J]. Food and Feed Industry, 2007, (7): 16-19.
- [6] 刘晨阳, 张蕙杰, 辛翔飞. 中国高粱产业发展特征及趋势分析[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(10): 1-9.
 LIU C Y, ZHANG H J, XIN X F. Development characteristics and trends of Chinese sorghum industry[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(10): 1-9.
- [7] KHODDAMI A, MESSINA V, VADABALJIA V K, et al. Sorghum in foods: Functionality and potential in innovative products[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(9): 1170-1186.
- [8] 褚西宁, 赵美蓉, 王朝健. 饲用饼粕中植酸量的快速测定法[J]. 饲料工业, 1997, (7): 42-43.
 CHU X N, ZHAO M R, WANG C J. A rapid method for the determination of phytic acid in feed cake meal[J]. Feed Industry Magazine, 1997, (7): 42-43.
- [9] ENGLYST H N, KINGMAN S M, CUMMINGS J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1992, 46(2): S33-50.
- [10] 田晓红, 谭斌, 谭洪卓, 等. 我国主产区高粱的理化性质分析[J]. 粮食与饲料工业, 2009, (4): 10-13.
 TIAN X H, TAN B, TAN H Z, et al. Analysis of physical and chemical properties of sorghum in main producing areas of our country[J]. Food and Feed Industry, 2009, (4): 10-13.
- [11] PATIDAR H, 乔春贵. 高粱籽粒大小和产量的基因作用[J]. 国外农学-杂粮作物, 1984, (S1): 7+57.
 PATIDAR H. Gene effects on grain size and yield in sorghum[J]. Foreign Agronomy Coarse grain crops, 1984(S1): 7+57.
- [12] LIU L, HERALD T J, WANG D, et al. Characterization of sorghum grain and evaluation of sorghum flour in a Chinese egg noodle system[J]. Journal of Cereal Science, 2012, 55(1): 31-36.
- [13] 毛祥, 温雪瓶, 黄丹, 等. 5 种常用酿酒高粱的主要成分及淀粉特性差异分析[J]. 中国酿造, 2020, 39(3): 57-62.
 MAO X, WEN X P, HUANG D, et al. Differential analysis of major components and starch characteristics of five commonly used brewing sorghums[J]. China Brewing, 2020, 39(3): 57-62.
- [14] 王红梅, 李哲, 李令, 等. 川南白酒产区主要酿酒高粱理化性质与代谢组学分析[J]. 酿酒科技, 2023(7): 44-56.
 WANG H M, LI Z, LI L, et al. Physicochemical properties and metabolomics analysis of major brewing sorghums in South Sichuan Baijiu production area[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2023(7): 44-56.
- [15] 张雪梅, 张玲, 高飞虎, 等. 重庆主栽酿酒糯高粱的品质特性[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(3): 177-181+187.
 ZHANG X M, ZHANG L, GAO F H, et al. Study on the quality characteristics of six kinds of glutinous sorghum in Chongqing[J]. Food and Fermentation Industries, 2016, 42(3): 177-181+187.
- [16] 程度, 曹建兰, 王珂佳, 等. 高粱对酱香型白酒品质影响的研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(7): 356-364.
 CHENG D, CAO J L, WANG K J, et al. Progress in understanding the effect of sorghum on the quality of Maotai-flavor liquor[J]. Food Science, 2022, 43(7): 356-364.
- [17] MORAES R A, OLIVEIRA F C E D, VALÉRIA AV Q, et al. Domestic processing effects on antioxidant capacity, total phenols and phytate content of sorghum[J]. Current Nutrition & Food Science, 2019, 15(4): 501-507.
- [18] 郭琦, 梁笃, 张一中, 等. 影响高粱饲用价值的主要内在因素及其利用措施[J]. 农业工程技术, 2021, 41(5): 88-90.
 GUO Q, LIANG D, ZHANG Y Z, et al. Main internal factors affecting forage value of sorghum and their utilization measures[J]. Agricultural Engineering Technology, 2021, 41(5): 88-90.
- [19] 张俊, 张三杉, 叶丹, 等. 发芽对高粱氨基酸及抗营养因子含量的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(1): 87-92.
 ZHANG J, ZHANG S S, YE D, et al. Effects of germination on the content of amino acids and anti-nutritional factors of sorghum grain[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(1): 87-92.
- [20] 蒋兰. 酿酒高粱淀粉含量测定及性质研究[D]. 重庆大学, 2014.
 JIANG L. Determination methods for sorghum starch and its physicochemical properties[D]. Chongqing University, 2013.
- [21] 马占玲, 励建荣. ICP-AES法测定小米和高粱米中的金属元素[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(6): 120-123.
 MA Z L, LI J R. Determination of metal elements in millet and sorghum rice by ICP-AES[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2012, 27(6): 120-123.
- [22] BARROS F, AWIKA J M, ROONEY L W. Interaction of tannins and other sorghum phenolic compounds with starch and effects on in vitro starch digestibility[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2012, 60(46): 11609-11617. 
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。