

不同品种青稞炒制后挥发性风味物质GC-MS分析

张文刚^{1,2}, 张 垚¹, 杨希娟^{1,2}, 党 斌^{1,2,*}, 张 杰^{1,2}, 杜 艳³, 陈丹硕³
(1.青海大学农林科学院, 青海省青藏高原农产品加工重点实验室, 青海 西宁 810016;

2.省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 青海 西宁 810016;

3.青海省青稞资源综合利用工程技术研究中心, 青海华实科技投资管理有限公司, 青海 西宁 810001)

摘 要: 为探究不同品种青稞炒制后挥发性风味成分的差异, 筛选风味化合物丰富的青稞品种。采用气相色谱-质谱联用技术对10个不同品种青稞炒制样挥发性成分进行分离鉴定。首先探讨炒制对昆仑15号风味的影响, 其次结合香气分析、聚类分析和主成分分析对不同品种归类。结果表明: 不同样品共检出140种香气成分, 包括杂环类(32种)、酯类(26种)、醇类(21种)、醛类(19种)、酮类(16种)、酸类(13种)、烃类(9种)、腈类(4种)。炒制后昆仑15号香气物质由48种增加到60种, 主要增加的是吡嗪类物质。不同品种炒制青稞中相对含量最高为杂环类(38.59%~64.42%), 其次为酯类(1.85%~35.98%)和醛类(7.56%~21.79%)。香气分析显示炒制青稞以可可香、烤香和坚果香为主, 未炒制昆仑15号果香与甜香较强。青稞焙炒香气与青稞品种及基本化学组成等有关, 肚里黄为本研究参试青稞品种中最适青稞炒制加工品种。分类分析显示样品可分为两大类, 昆仑15号和藏青320相似度较高, 为一类, 其他品种在欧式距离为9时为另一类。

关键词: 青稞; 炒制; 挥发性风味; 气相色谱-质谱联用; 聚类分析; 主成分分析

GC-MS Analysis of Volatile Flavor Substances in Different Varieties of Roasted Hullless Barley

ZHANG Wengang^{1,2}, ZHANG Yao¹, YANG Xijuan^{1,2}, DANG Bin^{1,2,*}, ZHANG Jie^{1,2}, DU Yan³, CHEN Danshuo³

(1. Key Laboratory of Qinghai Province Tibetan Plateau Agric-Product Processing, Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. State Key Laboratory of Three Rivers Ecological Farming and Plateau Agriculture and Animal Husbandry, Xining 810016, China; 3. Qinghai Province Highland Barley Resources Comprehensive Utilization Engineering Technology Research Center, Qinghai Huashi Science & Technology Investment Management Co. Ltd., Xining 810001, China)

Abstract: In order to explore the difference in the volatile components of different varieties of roasted, gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) was used to separate and identify the volatile components of 10 different varieties of roasted hullless barley. The influence of roasting on the flavor of the variety Kunlun 15 was examined, and then different varieties of roasted hullless barley were classified by using aroma analysis, hierarchical cluster analysis (HCA) and principal component analysis (PCA). The results showed that a total of 140 aroma components were detected in all samples, including 32 heterocyclics, 26 esters, 21 alcohols, 19 aldehydes, 16 ketones, 13 acids, 9 hydrocarbons and 4 nitriles. After roasting, the number of aroma components of Kunlun 15 increased from 48 to 60, and the newly formed aroma components were mostly pyrazines. The most abundant aroma substances were heterocycles (38.59%–64.42%) in all hullless barley varieties, followed by esters (1.85%–35.98%) and aldehydes (7.56%–21.79%). Aroma analysis showed that the flavor of roasted hullless barley was dominated by cocoa-like, roasted and nutty aromas, while raw hullless barley from Kunlun 15 had a strong fruity and sweet aroma. The aroma of roasted hullless barley was related to variety and chemical composition, and Dulihuang might be the most suitable variety for processing of roasted barley. Cluster analysis showed that the samples could be classified into two categories. Kunlun 15 and Zangqing 320 were plotted as one class due to their high similarity. The other varieties could be classified into the other group when the euclidean distance was 9.

Keywords: hullless barley; roasting; volatile flavor; gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS); hierarchical cluster analysis (HCA); principal component analysis (PCA)

收稿日期: 2018-05-22

基金项目: 青海省青藏高原农产品加工重点实验室建设专项(2018-1-6); 青海省科技厅应用基础项目(2016-ZJ-711)

第一作者简介: 张文刚(1993—)(ORCID: 0000-0002-7894-8972), 男, 助理研究员, 硕士, 研究方向为农产品贮藏与加工。

E-mail: zhwgang@hotmail.com

*通信作者简介: 党斌(1980—)(ORCID: 0000-0001-5054-846X), 男, 副研究员, 硕士, 研究方向为食品功能化学与营养。

E-mail: dangbin811@tom.com

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180522-312

中图分类号: TS210

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2019)08-0192-10

引文格式:

张文刚, 张垚, 杨希娟, 等. 不同品种青稞炒制后挥发性风味物质GC-MS分析[J]. 食品科学, 2019, 40(8): 192-201.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180522-312. <http://www.spkx.net.cn>

ZHANG Wengang, ZHANG Yao, YANG Xijuan, et al. GC-MS analysis of volatile flavor substances in different varieties of roasted hulless barley[J]. Food Science, 2019, 40(8): 192-201. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180522-312. <http://www.spkx.net.cn>

青稞 (*Hordeum vulgare* L. var. *nudum* Hook. F.) 是一种禾本科小麦族大麦属的禾谷类农作物, 其成熟后外颖和籽粒分离, 籽粒裸露无外壳, 又称米大麦、裸麦或元麦^[1-2]。青稞作为小宗粮中的大作物, 在我国栽培历史悠久, 种植面积广, 主要分布于海拔约1 400~4 700多米的青藏高原地区, 是我国藏区特色的主产作物和农牧民赖以生存的主要口粮^[3-4]。青稞种质资源丰富, 根据青稞颜色、形状等性状区分的品种多达上千种, 其中西藏地区以六棱青稞为主, 青海以四棱青稞为主^[5]。青稞与一般谷物的主要组成相近, 但营养价值更高, 具备独特的“三高两低”优势(高蛋白、高纤维、高维生素、低脂肪和低糖), 且富含酚类、 β -葡聚糖、膳食纤维等活性成分, 可很好地迎合人们“健康饮食”的需求^[6-8]。随着食品工业和分子营养学的不断发展, 青稞已成为功能食品开发的热点之一, 青稞食品如青稞挂面、青稞麦片、青稞饼干、青稞酸奶、青稞谷物饮料等不断被研发出来^[9-12]。青稞传统的加工形式主要为糌粑, 是将青稞麦粒炒熟、磨细、不经过筛滤制作而成的炒面, 保留了青稞全谷营养特性, 具备很高的营养价值, 是藏族人民一日三餐传统的主食之一^[13-15]。目前, 青稞糌粑已实现工业化生产, 相关研究工作也主要集中在糌粑加工工艺及产品质量控制方面^[16-17], 但对青稞炒制后挥发性风味物质的鉴定和分析鲜有报道。

食品中常用的风味分析技术主要有气相色谱、气相色谱-质谱联用(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)、电子鼻等, 其中GC-MS法速度快、准确度高, 可对几百种挥发性化合物同时进行定性定量检测, 是食品风味化合物分析的理想选择^[18-21]。本研究收集和选择不同品种青稞资源10份, 采用顶空固相微萃取结合GC-MS方法分析不同品种青稞炒制后主要挥发性风味物质, 结合香气分析、主成分分析(principal component analysis, PCA)、聚类分析(hierarchical cluster analysis, HCA)明确炒制对青稞挥发性成分的影响及不同品种的风味物质变化与差异, 为青稞糌粑加工及其他青稞焙炒食品的开发提供一定的理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料

供试的昆仑15号(KL-15)、肚里黄(DLH)、北青6号(Bq-6)、北青8号(Bq-8)、阿青6号(Aq-6)、西藏黑青稞(XZH)、瓦蓝青稞(WN)、康青7号(Kq-7)、甘青4号(Gq-4)、藏青320(Zq-320)10种青稞种质资源由青海省农林科学院作物所提供。风味化合物分析中未炒制昆仑15号记为KL-15w。

1.2 仪器与设备

6CG-80控温电炒锅 信阳市浉河区利农炒茶机厂; XL-10B扣压摇摆式小型粉碎机 天津华鑫仪器厂; AL204电子天平 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司; TSQ8000evo气相色谱、固相微萃取手柄、固相微萃取装置、65 μm DVB/CAR-PDMS萃取头、TSQ8000evo质谱系统、TG-WAXMS聚乙二醇毛细管柱(30 m \times 0.32 μm , 0.25 μm) 美国Thermo Fisher公司; 总淀粉测定试剂盒、ZS21-K-BGLU β -葡聚糖(混联)检测试剂盒 爱尔兰Megazyme公司。

1.3 方法

1.3.1 青稞基本成分测定

水分测定: 参照GB 5009.3—2010《食品中水分的测定》; 灰分测定: 参照GB 5009.4—2010《食品中灰分的测定》; 蛋白质测定: 参照GB 5009.5—2010《食品中蛋白质的测定》; 脂肪测定: 参照GB/T 5009.6—2003《食品中脂肪的测定》; 纤维测定: 参照GB/T 5009.88—2003《食品中不溶性膳食纤维的测定》; 氨基酸测定: 参照GB/T 5009.124—2003《食品中氨基酸的测定》; 总淀粉测定: 参照总淀粉测定试剂盒说明书。

1.3.2 不同品种青稞炒制

取不同品种青稞原料, 清理并清洗干净后于通风处晾晒至干燥, 然后利用炒锅将一定量的青稞于105 $^{\circ}\text{C}$ 炒制5 min, 炒制后的青稞趁热用万能粉碎机粉碎成粒度为60目的青稞粉备用。

1.3.3 青稞风味化合物GC-MS检测

准确称取青稞炒制粉2.0 g于10 mL样品瓶内, 将老化

好的DVB/CAR-PDMS萃取头插入样品瓶,伸出纤维于上空气中,60℃预热10 min,萃取30 min,在进样口吸取5 min后用于GC-MS分析,每个样品重复3次。

GC条件:进样口温度:265℃,载气流速:1.0 μL/min;程序升温:40℃保持2 min,以5℃/min升温至120℃,保持0 min,最后以12℃/min升温至240℃,保持10 min。

MS条件:电子电离源,电子能量70 eV,离子温度230℃,传输线温度250℃,扫描质量范围33~495 u。

1.4 数据处理

未知化合物采用NIST谱库进行检索,选择正反匹配度大于80的物质予以确认。采用SPSS 18.0和Microsoft Excel 2003进行数据分析处理。

2 结果与分析

2.1 不同品种青稞的基本成分分析

表1 不同品种青稞的基本成分
Table 1 Chemical composition of different varieties of hullness barley

品种	质量分数/%							
	水分	灰分	纤维	脂肪	蛋白质	总淀粉	β-葡聚糖	总氨基酸
KI-15	12.26±0.11 ^d	0.31±0.02 ^c	2.44±0.05 ^c	2.06±0.03 ^b	10.56±0.18 ^e	49.58±1.51 ^f	6.70±0.09 ^d	8.00±0.13 ^d
DLH	11.66±0.07 ^b	0.20±0.01 ^f	2.55±0.03 ^d	2.02±0.04 ^b	12.82±0.15 ^b	62.26±1.64 ^c	5.87±0.08 ^e	13.04±0.21 ^a
Bq-6	11.90±0.09 ^c	0.10±0.01 ^g	3.15±0.04 ^a	2.01±0.04 ^b	12.31±0.09 ^f	55.74±1.27 ^d	4.43±0.05 ^f	10.98±0.09 ^e
Bq-8	10.09±0.05 ^e	0.39±0.03 ^d	2.67±0.04 ^c	2.33±0.02 ^a	10.03±0.11 ^e	59.82±0.47 ^e	3.80±0.06 ^f	8.23±0.03 ^e
Aq-6	12.50±0.08 ^e	1.22±0.06 ^a	2.33±0.02 ^d	1.71±0.04 ^e	9.42±0.06 ^f	62.66±1.53 ^b	4.13±0.12 ^b	8.76±0.05 ^b
XZH	11.74±0.04 ^f	0.42±0.02 ^e	2.66±0.05 ^c	1.87±0.01 ^f	11.03±0.08 ^e	58.47±1.53 ^d	4.73±0.05 ^e	11.42±0.11 ^c
WN	12.70±0.12 ^b	0.64±0.03 ^b	2.10±0.03 ^e	1.92±0.02 ^e	12.48±0.12 ^c	59.13±0.89 ^f	5.82±0.01 ^b	10.05±0.12 ^c
Kq-7	13.34±0.10	0.39±0.01 ^d	2.51±0.03 ^d	1.80±0.02 ^d	13.42±0.20 ^a	57.86±1.32 ^b	4.80±0.03 ^d	11.88±0.25 ^b
Gq-4	11.00±0.03 ^g	0.16±0.01 ^h	2.92±0.01 ^b	1.81±0.03 ^d	9.34±0.07 ^g	61.02±1.01 ^d	4.52±0.01 ^f	8.86±0.08 ^e
Zq-320	12.73±0.05 ^c	0.28±0.02 ^e	2.43±0.04 ^c	1.42±0.04 ^f	10.79±0.13 ^f	68.62±2.63 ^a	5.34±0.11 ^c	9.14±0.04 ^f

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

由表1可知,10种青稞水分质量分数分布在10.09%~13.34%,除WN与Zq-320无显著差异外,其他青稞品种间均存在显著性差异($P<0.05$);灰分质量分数分布在0.10%~1.22%,DLH与Gq-4无显著差异,其他青稞品种间有显著差异($P<0.05$);纤维质量分数分布在2.10%~3.15%,DLH和Kq-7无显著差异,其余品种均存在显著差异($P<0.05$);脂肪质量分数在1.42%~2.33%之间,含量最低为Zq-320,最高为Bq-8, KI-15、DLH、Bq-6脂肪含量较高且无显著差异,Kq-7与Gq-4含量处于中间水平且无显著差异,其余品种差异显著($P<0.05$);蛋白质作为青稞主要营养组分之一,质量分数在9.42%~13.42%之间,最高为Kq-7,最低为Aq-6,各品种间差异显著($P<0.05$);淀粉为青稞中最丰富的物质,质量分数可达49.58%~68.62%,

含量最高为Zq-320,最低为KI-15,各品种间差异显著($P<0.05$);β-葡聚糖作为青稞中质量分数较高(3.80%~6.70%)的功能性低聚糖,品种资源不同,含量存在显著差异,其中含量最高为KI-15,DLH和WN次之,且处于同一水平,含量最低为Bq-8;氨基酸是青稞中含量较高的营养功能组分,是形成炒制特征风味重要的前体物质之一,各品种间质量分数分布在8.00%~13.04%,且差异显著($P<0.05$),含量较高的品种有DLH、Kq-7和XZH,含量最低为KI-15。青稞中这些主要组分共同构成炒制风味形成的物质基础,是不同品种青稞炒制粉挥发性香气组成与含量差异的初始来源。各品种青稞炒制后的特征香气,差异程度与气候、水土、栽培技术等条件引起的前体物质种类、含量、组成等不同有关^[22]。

2.2 炒制对青稞粉风味化合物的影响

由表2可知,KI-15w与KI-15挥发性成分种类和相对含量存在明显差异,炒制后香气种类更加丰富。KI-15w鉴定出48种,相对含量分别为醇类9.78%、醛类8.45%、酯类31.90%、酮类3.87%、酸类6.33%、杂环类0.36%、烷烃类10.34%、腈类6.34%。炒制后KI-15共鉴定出60种挥发性物质,相对含量分别为醇类3.57%、醛类9.38%、酯类35.98%、酮类0.99%、酸类2.73%、杂环类39.87%、烷烃类2.75%、腈类0.76%。

KI-15w香气物质是青稞籽粒本身具有的挥发性成分,主要包括酯类、醇类和醛类,表现为清香、酯香及甜香等,而炒制后,KI-15醇类种类和相对含量分别减少4种和63.49%,1-己醇、2-乙基-1-己醇、1-十二烷醇、(Z)-9-十八碳烯-1-醇等未检出,但出现了(2Z,5Z)-十五碳二烯-1-醇、苯甲醇和18-二十碳烯-1-醇,对风味影响较大的低阈值不饱和醇由4.72%降低到1.57%。醇类是天然KI-15w青稞中带有清香、花香和果香的重要风味化合物,结构上有脂肪族醇类、芳香族醇和萜烯族醇类等,它们的形成与醇还原酶作用相关^[23],在炒制过程中部分醇还原酶会受热失活使醇类物质的生成受阻,在较高温度下醇类物质也可发生酯化、缩合、裂解等反应,最终使炒制后醇类含量显著降低、酯类含量有所增加。一般来说醇类物质风味阈值高,炒制前(9.78%)对KI-15风味有一定贡献,炒制后(3.57%)贡献很小。由表2可看出,炒制后酯类相对含量增加12.79%,其可能来自原料本身或原料中醇与酸的酯化反应^[18];乙酸乙酯相对含量明显增加是酯类总量上升的主要原因,其他共有酯类相对含量均有所降低。

炒制后,醛类物质增加11.0%,壬醛、(E)-十四碳-2-烯醛和(Z)-11-十六碳烯醛未检出,但出现了(E,E)-2,4-壬二烯醛、5-甲基-2-呋喃甲醛和二十烷醛,糠醛由0.27%增加到1.89%,己醛由0.2%增加到1.27%,这些醛类可赋

予炒制青稞脂肪香、青草香、焦糖香等^[22]。K1-15醛类相对含量的增加主要源于脂肪氧化^[18,24]，它们是青稞受热时的特征风味化合物之一，可赋予炒制青稞粉一定的脂肪香味。由不饱和脂肪酸氧化产生的(E,E)-2,4-壬二烯醛为K1-15唯一活性较高的不饱和醛，其对炒制风味的形成较为重要^[22]。研究表明，大麦胚芽油中主要为亚油酸(55%)、棕榈酸(21%)及油酸(18%)，K1-15w中的这些功能性脂肪酸在炒制中可能易于发生氧化反应转化为醛类，从而使脂质氧化成为炒制青稞粉特征香气的重要途径^[25]。

酮类主要来自脂肪氧化、酯类分解或糖类热降解过程，在K1-15w中含量较低，炒制后K1-15中其相对含量和种类显著下降，这可能与酮类经反应生成二环吡嗪类物质以及炒制中挥发有关，酮类阈值相比同分异构的醛类要高，其对炒制风味影响较小^[18,26]。酸类相对含量降低56.87%，共有酸类是醋酸、己酸、9-十六碳烯酸和棕榈酸，主要呈现果香味和酸味^[25]。乙酸在几乎所有的植物种子中都有，经过炒制后含量会显著下降，新出现的2-甲基丁酸和2-甲基己酸可能由相应的醇、醛等化合物氧化而来，而9-十六碳烯酸和棕榈酸相对含量的显著降低，可能是参与了不饱和脂肪酸的热反应生成其他化合物^[27]。

烷烃类相对含量下降73.40%，种类增加2种，主要由青稞油脂在高温炒制过程中发生氧化和分解生成，其阈值较高，对风味贡献度较低^[19]。腈类具有比醛类更加尖锐和强烈的香味，主要存在于K1-15w，炒制后只有少量十六烷腈。

由表2可知，K1-15w只检出2-戊基呋喃(0.36%)，炒制后其相对含量进一步增大。炒制后K1-15出现16种新杂环化合物，总量达39.87%，其中吡嗪类93.18%、酚类0.88%、吡啶类1.58%、呋喃类4.36%。吡嗪类化合物是烘烤食品中的主要风味物质，其种类丰富且具有独特的香气和极低的阈值，是决定炒制青稞粉香气最关键的挥发性化合物^[28]。吡嗪类化合物环上氢原子被烷基、酰基或烷氧基取代生成2-乙酰基-3-甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、3,5-二乙基-2-甲基吡嗪等具有较强焦香味、烘烤味和清香味^[19]。吡啶类主要为具有焦香和烤香味的为2-乙酰基四氢吡啶^[16]。杂环类物质主要由K1-15青稞原料粉中还原糖与多种游离氨基酸发生美拉德、焦糖化及斯特勒克降解等反应生成，阈值极低(一般以 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 计)，作为炒制青稞粉最主要的特征风味化合物，可赋予食品坚果香、焙烤香、可可香等^[19,22,24]。

表2 K1-15w及其他不同青稞品种炒制样品的SPME-GC/MS分析结果

Table 2 SPME-GC/MS analysis of volatile flavor compounds of raw hullness barley from Kunlun 15 and roasted samples of different varieties

序号	化合物名称	保留时间/min	相对含量/%												香气类型
			K1-15w	K1-15	DLH	Aq-6	Bq-6	Bq-8	XZH	Gq-4	WN	Kq-7	Zq-320		
醇类															
1	(2Z,5Z)-十五碳二烯-1-醇	5.94	—	0.11	0.67	—	0.29	0.16	0.89	—	0.08	1.52	—	—	
2	4-甲基-1-戊醇	12.85	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.53	—	
3	1-己醇	12.87	0.54	—	0.43	0.45	0.32	0.23	—	1.65	1.18	—	0.53	香蕉味, 花香, 青草香, 香草味	
4	1-辛烯-3-醇	15.47	0.37	0.31	0.16	0.78	0.36	0.16	0.30	0.38	0.60	0.73	1.11	土壤香气, 油脂香, 花香, 霉香, 蘑菇香	
5	2-乙基-1-己醇	16.52	0.13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	青草香, 玫瑰香	
6	反式-2,3-丁二醇	17.69	—	—	5.85	—	—	11.50	—	—	—	—	—	水果香	
7	2-呋喃甲醇	20.22	0.51	1.76	0.91	1.70	0.87	0.70	1.76	1.76	1.66	1.11	1.46	烧焦味, 焦糖香, 蒸煮味	
8	13-十七烯-1-醇	20.43	0.50	0.18	—	—	0.24	—	—	—	—	—	—	—	
9	2-环戊基环戊醇	20.52	—	—	—	—	—	—	—	—	0.33	—	—	—	
10	苯甲醇	23.04	—	0.24	0.13	0.25	0.26	—	0.44	0.44	—	0.20	0.15	熟樱桃香, 烤面包香, 玫瑰花香, 甜香等	
11	环十二烷醇	23.47	1.50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
12	1-十二烷醇	23.85	1.83	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	脂肪味, 蜡香	
13	(Z)-2-(9-十八碳烯氧基)乙醇	23.96	0.55	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
14	2-甲基-1-戊烯-3-醇	24.64	—	—	—	0.36	—	—	0.25	—	—	—	—	—	
15	E,E,Z-1,3,12-十九碳三烯-5,14-二醇	25.13	0.33	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
16	18-二十碳烯-1-醇	25.45	—	0.31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
17	2-甲基-3,13(Z,Z)-十八碳二烯醇	25.90	1.64	0.48	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
18	(Z)-9-十八碳烯-1-醇	27.11	1.48	—	—	—	—	—	0.19	—	—	—	—	—	
19	1-十六烷醇	27.28	—	—	0.37	—	—	—	—	—	—	—	—	花香, 蜡香	
20	(3A,5Z,7E)-9,10-斯链胆甾-5,7,10(19)-三烯-3,24,25-三醇	28.54	0.40	0.18	0.34	0.31	0.13	0.05	0.08	0.18	0.10	1.75	1.80	—	
21	1-二十烷醇	28.79	—	—	1.11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
醛类															
22	丁醛	2.48	—	—	1.90	—	—	3.25	—	—	—	—	—	清香	
23	2-甲基丙醛	2.51	—	—	1.90	—	—	—	—	—	3.67	—	—	果香味, 巧克力味, 香蕉香味	
24	3-甲基丁醛	3.23	—	—	1.58	—	0.98	5.47	—	—	3.12	—	—	辛辣味, 杏仁味, 可可味, 麦芽味	

续表2

序号	化合物名称	保留 时间/min	相对含量/%										香气类型			
			K1-15w	K1-15	DLH	Aq-6	Bq-6	Bq-8	XZH	Gq-4	WN	Kq-7		Zq-320		
79	Z-8-十八碳烯-1-醇乙酸酯	27.88	0.48	0.16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
80	2,4-丁二烯酸-3-甲基甲酯	30.72	0.30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
81	10,13-二十碳二烯酸甲酯	31.14	0.24	0.21	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
82	4-羟基十八烷酸甲酯	34.76	0.50	0.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
酸类																
83	丙酰胺酸	2.44	—	—	—	—	—	—	0.65	—	3.38	3.10	—	—	—	—
84	醋酸	15.79	1.21	0.48	0.52	1.19	0.49	0.83	1.07	0.70	0.77	1.60	2.46	酸味, 水果香, 辛辣味, 醋香		
85	4-羟基丁酸	19.65	—	—	0.46	0.38	0.41	0.53	0.28	0.33	0.39	0.40	0.43	—		
86	3-甲基丁酸	20.41	—	—	0.28	—	—	0.28	—	—	—	—	—	奶酪香, 汗味		
87	2-甲基己酸	20.44	—	0.37	—	0.26	—	0.28	0.16	0.14	0.31	0.20	0.35	奶油味, 鸡脂肪香, 酸味, 猪油香		
88	2-甲基丁酸	20.44	—	0.37	—	0.26	—	—	0.13	0.14	0.31	0.19	0.35	奶酪香, 果香, 油脂味		
89	己酸	22.70	0.51	0.73	0.28	1.43	0.74	0.67	0.74	1.05	0.37	1.20	1.84	奶酪香, 油味, 辛辣味, 酸甜味		
90	9-十六碳烯酸	23.01	2.56	0.39	0.33	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
91	2-乙基己酸	23.77	—	—	0.50	1.00	0.24	—	0.65	0.35	—	0.90	0.54	—		
92	辛酸	24.80	—	—	0.14	0.19	0.18	0.13	0.16	0.28	0.21	0.20	0.37	奶酪香, 油味, 汗味		
93	壬酸	25.68	—	—	—	—	0.16	—	—	0.36	—	—	0.44	脂肪香, 椰子香		
94	十四烷酸	29.74	—	—	0.61	—	—	—	—	—	—	0.13	—	烧焦味, 奶酪味, 涩味, 油脂味, 蜡香		
95	棕榈酸	32.10	2.05	0.39	1.07	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
吡嗪类																
96	吡嗪	9.03	—	—	—	0.14	—	—	—	—	—	—	—	青草香, 辛辣味, 烤香, 甜香		
97	2-甲基吡嗪	10.41	—	3.92	5.81	5.35	5.61	4.87	7.35	5.57	7.16	6.27	4.25	坚果香, 可可味, 巧克力味, 烤花生味		
98	2,5-二甲基吡嗪	11.90	—	10.7	7.75	7.02	7.97	10.80	15.69	11.06	10.63	7.56	9.63	可可味, 坚果味, 泥土味		
99	2,6-二甲基吡嗪	12.07	—	—	3.08	—	2.99	—	—	—	2.99	3.23	—	可可味, 焙烤坚果味, 咖啡味		
100	乙基吡嗪	12.22	—	—	0.11	—	0.10	0.05	—	0.13	0.13	—	—	花生酱味, 坚果味, 焙烤可可味		
101	2,3-二甲基吡嗪	12.55	—	0.85	1.13	1.02	1.37	1.14	1.22	0.82	1.20	1.03	0.95	坚果味, 烤土豆味, 可可味, 焦糖味等		
102	2-乙基-6-甲基吡嗪	13.67	—	0.83	5.73	0.77	1.17	2.99	0.96	0.73	1.31	1.02	0.62	烤土豆味		
103	2-乙基-5-甲基吡嗪	13.83	—	1.9	0.83	1.86	2.36	3.24	2.56	2.10	2.57	1.87	1.77	咖啡味, 坚果味		
104	2,3,5-三甲基吡嗪	14.16	—	5.73	7.55	5.56	7.70	7.73	7.05	5.95	6.65	5.65	5.31	坚果味, 泥土味, 可可味, 烤花生味		
105	2,6-二乙基吡嗪	14.91	—	0.16	0.31	0.31	0.28	0.39	—	—	—	—	—	可可味, 焙烤坚果香, 咖啡味		
106	3-乙基-2,5-二甲基吡嗪	15.23	—	8.88	14.50	8.70	11.3	15.93	9.28	7.61	10.26	9.76	7.45	坚果味, 泥土味, 可可味		
107	2-乙基-3,5-二甲基吡嗪	15.64	—	0.81	1.25	0.73	1.47	1.64	0.68	0.95	0.98	1.21	0.63	土腥味, 葡萄汁香, 烤土豆味		
108	四甲基吡嗪	15.91	—	—	—	—	—	3.97	—	—	—	—	—	可可香, 咖啡香, 烤香, 青草香		
109	3,5-二乙基-2-甲基吡嗪	16.48	—	0.89	2.36	1.19	1.96	3.11	1.41	1.13	1.53	2.00	1.41	可可香, 烤香, 朗姆酒香, 甜香		
110	2,3,5-三甲基-6-乙基吡嗪	16.97	—	—	0.52	—	—	—	—	—	—	—	—	可可香, 巧克力香, 炒杏仁香		
111	2-甲基-6-(2-丙烯基)-吡嗪	17.64	—	1.24	0.96	—	—	0.85	2.49	—	2.07	—	—	—		
112	(Z)-2-甲基-3-(1-丙烯基)-吡嗪	19.34	—	—	0.37	0.33	0.38	0.34	0.30	0.32	0.35	0.28	0.33	—		
113	1-甲基乙基吡嗪	19.76	—	—	—	—	0.35	—	—	—	—	—	—	—		
114	2,5-二甲基-3-(3-甲基丁基)-吡嗪	20.03	—	—	—	—	0.26	—	—	—	—	—	—	—		
115	2-乙酰基-3-甲基吡嗪	20.59	—	—	0.24	0.39	0.37	0.25	0.23	0.28	0.20	0.37	—	木香, 暖香, 熏肉香		
116	(E)-2-甲基-5-(1-丙烯基)-吡嗪	20.92	—	1.24	0.96	0.26	0.27	0.19	0.32	0.20	2.30	1.76	0.21	芳香味, 花生油香气		
酚类																
117	2-甲氧基苯酚	22.86	—	—	0.11	0.18	0.19	0.08	0.22	0.27	0.25	0.12	1.12	芳香味		
118	4-乙基-2-甲氧基苯酚	26.05	—	0.35	0.60	0.90	0.68	0.32	0.98	1.14	1.07	0.93	0.94	发酵香, 炒花生香		
吡啶																
119	2-乙酰基-1,4,5,6-四氢吡啶	19.56	—	0.27	0.43	0.34	0.54	0.17	0.45	0.47	0.49	0.38	0.28	焦糖味		
120	2-乙酰基-3,4,5,6-四氢吡啶	21.15	—	0.36	0.32	0.38	0.30	0.42	0.61	0.43	0.47	0.34	0.43	焦糖香, 爆米花香, 烤香		
咪唑类																
121	2-戊基咪唑	9.64	0.36	1.45	2.02	2.45	1.35	0.54	1.57	1.77	0.80	1.24	2.93	黄油香, 花香, 水果香, 绿豆香		
122	2-乙基咪唑	24.34	—	0.29	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
吡咯																
123	2,5-二氢-1H-吡咯	21.72	—	—	—	—	—	—	—	0.33	—	—	—	坚果香, 甜香		
124	1-(2-咪唑基甲基)-1H-吡咯	22.53	—	—	—	0.21	0.18	0.09	—	0.25	0.32	—	—	—		
其他																
125	4-甲基嘧啶	10.40	—	—	—	—	—	4.87	7.35	—	7.16	—	—	—		
126	1-亚甲基苄	21.33	—	—	—	—	—	0.20	—	—	0.32	—	0.22	—		

续表2

序号	化合物名称	保留时间/min	相对含量/%											香气类型
			KI-15w	KI-15	DLH	Aq-6	Bq-6	Bq-8	XZH	Gq-4	WN	Kq-7	Zq-320	
127	1-甲氧基-苯基-蒎 烷烃类	21.64	—	—	0.20	0.50	0.21	0.18	0.29	0.41	0.47	0.50	0.68	—
128	4-甲基癸烷	11.41	—	—	—	—	—	—	—	0.83	—	—	—	—
129	3-甲基-1,2,4-三氧杂环戊烷	17.27	—	—	—	—	—	0.71	—	—	—	—	—	—
130	5H-5-甲基-6,7-二氢环戊烷	19.39	—	0.18	0.29	0.33	0.38	0.34	0.30	0.32	0.35	0.28	0.33	—
131	十二烷	22.22	—	0.67	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
132	十四烷	23.39	4.42	1.56	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
133	十五烷	24.48	5.92	0.31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	烯烃类													
134	1-甲基-双环[2.2.1]庚-2-烯	8.99	—	—	0.57	—	—	—	—	—	—	—	—	—
135	3-乙基-2-甲基-1,3-己二烯	14.50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.26	—
136	R-柠檬烯 蒎类	14.53	—	—	—	—	—	0.08	—	—	—	—	—	—
137	苯丙烷腈	24.64	0.56	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
138	十六烷腈	27.40	3.83	0.76	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
139	10-十一碳烯腈	27.61	0.96	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
140	十八烷腈	29.00	1.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

注：—未检出或文献中未查阅到物质所具有的香气类型；物质香气类型主要根据<http://www.vcf-online.nl/VcfHome.cfm>和<http://www.flavornet.org>及文献[29]报道查得。

2.3 不同品种青稞炒制后风味成分组成差异

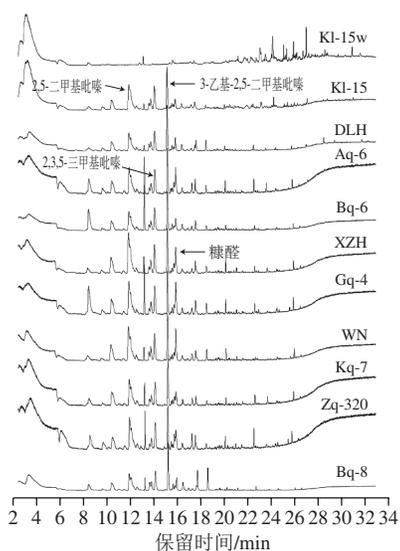


图1 10种炒制青稞挥发性风味物质GC-MS指纹图谱

Fig. 1 GC-MS fingerprints of volatile flavor substances in 10 varieties of roasted hullness barley

由图1可知，炒制样共有峰有23个，经鉴定分别为醇类：1-辛烯-3-醇、2-呋喃甲醇、(3A,5Z,7E)-9,10-断链胆甾-5,7,10(19)-三烯-3,24,25-三醇；酯类：(19S)-17-油酸-19-(乙酰氧基)-2,16二脱氢-20-羟基甲酯；醛类：(E,E)-2,4-壬二烯醛和糠醛；杂环类：2-甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、2,3-二甲基吡嗪、2-乙基-6-甲基吡嗪、2-乙基-5-甲基吡嗪、2,3,5-三甲基吡嗪、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪、2-乙基-3,5-二甲基吡嗪、3,5-二乙基-2-甲基吡嗪、(E)-2-甲基-5-(1-丙烯基)-吡嗪、2-戊基呋喃、2-乙酰基-1,4,5,6-四氢吡啶、2-乙酰基-3,4,5,6-四氢吡啶、

4-乙基-2-甲氧基苯酚；酸类：醋酸、己酸；烷烃类：5H-5-甲基-6,7-二氢环戊烷。共有组分最丰富的是杂环类（63.64%），其次为醇类（13.64%）和酸类（9.09%），而炒制青稞中最具代表性的香气物质为杂环化合物中的吡嗪类物质。

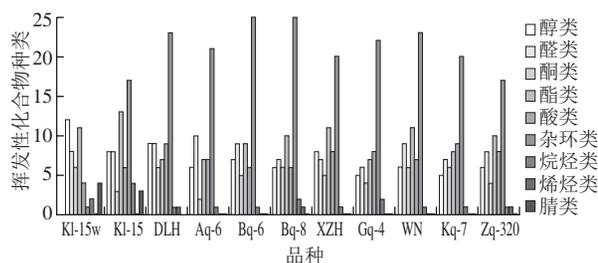


图2 KI-15w及其他不同品种炒制青稞中各类挥发性物质种类对比
Fig. 2 Comparison of volatile classes in different varieties of roasted hullness barley and raw hullness barley from Kunlun 15

由表2可知，10个品种（KI-15、DLH、Aq-6、Bq-6、Bq-8、XZH、Gq-4、WN、Kq-7、Zq-320）炒制青稞中分别鉴定出60、65、54、62、64、60、54、63、56种和55种挥发性物质，不同品种在各类物质种类和相对含量上均存在差异，总体上可能由青稞品种差异、基本化学组成及青稞材料本身挥发性香气的不同所引起。

由图2可知，KI-15w醇类、醛类、酯类最多，其次为酮类。炒制样杂环类物质最多，其次为酯类、醛类、酸类等，不同品种间存在较大差异。醇类相对含量最高为Bq-8（12.80%），其次为DLH（9.97%），最低为Bq-6（2.47%）；种类最丰富为DLH（9种），其次为KI-15和XZH（8种），最少为WN和Kq-7（5种）。醇类主要是(2Z,5Z)-十五碳二烯-1-醇、1-己醇、1-辛烯-3-醇、2-呋

喃甲醇、苯甲醇等, DLH和Bq-8中反式-2,3-丁二醇分别达到5.85%和11.5%, 其他样品相对含量最高为2-呋喃甲醇, 这些主要醇类风味阈值较低, 是形成清香、甜香、水果香、花香等特征醇香气的关键。不同青稞品种间醇类物质差异性的可能原因有: 原料醇类、蛋白质、脂肪、氨基酸等含量不同; 青稞醇还原酶活性差异; 醇前体物质组成及形成氢过氧化物能力不同^[22,30]。

醛类相对含量最高为WN (21.79%), 其次为DLH (17.39%) 和Zq-320 (15.76%), 最低为Gq-4 (7.56%); 种类最丰富为Aq-6 (10种), 其次DLH、Bq-6和WN (9种), 最少为Gq-4 (6种), 主要包括3-甲基丁醛、2-甲基丁醛、戊醛、己醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛、苯甲醛、5-甲基-2-呋喃甲醛、苯乙醛等。酮类整体较少, 含量较高为Bq-8、WN、XZH、Kq-7和DLH, 较低为Kl-15、Aq-6、Bq-6、Gq-4和Zq-320。种类最多为DLH、Bq-8、WN和Kq-7 (6种), 其次为Bq-6和XZH (5种), 最少为Kl-15和Aq-6。5-甲氧基-2-戊酮和5-乙基二氢-2(3H)-呋喃酮只在DLH中检出, Bq-8和XZH中相对含量最高为1-(6-甲基-2-吡嗪基)-1-乙酮, Zq-320中相对含量最高为3,5,5-三甲基-2-环己烯酮, 其他品种相对含量最高为呋喃酮。炒制青稞中醛类和酮类物质主要是脂肪酸氧化的产物, 因此各青稞中粗脂肪含量及脂肪酸组成对醛类和酮类化合物相对含量与组成有着重要影响^[23]。由表1可知, Bq-8脂肪含量最高, DLH、Bq-6、WN次之, 这与WN、DLH醛类较丰富, Bq-8、WN、DLH酮类较丰富的趋势相符。青稞炒制香气变化与炒制条件、环境、组成、品种等因素均相关, 因而除影响醛类和酮类形成和差异的主要因素脂肪类物质外, 其他因素的差异性也是造成品种香气不同的可能原因^[22]。

酯类相对含量最高为Kl-15 (35.98%) 和Zq-320 (25.58%), 其次为Kq-7 (11.35%) 和XZH (9.81%), 最低为DLH (1.85%)。Kl-15中检出13种, XZH和WN中11种, DLH、Aq-6和Gq-4只有7种。酯类相对含量品种差异较大, 例如: Kl-15中主要是醋酸甲酯 (4.85%) 和乙酸乙酯 (24.59%), Kq-7和Zq-320含量最高为(19S)-17-油酸-19-(乙酰氧基)-2,16-二脱氢-20-羟基甲酯, DLH中含量最高为丁内酯, Bq-6、XZH和Zq-320中主要是乙酸乙酯、乙酸烯丙酯和4-氨基-N-叔丁氧羰基-苯丙氨酸叔丁酯。酯类中长链复杂脂肪酸形成的酯较少, 而以低级脂肪酸和脂肪醇形成的甲酸乙酯、醋酸乙酯、丁内酯等为主, 其中丁内酯的形成可能与青稞超过最佳炒制温度和时间有关^[31]。酯类含量与种类总体差异性大的主要原因可能以青稞品种差异因素为主, 尤其青稞中氨基酸及脂肪含量与组成不同。

酸类相对含量最高为Kq-7 (7.92%), 其次为Zq-320 (6.78%) 和WN (5.74%), 最少为Bq-6 (2.22%), 种

类最丰富为DLH和Kq-7 (9种), XZH、Gq-4和Zq-320为8种, 最少为Kl-15、Bq-6和Bq-8 (6种), 主要包括醋酸、4-羟基丁酸、2-甲基己酸、2-甲基丁酸、己酸、2-乙基己酸和辛酸。醋酸和己酸是所有样品共存且含量较高的酸, 3-甲基丁酸只在DLH和Bq-8中检出, 9-十六碳烯酸主要存在于Kl-15和DLH。炒制后2-乙基己酸在Kl-15、Bq-8和WN中未检出, 壬酸只于Bq-6、Gq-4和Zq-320中检出。酸类化合物含量低但种类丰富, 由于阈值较低, 对香气形成有一定贡献。炒制青稞中烃类和脂类物质很少, 但均检出5H-5-甲基-6,7-二氢环戊烷。酸类主要是高温炒制过程中由相应醇和醛等氧化生成, 含量及种类随青稞品种有所变化, 其中乙酸存在于所有青稞的籽粒中且炒制后含量显著下降, 具有香甜气息的己酸阈值很高, 丁酸一般只在炒制青稞样中检出^[22]。烷烃类可能是青稞糖类和油脂降解形成的产物, 一般阈值都很高, 对食品风味贡献较小^[19]。

杂环类是炒制青稞中种类和含量最多的香气物质。Kl-15、Aq-6、Zq-320中相对含量分别为39.87%、38.59%和38.94%, Bq-6、Gq-4、Kq-7中相对含量分别为49.56%、42.24%和45.74%, DLH、Bq-8、XZH和WN中相对含量分别为57.14%、64.42%、61.01%和61.36%。种类最多为Bq-6和Bq-8 (25种), 其次为DLH和WN (23种), 最少为Kl-15和Zq-320 (17种), 以吡嗪类为主, 酚类、呋喃类、吡啶类、吡咯类等含量很低。吡嗪类主要包括2-甲基吡嗪 (3.92%~7.35%)、2,5-二甲基吡嗪 (7.02%~15.69%)、2,3,5-三甲基吡嗪 (5.31%~7.55%)、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪 (7.45%~15.93%) 等。酚类中2-甲氧基苯酚、4-乙烯基-2-甲氧基苯酚及吡啶类中2-乙酰基四氢吡啶在不同样品中几乎都存在。呋喃类主要是2-戊基呋喃, 而2-乙烯基呋喃只在Kl-15中检出。具有坚果香的2,5-二氢-1H-吡咯 (0.33%) 只在Gq-4中检出。杂环类主要由还原糖和氨基酸之间的美拉德、焦糖化及斯特勒克降解反应生成, 而其中吡嗪类是主要的风味物质, 其可作为不同炒制青稞品质评价及工艺优化的核心指标^[23]。吡嗪类化合物只存在于炒制后的青稞中, 其中2,5-二甲基吡嗪、2,3,5-三甲基吡嗪及3-乙基-2,5-二甲基吡嗪可作为预测炒制青稞炒制品质变化的理想化合物 (图1)。呋喃化合物炒制后显著增加, 呋喃衍生物如糠醛在热加工食品中均存在, 可提供令人愉悦的气味和甜味^[22-23]; 各青稞中均含有的2-戊基呋喃能提供强烈的焙烤香气, 且含量与焙烤时间有关, 受脱酰胺基反应及糖激活作用的调控^[26]。含量和种类较少的苯酚、吡啶及吡咯一般也由美拉德反应生成, 具有强烈的焙烤风味, 对青稞炒制风味也有一定贡献。

不同品种青稞炒制后形成的杂环类 (尤其吡嗪类化合物) 特征香气间的差异可能主要由样品初始水分含量

不同引起。研究显示,样品初始水分含量与焙炒过程升温 and 脱水速率直接相关,浅度和深度炒制过程中杂环类化合物含量均会随着水分含量降低而显著升高,而其他化合物变化不大,当水分含量低时样品能更快达到理想炒制风味^[22]。由表1可知,Bq-8水分最少,对应检测到的杂环类相对含量最高为64.42%,其次为水分含量较低的XZH、WN和DLH,水分含量最高的Kq-7为45.74%,显著低于Bq-8。除此之外,形成各类风味化合物的脂肪、蛋白质、氨基酸、还原糖等前体物质含量与组成差异也是造成不同品种炒制青稞特征香气种类和含量差异的重要原因。

2.4 不同品种青稞炒制粉的香气系列分析

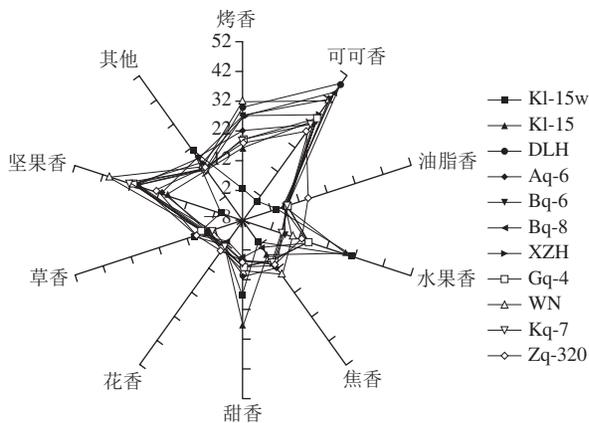


图3 KI-15w及其他不同品种炒制青稞香气系列分布

Fig. 3 Aroma distribution of different varieties of roasted hullness barley and raw hullness barley from Kunlun 15

由图3可知,KI-15w基本无炒制香气,主要为水果香、甜香和较弱的草香和花香。炒制青稞香气分布类似,草香和花香变化较小,果香明显减弱,焦香和坚果香不同程度增强。KI-15在炒制香气显著增强的基础上还保留了较多甜香和水果香,这与其酯类含量高有关。DLH、Bq-8、WN的炒制香气比较突出,均以可可香为主,其次为烤香、坚果香和水果香。Gq-4、Aq-6和Bq-6表现出以可可香、烤香和坚果香为主的香气,Zq-320各香气较均衡但含量偏低。XZH坚果香与可可香与Kq-7相当,烤香XZH强于Kq-7,其他香气很少。

综上所述,在KI-15、DLH、Aq-6、Bq-6、Bq-8、XZH、Gq-4、WN、Kq-7、Zq-320 10个品种青稞中,DLH的风味物质种类最为丰富(65种),醇类、醛类、酮类、酸类、杂环类等香气物质相对含量均较高,尤其杂环类化合物中吡嗪类特征香气物质相对含量可达52.26%,香气表现为以可可香、烤香、坚果香及较少果香为主的典型焙烤香气。因此DLH可作为最适青稞炒制及糌粑制作的青稞品种,其次为Bq-8和WN青稞。

2.5 不同品种炒制青稞HCA

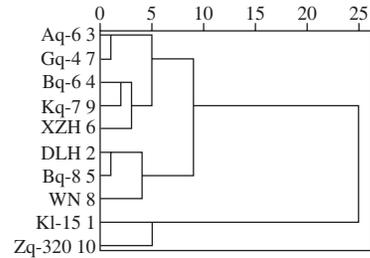


图4 不同品种炒制青稞挥发性风味物质HCA结果

Fig. 4 Cluster analysis of volatiles in different varieties of roasted hullness barley

由图4可知,不同样品可以分为两大类。第一大类8个样品最大欧式距离差为9,其中Aq-6和Gq-4在最小距离形成聚类,表明两者相似度极高;DLH和Bq-8在第一大类中也以最小距离形成聚类,表明DLH和Bq-8相似度极高。当欧式距离为5时,Aq-6、Gq-4、Bq-6、Kq-7和XZH聚为一小类,DLH、Bq-8和WN聚为另一小类,两小类样品在组内较相似而在组间差异明显。第二大类两个样品的最大欧式距离为5且只包含KI-15和Zq-320两个样品,表明KI-15和Zq-320之间相似度较高。两大类炒制青稞炒制粉差异较大,在欧式距离为25时才能归为一类。青稞炒制方式一致,而HCA差异主要由原料本身各类物质含量与水平不同造成。结合表1可知,影响样品聚类的主要因素是吡嗪类、酯类和醇类化合物的相对含量。

2.6 不同品种炒制青稞PCA

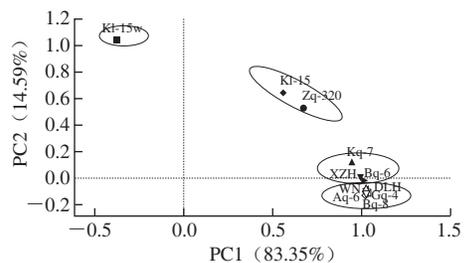


图5 KI-15w及其他不同品种炒制青稞的PCA结果

Fig. 5 PCA of volatile flavor compounds in different varieties of roasted hullness barley and raw hullness barley from Kunlun 15

如图5所示,其中PC1贡献率为83.35%,PC2贡献率为14.59%,2个主成分累计贡献率为97.94%,可较好地代表样品信息。根据PCA原理,样品在得分图上距离越接近则表示它们的香气组成和含量相似度越高。KI-15w单独分布在PCA图最左侧上部,与其他炒制样品显著不同。10个炒制样品均分布在PCA图的右半部,其中KI-15和Zq-320最为接近,表明这两个样品相似度很高。Kq-7、

XZH、Bq-6、WN、DLH、Aq-6、Gq-4和Bq-8距离较近, 8个样品间存在较高相似性。由于8个样品中Kq-7、XZH、Bq-6距离较近, 而WN、DLH、Aq-6、Gq-4和Bq-8之间存在一定程度重叠或距离极近, 因此可分为两组。该结果与HCA(图4)结果具有良好的一致性。

3 结论

炒制使青稞KI-15香气更丰富, 挥发性物质由48种增加至60种。炒制前酯类(31.9%)和醇类(9.78%)相对含量较高, 炒制后杂环类(39.87%)和酯类(35.98%)相对含量较高, 而杂环类中阈值极低的吡嗪类化合物是青稞炒制风味的主要贡献。

不同品种青稞炒制后各类香气种类和含量上存在较显著差异, 可能因为青稞品种及其营养品质差异引起。炒制青稞共有组分为23种, 以杂环化合物尤其吡嗪类为主。挥发性物质种类DLH最丰富; 醇类和杂环类相对含量Bq-8(12.80%和64.42%)最高, 醛类相对含量WN(21.79%)最高, 酯类相对含量KI-15(35.98%)最高, 酸类相对含量Kq-7(7.92%)最高, 炒制青稞中烃类和腈类物质很少。

炒制青稞以可可香、烤香和坚果香为主, 其中DLH、Bq-8、WN相较突出, 而KI-15w主要表现为果香和甜香。DLH相对最适宜青稞炒制加工, 其次为Bq-8和WN青稞。HCA和PCA表明炒制样品中KI-15与Zq-320为一类, 其余8个品种中Aq-6和Gq-4、DLH和Bq-8分别相似度极高, 当欧式距离为9时8个样品可归为一类。

参考文献:

- [1] 徐廷文. 中国栽培大麦的分类和变种鉴定[J]. 中国农业科学, 1982, 15(6): 39-46.
- [2] SHEN Y B, ZHANG H, CHENG L L, et al. *In vitro* and *in vivo* antioxidant activity of polyphenols extracted from black highland barley[J]. Food Chemistry, 2016, 194: 1003-1012. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.08.083.
- [3] 吴昆仑. 青稞功能元素与食品加工利用简述[J]. 作物杂志, 2008(2): 15-17. DOI:10.3969/j.issn.1001-7283.2008.02.005.
- [4] PEI J J, FENG Z Z, REN T, et al. Selectively screen the antibacterial peptide from the hydrolysates of highland barley[J]. Engineering in Life Sciences, 2018, 18: 48-54. DOI:10.1002/elsc.201700118.
- [5] 吕远平, 熊莱君, 贾利蓉, 等. 青稞特性及在食品中的应用[J]. 食品科学, 2005, 26(7): 266-270. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2005.07.065.
- [6] 徐菲, 党斌, 杨希娟, 等. 不同青稞品种的营养品质评价[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(9): 1249-1257. DOI:10.7606/j.issn.1009-1041.2016.09.017.
- [7] 李涛, 王金水, 李露, 等. 青稞的特性及其应用现状[J]. 农产品加工学刊, 2009(9): 92-96. DOI:10.3969/j.issn.1671-9646(X).2009.09.028.
- [8] SHEN Y B, HU C, ZHANG H, et al. Characteristics of three typical Chinese highland barley varieties: phenolic compounds and antioxidant activities[J]. Journal of Food Biochemistry, 2018, 42(2): e12488. DOI:10.1111/jfbc.12488.
- [9] 农彦彦, 冯才敏, 吴子瑜, 等. 青稞酥饼加工工艺及其对 β -葡聚糖的影响[J]. 粮油食品科技, 2018, 26(2): 6-10. DOI:10.3969/j.issn.1007-7561.2018.02.002.
- [10] 刘欢, 梁琪, 毕阳, 等. 青稞酸奶的加工技术研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2012, 47(2): 135-140. DOI:10.3969/j.issn.1003-4315.2012.02.026.
- [11] 张慧娟, 黄莲燕, 张小爽, 等. 青稞面条品质改良的研究[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(13): 75-81. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2017.13.016.
- [12] YAQOOB S, BABA W N, MASOODI F A, et al. Effect of sprouting on cake quality from wheat-barley flour blends[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2018, 12(2): 1253-1265. DOI:10.1007/s11694-018-9739-y.
- [13] 赵雯玮, 刘吉爱, 李姣, 等. 糌粑及其研究进展[J]. 粮食与饲料工业, 2017(3): 29-44. DOI:10.7633/j.issn.1003-6202.2017.03.008.
- [14] 杨希娟. 青稞糌粑加工工艺研究[J]. 食品工业, 2016, 37(8): 78-81.
- [15] WANG Z J, DANG S N, XING Y, et al. Dietary patterns and their associations with energy, nutrient intake and socioeconomic factors in rural lactating mothers in Tibet[J]. Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition, 2017, 26(3): 450-456. DOI:10.6133/apjcn.012016.13.
- [16] 甘济升, 贾素贤, 叶坚. 青稞加工工艺研究[J]. 现代食品, 2016(12): 124-126.
- [17] 梁锋, 杜艳, 郝静, 等. HACCP在青稞即食糌粑生产中的应用[J]. 粮食与食品工业, 2016, 26(6): 47-49. DOI:10.3969/j.issn.1672-5026.2016.06.012.
- [18] 耿秋月, 田洪磊, 詹萍, 等. 基于GC-MS技术的新疆椒麻鸡汤料挥发性成分的鉴定与分析[J]. 现代食品科技, 2017, 33(11): 243-250. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.11.035.
- [19] 赵阿丹, 胡志全, 刘友明, 等. 米茶焙炒挥发性气味的形成与特征研究[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(3): 1-5. DOI:10.3969/j.issn.1003-0174.2016.03.001.
- [20] 慕艳梅, 孙宝国, 黄明泉, 等. 同时蒸馏萃取-气质联用分析月盛斋酱牛肉的挥发性风味成分[J]. 食品科学, 2010, 31(18): 370-374.
- [21] LIM D K, MO C Y, LEE D K, et al. Non-destructive profiling of volatile organic compounds using HS-SPME/GC-MS and its application for the geographical discrimination of white rice[J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2018, 26(1): 260-267. DOI:10.1016/j.jfda.2017.04.005.
- [22] 李丽, 高彦祥, 袁芳. 坚果焙烤香气化合物的研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2011(3): 164-169. DOI:10.3969/j.issn.1006-2513.2011.03.028.
- [23] 陈建良, 芮汉明, 陈号川. 不同鸡种的鸡肉挥发性风味特性的比较研究[J]. 现代食品科技, 2009, 25(10): 1129-1134. DOI:10.3969/j.issn.1673-9078.2009.10.005.
- [24] ELMORE J S, MOTTRAM D S, ENSER M, et al. Effect of the polyunsaturated fatty acid composition of beef muscle on the profile of aroma volatiles[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1999, 47(4): 1619-1625. DOI:10.1021/jf980718m.
- [25] 任嘉嘉, 相海, 王强, 等. 大麦食品加工及功能特性研究进展[J]. 粮油加工, 2009(4): 99-102.
- [26] CANTALEJO M J. Analysis of volatile components derived from raw and roasted earth-almond (*Cyperus esculentus* L.)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1997, 45(4): 1853-1860. DOI:10.1021/jf960467m.
- [27] 静玮, 苏子鹏, 林丽静. 澳洲坚果焙烤过程中挥发性成分的特征分析[J]. 热带作物学报, 2016, 37(6): 1224-1231. DOI:10.3969/j.issn.1000-2561.2016.06.029.
- [28] 隋秀芳, 李祥, 秦礼康, 等. 蒸煮和焙炒整米苦荞茶香气成分分析及生产过程中主要化学成分的去向[J]. 食品科学, 2012, 33(22): 269-273.
- [29] 易桥宾, 谷凤林, 房一明, 等. 发酵与焙烤对可可豆香气影响的GC-MS分析[J]. 热带作物学报, 2015, 36(9): 1889-1902. DOI:10.3969/j.issn.1000-2561.2015.10.027.
- [29] 孙慕芳, 郭桂义, 张洁. 蒸青绿茶和炒青信阳毛尖绿茶香气品质的GC-MS分析[J]. 食品科学, 2014, 35(12): 151-155. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201412030.
- [30] RAMLI N, HASSAN O, SAID M, et al. Influence of roasting conditions on volatile flavor of roasted Malaysian cocoabeans[J]. Food Processing and Preservation, 2006(30): 280-298. DOI:10.1111/j.1745-4549.2006.00065.x.