

中图分类号: S532 文献标识码: A 文章编号: 1672-3635(2022)05-0443-15

DOI: 10.19918/j.cnki.1672-3635.2022.05.008

综 述

生马铃薯和蒸煮马铃薯的风味物质及影响因素

刘琳, 徐健, 姜红, 李小军, 刘刚, 曾凡逵*

(中国科学院兰州化学物理研究所, 甘肃 兰州 730030)

摘要: 马铃薯已经成为中国第四大主食, 因其独特的风味和较低的价格深受消费者喜爱。完整的鲜马铃薯块茎几乎没有味道, 当马铃薯进行去皮、切片或腐烂时会破坏细胞膜, 促进酶促反应和脂肪氧化反应从而生成一系列饱和与不饱和的醛类和醇类风味物质。分析生马铃薯的风味可以明确哪些风味物质是烹饪过程产生的。目前在生马铃薯中共鉴定出159种挥发性化合物, 其中关键的风味物质包括己醛、辛烯醛的同分异构体、烯醛、庚醛、戊醇、呋喃和丁醇等。蒸煮马铃薯的风味物质形成途径主要是热反应, 包括脂肪氧化和热降解反应, 如美拉德反应和斯特雷科尔降解(Strecker)反应。目前在蒸煮马铃薯中共鉴定出182种挥发性化合物, 关键风味物质包括甲硫基丙醛、己醛、2-庚醛、2-甲基呋喃、2-戊基呋喃、3-己酮和1-辛烯-3-醇等。品种、栽培条件和加工方式等都会影响马铃薯的风味。马铃薯风味研究, 尤其是将关键风味物质的种类及平衡作为马铃薯育种、栽培条件优化和加工方式选择的指标, 对促进马铃薯产业发展具有重要意义。

关键词: 马铃薯; 挥发性物质; 生马铃薯; 蒸煮马铃薯

Flavor Substances and Influencing Factors of Raw, Steamed or Boiled Potatoes

LIU Lin, XU Jian, JIANG Hong, LI Xiaojun, LIU Gang, ZENG Fankui*

(Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730030, China)

Abstract: Potatoes have become the fourth largest staple food in China, favored by consumers for their unique flavor and lower price. Intact fresh potato tubers have little taste and cell membranes are destroyed when potatoes are peeled, sliced or decayed, promoting enzymatic reactions and fat oxidation reactions to produce a range of saturated and unsaturated aldehyde and alcohol flavors. Analysis of the flavor of raw potatoes can determine which flavor substances are produced during the cooking process, and a total of 159 volatile compounds have been identified in raw potatoes, of which the key flavor substances include hexanal, isomers of octenal, alkenaldehyde, heptaldehyde, pentanol, furan and butanol. The flavor substance formation pathway of steamed or boiled potatoes is mainly thermal reactions, including fat oxidation and thermal degradation reactions, such as the Maillard reaction and the Strecker degradation reaction. At present, a total of 182 volatile compounds have been identified in the steamed or boiled potato, and the key flavor substances include methylthiopropionaldehyde, hexadehyde, 2-heptaneal, 2-methylfuran, 2-pentylfuran, 3-hexanone and 1-octen-3-ol, etc. Varieties, cultivation conditions and processing methods will affect the

收稿日期: 2022-10-09

基金项目: 吉林省与中国科学院科技合作高技术产业化专项资金(2021SYHZ0005); 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系(CARS-09)。

作者简介: 刘琳(1990-), 女, 硕士, 助理工程师, 从事马铃薯加工及营养研究。

*通信作者(Corresponding author): 曾凡逵, 博士, 研究员, 主要从事马铃薯加工及营养研究, E-mail: zengfk@licp.cas.cn。

flavor of potatoes. Research of potato flavor, especially the types and balances of key flavor substances as indicators of potato breeding, cultivation condition optimization and processing method selection, is of great significance to promote the development of the potato industry.

Key Words: potato; volatile substances; raw potato; steamed or boiled potato

马铃薯已成为中国第四大粮食作物, 2020年全国马铃薯鲜薯产量达到1亿t^[12], 随着中国马铃薯产量不断增加, 对马铃薯的研究也不断深入, 近年来, 马铃薯风味物质逐渐成为关注点。

风味, 通常是指在食用食物时品尝到的味道、气味和食物在口腔中给人的触觉感知的一种综合评价。对风味的感知是食物成分与食用者之间一系列复杂的相互作用结果。例如, 薯条中的淀粉和脂肪成分可能会影响口中的风味感知^[3], 直链淀粉/支链淀粉比率会影响淀粉基质中淀粉糊化过程香味化合物的保留和感知^[4]; 在口腔研究中, 脂肪的存在可减少来自乳状液的挥发性物质的释放^[5]等。影响风味的因素很多, 包括人类个体感觉特定化合物的生物能力各不相同^[6,7]、消费者个人喜好、选择食物时的心理因素、食用环境、消费者的饮食文化背景^[8]等。

从形式上讲, 风味由味觉、嗅觉和触觉组成。味觉是在舌头上感知到的, 由味觉感知到的味道包括甜味、酸味、咸味、苦味和鲜味, 决定马铃薯味道的是一些非挥发性物质, 马铃薯鲜味的物质如氨基酸和核苷酸非常重要, 甚至有人认为马铃薯最重要的风味是鲜; 嗅觉是鼻腔的感受器接触食物的风味物质时感知到的, 气味是马铃薯的芳香物质, 由嗅觉感知。马铃薯的香味主要由挥发性风味化合物所决定, 如吡嗪、庚醛和己醛。味觉和嗅觉信号在大脑的同一区域被处理和解读, 未经训练的消费者通常很难将两种体验分开; 有报道指出, 味觉和嗅觉具有协同和拮抗作用^[9]。触觉是口腔对食物硬度、脆度和质地的感知, 由于营养物质含量不同^[10], 尤其是干物质和淀粉含量^[11,12]不同, 均会导致马铃薯产品口感不同。

1 马铃薯风味物质的形成及组成

1.1 马铃薯风味物质的形成

马铃薯呈现出的风味由马铃薯风味前体物质提

供, 马铃薯的风味前体物质是马铃薯块茎在生长发育过程中形成的, 马铃薯品种、栽培条件和贮藏环境对风味前体物质的含量都有很大的影响, 而且这些因素对生成风味物质的酶也有很大的影响。生马铃薯当中含有的风味前体物质包括糖、氨基酸、RNA和脂肪; 与水果, 尤其是成熟期的水果会释放出高浓度的挥发性物质不同的是, 马铃薯在块茎发育或成熟期不会释放出可察觉的挥发性化合物, 除非他们因腐烂^[13]或切割^[14]而发生组织降解。

马铃薯烹饪过程中, 风味前体物质发生反应生成美拉德反应产物^[15], 糖、脂肪和RNA发生降解也生成多种风味物质^[16]。烹饪马铃薯块茎会释放出多种挥发性化合物, 而烹饪方法有烘烤、蒸、煮、烘焙、油炸, 这些烹饪方法决定了产生风味物质反应类型和反应程度, 因此对感知风味有着深远的影响。

1.2 马铃薯风味物质的组成

在食品中已经发现了7000多种挥发性化合物, 但只有相对较少的一部分(300~400)会产生其特有的气味。风味物质通常不是以一种独特的特征化合物而存在的, 而是由一些特殊而平衡地混合几种化合物而成^[13]。在马铃薯(包括生马铃薯和加工马铃薯)中, 这些化合物的种类包括脂类、醛类、醇类、酮类、酸类、酯类、烃类、胺类、呋喃类和含硫化合物, 具体种类见表1。

根据Dresow和Böhm^[13]的总结, 在生马铃薯中发现了大约159种挥发性物质, 加工马铃薯所产生的化合物的数量和浓度随着烹饪时间和温度的增加而增加, 从蒸煮马铃薯中鉴定出182种化合物, 烤马铃薯中鉴定出近400种化合物, 在法式炸薯条的挥发性成分中鉴定出了500多种化合物^[30]。本文主要介绍生马铃薯和蒸煮马铃薯中风味物质研究进展。

表1 马铃薯中的风味物质
Table 1 Aromatic compounds in potatoes

物质 Substance	感官特征(粗体代表显著相关) Sensory quality (Bold=Significantly correlated with)	参考文献(粗体代表定义为关键化合物) References (Bold=Defined as "key compounds")
(E)-2-癸烯醛 (E)-2-Decenal	油脂味	Mutti 和 Grosch ^[17]
(E)-2-庚醛 (E)-2-Heptenal	油脂味, 杏仁味	Petersen 等 ^[18] , Thybo 等 ^[19]
(E)-2-己烯醛 (E)-2-Hexenal	腐臭味	Thybo 等 ^[19]
(E)-2-壬醛 (E)-2-Nonenal	黄瓜味, 纸板味, 油脂味, 青草味, 图书馆味, 鹅绒味, 甜味, 马铃薯味	Oruna-Concha 等 ^[20] , Mutti 和 Grosch ^[17] , Petersen 等 ^[21] , Thybo 等 ^[19]
(E)-2-辛烯醛 (E)-2-Octenal	烤马铃薯味, 面包房味, 蒸煮味, 薯条味, 油脂味, 腐臭味	Petersen 等 ^[18,21] , Thybo 等 ^[19] , Mutti 和 Grosch ^[17]
(E)-2-戊烯醛 (E)-2-Pentenal	焙烤味, 橡胶味, 腐臭味	Ulrich 等 ^[22]
(E)- β -大马烯酮 (E)- β -Damascenone	果味, 甜味	Mutti 和 Grosch ^[17]
(E,E)-2,4-癸烯醛 (E,E)-2,4-Decadienal	洋葱味, 薯条味, 热马铃薯味, 甘草味, 油味, 深度油炸味, 油脂味, 石蜡味	Petersen 等 ^[21] , Oruna-Concha 等 ^[20] , Mutti 和 Grosch ^[17]
(E,E)-2,4-庚二烯醛 (E,E)-2,4-Heptadienal	腐臭味, 异味	Thybo 等 ^[19]
(E,E)-2,6-壬二酸 (E,E)-2,6-Nonadienal	油脂味, 黄瓜味	Ulrich 等 ^[22] , Mutti 和 Grosch ^[17]
(E,E)-3,5-辛二烯酮 (E,E)-3,5-Octadienone	坚果味	Ulrich 等 ^[22]
(E,Z)-2,4-癸二烯醛 (E,Z)-2,4-Decadienal	油脂味, 石蜡味, 腐臭味	Thybo 等 ^[19] , Mutti 和 Grosch ^[17]
(E,Z)-2,6-壬二酸 (E,Z)-2,6-Nonadienal	草地味, 青草味, 醋味, 黄瓜味, 豌豆味, 油漆味	Petersen 等 ^[18,21] , Mutti 和 Grosch ^[17]
(Z)-1,5-辛二烯-3-酮 (Z)-1,5-Octadien-3-one	天竺葵味	Mutti 和 Grosch ^[17]
(Z)-2-癸烯 (Z)-2-Decenal	油脂味	Mutti 和 Grosch ^[17]
(Z)-2-壬醛 (Z)-2-Nonenal	青草味, 油味	Mutti 和 Grosch ^[17]
(Z)-3-壬醛 (Z)-3-Nonenal	油脂味	Mutti 和 Grosch ^[17]
1,2-乙二醇 1,2-Ethandiol	咖啡味, 烧焦的味	Petersen 等 ^[21]
正己醇 1-Hexanol	辣椒味, 脚臭味	Petersen 等 ^[21]
1-辛烯-3-醇 1-Octen-3-ol	泥土味, 蘑菇味, 腐臭味	Oruna-Concha 等 ^[20] , Thybo 等 ^[19] , Duckham 等^[16]
1-辛烯-3-酮 1-Octen-3-one	蘑菇味	Mutti 和 Grosch ^[17]

续表 1

物质 Substance	感官特征(粗体代表显著相关) Sensory quality (Bold=Significantly correlated with)	参考文献(粗体代表定义为关键化合物) References (Bold=Defined as "key compounds")
1-戊醇 1-Pentanol	腐臭味, 马铃薯味, 香味	Thybo等 ^[19] , Morris等 ^[23]
1-戊烯-3-醇 1-Penten-3-ol	马铃薯味, 香味	Morris等 ^[23]
1-戊烯-3-酮 1-Penten-3-one	甜味	Morris等 ^[23]
2,3-丁二酮 2,3-Butandione	黄油味	Mutti和Grosch ^[17]
2,3-二乙基-5-甲基吡嗪 2,3-Diethyl-5-methylpyrazine	泥土味, 烧焦味	Mutti和Grosch ^[17]
2,3-戊二酮 2,3-Pentanedione		Duckham等^[16,24]
2,4-癸二烯醛 2,4-Decadienal	泥土味, 油脂味	Oruna-Concha等 ^[20]
2,4-七烯醛 2,4-Heptadienal	腐臭味, 异味, 甜味	Thybo等 ^[19] , Morris等 ^[23]
2,4-甲酰胺醛 2,4-Mecadienal	油脂味, 难闻的味	Ulrich等 ^[22]
2,4-壬二酸 2,4-Nonadienal	腐臭味	Thybo等 ^[19]
2,6-二甲基吡嗪 2,6-Dimethylpyrazine	坚果味, 气味温和	Ulrich等 ^[22]
2-乙酰基-1-吡咯啉 2-Acetyl-1-pyrroline	烘焙味, 爆米花味	Mutti和Grosch ^[17]
2-丁基呋喃 2-Butylfuran	甜味	Morris等 ^[23]
2-癸烯 2-Decenal	纸板异味	Blanda等 ^[25]
2-乙基-3,5-二甲基吡嗪 2-Ethyl-3,5-dimethylpyrazine	坚果味, 烘烤味, 烘焙味, 咖啡味	Ulrich等 ^[22] , Oruna-Concha等 ^[20] , Duckham等^[16]
2-乙基-3,6-二甲基吡嗪 2-Ethyl-3,6-dimethylpyrazine	坚果味, 烘焙味, 泥土味, 烤马铃薯味	Oruna-Concha等 ^[20]
2-乙基呋喃 2-Ethylfuran	香味, 腐臭味, 异味	Thybo等 ^[19] , Morris等 ^[23]
2-庚醛 2-Heptenal	马铃薯味	Morris等 ^[23]
2-己烯醛 2-Hexenal	纸板异味, 异味	Morris等 ^[23] , Blanda等 ^[25]
2-异丁基-3-甲氧基吡嗪 2-Isobutyl-3-methoxypyrazine		Duckham等^[16,24]
2-异丙基-3-甲氧基吡嗪 2-Isopropyl-3-methoxypyrazine	泥土味, 生马铃薯味, 马铃薯味	Oruna-Concha等 ^[20] , Duckham等^[16,24]
2-甲氧基-3-异丁基吡嗪 2-Methoxy-3-isobutylpyrazine	发芽味, 豌豆味, 青草味, 甜椒味, 煮马铃薯味	Petersen等 ^[21]

续表 1

物质 Substance	感官特征(粗体代表显著相关) Sensory quality (Bold=Significantly correlated with)	参考文献(粗体代表定义为关键化合物) References (Bold=Defined as "key compounds")
2-甲氧基-3-异丙基吡嗪 2-Methoxy-3-isopropylpyrazine	泥土味, 青草味, 豌豆味, 生马铃薯味, 无甜味	Petersen 等 ^[21]
2-甲基-1-丁醇 2-Methyl-1-butanol		Duckham 等^[24]
2-甲基-5-异丙基吡嗪 2-Methyl-5-isopropylpyrazine	坚果味, 气味温和, 化学药品味	Ulrich 等 ^[22]
2-甲基丁醛 2-Methylbutanal	果味, 香味	Morris 等 ^[23] , Duckham 等^[16,24]
2-甲基丁醇 2-Methylbutanol	难闻的味, 汗水味	Ulrich 等 ^[22]
2-甲基呋喃 2-Methylfuran	马铃薯味, 香味	Morris 等 ^[23]
2-甲基丙醛 2-Methylpropanal	香味	Morris 等 ^[23]
2-戊烯醛 2-Pentenal	纸板异味, 马铃薯味, 奶油味	Morris 等 ^[23] , Blanda 等 ^[25]
2-戊基呋喃 2-Pentylfuran	难闻的味, 绿豆味, 蒸煮味, 橡胶/纸板异味, 甜味, 异味	Ulrich 等 ^[22] , Petersen 等 ^[18] , Thybo 等 ^[19] , Morris 等 ^[23] , Blanda 等 ^[25] , Duckham 等^[16,24]
2-丙酮 2-Propanone	香味	Morris 等 ^[23]
2-丙基呋喃 2-Propylfuran	马铃薯味, 香味	Morris 等 ^[23]
3-(甲硫基)丙醛 3-(Methylthio) propanal		Duckham 等^[16,24]
3-乙基-2,5-二甲基吡嗪 3-Ethyl-2,5-dimethylpyrazine	坚果味, 泥土味, 草本味	Ulrich 等 ^[22]
3-乙基-2-甲基-1,3-己二烯 3-Ethyl-2-methyl-1,3-hexadiene	马铃薯味, 风味, 奶油味	Morris 等 ^[23]
3-异丁基-2-甲氧基吡嗪 3-Isobutyl-2-methoxypyrazine	胡椒味, 青草味	Mutti 和 Grosch ^[17]
3-甲基-1-丁醇 3-Methyl-1-butanol		Duckham 等^[24]
3-甲基-1-戊醇 3-Methyl-1-pentanol	烧焦味, 难闻的味, 油脂味, 薯条味, 刺鼻味	Petersen 等 ^[21]
3-甲基丁醛 3-Methylbutanal	麦芽香, 果味, 香味	Morris 等 ^[23] , Mutti 和 Grosch ^[17] , Duckham 等 ^[16,24]
3-或-2-二甲基丁烯酸 3-or-2-Methylbutanoic acid	马铃薯味, 香味, 奶油味	Morris 等 ^[23]
4-庚烯醛 4-Heptenal	甜味	Morris 等 ^[23]
6-甲基-5-庚烯-2-酮 6-Methyl-5-hepten-2-one		Duckham 等^[16]
醋酸 Acetic acid	醋	Petersen 等 ^[18]

续表 1

物质 Substance	感官特征(粗体代表显著相关) Sensory quality (Bold=Significantly correlated with)	参考文献(粗体代表定义为关键化合物) References (Bold=Defined as "key compounds")
烷基吡嗪 Alkyl pyrazines	泥土味, 焙烤味, 坚果味, 黄油味	Maga 和 Holm ^[26] , Coleman 和 Ho ^[27] , Buttery 等 ^[28] , Oruna-Concha 等 ^[20]
苯甲醛 Benzaldehyde	香味	Morris 等 ^[23] , Duckham 等^[16,24]
苯甲醇 Benzyl alcohol	花香味, 柑橘味, 水果味	Petersen 等 ^[21]
β -环柠檬醛 β -Cyclocitral		Duckham 等^[16]
β -大马烯酮 β -Damascenone		Duckham 等^[16]
丁二醇 Butanedione		Duckham 等^[24]
C4-庚醛 C4-Heptenal	煮马铃薯味, 腐臭味, 泥土味	Josephson 和 Lindsay ^[29]
癸醛 Decanal	果味, 油脂味, 花香味, 焦塑料味, 腐臭味	Petersen 等 ^[21] , Thybo 等 ^[19] , Duckham 等^[16,24]
双乙酰 Diacetyl	黄油味, 甜味, 焦糖味	Ulrich 等 ^[22]
二甲基二硫化物 Dimethyl disulfide	洋葱味, 煮熟的卷心菜味, 香味	Oruna-Concha 等 ^[20] , Morris 等 ^[23] , Duckham 等^[16,24]
二甲基硫醚 Dimethyl sulfide	异味	Morris 等 ^[23]
二甲基亚砷 Dimethyl sulfoxide	腐臭味	Thybo 等 ^[19]
三硫化二甲酯 Dimethyl trisulfide	卷心菜味, 香味	Morris 等 ^[23] , Mutti 和 Grosch ^[17] , Duckham 等^[16,24]
三硫化二甲酯, 二甲基二硫化物 Dimethyl trisulfide, dimethyl disulfide	煮熟的洋葱味	Duckham 等^[16,24] , Oruna-Concha 等 ^[20]
E-(或Z)-2-(1-戊烯基)呋喃 E-(or Z)-2-(1-Pentenyl) furan	甜味	Morris 等 ^[23]
E-(或Z)-2-(2-戊烯基)呋喃 E-(or Z)-2-(2-Pentenyl) furan	甜味	Morris 等 ^[23]
呋喃 Furan	香味, 甜味	Morris 等 ^[23]
呋喃甲醛 Furfural	香味	Morris 等 ^[23]
γ -癸内酯 γ -Decalactone	甜味, 桃子味	Mutti 和 Grosch ^[17]
γ -壬内酯 γ -Nonalacatone	甜味, 桃子味	Mutti 和 Grosch ^[17]
γ -辛内酯 γ -Octalactone	甜味, 桃子味	Mutti 和 Grosch ^[17]
香叶基丙酮 Geranyl acetone		Duckham 等^[16]
正庚醛 Heptanal	青草味	Petersen 等 ^[18] , Duckham 等 ^[16,24]

续表 1

物质 Substance	感官特征(粗体代表显著相关) Sensory quality (Bold=Significantly correlated with)	参考文献(粗体代表定义为关键化合物) References (Bold=Defined as "key compounds")
己醛 Hexanal	青草味, 草地味, 马铃薯味, 香味, 奶油味, 腐臭味	Ulrich 等 ^[22] , Petersen 等 ^[21] , Thybo 等 ^[19] , Morris 等 ^[23] , Mutti 和 Grosch ^[17] , Duckham 等^[16,24]
己酸 Hexanoic acid	预煮味, 汤味, 蛋糕味, 生马铃薯味	Petersen 等 ^[21]
芳樟醇 Linalool	马铃薯味	Thybo 等 ^[19] , Duckham 等^[16]
甲硫基丙醛 Methional	熟马铃薯味, 煮马铃薯味, 马铃薯味	Duckham 等 ^[24] , Ulrich 等 ^[22] , Petersen 等 ^[18,21] , Thybo 等 ^[19] , Oruna-Concha 等 ^[20] , Mutti 和 Grosch ^[17]
甲氧基吡嗪 Methoxypyrazines	霉味, 泥土味	Duckham 等 ^[24]
甲基丙醛 Methylpropanal	麦芽香味	Mutti 和 Grosch ^[17] , Duckham 等^[24]
甲基吡嗪 Methylpyrazine	坚果味, 马铃薯味	Ulrich 等 ^[22]
甲基水杨酸 Methylsalicylate	马铃薯味, 香味, 奶油味	Morris 等 ^[23]
壬醛 Nonanal	油脂变质的味, 臭氧味, 煮马铃薯味, 腐臭味	Petersen 等 ^[21] , Thybo 等 ^[19] , Duckham 等^[16,24]
辛醛 Octanal	油脂味, 柑橘味, 马铃薯味	Morris 等 ^[23] , Mutti 和 Grosch ^[17] , Duckham 等^[16]
仲辛酮 2-Octanone	蘑菇味, 泥土味	Ulrich 等 ^[22]
p-异丙基甲苯 p-Cymene	异味	Thybo 等 ^[19]
正戊醛 Pentanal	青草味, 杏仁味, 杏仁膏味, 马铃薯味, 香味, 奶油味, 腐臭味	Petersen 等 ^[18] , Thybo 等 ^[19] , Morris 等 ^[23] , Duckham 等^[16,24]
苯乙醛 Phenylacetaldehyde	青草味, 花香味, 泥土味, 蜂蜜味, 玫瑰味, 甜味	Ulrich 等 ^[22] , Petersen 等 ^[18] , Oruna-Concha 等 ^[20] , Mutti 和 Grosch ^[17] , Duckham 等^[16,24]
丙醛 Propanal	异味	Morris 等 ^[23]
吡咯 Pyrrole	坚果味, 烘焙味	Ulrich 等 ^[22]
萜烯类(α -黄连烯, β -大马烯酮, 其他)	果味, 花香味	Duckham 等^[16]
反式-4,5-环氧-(E)-2-癸烯醛 Tr-4,5-Epoxy-(E)-2-decenal	金属味	Mutti 和 Grosch ^[17]
反式-4,5-环氧-(E)-2-壬醛 Tr-4,5-Epoxy-(E)-2-nonenal	金属味	Mutti 和 Grosch ^[17]
十一醛 Undecanal		Duckham 等^[16]
Z-(或E)-2-(2-戊烯基)呋喃 Z-(or E)-2-(2-Pentenyl) furan	马铃薯味, 香味, 奶油味	Morris 等 ^[23]

2 生马铃薯的风味物质

生马铃薯块茎有一种有限而独特的香味, 在烹饪过程中准备块茎, 从切下或损坏的马铃薯块茎中释放出挥发物时, 人们可以感知到这种香味, 通常叫马铃薯味或马铃薯风味。这些挥发性物质包括那些生马铃薯中存在的, 但更多的是块茎腐烂或者被切割之后产生的。

2.1 生马铃薯风味物质的形成

生马铃薯的风味是大家比较熟悉的, 但完整的鲜马铃薯几乎是没有味道的, 当马铃薯进行去皮、切片或腐烂时会破坏细胞膜, 促进脂肪酸被原组织中的脂氧合酶氧化^[14], 导致己醛、辛烯醛的同质异构体和2,4-癸二烯醛的浓度大幅增加^[18,29]。不饱和脂肪酸通过脂肪氧化产生的重要化合物包括2-辛烯醛、庚醛、戊醇、2-戊基呋喃、2-甲基丁醇和3-甲基丁醇。同时, 其他脂氧合酶启动反应的产物包括1-戊烯-3-酮、1-戊醇、2,4-庚二烯醛和2,6-壬二烯醛^[18,29]。一些研究报道了在生马铃薯中发现甲氧基吡嗪, 特别是2-甲氧基-3-异丙基吡嗪^[31,32]。还有一些讨论关于这些物质是由块茎本身产生还是由土壤细菌产生并随后被马铃薯块茎吸收^[31]。Dresow和Böhm^[13]得出结论, 尽管生马铃薯含有许多有效的挥发物, 但没有一种单一成分能够代表整个生马铃薯的典型香味。

2.2 生马铃薯风味物质形成的影响因素

生马铃薯的风味特征受到很多因素的影响, 包括土壤、施肥、采后处理、加工方式、包装等。Khan等^[33]通过论证认为马铃薯的风味与土壤当中的矿物质组成特别是钾与氮元素的比例关系非常大。Fischer和Müller^[34]通过盆栽试验发现施肥对生马铃薯块茎挥发性风味物质的影响很大, 特别是对戊醇、己醇、己烯醛、庚醛和2,4-癸二烯醛含量的影响, 认为施肥影响了马铃薯块茎当中脂肪的含量和类型, 脂肪是鉴定出来的这些风味物质的前体物质。

马铃薯采后处理对风味形成的影响也需要仔细考虑^[35]。对于预去皮、真空包装的马铃薯块茎, 原材料的质量、马铃薯品种和块茎的生理成熟度都是至关重要的, 用这种方法加工的马铃薯块茎

的感官质量下降是由于酸败、异味物质和表面硬度的增加引起的^[19]。以这种方式处理和储存不同时间的马铃薯品种之间的特征芳香族化合物不同, 包括甲硫基丙醛、芳樟醇、对甲苯、壬醛和癸醛^[19]。相比之下, 新鲜的成熟度高的马铃薯块茎含有高浓度的甲硫基丙醛、芳樟醇和对-氰基烯, 而壬醛和癸醛的浓度较低, 马铃薯风味的感官评分较高, 酸败的评分较低。

2.3 生马铃薯风味物质的国内外研究现状

目前关于分析生马铃薯当中挥发性风味物质的文献报道不多, 主要是由于样品处理、分离收集挥发性风味物质的难度很大, 很难获得足够的量用于分析鉴定。另外, 目前生食马铃薯的品种极少, 全球范围内几乎很少有人食用生马铃薯, 因此分析研究生马铃薯的风味物质意义不大。但是要研究烹饪过程生成的马铃薯挥发性风味物质, 分析烹饪前生马铃薯当中的风味物质组成是非常有必要的, 通过比较可以明确哪些风味物质是烹饪过程产生的。在切块过程中马铃薯会发生酶促反应和脂肪氧化反应, 这些反应会生成一系列饱和的和不饱和的醛类和醇类物质, 这些物质具有非常低的嗅觉阈值, 某些还会对马铃薯的风味造成不利影响。

Self等^[36]先把空气通过活性炭, 然后将活性炭净化的空气连续3个月穿过2 kg马铃薯整薯, 再穿过一系列冷阱。将冷阱收集的挥发性风味物质收集起来发现具有泥土的芳香, 但是由于样品中风味物质的量太少没有鉴定出具体的风味物质是什么化合物。Meigh等^[37]试图对新鲜生马铃薯挥发性风味物质进行分析, 同样由于含量太低没有鉴定出任何化合物。但是, 他们却成功地从冷冻干燥的生马铃薯皮当中提取到了足够的挥发性风味物质, 鉴定出了10种挥发性化合物, 包括2-甲氧基-3-乙基吡嗪。随后, Buttery和Ling^[31]在生马铃薯中鉴定了2-甲氧基-3-异丙基吡嗪、3-壬烯醇、庚醇、1-辛烯-3-醇和2-己酮。

Murray和Whitfield^[32]分析出了多种食品包括生马铃薯当中的甲氧基吡嗪, 含量最丰富的是2-甲氧基-3-异丙基吡嗪。甲氧基吡嗪的嗅觉阈值很

低, 具有蔬菜的风味包括闻起来像马铃薯的气味。由于生马铃薯当中含有甲氧基吡嗪, 因此可以推断该物质是通过生物合成的。

Josephson 和 Lindsay^[29]分析了脂肪氧化反应生成的生马铃薯挥发性风味物质, 他们将生马铃薯切碎鉴定了己醛、辛烯醛、2,4-癸二烯醛的同分异构体, 这些物质都是典型的脂肪氧化产物。Fischer 和 Müller^[34]同样鉴定了生马铃薯块茎当中一系列脂

肪氧化生成的挥发性风味物质。

曾著莉等^[38]分析了马铃薯挥发性风味物质, 经分析鉴定, 在鲜马铃薯中得到 30 种挥发性风味物质, 主要挥发性风味物质是碳氢化合物, 包括甲基环戊烷(25.74%)、正己烷(5.86%)、正戊烷(5.93%)等。

以上文献中在生马铃薯中已鉴定出的挥发性风味物质具体见表 2。

表 2 生马铃薯中已鉴定出的挥发性风味物质
Table 2 Identified volatile flavor compounds in raw potatoes

分类 Classification	挥发性风味物质 Volatile flavor compounds
醛类 Aldehyde	乙醛、丙醛、2-丙烯醛、2-甲基丙醛、正丁醛、2-丁烯醛、2-甲基丁醛、3-甲基丁醛、正丁醛、2-丁烯醛、2-甲基丁醛、3-甲基丁醛、戊醛、2-戊烯醛、己醛、2-己烯醛、庚醛、2,4-庚二烯醛、辛醛、2-辛烯醛、2-壬烯醛、癸醛、2,4-癸二烯醛、2,4-庚二烯醛、2,4-壬二烯醛、苯甲醛、苯乙醛
酯类 Ester	甲基 2-羟苯酸酯
酮类 Ketone	丙酮、3-甲基-2-丁酮、2,3-丁二酮、2,3-戊二酮、丙酮、丁酮、己酮、庚酮、辛酮、1-辛烯-3-酮、壬酮、反式-2-壬烯-4-酮、癸酮
醇类 Alcohol	甲醇、乙醇、异丁醇、正丁醇、丙醇、2-丁烯-1-醇、2-甲基-1-丁醇、3-甲基-1-丁醇、戊醇、4-甲基-1-戊醇、己醇、己烯醇、3-甲基-2-己醇、庚醇、辛醇、辛烯醇、1-辛烯-3-醇、3-壬烯醇、香叶醇、橙花醇、芳樟醇、苯甲醇、2-苯乙醇、A-松油醇
酸类 Acid	乙酸、癸酸、十四烷酸、十五烷酸、十六烷酸、9-十六碳酸、十七烷酸、十八烷酸、顺式-9-十八烷酸、9,12-十八烷酸、9,12,15-十八碳三烯酸、二十烷酸、苯乙酸
烃类 Hydrocarbon	癸烷、十一烷、十二烷、十四烷、柠檬烯、 α -蒎烯、 β -蒎烯、3-蒎烯、苯、甲苯、乙基苯、邻二甲苯、间二甲苯、对二甲苯、1-乙基-2-甲基苯、1-乙基-4-甲基苯、1,2,3-三甲苯、1,2,4-三甲苯、1,3,5-三甲苯、联苯、萘、1-甲基萘、2-甲基萘、二甲基萘、三甲基萘、1,4-二甲基萘、1,6-二甲基萘、2,6-萘
吡嗪类 Pyrazine	2-甲基-3-甲氧基吡嗪、2-丁基-3-甲氧基吡嗪、2-异丁基-3-甲氧基吡嗪、2-异丙基-3-甲氧基吡嗪、吡嗪
吡啶类 Pyridine	吡啶
呋喃类 Furan	呋喃、2-乙基呋喃、2-戊基呋喃、2-呋喃甲醛、2-乙酰呋喃、1-(2-呋喃)-2-丙酮
胺类 Amine	甲胺、丙胺、异丁胺、二乙胺
醚类 Ether	乙醚
卤族 Halogen family	溴二氯甲烷
噻唑类 Thiazole	二丙基噻唑、2,4,5-三甲基噻唑、乙基二甲基噻唑、2-异丙基-4,5-二甲基噻唑、2-异丁基-4,5-二甲基噻唑、5-乙基-2-异丙基-4-甲基噻唑、苯并噻唑、2-乙酰基噻唑
其他含硫化合物 Other sulfur-containing compound	甲硫醇、乙硫醇、1-丙硫醇、2-丙硫醇、2-甲基-2-丙硫醇、硫化氢、二甲基硫醚、甲基乙基硫醚、二乙基硫醚、甲基丙基硫醚、甲基异丁基二硫醚、3-(甲硫基)丙醛、3,5-二甲基-1,2,4-三硫环戊烷
其余杂物 Other	苯甲醛乙醛缩二乙醇

3 蒸煮马铃薯的风味物质

蒸煮马铃薯是一个简单的热加工过程, 马铃薯在整个热加工过程中的温度从不会高于沸水的温度, 蒸煮马铃薯的过程只需要确定蒸煮的时间即可, 时间与马铃薯的大小和蒸煮熟的程度相关。蒸马铃薯与煮马铃薯在生活中都是以水为媒介促使马铃薯营养成分和风味物质的改变, 在国内外文献研究中没有明确的区分, 因此, 本篇文章将蒸煮作为一种加工方式讨论。水作为蒸煮马铃薯的媒介能够萃取风味前体物质, 如还原糖和游离氨基酸, 萃取的多少受到马铃薯块茎大小的影响。蒸煮马铃薯的过程发生了很多热反应, 这些反应确定了蒸煮马铃薯的最终风味。蒸煮马铃薯有一种微弱但是特有的香味, 这是由烹饪过程中风味前体分子的化学转化产生的^[22], 尤其是脂肪氧化和氨基酸的斯特雷科尔降解(Strecker)^[18]。此外, 用于块茎生产和采后贮藏的生产系统和加工方法也会影响马铃薯风味。例如, 为维持全年的马铃薯块茎供应, 长期冷藏就显得尤其重要, 因为他是淀粉分解和还原糖积累的关键因素, 这两个因素都可以改变块茎的风味。

在煮马铃薯中发现了140~182种挥发性化合物, 煮马铃薯的典型香味主要是由于甲硫基丙醛和一系列吡嗪类化合物产生的^[22]。也有文献报道挥发物主要是由于脂质氧化化合物的形成, 以及氨基酸的斯特雷科尔降解(Strecker)形成相应的醛类化合物^[18]。特别是, 蒸煮马铃薯有利于生成己醛和2-庚醛, 以及脂衍生化合物2-甲基呋喃、2-戊基呋喃、3-己酮和1-辛烯-3-醇^[39]。未去皮的马铃薯通常含有更多的芳香化合物, 尤其萜烯在未去皮的马铃薯中的比例高于去皮的马铃薯^[40]。

3.1 蒸煮马铃薯风味的形成

蒸煮马铃薯挥发性化合物形成过程中最重要的反应^[13,41]是热反应, 包括脂肪氧化和热降解反应, 如美拉德反应和斯特雷科尔降解(Strecker)反应, 涉及蛋白质、糖和脂肪降解。这些反应的产物中脂质降解产物、糖降解与美拉德反应产物分别占所监测化合物总产量的22%~69%、28%~

77%, 具体占比多少取决于马铃薯品种^[16,24], 而含硫化合物、萜烯和甲氧基吡嗪的浓度相对较低^[16]。

美拉德反应发生在羰基之间, 通常是还原糖和游离氨基酸之间的羰基, 可以在相当低的温度下发生, 在正常烹饪温度下反应速率显著增加^[24,41]。另外通过这个反应过程可以生成蛋氨酸^[24,42]。

斯特雷科尔降解(Strecker)是指醛或酮在氨的存在下与氰化氢反应生成氨基腈, 水解可得 α -氨基酸。斯特雷科尔降解(Strecker)反应通常与美拉德反应途径衍生的 α -二羰基化合物的反应有关。 α -氨基酸经过脱羧并转化为相关结构的醛^[43], 产生支链羰基和醇类挥发性物质, 这对马铃薯风味有显著影响^[24]。虽然主要反应物是蛋白质和碳水化合物, 但也包括脂类和多酚类化合物, 从而产生新的风味化合物^[43]。然后, 美拉德反应和斯特雷科尔降解(Strecker)的产物进行进一步反应, 形成一系列化合物, 包括吡嗪、恶唑和噻吩^[41]。吡嗪类在美拉德和斯特雷科尔反应中由氨基酸和糖组成, 具有典型的泥土味的“类似马铃薯味”风味, 而与吡嗪生成有关的天门冬酰胺和谷氨酰胺在马铃薯中大量存在^[44]。

酶促反应有助于风味前体化合物的形成, 如蛋白质中的氨基酸, 然后这些前体化合物通过非酶反应形成风味化合物。这些反应的程度受到加热过程中酶变性的限制, 但很大程度上依赖于烹饪条件, 如加热模式和样品大小。

脂类和脂肪酸的降解是通过热降解反应以及不饱和脂肪酸中亚油酸、 α -亚麻酸的酶促和自氧化来实现的^[45]。脂肪酶通过催化不饱和脂肪酸氧化形成脂肪酸氢过氧化物来促进风味化合物的形成, 也可能产生异味^[46]。脂类氧化和酶降解的最终产物包括许多不饱和的、饱和的醛类、酮类和醇类。

一些化合物在马铃薯中的量很少。尽管他们对风味的影响尚不清楚, 但有些物质的量可能高于人类感知阈值的浓度, 因此很可能对风味产生重大影响^[18,24]。

3.2 蒸煮马铃薯风味物质形成的影响因素

影响产生挥发物数量和类型以及浓度的因素很多, 大致可以分为以下两大类: 一是产生挥发

性物质的前体物质, 这些前体物质是马铃薯中的代谢物, 这些代谢物来源于马铃薯的基本营养素, 包括碳水化合物, 特别是单糖和二糖、蛋白质和游离氨基酸、脂肪、甘油三酯或其衍生物, 以及一系列维生素和矿物质^[13]。二是制备方法(例如去皮与不去皮)、烹饪条件和所用分析方法等因素而存在差异, 例如蒸煮的过程中存在加热温度、时间和水这些外界因素介入, 同时这些因素对马铃薯中酶和非酶反应均有影响, 这些反应会产生和降解关键风味化合物。

3.3 蒸煮马铃薯风味物质的国内外研究现状

关于蒸煮马铃薯风味物质的关键成分和异味成分均有相关报道。Mutti 和 Grosch^[17]报道, 甲硫基丙醛是他们所测试的最具气味活性的化合物之一, 也是煮马铃薯中最有效的风味成分之一。Ulrich 等^[22]确定了包括甲硫基丙醛、双乙酰和至少 5 种不同取代的吡嗪类化合物作为煮马铃薯的特征性风味化合物, 这与早期的研究结果一致^[47]。另外两篇报道也表明含硫化合物甲硫基丙醛是煮马铃薯风味的关键成分^[18,22]。但是, Duckham 等^[16]在分析的 11 个马铃薯品种中发现只有不到一半的品种中检测到了甲硫基丙醛。据报道, 另一种具有高气味活性的化合物是 2,3-二乙基-5-甲基吡嗪, 属于典型的煮马铃薯风味^[17]。

在煮马铃薯中发现的异味化合物包括 2,6-壬二酸、2,4-癸二烯醛和 2-戊基呋喃^[22]。在煮马铃薯中, 其他的化合物如己醛、水杨酸甲酯和 2-甲基丁酸与马铃薯风味强度、奶油味和芳香密切相关^[23]。

不同蒸煮条件下马铃薯产生的风味物质也有差异。Self 等^[36]分别将马铃薯煮 30 min 和 5 h, 鉴定了 10 种风味物质, 并且表示, 随着时间延长, 风味物质含量增加。Gumbmann 和 Burr^[48]将马铃薯去皮后匀浆然后与水一起加热回流收集挥发性组分, 从挥发性组分中鉴定了 12 种含硫物质, 经过分析认为检测到的简单含硫化合物是直接由含硫氨基酸生成的, 复杂的含硫化合物需要通过进一步反应才能生成。主要的挥发性风味物质是甲硫醇和二甲基硫醚。Self 等^[36]报道除非煮马铃薯的水

温高于 90℃, 否则生成风味物质的反应不够充分, 他们在煮马铃薯当中鉴定了 11 种挥发性风味物质。Meigh 等^[37]用水煮马铃薯皮鉴定了 17 种挥发性风味物质, 包括 2-甲氧基-3-异丙基吡嗪和几种其他的呋喃衍生物。Buttery 等^[28]对比了真空条件下 40~50℃蒸馏和常压条件下 100℃蒸馏 3 h 的马铃薯蒸馏出来的油脂组分, 真空蒸馏鉴定出来的挥发性风味物质主要是 1-辛烯-3-醇, 常压蒸馏主要挥发性组分为 2-正戊基呋喃, 该试验数据说明空气在生成马铃薯风味物质中的作用。Buttery 和 Ling^[49]采用 Buttery 等^[50]的方法, 同样证实了 2-甲氧基-3-异丙基吡嗪的存在, 达到了其嗅觉阈值的 50 倍。Nursten 和 Sheen^[40]比较了蒸汽蒸馏法萃取去皮马铃薯和未去皮马铃薯的挥发性风味成分, 大约鉴定出了 30 种化合物, 未去皮马铃薯风味物质含量更高, 萜烯类化合物相对去皮马铃薯含量也更高, 可能是由于皮当中的纤维降解引起的。这也正是马铃薯的风味相对其他食品乏味的主要原因。Buttery 和 Ling^[49]鉴定了马铃薯挥发性风味物质当中的噻唑类化合物, 发现不同煮马铃薯样品当中的该类物质的差别很大。有些煮马铃薯当中不含有噻唑类物质, 他们认为从煮马铃薯当中分离噻唑类化合物的方法至关重要。Josephson 和 Lindsay^[29]报道了煮马铃薯挥发性风味物质当中含有顺式-4-庚烯醛, 浓度很低, 该化合物赋予了样品煮过以后再冷却马铃薯的风味, 并表示新鲜煮过马铃薯的挥发性风味物质有很多属于脂肪降解的产物。且认为顺式-4-庚烯醛是煮马铃薯的重要风味物质, 还发现了其他 3 种由脂肪衍生出来的风味物质, 反式-2-壬二烯醛、顺式-6-壬二烯醛和 1,5-辛二烯-2-酮, 这 3 种物质的嗅觉阈值也很低^[28,51]。另外还发现马铃薯泥当中顺式-4-庚烯醛、反式-2-壬二烯醛、顺式-6-壬二烯醛的浓度非常低, 感官评价员认为后两种风味物质为非典型的青草味^[29]。在新鲜煮马铃薯泥里面少量添加顺式-4-庚烯醛^[50]能够从整体方面强化其带有泥土的马铃薯风味, 浓度增加时会出现陈废物质积压的气味。

刘国敏等^[52]选取了 5 个马铃薯品种对蒸制 35 min 熟化的普通马铃薯分离鉴定风味物质, 5 个品种共

同的关键性风味物质有4种, 分别是正辛醛、壬醛、正癸醛和2-戊基呋喃。李凯峰等^[53]对6个马铃薯品种在沸水蒸煮、空气炸制、传统炭烤3种烹饪方式下的马铃薯块茎风味物质进行检测, 结果表明, 由脂类降解产生的醛类化合物在沸水蒸煮烹饪方式下含量最高。曾著莉等^[58]分析了马铃薯挥发性风味物质, 经分析鉴定, 蒸熟马铃薯泥中得到31种, 60℃下保温3 h的马铃薯泥中得到37种, 主要挥发性风味物质是醛类, 包括己醛(88.92%)、戊醛(3.437%)、(Z)-2-庚烯醛(2.077%)、壬醛(0.748%)等。赵兵等^[54]对蒸煮30~180 min的马铃薯

产品风味物质进行测定, 发现随着蒸煮时间的延长, 马铃薯由开始的肉黄色逐渐变暗, 且不良风味不断增强; 使马铃薯产品具有香味的己醛、壬醛、反-2-辛烯醛、癸醛、反,反-2,4-庚二烯醛、反-2-壬烯醛、反,反-2,4-壬二烯醛、反,反-2,4-癸二烯醛等物质含量逐渐降低。随蒸煮时间延长, 马铃薯的特征风味物质甲硫基丙醛含量没有显著变化, 此外, 受其他关键风味物质减少的影响, 甲硫基丙醛增加了马铃薯产品整体风味的刺激性。

以上文献中在蒸煮马铃薯中已鉴定出的挥发性风味物质具体见表3。

表3 蒸煮马铃薯中已鉴定出的挥发性风味物质
Table 3 Identified volatile flavor compounds in steamed or boiled potatoes

分类 Classification	挥发性风味物质 Volatile flavor compounds
醛类 Aldehyde	乙醛、丙醛、2-甲基丙醛、2-甲基丁醛、3-甲基丁醛、异丁醛、丁醛、异丁醛、4-戊烯醛、己醛、2-己烯醛、庚醛、2-庚烯醛、4-庚烯醛、辛醛、辛烯醛、壬醛、2-壬烯醛、癸醛、2,4-癸二烯醛、2,4-壬二烯醛、2,6-壬二烯醛、2,4-庚二烯醛、苯甲醛、苯乙醛、糠醛(呋喃甲醛)、乙基苯甲醛
酯类 Ester	水杨酸甲酯、庚酸乙酯
酮类 Ketone	丙酮、甲基异丙基甲酮、1-辛烯-3-酮、2-庚酮、2-壬烯-4-酮、2-癸酮、2,3-戊二酮、2-十一酮、3,5-辛二烯-2-酮、1,5-辛二烯-3-酮
醇类 Alcohol	甲醇、2-辛烯-1-醇、1-辛烯-3-醇、2-辛醇、2-丁醇、3-丁醇、戊醇、2-丁醇、己醇、庚醇、3-甲基-2-己醇、3-甲基-1-丁醇、辛醇、芳樟醇、苯基醇、松油醇、萜烯醇、橙花醇、香叶醇
酸类 Acid	乙酸
烃类 Hydrocarbon	庚烷、辛烷、癸烷、2-蒎烯、2(10)-蒎烯、柠檬烯、3-蒎烯、甲苯、苯、乙苯、邻二苯、间二苯、对二苯、1,2,3-三甲苯、邻乙基甲苯、萘、2-甲基萘
吡嗪类 Pyrazine	2-甲氧基-3-异丙基吡嗪
吡啶类 Pyridine	吡啶
呋喃类 Furan	2-戊基呋喃、2-乙基呋喃、2-甲基呋喃、3-甲基呋喃、2-正丁基呋喃、2-己基呋喃
噻唑类 Thiazole	苯并噻唑、2,4,5-三甲基噻唑、2-异丁基-4,5-二甲基噻唑、2-异丁基-4-甲基-5-乙基噻唑、2-乙酰基噻唑、二丙基噻唑、乙基二甲基噻唑
噻吩类 Thiophen	苯并噻吩
其他含硫化合物 Other sulfur-containing compound	硫化氢、甲硫醇、乙硫醇、二甲基硫醚、异丙硫醇、丁硫醇、丙硫醇、甲基乙基硫醚、二乙基硫醚、正辛基丙基硫醚、二甲基二硫醚、乙基甲基二硫醚、甲基异丙基二硫化物、3,5-二甲基-1,2,4-三硫环戊烷
其余杂化物 The rest of hybrid	联苯、戊基基环氧乙烷

4 结 语

马铃薯风味物质种类多样且变化丰富, 其受到品种、栽培条件、贮藏环境及加工方式的影响。其中, 生马铃薯的典型风味是己醛、辛烯醛的同分异构体、烯醛、庚醛、戊醇、呋喃和丁醇等。在生马铃薯中发现甲氧基吡嗪, 特别是2-甲氧基-3-异丙基吡嗪。马铃薯烹饪过程中, 风味前体物质发生脂质氧化以及氨基酸的斯特雷科尔降解(Strecker)。烹饪马铃薯块茎会释放出多种挥发性化合物, 不同的烹饪方法决定了产生风味物质反应类型和反应程度, 对风味有着深远的影响。本文介绍的蒸煮马铃薯的典型香味是由于甲硫基丙醛和一系列吡嗪类化合物生成了己醛和2-庚醛, 以及脂衍生化合物2-甲基呋喃、2-戊基呋喃、3-己酮和1-辛烯-3-醇等。目前, 马铃薯风味物质的研究已经取得一定的进展, 但是, 还没有统一的标准可供马铃薯加工企业、相关研究机构等来作参考, 因此, 能够建立一套完整马铃薯风味评价体系很有必要。另外, 研究风味物质的技术也需要在传统的液相色谱、色谱-质谱联用、核磁共振等方法的基础上进一步提升。近些年, 代谢组学技术飞速发展, 而风味物质源于代谢, 因此, 代谢组学将会成为鉴定与风味相关物质的热门方法。风味作为食品重要的消费特性, 未来将会与马铃薯产量和营养价值一同作为马铃薯品种选育、加工和开发的关键因素。

[参 考 文 献]

- [1] 刘琳, 赵宇慈, 苏德花, 等. 马铃薯渣饲料化利用研究进展 [J]. 中国马铃薯, 2022, 36(1): 63-70.
- [2] 徐宁, 张洪亮, 张荣华, 等. 中国马铃薯种植业现状与展望 [J]. 中国马铃薯, 2021, 35(1): 81-96.
- [3] Zhao Y, Zhou X, Lei C, *et al.* The effect of raw dehydrated potato flour on the rheological properties of dough and nutritional quality of chiffon cakes [J]. *International Journal of Food Engineering*, 2021, 17(8): 619-632.
- [4] Arvisenet G, Le Bail P, Voilley A, *et al.* Influence of physicochemical interactions between amylose and aroma compounds on the retention of aroma in food-like matrices [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(24): 7088-7093.
- [5] Doyen K, Carey M, Linforth R S T, *et al.* Volatile release from an emulsion: headspace and in-mouth studies [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001, 49(2): 804-810.
- [6] Jaeger S R, de Silva H N, Lawless H T. Detection thresholds of 10 odor-active compounds naturally occurring in food using a replicated forced-choice ascending method of limits [J]. *Journal of Sensory Studies*, 2014, 29(1): 43-55.
- [7] McRae J F, Jaeger S R, Bava C M, *et al.* Identification of regions associated with variation in sensitivity to food-related odors in the human genome [J]. *Current Biology*, 2013, 23(16): 1596-1600.
- [8] Zhao Y, Wang X, Liao W, *et al.* Study on nutritional quality and volatile aroma compounds of the stir-fried shredded potatoes [J]. *American Journal of Potato Research*, 2022, 99: 191-205.
- [9] Prescott J. Flavour as a psychological construct: implications for perceiving and measuring the sensory qualities of foods [J]. *Food Quality and Preference*, 1999, 10(4-5): 349-356.
- [10] Xu D, Zhou X, Lei C, *et al.* Development of biscuits and cookies using raw dehydrated potato flour and its nutritional quality and volatile aroma compounds evaluation [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(7): e14528.
- [11] 龚兴旺, 郭华春. 马铃薯风味的研究进展 [J]. 食品科学, 2016, 37(9): 264-268.
- [12] 仇菊, 朱宏, 朱大洲, 等. 不同加工用途马铃薯品质特性分析 [J]. 中国马铃薯, 2019, 33(6): 372-378.
- [13] Dresow J F, Böhm H. The influence of volatile compounds of the flavour of raw, boiled and baked potatoes: impact of agricultural measures on the volatile components [J]. *Landbauforschung-vTI Agriculture and Forestry Research*, 2009, 59(4): 309-338.
- [14] Galliard T, Phillips D R. Lipoxygenase from potato tubers. Partial purification and properties of an enzyme that specifically oxygenates the 9-position of linoleic acid [J]. *Biochemical Journal*, 1971, 124(2): 431-438.
- [15] Zeng F K, Liu H, Yu H, *et al.* Effect of potato flour on the rheological properties of dough and the volatile aroma components of bread [J]. *American Journal of Potato Research*, 2019, 96(1): 69-78.
- [16] Duckham S C, Dodson A T, Bakker J, *et al.* Volatile flavour

- components of baked potato flesh. A comparison of eleven potato cultivars [J]. *Food/Nahrung*, 2001, 45(5): 317–323.
- [17] Mutti B, Grosch W. Potent odorants of boiled potatoes [J]. *Food/Nahrung*, 1999, 43(5): 302–306.
- [18] Petersen M A, Poll L, Larsen L M. Comparison of volatiles in raw and boiled potatoes using a mild extraction technique combined with GC odour profiling and GC-MS [J]. *Food Chemistry*, 1998, 61(4): 461–466.
- [19] Thybo A K, Christiansen J, Kaack K, *et al.* Effect of cultivars, wound healing and storage on sensory quality and chemical components in pre-peeled potatoes [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2006, 39(2): 166–176.
- [20] Oruna-Concha M J, Duckham S C, Ames J M, *et al.* Comparison of volatile compounds isolated from the skin and flesh of four potato cultivars after baking [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001, 49(5): 2414–2421.
- [21] Petersen M A, Poll L, Larsen L M. Identification of compounds contributing to boiled potato off-flavour ('POF') [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 1999, 32(1): 32–40.
- [22] Ulrich D, Hoberg E, Neugebauer W, *et al.* Investigation of the boiled potato flavor by human sensory and instrumental methods [J]. *American Journal of Potato Research*, 2000, 77(2): 111–117.
- [23] Morris W L, Shepherd T, Verrall S R, *et al.* Relationships between volatile and non-volatile metabolites and attributes of processed potato flavour [J]. *Phytochemistry*, 2010, 71(14): 1765–1773.
- [24] Duckham S C, Dodson A T, Bakker J, *et al.* Effect of cultivar and storage time on the volatile flavor components of baked potato [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(20): 5640–5648.
- [25] Blanda G, Cerretani L, Comandini P, *et al.* Investigation of off-odour and off-flavour development in boiled potatoes [J]. *Food Chemistry*, 2010, 118(2): 283–290.
- [26] Maga J A, Holm D G. Subjective and objective comparison of baked potato aroma as influenced by variety/clone [J]. *Developments in Food Science*, 1992, 29: 537–541.
- [27] Coleman E C, Ho C T. Chemistry of baked potato flavor. I. Pyrazines and thiazoles identified in the volatile flavor of baked potato [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1980, 28(1): 66–68.
- [28] Buttery R G, Seifert R M, Guadagni D G, *et al.* Characterization of volatile pyrazine and pyridine components of potato chips [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1971, 19(5): 969–971.
- [29] Josephson D B, Lindsay R C. c4-Heptenal: an influential volatile compound in boiled potato flavor [J]. *Journal of Food Science*, 1987, 52(2): 328–331.
- [30] Maga J A. Potato flavor [J]. *Food Reviews International*, 1994, 10(1): 1–48.
- [31] Buttery R G, Ling L C. Earthy aroma of potatoes [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1973, 21(4): 745–746.
- [32] Murray K E, Whitfield F B. The occurrence of 3-alkyl-2-methoxypyrazines in raw vegetables [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1975, 26(7): 973–986.
- [33] Khan I, Müller K, Warmbier H. Einfluss von Sorte und Düngung auf das Spektrum flüchtiger Aromastoffe in Kartoffeln [J]. *Potato Research*, 1977, 20(3): 235–242.
- [34] Fischer J, Müller K. Untersuchungen über flüchtige Aromastoffe der Kartoffel. I. Isolation und Anreicherung flüchtiger Aromastoffe mit der Dynamischen Headspace Technik [J]. *Potato Research*, 1991, 34(2): 159–167.
- [35] Petersen M A, Poll L, Larsen L M. Changes in flavor-affecting aroma compounds during potato storage are not associated with lipoxygenase activity [J]. *American Journal of Potato Research*, 2003, 80(6): 397–402.
- [36] Self R, Rolley H, Joyce A. Some volatile compounds from cooked potatoes [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1963, 14(1): 8–14.
- [37] Meigh D F, Filmer A, Self R. Growth-inhibitory volatile aromatic compounds produced by *Solanum tuberosum* tubers [J]. *Phytochemistry*, 1973, 12(5): 987–993.
- [38] 曾著莉, 魏晋梅, 牛黎莉, 等. HS-SPME-GC-MS分析马铃薯挥发性风味物质 [J]. *食品与生物技术学报*, 2019, 38(6): 123–130.
- [39] Oruna-Concha M J, Bakker J, Ames J M. Comparison of the volatile components of two cultivars of potato cooked by boiling, conventional baking and microwave baking [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2002, 82(9): 1080–1087.
- [40] Nursten H E, Sheen M R. Volatile flavour components of cooked potato [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1974,

- 25(6): 643–663.
- [41] Whitfield F B, Mottram D S. Volatiles from interactions of Maillard reactions and lipids [J]. *Critical Reviews in Food Science Nutrition*, 1992, 31(1–2): 1–58.
- [42] O'connor C, Fisk K, Smith B, *et al.* Fat uptake in French fries as affected by different potato varieties and processing [J]. *Journal of Food Science*, 2001, 66(6): 903–908.
- [43] Rizzi G P. The Strecker degradation of amino acids: newer avenues for flavor formation [J]. *Food Reviews International*, 2008, 24(4): 416–435.
- [44] Martin F L, Ames J M. Formation of Strecker aldehydes and pyrazines in a fried potato model system [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001, 49(8): 3885–3892.
- [45] Dobson G, Griffiths D W, Davies H V, *et al.* Comparison of fatty acid and polar lipid contents of tubers from two potato species, *Solanum tuberosum* and *Solanum phureja* [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(20): 6306–6314.
- [46] Baysal T, Demirdöven A. Lipoxygenase in fruits and vegetables: a review [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2007, 40(4): 491–496.
- [47] Ho C T, Hartman T G. Lipids in food flavors volume 558. Lipid-derived aroma compounds in cooked potatoes and reconstituted dehydrated potato granules [M]//American Chemical Society. [ACS Symposium Series]. Washington: ACS, 1994: 108–129.
- [48] Gumbmann M R, Burr H K. Food flavors and odors, volatile sulfur compounds in potatoes [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1964, 12(5): 404–408.
- [49] Buttery R G, Ling L C. Alkylthiazoles in potato products [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1974, 22(5): 912–914.
- [50] Buttery R G, Seifert R M, Ling L C. Characterization of some volatile potato components [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1970, 18(3): 538–539.
- [51] McGill A S, Hardy R, Burt J R, *et al.* Hept-cis-4-enal and its contribution to the off-flavour in cold stored cod [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1974, 25(12): 1477–1489.
- [52] 刘国敏, 覃维治, 韦荣昌, 等. 不同品种(系)马铃薯挥发性风味物质对比分析 [J]. *食品工业科技*, 2022, 43(9): 284–292.
- [53] 李凯峰, 周远平, 王琼, 等. 3种烹调方式下马铃薯风味化合物组分构成的品种间差异比较 [J]. *食品科学*, 2020, 41(20): 159–166.
- [54] 赵兵, 张敏, 梁杉. 过度蒸煮对马铃薯风味化合物组成的影响 [J]. *食品科学*, 2017, 38(22): 200–204.