

中图分类号: S532 文献标识码: A 文章编号: 1672-3635(2022)06-0551-08
DOI: 10.19918/j.cnki.1672-3635.2022.06.009

综述

烘烤马铃薯风味化合物的形成过程、种类及影响因素

姜红, 刘琳, 徐健, 张小璐, 曾凡逵*, 刘刚

(中国科学院兰州化学物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 烘烤马铃薯作为一种普通的烹饪方式, 其产生的风味化合物复杂多样。烘烤马铃薯的风味化合物主要通过美拉德反应/Strecker降解、脂质的热氧化降解和硫胺素的热降解途径产生, 通过这些途径产生的风味化合物种类主要包括醛、酸、酮、酯、醚、内酯、吡嗪、炔类、呋喃、吡啶、吡咯、噻唑、噻吩以及硫化物等。目前, 在烘烤马铃薯中共鉴定出了392种挥发性风味物质, 其中吡嗪类化合物对马铃薯风味的贡献最大, 尤其是2-异丁基-3-甲氧基吡嗪、2,3-二乙基-5-甲基吡嗪、3,5-二乙基-2-甲基吡嗪更能体现烘烤马铃薯的呈香特点。马铃薯的品种和烘烤方式对风味化合物的产生影响较大, 马铃薯不同部位的风味化合物种类具有差异显著性。此外, 马铃薯的采前农艺措施和采后贮藏时间对烘烤马铃薯的风味化合物形成也具有重要的影响。

关键词: 马铃薯; 烘烤; 风味化合物; 形成途径; 影响因素

Formation Pathways, Types and Influencing Factors of Flavor Compounds of Baked Potatoes

JIANG Hong, LIU Lin, XU Jian, ZHANG Xiaolu, ZENG Fankui*, LIU Gang

(Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: As a common way of cooking, baked potato produces complex and diverse flavor compounds through the Maillard reaction/Strecker degradation, lipid oxidation degradation and the thermal degradation of thiamine. The flavor compounds mainly include aldehyde, acid, ketones, ester, ether, lactone, pyrazine, hydrocarbons, furan, pyridine, pyrrole, thiazole, thiophene, and sulfide. At present, a total of 392 volatiles in baked potato have been identified, among which pyrazines have the greatest contribution to potato flavor, especially 2-isobutyl-3-methoxypyrazines, 2,3-diethyl-5-methylpyrazines, 3,5-diethyl-2-methylpyrazines having much more characteristic baked potato aroma. The variety and baking method of potato have a great influence on the production of flavor compounds; also, the flavor compound types of different parts in potato differ significantly. In addition, the potato agronomic measures of pre-harvest and storage time of post-harvest can also have an important impact on the flavor compounds of baked potatoes.

Key Words: potato; bake; flavor compound; formation pathway; influencing factor

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: 姜红(1990-), 女, 博士, 特聘助理研究员, 主要从事马铃薯加工与贮藏研究。

*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。

马铃薯作为世界上重要的粮菜兼用作物, 具有较高的营养价值, 是淀粉、蛋白质、矿物质、膳食纤维和植物化学物质的重要来源^[1]。此外, 马铃薯还具有调节血糖和血脂、抗炎和增强免疫力的功能^[2]。在不同的国家, 人们会根据不同的饮食习惯而选择不同的烹饪或加工方式。马铃薯块茎的主要烹饪方式包括蒸煮、煎炸和烘烤等, 通过不同的烹饪方式可以制作多种多样的食品, 而在众多的产品当中, 马铃薯风味则是消费者追求的品质标准之一。烘烤作为马铃薯的加工方式之一, 产生的风味种类较为丰富, 对于膳食纤维的改变较小, 可以保留酥脆的口感^[3], 因此, 烘烤马铃薯被看作是一种健康美味且易被大众接受的一类食品。

1 烘烤马铃薯的风味化合物

风味是植物由正常代谢过程中生物合成的芳香化学物质所产生的, 其可以通过烹饪或加工得到进一步改善^[4,5]。烘烤马铃薯是一种独一无二的加工方式, 其通常都是未经切开且不掺杂油、盐与水就直接进行加热的, 块茎受热后会产生风味物质, 而烘烤马铃薯产生的所有化合物均来自于马铃薯块茎本身^[6]。Duckham等^[7]研究表明, 烘烤马铃薯主要风味化合物是美拉德反应/Strecker降解、脂质降解和硫胺素的热降解造成的。美拉德反应涉及还原糖和氨基酸之间的相互作用, 产生多种吡嗪类化合物, 这也是烘烤马铃薯具有独特风味的关键成分。脂质降解产生的风味物质包括各种醛和酮, 具有一定的水果味或花香味^[8], 而氨基酸甲硫氨酸的Strecker降解产生具有马铃薯本身的气味^[9]。烘烤马铃薯产生的风味化合物种类并非单一的, 其是极其复杂的, 不同的学者鉴定出的风味化合物种类与数量各异, 烘烤马铃薯的挥发性化合物种类可多达392种^[10]。此外, 烘烤马铃薯风味化合物的产生受多种因素的影响, 包括内在因素如品种和块茎的不同部位, 外部因素如农业管理、贮藏时间和烘烤条件。

2 烘烤马铃薯风味化合物的形成途径

2.1 美拉德反应/Strecker降解

美拉德反应作为非酶褐变的一种, 对马铃薯风

味的形成具有至关重要的作用, 通过美拉德反应可以产生一些宜人的特征性风味物质^[11,12]。该反应是来自于糖中的羰基与氨基酸或蛋白质之间的一种加缩反应, 通常称之为“羰氨反应”, 他们的反应终产物主要包括一些类黑精、非挥发性化合物和挥发性物质如醛、酮及一些杂环化合物。虽然该过程中产生的挥发性化合物含量极低, 但对烘烤马铃薯风味形成的贡献较大。美拉德反应分为初级阶段、中级阶段和终级阶段^[13]。

美拉德反应的初级阶段主要指还原糖和氨基化合物的缩合反应, 醛糖通过自身环化产生的N-取代糖基胺经过酸催化重排生成Amadori重排产物, 而酮糖通过特定途径产生Heyns重排产物^[14], 这些物质的产生只是非挥发性风味物质的前体物质, 并不会引起烘烤马铃薯色泽和香味的变化。美拉德反应的中间阶段产生的一些中间体是马铃薯风味的特征性物质, 主要包括1,2-烯胺醇、3-脱氧-1,2-二羰基化合物、2,3-烯二醇、脱氢还原酮、还原酮、丙酮醇、丙酮醛、丁二酮等, 这些中间体主要是高温下Amadori和Heyns重排产物的不稳定而导致的^[15]。初级和中级反应产生的物质主要呈现为无色和淡黄色, 而色泽的呈现主要在终级阶段, 该阶段产生一些含有杂环的化合物, 如吡咯类、吡啶类和咪唑类, 最终经过一系列反应生成类黑精, 其对于风味的形成也具有重要的作用^[16]。

美拉德反应的一个重要过程是氨基酸的Strecker降解, 主要是由羰基化合物引发的 α -氨基化合物的降解, 通过Strecker降解产生Strecker醛和 α -氨基酮^[17]。该过程在风味形成中具有积极的作用, 为氮和硫引入杂环化合物提供了途径。 α -氨基酮是杂环化合物的前体物质, 杂环化合物如吡嗪类物质是 α -氨基酮通过自身缩合或者与其他氨基酮相互作用产生的。而食品在烘烤过程中产生的馥郁香味多是由吡嗪类物质引起的。此外, 如果氨基酸是半胱氨酸或者蛋氨酸, 则通过Strecker降解产生硫化氢、氨、乙醛、甲硫醇等, 他们与美拉德反应过程中产生的羰基化合物组成了特征性风味化合物的重要中间体物质^[18]。

2.2 脂质的热氧化降解

脂类物质对食品风味化合物的贡献主要是通过热氧化降解途径发生的^[19]。马铃薯在加热过程中产生的风味物质也是由氧化(自由基夺氢、过氧自由基和氢过氧化物的形成)及分解作用引起的。通过这种途径产生的风味物质既包括自身氧化降解形成的挥发性成分,也包括该途径中形成的一些特征性风味前体物质与美拉德反应中间产物相互作用而形成的一些风味物质,即热氧化过程中的“二次反应”,如醛、酮、内酯、烃类和吡嗪、噻唑、吡啶及含硫类的一些风味物质。脂质在热氧化降解反应中被转变为饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸,而上述特征性的由脂质热氧化所导致的风味物质主要是不饱和脂肪酸的作用。

2.3 硫胺素的热降解

硫胺素即维生素B1,其因含有硫和氮的双环结构,当马铃薯在烘烤过程中被加热后,可能会被分解产生多种含硫和含氮的挥发性物质,主要为呋喃、噻唑、噻吩和许多其他的含硫化合物,这些化合物也是加工过程中产生香味的主要物质^[20]。硫胺素发生热降解以后,产生的噻吩类化合物如2-甲基-2,3-二羟基-3-噻吩硫醇和2-甲基-4,5-二羟基-3-噻吩硫醇,是烘烤类气味的主要体现物质。

3 烘烤马铃薯风味化合物的种类

烘烤马铃薯所产生的风味并不是由某种单一化合物导致的,而是多种特征性风味物质的综合作用。研究表明,烘烤马铃薯当中含有的挥发性风味物质包括吡嗪、酮类、酸类、醛类、醇类、酯类、卤族类、噻唑类、酯类、恶唑类、呋喃类、含硫化合物、含氮化合物、饱和烃类、不饱和芳香烃类和混杂的化合物,其中吡嗪、恶唑和噻唑类化合物对烘烤马铃薯风味的贡献值最大^[21]。但研究普遍认为,吡嗪类化合物可能是烤马铃薯风味化合物中最主要的贡献者,包括2-乙基-3,6-二甲基吡嗪、2-异丁基-3-甲氧基吡嗪、2-异丙基-3-甲氧基吡嗪、2-异丁基-3-甲基吡嗪、2,3-二乙基-5-甲基吡嗪、3,5-二乙基-2-甲基吡嗪、2-乙基-6-乙炔基吡嗪和2-乙基-3-甲基吡嗪^[7,10,21]。在这些化合

物中,2-异丁基-3-甲氧基吡嗪、2,3-二乙基-5-甲基吡嗪、3,5-二乙基-2-甲基吡嗪更能体现烤马铃薯的呈香特点^[22]。除此之外,马铃薯块茎烘烤过程中还会产生如表1所示的其他的一些风味物质。

Buttery等^[23]采用连续真空蒸汽蒸馏对232℃条件下烘烤马铃薯的风味进行鉴定,发现了多种特征性的风味物质,其中最重要的是2-乙基-3,6-二甲基吡嗪。此外,还发现烘烤马铃薯皮中的吡嗪类与脂肪族醛类物质的比例高于整个马铃薯的。相反,其内部的吡嗪类物质与脂肪族醛类物质的比例反而很高,这可能是因为薯皮当中的温度和水分含量相对于马铃薯内部都更有利于吡嗪类风味物质的生成,而马铃薯内部的吡嗪类含量较高可能是因为烘烤过程中从表皮部位向中心迁移导致的。有人将烘烤马铃薯的挥发性风味物质分为酸性、中性和碱性三类。并且认为中性和碱性风味物质对烘烤马铃薯的风味贡献最大。类似地,2-乙基-3,6-二甲基吡嗪对烘烤马铃薯的风味影响最大。另外,2-异丁基-3-甲基吡嗪、2,3-二乙基-5-甲基吡嗪和3,5-二乙基-2-甲基吡嗪对马铃薯风味也具有重要的作用^[22]。烘烤马铃薯风味物质还包含一些杂环类物质,如呋喃、恶唑、噻吩类、吡咯类和吡啶类化合物。呋喃类化合物被认为是脂肪氧化的产物,具有青草味、豆腥味和甘草味。恶唑类、吡咯类和噻吩类化合物具有泥腥味和坚果味^[24]。如果长时间进行高温烘烤马铃薯,则会生成更多的杂环类风味物质(如吡嗪类),这种烘烤方式会对马铃薯的风味造成影响。

4 烘烤马铃薯风味化合物的影响因素

脂肪酸、糖和氨基酸是大多数化合物的前体,这些化合物负责在马铃薯块茎烘烤时形成各具特色的风味物质。脂质降解和美拉德反应是烘烤马铃薯风味化合物形成的主要途径,占有率分别为22%~69%和28%~77%^[25]。即使通过美拉德反应、脂质降解和硫胺素热降解等途径会产生不同的马铃薯风味物质,但这些物质的产生还受基因型、烘烤条件和烘烤方式、不同部位、储存时间、农艺管理等的影响^[26]。

表1 烘烤马铃薯中报道的风味化合物

Table 1 Flavor compounds reported in baked potatoes

种类 Type	化合物 Compound
醛类 Aldehyde	2-甲基丙醛、2-甲基-2-丙醛、2-甲基丁醛、3-甲基-1-丁烯醛、2-甲基-2-丁烯醛、3-甲基-2-丁烯醛、戊醛、戊烯醛、2-戊烯醛、4-甲基-2-苯基-2-戊烯醛、己醛、2-乙基己烯醛、5-甲基-2-苯基己烯醛、庚(烯)醛、2-庚烯醛、4-庚烯醛、辛(烯)醛、2-辛烯醛、壬醛、2(3)-壬烯醛、乙基苯甲醛、癸醛、十一醛、2-十一醛、2,4-癸二烯醛、2,4-庚二烯醛、甲硫基丙醛、3-甲基丁醛、2,5-二甲基苯甲醛、对-甲氧基肉桂醛、水杨醛、十二醛、壬二烯醛、2,4-壬二烯醛、苯甲醛、苯乙醛、糠醛、2-糠醛、5-甲基糠醛、5-甲基-2-糠醛、5-甲基-2-噻吩甲醛
酯类 Ester	乙酸乙酯、乙酸仲丁酯、乙酸丁酯、2-甲基丁基乙酸酯、乙酸戊酯、1-庚烯基 2-醋酸酯、2-甲基丁酸甲酯、戊酸甲酯、2-甲基丁基戊酸酯、2-甲基戊酸甲酯、己酸甲酯、己酸烯丙酯、辛酸甲酯、壬酸甲酯、酞酸二乙酯、邻苯二甲酸二异丁酯、间苯二甲酸二异丁酯、邻苯二甲酸酐、2-甲基戊酸乙酯、烯丙基己酸酯、乙酸丁酯、乙酸庚烯酯、2-甲基丙酸甲酯、棕榈酸甲酯、硬脂酸甲酯、辛酸甲酯、十四酸甲酯、乙酸十八醇酯
酮类 Ketone	丙酮、丁二酮、丁酮、4-甲基-2-戊酮、5-甲氧基-2-戊酮、4-甲基-3-戊烯-2-酮、2,6-二甲基-3-戊烯基-2-酮、己酮、3-己酮、庚酮、2-庚酮、4-庚酮、2-甲基-4-庚酮、6-甲基-5-庚烯-2-酮、2-甲基-2-庚烯-6-酮、3-辛烯-2-酮、4-辛烯-3-酮、4-癸酮、3,5-辛二烯-2-酮、2,5-二甲基-1-环戊酮、2-乙酰基-3,3-二甲基环戊酮、1-苯基-1,2-丙二酮、香叶基丙酮、螺二烯酮、2-乙酰基-丙酮、2-丁酮、3-戊酮、3-乙基环戊酮、2-十五烷酮、3,5,5-三甲基-2-环己烯-1-酮
醇类 Alcohol	甲醇、乙醇、仲丁醇、3-甲基-1-戊醇、2-甲基丁醇、3-甲基丁醇、戊醇、2-甲基-2-戊醇、2,4-二甲基-3-戊醇、4-甲基-4-戊醇、2-甲-3-戊烯-2-醇、2-甲-1-戊烯-3-醇、庚醇、2-乙烯基-1-庚醇、1-辛烯-3-醇、3-己烯-1-醇、丁子香酚、4-乙烯基-2-甲氧基苯酚、2-甲氧基-4-乙烯基苯酚、3,6-二甲基-3-辛醇、十二(六)烷醇、三甲基苯甲醇、3-甲氧基-4-异丙基苯甲醇、萘酚、2-十四氧基乙醇、沉香醇、苯甲醇
酸类 Acid	乙酸、丙酸、丁酸、戊酸、己酸、庚酸、2-甲基乙酸、2-甲基戊酸、2-甲基丙酸、2-苯基巴豆酸、3-甲基丁酸、3-甲基戊酸、4-甲基戊酸、乙酸仲丁酯、2-甲基丁基乙酸酯、2-甲基己酸、2-氧代己二酸
醚类 Ether	甲醚、乙基异丙基醚、乙基戊基醚、甲基壬基醚、二甘醇二乙醚
烃类 Hydrocarbon	辛烷、己烷、壬烷、癸烷、十三烷、十四烷、2-甲基癸烷、4-甲基癸烷、2-甲基十四烷、十五烷、2,6,10,14-四甲基十五烷、十六烷、5,7-二甲基十六烷、7,9-二甲基十六烷、2,6,11,15-四甲基十六烷、(环)庚烷、2,4-二甲基庚烷、9-辛基十七烷、2,2,4,6,6-五甲基庚烷、环癸烷、十一烷、2,6,9-三甲基十一烷、2,6,10-三甲基十一烷、十二烷、1-十二烷、4,6-二正丙基十二烷、1-环戊基-4-辛基癸烷、1,1-二乙氧基乙烷、3,5,5-三甲基-1-己烯、2-乙基-3-辛烯、4-乙基-3-辛烯、1-辛二烯、1,4-二甲基-4-乙烯基环己烯、1,1-二氯庚烷、1-氯代十六烷、o-氯苯胺、p-氯苯胺、4-氯联苯、三氯乙酸、1-碘十八烷、二苯基甲烷、1-甲基茛菪满、4,5,7-三甲基茛菪满、a-香橙烯、愈创木烯、环苜蓿烯、长叶环烯、古芸烯、柠檬烯、a-蒎烯、3-蒎烯、苯、甲苯、乙苯、二甲苯、1,2-二甲苯、1,3-二甲苯、1,4-二甲苯、茴香素、烷基苯、丙基苯、戊基苯、乙烯基苯、2-乙烯基甲苯、3-乙基苯甲醛、1,2,3,5-四甲基苯、六甲基苯、1-甲基-4-乙基苯、甲基丙基苯、壬基苯、联二苯、二苯基甲烷、2-甲基萘、1,2-二甲基萘、1,3-二甲基萘、2,7-二甲基萘、1,3,8-三甲基萘、1,4,5-三甲基萘、1,4,6-三甲基-1,2,3,4-四氢化萘、萘烷、2-异丙基萘、3-甲基二十烷、甲基环戊烷、 γ -蛇麻烯、月桂烯、水芹烯
卤族 Halogen family	氯仿、1,1,1-三氯乙烷、四氯乙烯、2-氯丙烷、1-氯-2-甲基丁烷、1-氯庚烷、1,1-二氯庚烷、1-氯代十六烷、邻氯苯胺、对氯苯胺、2-氯联苯、三氯乙烷、2-溴-5-乙基壬烷、1-碘-十八烷

续表 1

种类 Type	化合物 Compound
吡嗪 Pyrazine	2,3-二甲基-5-丁酰吡嗪、2,3-二甲基吡嗪、2,5-二乙基-3-甲基吡嗪、2,5-二甲基-3-(2-甲基丙基)吡嗪、2,5-二甲基-3-(3-甲基丁基)吡嗪、2,5-二甲基-3-丁基吡嗪、2,5-二甲基-3-丙烯基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、2,6-二乙基-3-甲基吡嗪、2,6-二甲基-3-(2-甲基丁基)吡嗪、2,6-二甲基-3-丁基吡嗪、2,6-二甲基吡嗪、2-丁基-3-甲基吡嗪、2-丁基-6-甲基吡嗪、2-乙烯基-5-甲基吡嗪、2-乙烯基-6-甲基吡嗪、2-乙基-3,5,6-三甲基吡嗪、2-乙基-3,5-二甲基吡嗪、2-乙基-3,6-二甲基吡嗪、2-乙基-3-甲基吡嗪、2-乙基-5-甲基吡嗪、2-乙基-6-甲基吡嗪、2-乙基-6-丙基吡嗪、2-乙基-6-乙基吡嗪、2-异丁基-2,5-二甲基吡嗪、2,3-二乙基-5-甲基吡嗪、2-异丁基-3,6-二甲基吡嗪、2-异丁基-3-甲氧基吡嗪、2-异丁基-3-甲基吡嗪、2-异丁基-5-甲基吡嗪、2-异丙基-3-甲氧基吡嗪、2-甲基-5-丙酰吡嗪、2-甲基-5-乙烯基吡嗪、2-甲基-6,7-二氢-5H-环戊基吡嗪、3,5-二乙基-2-甲基吡嗪、3,5-二甲基-2-(2-甲基丙基)吡嗪、3,5-二甲基-6,7-二氢-5H-环戊基吡嗪、3-丁基-2,5-二甲基吡嗪、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪、3-异丙基-2-甲氧基吡嗪、5,7-二甲基-1,2,3,4,7,8-六氢喹啉、5-丁基-2,3-二甲基吡嗪、5-甲基-6,7-二氢吡嗪、甲基戊基吡嗪、二乙基丙基吡嗪、二甲基丙基吡嗪、乙基二甲基乙烯基吡嗪、乙基吡嗪、乙基乙烯基吡嗪、异戊二甲基吡嗪、异戊吡嗪、异丁基二甲基吡嗪、异丁基乙基甲基吡嗪、甲基吡嗪三甲基吡嗪
内酯类 Lactone	4-吡哆酸内酯
恶唑 Oxazole	2,4,5-三甲基恶唑、5-乙酰基-2,4-二甲基恶唑
噻吩 Thiophene	噻吩、2-乙酰基噻吩、2-丁基-6-乙基噻吩
噻唑 Thiazole	2,4,5-三甲基噻唑、2,4-二甲基-5-乙酰基噻唑
吡咯 Pyrrole	2-乙酰基吡咯、2-乙酰-1-吡咯、1-甲基-1-吡咯、N-甲基-2-甲酰基吡咯
吡啶 Pyridine	吡啶、2-氨基吡啶、2-乙酰基吡啶
呋喃 Furan	2-呋喃甲醛、2-乙酰呋喃、2-丙酰呋喃、2-戊烷基呋喃、反式-2-(2-戊烯基)呋喃、2-甲基呋喃、2,5-二甲基四氢呋喃、2-甲基四氢呋喃-3-酮、2-乙基呋喃
含硫化合物 Sulfur-containing compound	甲基丙基二硫化物、甲基N-戊基二硫化物、二甲基硫化物、二硫化二甲酯、二甲基三硫化物、四硫化二甲酯、2-乙基己基巯基、戊二硫化乙酯、苯甲基硫化物、苯甲基二硫化物、二戊基二硫化物
含氮化合物 Nitrogen-containing compound	二乙基甲酰胺、二乙酰乙酰胺、二苯胺、胸腺嘧啶、氰基苯、2-氨基-4-硝基甲苯
其他 Other	2-丙基-1,3-二恶烷、2,4,6-三甲基-1,3,5-三恶烷

4.1 品种对烘烤马铃薯风味化合物的影响

Duckham 等^[25]以种植在同一块土地中的 11 个品种(‘Nadine’ ‘Golden Wonder’ ‘Fianna’ ‘Estima’ ‘Cara’ ‘Saxon’ ‘Kerr’s Pink’ ‘Maris Piper’ ‘Desiree’ ‘Marfona’ 和 ‘Pentland Squire’)块茎为材料, 在传统烤箱中 190℃烘烤 1 h 后选取块茎的髓质部分进行风味物质检测, 结果表明, 不同品种之间风味化合物含量差异显著, 对某一品种而言, 2-异丁基-3-甲氧基吡嗪、2-异丙基-3-甲氧基吡嗪、二甲基三硫化物、癸醛和 3-甲基丁醛是烘烤马铃薯风味的主要贡献者, 但也存在较低水平的其他成

分如含硫化合物、甲氧基吡嗪和萜烯。在这些品种当中, ‘Marfona’对美拉德和/或糖降解形成的化合物的绝对产率和相对产率最高(77%), 而‘Cara’的产率最低(25%)。同样, 使用传统方法在 250℃的烤箱中烘烤 5 个不同品种的马铃薯块茎, 结果显示, 对风味产生最大影响的化合物为 2-异丙基-3-甲氧基吡嗪、2-异丁基-3-甲氧基吡嗪、二甲基三硫化物、癸醛和 3-甲基丁醛, 而甲基丙醛、2-甲基丁醛、甲基丁醛和壬醛也可能对风味产生重要影响。在所有品种当中, ‘Kerr’s Pink’品种的风味化合物含量最低, 而‘Estima’和‘Desiree’的含量最

高^[7]。以‘Estima’和‘Piper’为研究对象, 对其进行蒸煮和烘烤, 发现不同的烹饪方式会导致独特风味物质的产生, 但不管哪种烹饪方式, 风味物质均来源于脂质降解和美拉德反应或糖降解, 其中‘Piper’品种在烘烤后的脂质降解/美拉德反应比率较高, 而‘Estima’品种烘烤后鉴定到硫化物、萜烯和2-甲基丁醛含量较高, 且2-异丙基-3-甲氧基吡嗪风味化合物是该品种特有的^[27]。2-异丙基-3-甲氧基吡嗪这种化合物备受关注, 是因为其气味阈值极低, 只有2 ng/L, 而且在生的、煮熟的和烘烤的马铃薯中也发现过这种化合物。

Oruna-Concha等^[28]通过GC-MS鉴定8个烤马铃薯品种(‘Marfona’‘Desiree’‘King Edward’‘Fianna’‘Nadine’‘Pentland Squire’‘Saxon’和‘Cara’)的风味化合物, 得到80种特征性风味物质, 主要包括己醛、壬醛、癸醛、苯甲醛和2-戊基呋喃。其中60种为脂源性的, ‘Desiree’品种的脂质类风味化合物含量最低, ‘King Edward’品种的相对丰度较高。对于美拉德/糖衍生风味化合物的含量来说, ‘Cara’品种较低, ‘Marfona’品种则较高。此外, 硫化物的含量和相对丰度在‘Fianna’品种中最低, 而在‘Nadine’最高。风味物质本质上具有复杂的特征, 对其进行分析需要主观与客观的结合, 采用风味生物标记物进行高通量风味类型鉴定是一种较好的选择。有学者采用这种方法分析了15个品种的风味化合物, 发现2-乙基呋喃、2-戊基呋喃、异门酮、2-苯乙醛、二甲基三硫和2,2,3,4-四甲基戊烷是马铃薯类的风味物质, 3-甲基戊烷是香气浓度、苦味、泥土和木头味的主要体现物质, 2-甲氧基-3-丙基-2-基吡嗪也与香味浓度相关, 3,4,4-三甲基-2-环戊烯-1-酮是造成苦味产生的原因, 1-戊醇使得烘烤马铃薯具有泥土味, 2-戊基呋喃, (E)-庚二烯醛, 戊二醛和(E)-2-甲基-2-戊烯醛则会使烘烤马铃薯产生木头味^[29]。

4.2 烘烤方式和烘烤条件对烘烤马铃薯风味化合物的影响

目前, 马铃薯的烘烤方式主要有传统烘焙和微波烘焙, 通过微波辐射烹饪食物, 其传热特性与传统烘焙不同^[30], 马铃薯在微波炉中烘烤比在传

统烤箱中更快, 微波烘焙大约只需10 min, 而传统烘焙大约需要1 h^[31]。此外, 与传统烘焙相比, 微波烘烤的外层保持在较低的温度, 不形成结皮^[27]。经过专业感官评价员的分析发现, 传统和微波炉烘烤完整马铃薯块茎产生的风味化合物类型完全不同, 气味和口感得分数据结果表明, 微波烘烤的马铃薯不如传统烘烤的^[6]。Brittin和Trevino^[32]也发现了类似的现象。微波烘烤后2-壬烯醛和癸醛含量最高, 而传统烘烤比微波烘烤得到含量更高的己醛和1-辛烯-3-醇^[27]。紫色马铃薯烘烤后的风味物质的研究表明, 虽然烘烤熟化处理的马铃薯产生的挥发性风味物质较为丰富, 但微波烘烤的马铃薯所产生的风味物质是最为单调的^[33]。刘森等^[34]研究了不同烘烤条件对马铃薯风味物质的种类与含量的影响, 发现烘烤条件的不同对种类的影响较小, 但对物质的含量影响极大。

微波和传统烘焙过程中, 马铃薯的水分流失大致相同, 但在微波炉中块茎的水分流失是比较均匀的。在研究者们看来, 这种失水机制可能是导致烘烤过程中风味化合物损失的主要原因。微波烘焙马铃薯的分离物中总挥发性物质的含量最低, 其可以通过块茎表面的蒸发冷却来解释。水分是影响美拉德反应的一个重要因素, 用这两种方法烘烤的马铃薯中水分水平的降低很可能在通过这一途径形成的风味物质水平中发挥了关键作用。传统烘烤的马铃薯中, 其形成的外壳是一个低含水量的区域, 温度在100~190℃, 而在微波烘烤的马铃薯中没有发现这种结皮。Eijk^[30]的一项研究表明, 与微波烘烤相比, 传统烘烤的块茎表面形成的低水分和高温度的表皮, 以及相对较长的烹饪时间, 促进了美拉德反应过程。食物在烘烤过程被加热以后, 来源于食物中的天冬酰胺的氨基与葡萄糖和果糖的羰基之间发生美拉德反应可以产生丙烯酰胺这种物质, 其被认为是一种可能的致癌物, 研究表明, 通过真空烘烤和传统烘烤相结合的工艺, 可以减少烘烤产品中的丙烯酰胺含量^[35]。

4.3 不同部位和贮藏时间对烘烤马铃薯风味化合物的影响

Oruna-Concha等^[36]分析了烘烤后的马铃薯表皮

和皮下组织的挥发性风味化合物的差异, 结果表明, 烘烤表皮中的美拉德反应和糖降解产物最为丰富, 而皮下组织中的脂质降解产物最为丰富, 其在不同品种间存在定性和定量差异。将5个不同品种(‘Estima’ ‘Saxon’ ‘Golden Wonder’ ‘Kerr’s Pink’ 和 ‘Desiree’)马铃薯分别在4℃下贮藏2~3个月和3~8个月以后进行烘烤, 然后采用顶空法分离风味化合物, 用GC-MS进行分析并检测出超过150种化合物。鉴定发现, 随着贮藏时间增加, 化合物总量发生显著增加, 其中脂质类的风味化合物的含量变化尤为显著^[7], 如脂源性醛, 己醛、庚醛、壬醛和癸醛的含量在3~8个月的马铃薯中显著增加。此外, 贮藏8个月的烘烤马铃薯中美拉德/糖衍生的化合物水平显著高于贮藏2~3个月的。贮存期在2~3个月的马铃薯中, 甲基丙醛、2-甲基丁醛和3-甲基丁醛含量无显著升高, 但在3~8个月显著升高。甲基硫丙醛作为唯一具有显著的储存时间效应的化合物, 其含量在3~8个月发生了下降。

4.4 农艺管理对烘烤马铃薯风味化合物的影响

虽然马铃薯的遗传因素对加工过程中的风味物质的产生起着决定性作用, 但是一些自然生境如栽培、施肥、贮藏条件等也会影响风味化合物的形成。根据文献报道, 施加氮磷钾肥对于煮马铃薯的风味化合物具有一定的影响^[37], 但目前未见施肥对于烘烤马铃薯风味物质产生的影响。此外, 烹饪过后放置的时间对于煮马铃薯的风味也具有一定的影响, 但也未见其对于烘烤马铃薯风味化合物的影响研究。

5 结 论

在烘烤马铃薯中鉴别到的大量风味化合物主要是美拉德反应/Strecker降解和脂质热氧化降解的混合型产物, 其形成过程复杂, 产物种类多样, 且受多种内外因素的影响。研究普遍认为, 吡嗪类化合物是烘烤马铃薯风味化合物中最主要的贡献者, 其中2-异丁基-3-甲氧基吡嗪、2,3-二乙基-5-甲基吡嗪、3,5-二乙基-2-甲基吡嗪是烘烤马铃薯最重要的特征性风味物质。目前, 大量与气味相关的风味化合物可以通过气质联用、气相

离子迁移谱、挥发性物质代谢组学等技术手段进行鉴定。随着分析技术的进步, 更多种类的微量风味物质将会被鉴定出来。烘烤马铃薯的风味化合物受品种、烹饪方式、烹饪条件、贮藏时间和农艺管理等因素的影响, 但是这些因素对烘烤马铃薯中风味化合物的影响迄今尚未得到充分研究。因此, 从这些方面进行马铃薯风味物质形成的相关研究, 对于培育具有烘烤特性的马铃薯新品种以满足消费者的需求具有一定的指导意义。

[参 考 文 献]

- [1] 曾凡遼, 许丹, 刘刚. 马铃薯营养综述 [J]. 中国马铃薯, 2015, 29(4): 233-243.
- [2] 王颖, 潘哲超, 李先平, 等. 马铃薯的营养价值与人体健康 [J]. 中国食物与营养, 2017, 23(8): 5-8.
- [3] 杨军林, 任亚梅, 张武岗, 等. 基于主成分分析法的熟化马铃薯品质评价 [J]. 食品科学, 2018, 39(19): 70-77.
- [4] Auvray M, Spence C. The multisensory perception of flavor [J]. Consciousness and Cognition, 2008, 17(3): 1016-1031.
- [5] Reineccius G. Source book of flavors [M]. Berlin: Springer Science and Business Media, 2013.
- [6] Jansky S H. Potato flavor [J]. American Journal of Potato Research, 2010, 87(2): 209-217.
- [7] 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.
- [8] Burdock G A. Fenaroli's handbook of flavor ingredients [M]. Florida: CRC Press, 2016.
- [9] Whitfield F B, Last J H. Vegetables [M]//Maarse H. Volatile compounds in foods and beverages. London: Routledge, 2017: 203-281.
- [10] 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.
- [11] 戚繁. 美拉德反应在食品工业中的研究进展 [J]. 现代食品, 2020(19): 44-46.

- [12] 祁岩龙, 冯怀章, 于洋, 等. 美拉德反应研究进展及在食品工业中的应用 [J]. 食品工业, 2018, 39(3): 248–252.
- [13] 郑文华, 许旭. 美拉德反应的研究进展 [J]. 化学进展, 2005(1): 122–129.
- [14] Martins S I, Jongen W M, Van Boekel M A. A review of Maillard reaction in food and implications to kinetic modelling [J]. Trends in Food Science and Technology, 2000, 11(9–10): 364–373.
- [15] 付莉, 李铁刚. 简述美拉德反应 [J]. 食品科技, 2006(12): 9–11.
- [16] 冯大炎, 周运友. Maillard 反应与 Strecker 降解及其对食品风味与食品营养的影响 [J]. 安徽师大学报: 自然科学版, 1993(2): 79–84.
- [17] Yaylayan V A. Recent advances in the chemistry of Strecker degradation and Amadori rearrangement: implications to aroma and color formation [J]. Food Science and Technology Research, 2003, 9(1): 1–6.
- [18] Fors S. Sensory properties of volatile Maillard reaction products and related compounds [M]//Waller G R, Feather M S. The Maillard reaction in foods and nutrition. Washington: American Chemical Society, 1983: 185–286.
- [19] Reineccius G, Peterson D. Principal of food flavor analysis [M]//Kilcast D. Instrumental assessment of food sensory quality, Woodhead Publishing series in food science, technology and nutrition. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013: 53–102.
- [20] Reineccius G A, Liardon R. The use of charcoal traps and microwave desorption for the analysis of headspace volatiles above heated thiamine solutions [C]//Eichorn H. Topics in flavour research, 1985: 125–138.
- [21] Coleman E C, Ho C-T, Chang S S. Isolation and identification of volatile compounds from baked potatoes [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1981, 29(1): 42–48.
- [22] Pareles S R, Chang S S. Identification of compounds responsible for baked potato flavor [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1974, 22(2): 339–340.
- [23] BATTERY R, Guadagni D, Ling L. Volatile components of baked potatoes [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1973, 24(9): 1125–1131.
- [24] Ho C T, Coleman E C. Chemistry of baked potato flour: further identification of heterocyclic compounds in the volatile flavor of baked potato [J]. Journal of Food Science, 1980, 45(4): 1094–1095.
- [25] Duckham S, Dodson A, 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.
- [26] Morris W L, Taylor M A. Improving flavor to increase consumption [J]. American Journal of Potato Research, 2019, 96(2): 195–200.
- [27] 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.
- [28] Oruna-Concha M, Bakker J, Ames J. Comparison of the volatile components of eight cultivars of potato after microwave baking [J]. LWT-Food Science and Technology, 2002, 35(1): 80–86.
- [29] Bough R A, Holm D G, Jayanty S S. Evaluation of cooked flavor for fifteen potato genotypes and the correlation of sensory analysis to instrumental methods [J]. American Journal of Potato Research, 2020, 97(1): 63–77.
- [30] Eijk T V. Flavor and flavorings in microwave foods [C]//Abstracts of papers of the American Chemical Society. Washington: American Chemical Society, 1992.
- [31] Wilson W D, MacKinnon I M, Jarvis M C. Transfer of heat and moisture during microwave baking of potatoes [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2002, 82(9): 1070–1073.
- [32] Brittin H, Trevino J. Acceptability of microwave and conventionally baked potatoes [J]. Journal of Food Science, 1980, 45(5): 1425–1427.
- [33] 王榛, 陈雷, 潘超, 等. 不同熟化方法对紫色马铃薯挥发性风味物质形成的影响 [J]. 中国粮油学报, 2017, 32(6): 128–133.
- [34] 刘森, 王宝心, 祁立波, 等. 不同焙烤条件的烤马铃薯条品质对比 [J]. 现代食品科技, 2020, 36(4): 202–209.
- [35] Akkurt K, Mogol B A, Gökmen V. Mitigation of acrylamide in baked potato chips by vacuum baking and combined conventional and vacuum baking processes [J]. LWT- Food Science and Technology, 2021, 144: 111211.
- [36] Oruna-Concha M J, Duckham S C, Ames J M. 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.
- [37] Ceylan S, Mordogan N, Akdemir H, *et al.* Effect of organic fertilizers on some agronomic and chemical properties of potato (*Solanum tuberosum* L.) [J]. Asian Journal of Chemistry, 2006, 18(2): 1223.