朱寅，滕健. 小麦制品中挥发性成分的研究综述 [J]. 食品工业科技，2023, 44(2)：436−444. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022020104

ZHU Yin, TENG Jian. A Review of Volatile Components in Wheat Products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(2): 436−444. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022020104

·专题综述·

小麦制品中挥发性成分的研究综述

朱　寅，滕　健*

（上海究本科技有限公司，上海 201403）

摘　要：粮食因其种类和加工方式的不同，会产生不同的挥发性成分，形成食物独特的风味，引起人们的食欲。小麦制品是日常生活中最重要的主食之一，众多学者对不同小麦及其制品的挥发性成分进行检测，并对处理方式的影响开展了深入的研究。本文就常见小麦制品中挥发性成分的研究结果、加工方式对风味的影响做一综述，以期为小麦制品的天然留香和增香技术提供理论依据和开发方向。

关键词：小麦制品，风味，挥发性成分，加工方式，增香

中图分类号：TS201.2　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1002−0306(2023)02−0436−09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022020104

本文网刊：

A Review of Volatile Components in Wheat Products

ZHU Yin，TENG Jian*

（Adfontes (Shanghai) Technology Co., Ltd., Shanghai 201403, China）

Abstract: Different grains and processing methods may produce different volatile components, form a unique flavor and increase people's appetite. Wheat products are one of the most important foods in daily life. Many scholars have studied the volatile components of different wheat products, and carried out in-depth researches on the influence of treatment methods. This paper summarizes the research results of volatile components in wheat products and the influence of processing methods, in order to provide the theoretical basis and development direction for the natural flavor retention and enhancement technology of wheat products .

Key words: wheat products; flavor; volatile components; processing method; flavor enhancement

古人云，“民以食为天”，其原义是人民以粮食为生存的根本。通常所说的粮食，主要包括稻米、小麦、大豆及其他杂粮，比如小米、黑米、荞麦、燕麦、薏仁米、高粱等。通过不同的加工方式，可以将粮食加工成为各种食物，满足不同人群对营养和美味的需要。风味是评价食物的一个重要指标，因粮食种类和加工方式等不同，会产生不同的挥发性成分，形成食物独特的风味。在谷物风味领域，很多学者对稻米及其制品[1−4]、燕麦及其制品[5−6]、玉米制品[7−8]、高粱及其制品[9]、以及大豆制品[10] 等粮食的挥发性成分做了深入的研究，为筛选风味优良且稳定的粮食品种及其制品指引了方向。

小麦是在世界范围内被普遍种植的一种粮食作物，其颖果是人们重要的主食之一，在我国谷物产量排名很高。以小麦粉、全麦粉、麸皮等为主要食材加工制作的小麦制品，如面条、馒头、饼干、面包等，更是人们日常生活中必不可少的膳食组成。对于小麦制品的风味研究很多，但多为针对单一制品在不同加工条件下风味物质的实验性研究，缺乏综合性的影响因素分析和总结。本文综述了各种小麦制品在不同加工工艺中挥发性成分的研究，通过整合和比较分析，从中找出风味化合物与各种加工技术的关联，可以对最终成品的留香和增香技术开发提供研究基础和新的策略方向。

1　小麦制品风味概述

收割的原麦若未经处理，其风味是不明显的。只有经过脱壳、除杂、制粉、制成品、熟化等一系列加工工艺处理后，其挥发性成分的种类和含量发生了

收稿日期：2022−02−18

作者简介：朱寅（1981−），女，硕士，研究方向：膳食纤维食品开发，E-mail: yin_zhu@adfontes.com.cn。

*** 通信作者：**滕健（1984−），男，硕士，研究方向：膳食纤维及肠道菌群研究，E-mail: jian_teng@adfontes.com.cn。

表 1　小麦制品挥发性成分的产生及风味特点

Table 1　Generation and flavor character of key volatile compounds in wheat products

挥发性成分	产生及风味特点[12-14]
醛类化合物	亚油酸和亚麻酸等脂肪酸氧化分解，以及酯类化合物氧化降解的产物，一般具有奶油、脂肪、草香以及青香等气味。
醇类化合物	脂肪酸氧化降解产物，通常分为饱和醇、不饱和醇，多为清香、甜香、水果香、花香等气味。
酯类化合物	通常由低级饱和脂肪酸与醇类酯化反应生成，种类繁多，是气味的主要载体，具有各种果实香味。
酮类化合物	脂肪酸的氧化反应和美拉德反应、醇类化合物的氧化作用和酯类化合物分解的产物，多为水果香味、脂肪味、香草味和花香等，且随着碳链增长香味特征更加浓郁。
烃类化合物	脂肪酸的烷氧自由基发生断裂降解的产物，多为焦甜味、脂肪味、果香等气味，但烯烃类在一定条件下形成醛和酮，对风味形成一定影响。
杂环类化合物（包括呋喃、吡啶、吡嗪、吡咯等）	亚油酸氧化、美拉德反应、焦糖化反应以及Strecker降解反应的产物、中间产物和衍生物，多具有焦香味、烤香味。

变化，特征风味才逐渐显现（表 1）。从原麦制成各种可食用的小麦制品的过程中，挥发性成分的变化是由一系列的物化反应引起的，主要有：a.脂质氧化反应，多发生在低温度及高水分环境下，产物以醛、酮、醇类物质为主；b.非酶促美拉德反应（包括 Strecker 降解），多发生在高温度及低水份环境下，产物以吡嗪、呋喃、吡咯及含硫化合物为主[11]。可见，加工过程中不同反应所产生的挥发性物质，是小麦制品特征风味的主要来源，因此也是众多增香技术研究的重点。

食物的风味是由多种复杂的挥发性成分组成的，不同成分有其自身的特点，气味阈值也存在差异[15]。小麦经过多道工艺及不同加工方式处理后，其挥发性成分的种类和含量的发生了变化，风味也有所不同。目前，食品中挥发性成分的检测大多采用顶空固相微萃取（HS-SPME）-气质联用（GC-MS）和电子鼻[16]。其中，HS-SPME 可以对样品进行前处理、进样，GC-MS 对未知化合物进行高效分离和鉴别；而电子鼻是模拟生物的嗅觉系统，利用多种传感器组合在一起，可检测挥发性成分的含量和种类。小麦制品中挥发性成分很多，通常用相对气味活度值（ROAV）和主成分分析（PCA）进行挥发性成分的定量分析，并将 ROAV ≥ 1 的挥发性成分定义为各小麦制品中主要的风味化合物。研究显示[17]，小麦制品的挥发性成分主要包括醛类、醇类、酸酯类、酮类、烯烃类和杂环类物质等，表 2 列举了一些研究总结的小麦制品中构成其特征性风味的主要挥发性成分。

研究不同挥发性成分的形成条件以及风味表达，是开发小麦制品增香技术的基础，同时也为通过优化反应条件，促使目标挥发性成分的形成，实现风味的定向设计提供了可能性。

2　小麦制品风味的形成过程及影响因素

对于小麦制品的风味形成，主要涉及两个过程风味物质的变化：a.面粉等半成品原料自身的风味。原麦脱壳后，经不同的磨粉和处理工艺，如挤压、热处理、微波等，可得到具有不同营养组成和再加工性能的面粉，如精制小麦粉、全麦粉、小麦麸皮等。b.成品类小麦制品加工过程中产生的风味变化。面粉原料经过发酵、蒸煮、烘烤等不同的熟化工艺，其

表 2　小麦制品中主要挥发性成分及其气味描述

Table 2　Key volatile compounds in wheat products and the flavor description

名称	气味描述[13,18-21]
醛类	
异戊醛	麦芽香味
己醛	甜味、青草味、油脂味、水果味
庚醛	脂肪味、柑橘味、腐臭味、青草味
辛醛	脂肪味、肥皂味、柠檬味、青草味
壬醛	脂肪味、柑橘味、青草味、玫瑰味、蜡味
癸醛	橘皮味、油脂味、清香味、坚果味
十一醛	脂肪味
糠醛	马铃薯味、烘烤味
苯甲醛	扁桃仁味、焦糖味
苯乙醛	浆果香、坚果香、蜂蜜香
(E)-2-庚烯醛	脂肪味
(E,E)-2,4-庚二烯醛	脂肪味、鱼腥味、花香、坚果味
(E)-2-辛烯醛	青草味、果香、脂肪味
(E)-2-壬烯醛	清香味
2,4-壬二烯醛	香菜味、油炸味、脂肪味、青草味
(Z)-2,4-癸二烯醛	鸡肉香
2-十一烯醛	柑橘味、脂肪味

续表 2

名称	气味描述[13,18−21]
醇类	
戊醇	水果味、甜味
己醇	石油味、青草味、甜味、木头香、香蕉味、花香、香草味
庚醇	柑橘味、干鱼味、脂肪味、坚果味
辛醇	蘑菇味、脂肪味、茉莉花香、柠檬香、草药味、金属味、土味
2-甲基丙醇	麦芽酒味
2-甲基丁醇	酒精味、酒味
3-甲基丁醇	威士忌味、麦芽酒味、烧焦味
2-乙基己醇	青草香、玫瑰香
1-辛烯-3-乙醇	土壤香、油脂香、花香味、蘑菇香
酸酯类	
苯甲酸	香油香脂味
月桂酸	清油脂味、椰油味
正己酸乙酯	水果香味
辛酸乙酯	酒香味
γ-壬内酯	椰子香、茴香味、杏李香味
酮类	
己-3-酮	水果味
辛-3-酮	草药味
壬酮	水果味、甜味、蜡味、绿草味
庚酮	奶酪味、水果味、绿香蕉味、辣味、草药味、椰子味、木头味
苯甲酮	香油香脂味
苯乙酮	扁桃仁味、花香味
乙烯酮	威士忌味
3-辛烯-2-酮	玫瑰香
2-甲基戊-3-酮	薄荷味
(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮	香脂气、莳萝味、甜味、香草味
烯烃类	
十五烯	塑料味
苯乙烯	脂肪味、黄瓜味
β-月桂烯	香油香脂味、发酵味、辣味
D-柠檬烯	柑橘味、薄荷味
双戊烯	柑橘味、薄荷味
(E)-2-癸烯	脂肪味、鱼味、干草味、油漆味
杂环类化合物	
甲苯	油漆味
间二甲苯	塑料味
乙酰苯	发酵味、花香味、扁桃仁味
p-甲基异丙基苯	柑橘味、甜味、草药味、辣味
2-甲基呋喃	爆米花味
2-乙基呋喃	面包味、扁桃仁味、甜味
2-正戊基呋喃	坚果味、奶油味、可可味、肉味
2-乙基吡嗪	花生酱味、木头味
2-乙基-5-甲基吡嗪	水果味、甜味
2,5-二甲基吡嗪	可可味、烤坚果味、烤牛肉味、药味
2,6-二甲基吡嗪	烤坚果味、可可味、烤牛肉味

挥发性风味物质的种类和数量会发生不同的变化。众多研究还发现[22−24]，小麦制品加工过程中，工艺参数的改变，也会影响最终产品的风味品质。

2.1 麦粒处理过程对挥发性成分的影响

麦粒是加工面粉的原料。不同的小麦品种，其风味也略有差异，但由于其主要挥发成分是阈值较高的烃类，本身风味不明显，因此品种差异对面粉风味的影响相对较小。麦粒有完整的皮层，会有效阻隔麦粒内部的风味物质的散发。但是，麦粒经过不同程度处理后，有利于风味物质从麦粒皮层阻隔中飘溢出来；此外，经过处理后的麦粒，醛类、杂环类等挥发性成分的增加也会提升其自身的风味。张康逸等[25]测得不同处理方式的青麦仁的挥发性成分，主要以脂肪香气（主要为正己醛、庚醛、顺-3-壬烯-1-醇、反-2-辛

烯醛、反-2-壬醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛、反-2,4-癸二烯醛等)为主。冻干处理可使醛类物质增加，炒制使醇酮类物质减少，速冻、预冷和蒸煮使蔬菜青香(2-正戊基呋喃等化合物)和柑橘果香(甲苯类化合物)增加，蜡状醛香下降。另有研究对生、洗、烫、预冷、冷冻、蒸制、煮制、油炸、冷冻干燥等不同处理下青麦仁中挥发性成分进行检测，通过 Venn 图和气味活度值(OAV)发现正己醛、苯甲醛、壬醛、(E)-辛 2-烯醛四种醛类及 2-戊基呋喃是关键风味物质，并根据挥发性指纹特征和感官评价的风味轮廓，发现不同处理青麦仁主要呈现甜花、脂肪香味、蘑菇干草、蜡醛、柑橘果味、菜豆、苦杏仁 7 种特征香味[26]。由此可见，麦粒处理方式的不同，会引起风味略有差异；但是，经过这些处理过的麦粒很少直接食用，需经过加工成为小麦制品才有最终的风味呈现。而这些预处理可能改变麦粒熟化度、结构和成分等，极有可能影响后道小麦制品加工方式和工艺的设定，从而影响最终成品的风味，因此实际应用需综合考虑完整的加工过程，进行风味的优化设计。

相同的处理方式，工艺参数的调整也会引起挥发性成分的差异。但是，由于对麦粒的处理，通常以净化、预熟化、粗加工等为主，以风味为目的进行工艺参数优化的市场应用价值较低，因此这方面的研究也较少。尤其是相对成熟的处理方式，更鲜有工艺参数对麦粒风味影响的研究；但新的处理方式，如微波，尚存在优化的空间。渠琛玲等[14]用 700 W 功率的微波处理小麦籽粒，研磨成粉后测定了挥发性物质的种类及含量的变化。结果表明，随着微波处理时间越长，面粉中 2-戊基呋喃、醛类、酸类和酯类等挥发性物质的含量越低，从而使风味下降越大。但 Zhang 等[27]研究微波处理的结果却有所不同，他们发现微波处理麦胚过程中，随着微波输出功率的增加，酯类、烷烃类、醇类和酸类的含量降低，而杂环化合物、含氮化合物、醛酮类的含量增加，因此草香味减弱，烤香味增加。由此可见，对于微波处理方式，对风味的影响需要综合考虑功率和时间的参数优化。

2.2　加工工艺对不同小麦制粉挥发性成分的影响

2.2.1　精制小麦粉挥发性成分的研究　市面上购得的小麦粉多为精制小麦粉，是指麦粒提取麸皮后的面粉麦粒，磨粉后制得的面粉，是制作小麦制品的主要原料，也是人们日常生活中食用最多的主食食材之一。小麦粉通过精制过程，可以提升原料质感和口感。但是，由于小麦皮层中含有较多的挥发性成分或挥发性成分前体，因此小麦粉精制程度越高，胚芽和麸皮去除越多，出粉率越低，小麦粉中醇类和醛类的物质增加，但挥发性物质种类减少，总体风味也不断减弱[28]。

但是，适宜的高温处理，可以限制样品中水的迁移，促进蛋白质分子的聚集，降低自由基的相对浓度[29]，使小麦粉贮藏品质和整体的风味分布得到极大的改善。王美婷等[11]利用 GC-MS 技术研究了发酵小麦粉在热加工过程中的挥发性物质，发现 120 ℃是发酵小麦粉制品风味形成的关键温度控制点，其风味主要来源于：a.脂质氧化产生的挥发性产物，如己醛、庚醛、壬醛、反-2-庚烯醛和辛醛等醛类，1-己醇、1-辛烯-3-醇和 1-辛醇等醇类及苯甲醛、3-辛烯-2-酮和苯乙酮等醛酮；b.美拉德反应产物，如 1-(2-呋喃基)-乙酮、3-苯基-呋喃等。Chai 等[30]采用真空辅助 HS-SPME-GC-MS 技术对面粉加热过程中的挥发分进行分析，同样发现温度对挥发性化合物的形成和含量有重要影响。在 60~100 ℃的低温范围，面粉的风味成分主要由 C_6~C_{10} 挥发性醛类和醇类组成。随着温度的升高，在达到 90~130 ℃时，大部分挥发性成分的生成速率增加，特别是 120 ℃时，形成了许多长碳链醛和醇、呋喃、酸、酯、含氮和含硫化合物。因此，对于精制小麦粉而言，精制程度与风味负相关，而通过 120 ℃左右的热处理，可增加风味物质的产生，弥补因精制过程造成的风味损失。这为因追求小麦产品口感提升而不断提高精制程度，从而造成风味损失，提供了一个易行的解决方案。

2.2.2　全麦粉挥发性成分的研究　随着健康意识的日益增加，全麦粉因为营养成分丰富、热量低、饱腹感强，被越来越多地用来替代小麦粉作为面制品的原材料。研究表明，除了健康收益外，全麦粉的风味也优于小麦粉，这可能是因为全麦粉中保留了较多麦粒的皮层，使得全麦粉中所含的挥发性成分种类和含量都高于小麦粉。Chis 等[20]通过 GS-MS 测得全麦粉中 4 种主要挥发性物质是 2-甲基丙醛、己醛、1-苯乙酮和壬醛。袁佐云等[13]对全麦粉及其组分的挥发性物质进行定性分析，检测出挥发性物质 39 种，数量明显高于小麦粉。其中，3-甲基-1-丁醇、正己醇、苯甲醇、正壬醇、反式-2-壬烯醛、香兰醛、己酸、庚酸、4-乙烯基愈创木酚、香叶基酮、植酮为全麦粉区别于小麦粉的挥发性成分，主要来自于麸皮或胚芽。徐鑫等[31]的研究表明，全麦粉中检出的挥发性成分高于小麦粉，并且小麦粉挥发性成分依次以烃类、醛类、醇类为主，而全麦粉为醇类、醛类和烃类为主。任国宝等[12]的研究结果显示，与小麦粉相比，全麦粉中醛类、醇类和呋喃类挥发性化合物的相对含量增加非常明显，这可能与全麦粉中引入麸皮和胚芽有关，另外脂肪的氧化降解也是主要原因之一。

对于全麦粉挥发性成分的研究多集中在成分分析上，加工工艺条件优化对全麦粉增香的研究相对较少，这可能是因为在实际应用时，加工收益与投入不成正比。研究显示[12]，麸皮成分在挤压膨化过程中能发生美拉德反应，使得挤压膨化全麦粉中醛类、吡嗪类、酮类化合物相对含量增加较多，风味更好。通过工艺的优化进行全麦粉的增香价值多大，与工艺的发展息息相关，值得关注。除此之外还需要注意的是，

全麦粉产品开发，在风味特性方面要与小麦粉有所区别。全麦粉含有小麦粉的所有风味物质，而且小麦皮层也被破坏，风味物质容易散发出来，风味更为明显，一旦处理不当，可能影响产品本身的风味品质，需区别研究和应用。

2.2.3 小麦麸皮挥发性成分的研究 长期以来，小麦麸皮因其口感粗糙，很少直接食用，通常用来制作发酵调味品或者饲料。由于近年来市场对全麦粉需求的增加，更多的小麦麸皮被加工后作为回填小麦粉原料，制成全麦粉使用。对于食用性小麦麸皮的开发利用起步较晚，因此对于小麦麸皮的挥发性成分的研究也较少。但是，因其富含营养成分和风味物质，被认为具有极好的应用前景，已引起了学术界的关注。通常认为，小麦麸皮的气味主要由正己酸乙酯等为代表的水果香、以柠檬烯等为代表的柑橘香、以正己醛为代表的青草香和苯乙烯的特殊臭味构成。但由于小麦麸皮来源不同，检测方式差异，报道的数据也有差异。徐鑫等[31] 测得麸皮中挥发性成分以醛类、醇类和烃类为主。魏敏等[32] 分析发现小麦麸皮主要的挥发性成分为亚油酸、1,2-邻苯二甲酸-单(2-乙基己基)乙酯、丙酸苯乙酯、丁酸-2-甲基-2-苯乙酯、Z-4H-5,6-二甲基-2H-2-吡喃酮等。

基于对全麦粉的研究可以推断，加工处理同样可以提升小麦麸皮的风味。但由于小麦麸皮早期应用所限，风味的研究多集中在小麦麸皮的发酵过程，对于其他加工方式对风味的影响的研究较少。王太军等[33] 研究了热处理对小麦麸皮挥发性成分的影响，发现原麸皮中的挥发性物质主要为烃类。热处理后，麸皮中的烷烃类、烯烃类大幅减少，醛类和酮类大量生成，主要挥发性物质为 3,5-辛二烯酮、(E,E)-2,4-庚二烯醛、苯甲醛、十一烷、十二烷和十三烷等。随着健康意识的增强，小麦麸皮回填到小麦制品是大势所趋，而小麦麸皮含有大部分小麦籽粒的风味物质，在增加产品健康收益的同时，也能给产品带来浓郁的风味。此外，随着加工方式的不断开发和进步，食用性小麦麸皮市场前景可期，综合其风味优化的可食性研究和开发应用潜力巨大。

2.3 加工工艺对不同小麦粉再加工制品风味的影响

赋予小麦制品更好的“香”味，可以提升食物的食用体验。面条、馒头、饼干和面包是日常生活中食用最为广泛的小麦制品，其制作过程代表了四种典型的从面粉到成品的加工工艺。面粉原料经过发酵、蒸煮、烘烤等不同的熟化工艺，其挥发性风味物质的种类和数量都会发生不同的变化，这也是小麦制品重要的增香环节，决定了食物最终的风味呈现。

2.3.1 面条挥发性成分的研究 面条的制作过程较为简单，其风味的差异主要来自于面粉配方的选择以及面条的蒸煮过程。用加工处理过的面粉或者在常规的面粉中添加可以提升风味的成分，是最常规有效的面条增香方式。许柠等[21] 采用 HS-SPME-GC-MS 技术结合相对气味活度值分析发现，添加挤压麸胚可以赋予挂面更多的挥发性化合物，其中有一部分对风味具有较高贡献：醛类化合物(庚醛、辛醛、苯乙醛)、醇类化合物(1-辛烯-3-醇、2-乙基己醇)、酯类化合物(邻苯二甲酸二异丁酯)。曹佳兴等[34] 研究了挤压膨化温度对麸皮回填法制备的全麦挂面风味成分的影响，发现 160 ℃ 挤压麦麸回填的挂面，醛类化合物相对含量较高，风味物质也更为丰富。由于面条食用前需水煮或蒸制，许多风味物质在熟制过程中会溶出而散失；此外，还需要考虑所添加风味成分与小麦粉本身风味的融合性。因此，在增香成分的选择上，基本以杂粮的添加为主，成品风味也主要随杂粮的种类和添加量不同而异；制面过程难有提升风味的创新。

在蒸煮过程中，面条在温度和水分的共同作用下，风味会得到更大的提升。这是因为面条中的大分子物质发生了一系列反应，导致风味化合物变化复杂，特别是醛类物质释放强烈。研究发现[29]，生全麦挂面特征风味化合物为醛类化合物((E)-2-壬烯醛、己醛、壬醛)和酯类化合物(邻苯二甲酸二异丁酯)，而熟全麦挂面特征风味化合物为醛类化合物((E)-2-辛烯醛和(Z)-2,4—癸二烯醛)。张玉荣等[35] 的研究同样发现，蒸煮过程会使面条中的醛类物质挥发、酯类氧化降解，风味更为突出。众所周知，蒸煮面条的时间和水温，以及食用时面条的温度，对面条的口感和可消化性存在影响，但对风味挥发物的影响，未见详述。如何呈现一碗口感和风味俱佳的面条，需要在这些工艺参数上寻找适宜的平衡点。

2.3.2 馒头挥发性成分的研究 与面条相比，馒头的制作过程多了一个极为重要的增香环节—发酵。发酵是小麦制品常用的加工过程，东方的馒头包子、西方的面包苏打饼干等，都离不开发酵工艺。发酵产生的挥发性成分，可以赋予食物令人愉悦的风味，许多研究都围绕着面团的发酵过程展开[36−38]。馒头风味的形成可以分为两步，首先是面团的发酵过程。此时，酵母菌一方面通过糖类代谢，将面粉中可发酵糖类转化成乙醇、二氧化碳或其他的小分子化合物；另一方面还可以通过 Ehrlich 途径(即氨基酸分解代谢途径)，将氨基酸转化为醇和酸等风味化合物。研究测得，发酵面团的主要挥发性物质依次为醇类、酯类、苯环类、醛类和酮类[17]。其次，是馒头的蒸制过程。馒头的蒸制过程温度较低，时间较短，此时面团中原有醇类和酯类物质挥发出来，形成了诱人的风味；同时，由于单糖的热降解，有少量新的嗅感物质如醛类生成。蒸制后的馒头挥发性物质组成和含量的影响因素很多，但其主要的挥发性物质依次为烃类、醇类、醛类和酯类物质[17]。

由于馒头的制作工艺相对成熟，这两个过程的工艺参数也经过了数百年的优化，因此馒头挥发性风味物质的研究和应用机会主要集中在面粉和酵母的

种类选择上。在面粉选择方面，全麦粉馒头含有更多的醛类、醇类和呋喃类化合物；如果将全麦粉进行挤压膨化，则所得馒头醛类化合物相对含量可增至整体挥发性化合物总量的一半以上，而且还新增了吡嗪类和酚类化合物，风味更为突出[12]。此外，添加燕麦、高粱和黍子等杂粮[39−40]，会产生一些特殊的风味物质，如壬醇、3-甲基十五烷、十八烷、植烷、3-甲基丁酸、2,6-二甲基吡嗪等，使馒头的风味更具层次感。

近年来，关于酵母种类对馒头挥发性成分影响的研究收获颇丰。传统发酵过程制作的馒头比商业酵母发酵的馒头风味更丰富[41]，这主要是因为传统面团中还含有乳酸菌，它一方面通过糖类代谢将糖类转化成乳酸和其他醇类、酯类等风味化合物；另一方面还可以通过分泌蛋白酶降解低聚合肽为氨基酸，再经一系列反应转化成醛、酮、酯等风味物质，有助于改善制品风味。进一步地，在传统发酵过程中，全麦酵母比通用酵母使馒头含有更多碳氢化合物、酯类、醇类、酮类、醛类、杂环类挥发性化合物[42]。对于酵母的选择和发酵面团制作的变迁，充分体现了传统与现代、厨房习惯与商业诉求的碰撞。为了在满足商业诉求的同时，保留住馒头原来的古朴风味，可以综合考虑面粉成分的优化及增香处理，及与酵母菌种多样性的风味互补。

2.3.3　饼干挥发性成分的研究　与面条和馒头等中式面制品不同，饼干制作需要通过烘焙环节完成，高温下的美拉德反应是风味产生的重要环节[43]。饼干的配方中添加了更多的脂肪和蛋白质等成分，碳水化合物的种类也更多，烘焙温度高于 160 ℃，有利于更多的挥发性风味物质产生。梁玲等[18] 研究了小麦胚芽饼干烘烤过程中的风味物质，主要为醛类、酮类和含氮的杂环化合物，其中含氮的杂环化合物的种类和含量均最高，是麦香味形成的主要贡献物质。Simona 等[19] 研究发现，以小麦粉为主要原料的饼干中主要挥发物为乙醛、苯甲酸、β-月桂酸、3,7-二甲基十烷、2,4-二甲基庚烷等；用 40% 亚麻籽粉替代小麦粉后，饼干的挥发物中 β-月桂酸、苯乙酮、苯甲醛、D-柠檬烯和月桂酸明显增加，这主要是由美拉德反应和脂质氧化产生的。Chis 等[20] 测得用全麦粉制成的杂粮饼干，其挥发物质主要为柠檬烯、β-蒎烯、苯甲醛、己醛、p-异丙基苯等。Starowicz 等[44] 研究了补充 3β-D 芦丁苷 5~50 mg/100 g 黑麦饼干中，对酚和吡嗪、糠醇、糠醛等美拉德反应产物形成的影响。结果测得饼干挥发性组分主要有：甲基吡嗪、乙吡嗪、2,3-/2,5-和 2,6-二甲基吡嗪，以及糠醛、糠醇和己醛，由此推测 3β-D 芦丁苷可能是影响理想挥发性化合物和不良毒性化合物形成的因素之一。目前，众多研究都是基于现有的高油高糖的小麦粉饼干展开的。但在追求大健康的趋势之下，控油控糖的饼干配方，必然对风味有很大的负面影响。由于饼干属于副食，人们对于饼干风味接受度的阈值较高，是否可以通过配方的优化、原料的前处理、烘培工艺的优化，提升低油低糖饼干的风味，尚待研究。

2.3.4　面包挥发性成分的研究　在四种典型的小麦制品中，面包的制备过程最为复杂，涉及发酵和烘烤两个关键的风味产生过程。除了前述的与馒头的发酵和饼干的烘烤相似的影响外，发酵条件的改变，如发酵温度、时间及酵母选择，也会对风味产生影响。孝英达等[45] 研究了不同冷藏温度、冷藏时间及面团冷藏前醒发处理时间对面团发酵及面包品质的影响，发现经过醒发 15~30 min 的面团在 2~4 ℃ 温度下冷藏 1~4 d，能够获得较好品质的面包。主要是因为随着冷藏时间增长，面包风味物质随之增加。挥发性香气成分的变化主要体现在酵母发酵产生的乙醇增加，具有白兰地酒香味的辛酸乙酯和具有甜奶香味的 γ-壬内酯含量变高，以及苯甲醛、呋喃甲醛（糠醛）含量增加。武盟等[46] 发现高产 α-半乳糖苷酶乳酸菌发酵的面包，醇类、酸类、酯类、酮类成分明显增加，面包风味得到了整体的改善。崔震昆等[47] 研究了不同酵母对无糖面包品质及风味成分的影响，结果发现产生的风味物质最多的为低糖性酵母，天然酵母次之，最少的为即发高活性干酵母。

此外，新原料的添加也是面包增香的主要方式。Castelo-Branco 等[48] 研究了番石榴粉作为香气和酚类化合物的来源添加到面包中对风味的影响，结果表明番石榴粉的加入使面包中酚类化合物的含量增加了约 2~3 倍，具有更丰富的挥发性，特别是由于萜烯的存在，改善了面包的风味轮廓。孟宁等[49] 研究了马铃薯粉对面包风味的影响，结果表明面包的主要挥发性成分为酯类物质，添加马铃薯粉使各类风味化合物的相对含量发生了变化，其中异薄荷酮、对薄荷-3-烯、1-甲基-4-(1-甲基亚乙基)-环己烯、丙二酸二乙酯等风味化合物，烯烃类物质相对含量和种类明显增多。随着中国国际化进程的加快和东西方饮食文化的交流，面包越来越多地被作为三餐的选择，但很多商业化的面包考虑到面包品质，都是通过香精提升面包风味的，及其缺乏健康价值。因此，基于挥发性物质的研究，用天然成分和加工工艺优化进行面包自然增香，具有很高的健康收益，市场潜力可期；但由于面包制备过程复杂，必须同时兼顾对面包质构、口感、保存等其他方面的影响。

上述众多的风味研究，多集中在原料优化以及制作工艺对增香的作用，但产品的贮存过程也不能忽视。例如，孙莹等[50] 分析贮存条件对马铃薯面包挥发性成分的影响，发现经贮藏后，风味逐渐减弱，挥发性物质不断降低。冷藏样品酸类、酯类、酮类和烃类物质消失，常温样品贮藏后醛类和醚类消失，醇类化合物相对含量都显著增加。因此，小麦制品食用时的实际风味，是一个动态的变化结果，需要综合考量各方面的综合因素。

3 结语

众多研究结果说明，小麦制品的风味和原料种类、处理方式、加工过程、工艺参数、贮存条件等众多因素息息相关，通过优化工艺和参数，可以在常规加工方式基础上，对小麦制品的风味进行提升。随着人们健康意识的增强，通过加工方式的优化提升小麦制品的风味，有望成为替代人工合成香精使用的新方向。但从研究结果到实际应用，挑战与机会也是并存的。首先，对小麦制品的挥发性成分研究多为观察型研究，着重在不同处理条件下，产品的挥发性风味物质的检测；而且研究通常只是着重在从麦粒加工成小麦制粉，到再加工成小麦制品过程中的一个或少数几个环节，缺乏整体风味的综合考虑。其次，基于现有研究结果，通过对反应物质的控制和反应条件的优化，以达到风味的靶向性生成和长期留香的前瞻性香味设计开发，利用其他风味物质与小麦制品高效互补结合的增香技术研究也屈指可数。此外，加工过程在影响风味的同时，对成品的结构、外观、口感等也会有影响，这在很多研究中鲜少提及。因此，实现小麦制品健康和美味的双提升，需要综合考虑从原料到成品的全过程开发，以及从研究结果到实际应用的有效转化。

参考文献

[1] DEEPAK K V, PREM P S. A paradigm of volatile aroma compounds in rice and their product with extraction and identification methods: A comprehensive review[J]. Food Research International, 2020(130): 108924.

[2] GAO C, LI Y, PAN Q F, et al. Analysis of the key aroma volatile compounds in rice bran during storage and processing via HS-SPME GC/MS[J]. Journal of Cereal Science, 2021(99): 103178.

[3] ZHAO Q Y, XUE Y, SHEN Q. Changes in the major aroma-active compounds and taste componets of Jasmine rice during storage[J]. Food Research International, 2020(133): 109160.

[4] DHONDGE H V, PABLEE A A, BARVKAR V T, et al. Rhizobacterial consortium mediated aroma and yield enhancement in basmati and non-basmati rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Journal of Biotechnology, 2021, 328: 47−58.

[5] HEYDANEK M G, MCGORRIN R J. Gas chromatography−mass spectroscopy investigations on the flavor chemistry of oat groats[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1981, 29(5): 950−954.

[6] HEYDANEK M G, MCGORRIN R J. Oat flavor chemistry: Principles and prospects[M]. In Oats: Chemistry and Technology, 1st ed. ; Webster, F. H. , Ed. ; AACC International: St. Paul, MN, 1986: 335−369.

[7] SMITH K, PETERSON D G. Identification of aroma differences in refined and whole grain extruded maize puffs[J]. Molecules, 2020, 25(9): 2261.

[8] 孙嘉卿, 冯涛, 张灿, 等. 结合 GC-MS 和 GC-IMS 分析不同处理方式下玉米的挥发性风味物质[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(1): 1−9. [SUN J Q, FENG T, ZHANG C, et al. Analysis of volatile flavor compounds in corn under diferent treatments by GC-MA and GC-IMS[J]. Science and Technology of Cereals, Oil and Food, 2021, 29(1): 1−9.]

[9] FAN X J, JIAO X, LIU J G, et al. Characterizing the volatile compounds of different sorghum cultivars by both GC-MS and HS-GC-IMS[J]. Food Research International, 2021, 140: 109975.

[10] 冯涛, 孙嘉卿, 张灿, 等. 结合 GC-MS 和 GC-IMS 分析不同处理方式下青豆的挥发性风味物质[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(1): 10−19. [FENG T, SUN J Q, ZHANG C, et al. Analysis of volatile flavor compounds in green beans under diferent treatments by GC-MA and GC-IMS[J]. Science and Technology of Cereals, Oil and Food, 2021, 29(1): 10−19.]

[11] 王美婷, 王缤晨, 肖琳, 等. 发酵小麦粉加热过程中挥发性成分分析[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(20): 221−228. [WANG M T, WANG B C, XIAO L, et al. Analysis of volatile compounds from fermented wheat flour during heating process[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(20): 221−228.]

[12] 任国宝, 任晨刚, 曾维鹏, 等. 全麦粉品质及其挥发性物质研究[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(10): 8−14. [REN G B, REN C G, ZENG W P, et al. Study on quality and volatile matter of whole wheat flour[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(10): 8−14.]

[13] 袁佐云, 章晴, 任晨刚, 等. 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用法分析全麦粉中的挥发性成分[J]. 中国食品学报, 2016, 16(11): 240−245. [YUAN Z Y, ZHANG Q, REN C G, et al. Analysis of volatile components in whole wheat powder by HS-SPME-GC/MS[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(11): 240−245.]

[14] 渠琛玲, 王红亮, 王芳婷, 等. 微波处理对小麦风味的影响[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(9): 26−28. [QU C L, WANG H L, WANG F T, et al. Influences of microwave treatment on the flavor of wheat[J]. Cereals and Oils, 2017, 30(9): 26−28.]

[15] VALLONE S, SIVERTSEN H, ANTHON G E, et al. An integrated approach for flavour quality evaluation in muskmelon (*Cucumis melo* L. reticulatus group) during ripening[J]. Food Chemistry, 2013, 139(1-4): 171−183.

[16] 崔晓兰, 王强强. 粮食挥发性物质及其检测技术研究进展[J]. 现代食品, 2018(15): 114−117. [CUI X L, WANG Q Q. Research progress on volatile components of grain and their detection technology[J]. Modern Food, 2018(15): 114−117.]

[17] 孟克迪, 张国治. 馒头风味的研究进展[J]. 粮食加工, 2021, 46(2): 23−27. [MENG K D, ZANG G Z. Research progress of the flavor of steamed bread[J]. Grain Processing, 2021, 46(2): 23−27.]

[18] 梁玲, 陈存社. 小麦胚芽饼干烘烤过程中麦香味的形成及分析[J]. 食品工业科技, 2017, 38(7): 64−69. [LIANG L, CHEN C S. Formation and analysis of wheat fragrance in wheat germ biscuit baking process[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(7): 64−69.]

[19] SIMONA M M, LAURA S, ADRINANA P, et al. Nutritional, sensory, texture properties and volatile compounds profile of biscuits with roasted flaxseed flour partially substituting for wheat flour[J]. Applied Sciences, 2021, 11(11): 4791.

[20] CHIS M S, POP A, PAUCEAN A, et al. Fatty acids, volatile and sensory profile of multigrain biscuits enriched with spent malt

rootles[J]. Applied Sciences, 2020, 25: 442.
[21] 许柠, 张国治, 刘艳香, 等. 全麦挂面特征风味化合物分析[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2020, 41(6): 47−60. [XU N, ZHANG G Z, LIU Y X, et al. Analysis of characteristic flavor compounds in whole wheat noodles[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 41(6): 47−60.]
[22] JOANA P, JOSÉ B, MANUEL G. Wheat bread aroma compounds in crumb and crust: A review[J]. Food Research International, 2015, 75: 200−215.
[23] NOR Q, MIKAEL A P, ÅSE S H. Volatile compounds in crumb of whole-meal wheat bread fermented with different yeast levels and fermentation temperatures[J]. Cereal Chemistry Journal, 2016, 93(2): 209−216.
[24] HUI-ING H, THOMAS G H, MUKUND V K, et al. Aroma generation in extruded and heated wheat flour[J]. Lipds in Food Flavors, 1994, 558(10): 144−157.
[25] 张康逸, 孙嘉卿, 张灿, 等. 结合 GC-MS 和 GC-IMS 分析不同处理方式下青麦仁的挥发性风味物质[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(1): 20−30. [ZHANG K Y, SUN J Q, ZHANG C, et al. Analysis of volatile flavor compounds in green wheat kernel under different treatments by GC-MS and GC-IMS[J]. Science and Technology of Cereals, Oil and Food, 2021, 29(1): 20−30.]
[26] ZHANG K Y, ZHANG C, GAO L L, et al. Analysis of volatile flavor compounds of green wheat under different treatments by GC-MS and GC-IMS[J]. Journal of Food Biochemistry, 2021: e13875.
[27] ZHANG Y K, TANG N, SHI L, et al. Characterization and comparison of predominant aroma compounds in microwave-treated wheat germ and evaluation of microwave radiation on stability[J]. Journal of Cereal Science, 2020, 93: 102942.
[28] ROSS A S, QUAIL K J, CROSBIE G B, et al. Physico chemical properties of Australian flours in fluencing the texture of alkaline noodles[J]. Cereal Chemistry, 1997, 74(6): 814−820.
[29] HONG T T, ZHAO Q Y, XU D, et al. Effect of heat-treated flour on the quality and storage stability of fresh noodles[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 146: 111463.
[30] CHAI D, LI C, ZHANG X, et al. Analysis of volatile compounds from wheat flour in the heating process[J]. International Journal of Food Engineering, 2019, 15(10): 1−13.
[31] 徐鑫, 毛红艳, 王仙, 等. 顶空固相微萃取全麦粉中挥发性成分的研究[J]. 新疆农业科学, 2018, 55(10): 1902−1908. [XU X, MAO H Y, WANG X, et al. Analysis of volatile components in whole wheat powder by HS-SPME[J]. Xinjiang Agricultural Science, 2018, 55(10): 1902−1908.]
[32] 魏敏, 陈义坤, 罗诚浩, 等. 生物转化麸皮提取物的挥发性成分 GC/MS 分析[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(18): 132−135. [WEI M, CHEN Y K, LUO C H, et al. GC/MS analysis of biotransformated bran extract's volatile components[J]. Food Research and Development, 2016, 37(18): 132−135.]
[33] 王太军, 温纪平, 王华东, 等. 热处理对小麦麸皮挥发性成分的影响[J]. 粮食与油脂, 2016, 29(8): 68−70. [WANG T J, WEN J P, WANG H D, et al. Effect of heat treatment on the volatile compounds in wheat bran[J]. Cereals and Oils, 2016, 29(8): 68−70.]
[34] 曹佳兴, 许柠, 汪丽萍, 等. 挤压膨化温度对麸皮回填法制备的全麦挂面风味成分的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2021, 42(6): 71−79. [CAO J X, XU N, WANG L P, et al. Effect of extrusion temperatures on flavor components of whole wheat noodles prepared by bran backfilling method[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 42(6): 71−79.]
[35] 张玉荣, 高艳娜, 林家勇, 等. 顶空固相微萃取-气质联用分析小麦储藏过程中挥发性成分变化[J]. 分析化学, 2010, 38(7): 953−957. [ZHANG Y R, GAO Y N, LIN J Y, et al. Analysis of vola- tile compounds changes of wheat during storage by HS-SPME-GC[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2010, 38(7): 953−957.]
[36] RENMAN S U, PATERSON A, PIGGOTT J R. Flavour in sour-dough breads: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2006, 17(10): 557−566.
[37] BIRCH A N, PETERSEN M A, HANSEN S. The aroma profile of wheat bread crumb influenced by yeast concentration and fermentation temperature[J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 50(2): 480−488.
[38] 王远辉, 赵靖雯, 吴宵云, 等. 酵子馒头与酵母馒头挥发性组分与香气特征分析[J]. 中国食品学报, 2020, 20(4): 281−290. [WANG Y H, ZHAO J W, WU X Y, et al. Analysis of volatile components and aroma characteristics between Jiaozi steamed bread and yeast steamed bread[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(4): 281−290.]
[39] 张佳丽, 张爱霞, 李朋亮, 等. 基于 GC-IMS 分析不同杂粮馒头挥发性成分的差异[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(9): 270−279. [ZHANG J L, ZHANG A X, LI P L, et al. Analysis of volatile components in steamed bread of different coarse cereals on GC-IMS[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(9): 270−279.]
[40] 陈中爱, 董楠, 陈朝军, 等. 含不同粗粮粉面包的营养、质构特性、风味化合物[J]. 食品工业科技, 2018, 39(4): 21−27. [CHEN Z A, DONG N, CHEN C J, et al. Nutritional properties, texture characteristics and volatile flavor compounds of bread containing different grain flour[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(4): 21−27.]
[41] 尚英, 熊荣园. 全麦发酵面团菌群结构分析及对风味物质的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(5): 44−47. [SHANG Y, XIONG R Y. Structure analysis of whole wheat yeast bacteria and its effects on flaor substances[J]. Food & Machinery, 2019, 35(5): 44−47.]
[42] FRITZ P, FRANCISCO F. Volatile organic compounds at early stages of sourdough preparation via static headspace and GC/MS analysis[J]. Current Research in Nutrition and Food Science, 2017, 5(2): 89−99.
[43] PURLIS E. Browning development in bakery products: A review[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 99(3): 239−249.
[44] STAROWICZ M, KOUTSIDIS G, ZIELIŃSKI H. Determination of antioxidant capacity, phenolics and volatile Maillard reaction products in rye-buckwheat biscuits supplemented with 3β-D-rutinoside[J]. Molecules, 2019, 24: 982.
[45] 孝英达, 吴凤凤, 王沛, 等. 冷藏对面团发酵及面包品质的影

响[J]. 食品与生物技术学报, 2018, 37(7): 679−687. [XIAO Y D, WU F F, WANG P, et al. Effect of refrigerated storage on dough fermentation property and bread quality[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2018, 37(7): 679−687.]
[46] 武盟, 曹伟超, 程新, 等. 高产 α-半乳糖苷酶乳酸菌发酵对鹰嘴豆酸面团生化特性及其面包烘焙品质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(10): 146−153. [WU M, CAO W C, CHENG X, et al. Effect of fermentation with high-yield α-galactosidase-producing lactic acid bacteria on biochemical properties and breadmaking characteristics of chickpea sourdough[J]. Food Science, 2021, 42(10): 146−153.]
[47] 崔震昆, 毕继才, 朱琳, 等. 不同酵母对无糖面包品质及风味成分的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(21): 90−94. [CUI Z K, BI J C, ZHU L, et al. Effect of different yeasts on sugar-free bread quality and flavor components[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(21): 90−94.]
[48] CASTELO-BRANCO V N, LAGO M G, MINUZZO D A, et al. Bread formulated with guava powder was enriched in phenolic and aroma compounds, and was highly acceptable by consumers[J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53(2): 4168−4178.
[49] 孟宁, 孙莹, 刘明, 等. 马铃薯粉对面包烘焙特性与风味化合物的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(2): 223−229. [MENG N, SUN Y, LIU M, et al. Effects of potato flour on baking properties and flavor compounds of bread[J]. Food Science, 2020, 41(2): 223−229.]
[50] 孙莹, 苗榕芯, 江连洲. 电子鼻结合气相色谱-质谱联用技术分析贮存条件对马铃薯面包挥发性成分的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(2): 222−228. [SUN Y, MIAO R X, JIANG L Z. Analysis of volatile components of potato bread under different storage conditions by electronic nose combined with HS-SPME-GC-MS[J]. Food Science, 2019, 40(2): 222−228.]