

食品风味协同作用研究进展

陈 臣^{1,2}, 袁佳杰¹, 杨仁琴², 于海燕¹, 田怀香^{1*}

(1. 上海应用技术大学, 香料香精技术与工程学院, 上海 201418; 2. 扬州市扬大康源乳业有限公司, 扬州 225000)

摘 要: 随着消费者对食品风味质量的日益重视, 食品风味逐渐成为研究热点。食品的香气馥郁复杂, 难以准确定性定量, 各种香气成分之间及其与食品基质间的相互作用导致混合香气的协同、加成、折中、掩盖等作用, 这些作用决定了最终食品的风味和品质。目前, 关于风味物质协同作用的研究主要集中在香精调配中, 鲜有文章系统地对食品中的风味物质协同作用进行阐述。本文主要综述了香气协同探究历程、宏观[阈值法、S 型曲线法、风味活性值法(odor activity value, OAV)和 σ - τ 图法]研究方法和微观研究方法(离子浓度变化对嗅觉受体活性水平)的研究进展; 总结了乳制品、酒类和肉类中发生的风味协同作用的规律和作用机制, 并对未来的发展趋势进行了展望, 以期能为食品风味和品质的改良提供理论依据。

关键词: 食品; 香气协同; 风味

Research progress of synergistic effect of food flavor

CHEN Chen^{1,2}, YUAN Jia-Jie¹, YANG Ren-Qin², YU Hai-Yan¹, TIAN Huai-Xiang^{1*}

(1. School of Perfume and Aroma Technology, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China;
2. Kangyuan Dairy Co., Ltd., Yangzhou University, Yangzhou 225000, China)

ABSTRACT: With the increasing attention of consumers to the quality of food flavor, food flavor has gradually become a research hotspot. The aroma of food is complex and difficult to be determined qualitatively and quantitatively. The interaction between various aroma components and food matrix leads to the synergistic, additive, eclectic and masking effects, which determine the flavor and quality of the final food. At present, the research on the synergistic effect of flavor substances mainly focuses on the blending of aromas. Few articles have systematically expounded the synergistic effect of flavor substances in food. This paper mainly reviewed the research progress of synergistic effect, the macroscopical research methods [threshold method, S-curve method, odor activity value (OAV) method and σ - τ diagram method] and microcosmic research methods (the change of ion concentration on the activity level of olfactory receptor), summarized the mechanism of the synergistic effect in dairy products, wine and meat, and discussed the future development trend, so as to provide theoretical basis for the improvement of food flavor and quality.

KEY WORDS: food; synergistic effect; flavor

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31972197)、扬州市“绿扬金凤计划”优秀博士项目(yzlyjfh2016YB107)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (31972197), and “Lvyangjinfeng” Outstanding Doctor Project (yzlyjfh2016YB107)

***通讯作者:** 田怀香, 博士, 教授, 主要研究方向为食品风味化学与食用香精。E-mail: tianhx@sit.edu.cn

***Corresponding author:** TIAN Huai-Xiang, Ph.D, Professor, School of Perfume and Aroma Technology, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China. E-mail: tianhx@sit.edu.cn

1 引言

随着生活品质的提高以及食品市场的扩大,人们对于食品的需求和选择不仅拘泥于单纯的果腹,“风味、卫生、便利”是现代食品行业发展的新趋势和新要求。在所有要素中,风味是消费者选择食品的第一选择要素,产品的“色、香、味、形”等广义感官评价指标是影响消费者购买的重要因素,也是所有食品企业所共同追求的目标。因此,为了满足人们对美好生活的追求,生产出令消费者更满意的产品,对食品风味的形成机理研究意义重大且迫在眉睫。

有研究表明一种食品的香气成分非常繁杂,在被嗅觉器官确认后,给人的感觉并非简单的各个成分之间的加合,而是通过复杂的协同作用后最终形成^[1]。香气化合物在食品中的贡献取决于多个因素,包括化合物的浓度、阈值、食品的基质以及不同化合物的相互作用。目前,对香气成分的协同作用研究作为特征香气调控技术的核心已经成为国内外食品风味的研究热点。基于此,本文将对香气协同研究发展历程、国内外香气协同研究的方法、食品风味协同在研究过程中所遇到的难题以及未来的研究热点方向进行阐述。通过综述近年来关于食品风味协同作用的研究进展,探究不同风味物质之间在复杂食品体系的相互作用,进而为在食品加工中应用食品风味协同作用提供参考。

2 香气协同探究

2.1 香气协同研究发展历程

香气协同,简单来说就是混合物所被感知的香气强度远大于其中任一单一组分香气强度之和^[2]。Baker等^[3]在水溶液气味的响应参数测定中最早提出了协同-对抗作用的概念,即嗅觉物质通过相互作用,显示出加成作用或减弱作用,甚至可能更进一步表现出协同作用或拮抗作用。同年,Moulton等^[4]在微观层面上研究发现了嗅觉系统中的神经元细胞能使来自不同受体的信号相互作用。而Vicente等^[5]则从心理物理的角度对上百种二元混合物进行定量定性,发现大部分二元混合物使气味强度显著降低,发生协同作用的只有少部分。

虽然协同作用早早地被确认,但具体的作用机制、发生途径仍然不明确。直到二十一世纪初,嗅觉受体基因超家族被发现^[6]使得人们对嗅觉神经的探究和香气如何产生并被大脑感知有了更科学的认识。于是,在此之上人们又对特征香气形成的原因开始了研究,并提出了分子振动理论和识别理论。其中分子振动理论认为嗅觉受体分子的形状结构、官能团、立体构象没有反应而是对分子的振动有反应。通过非弹性电子隧道的实验,将气味与远红外光谱中的某些吸收峰联系,证实了嗅觉受体及其相关的G蛋白上能够检测到隧道光谱仪发射的元素^[7]。Tucín^[8]通过这个

实验得出了形状非常相似但振动形式频率不同的分子闻起来不同的结论并且认为嗅觉与视觉听觉一样是一种光谱感觉。而Amoore^[9]的识别理论则对于香气产生的机制给出了不一样的解答,他的立体化学理论则把各种化合物的气味与其分子模型的大小和形状联系起来,产生了与Turin教授相对的观点。根据近些年来研究表明,嗅神经元纤毛上存在多个嗅觉受体,人们大脑感知到的气味来源于香气物质与嗅觉受体的作用^[10-12]。而不同香气物质与受体活性位点的结合能力不同,有些香气成分之间会竞争特定活性位点,从而使某种气味被感知到的强度减弱,这就是掩盖作用;有些香气物质之间相互协作与活性受体结合,因此表现出协同作用^[13]。

2.2 香气协同的研究方法

目前,对于香气协同的研究方法主要分为宏观层面与微观层面。宏观层面的方法是目前主要研究香气协同的手段,主要有阈值法、S型曲线法、风味活性值法(odour activity value, OAV)和 σ -t图这4种^[14-16]。

微观层面上则是从通过细胞内微量离子浓度变化,或是体内嗅觉受体和香气分子结合后神经元的活性变化来侧面反映协同、掩盖作用。

2.2.1 协同作用检测方法

(1) 阈值法。香气协同中阈值法指的是将混合物中各组分按照阈值浓度1:1进行混合,随后通过三点选配法(3-AFC)进行阈值判定(即:将配制完的一定浓度的样品连同2个参比样一同提供给评价员并要求其识别,并将样品配成不同浓度进行重复试验。将评价员提交的二元结果(或是测试样——正确或是参比样——错误)进行在某一浓度下做出正确选择次数是否服从二项分布的统计模型,从而得到阈值),最后将实际测定混合物阈值与理论计算所得的混合物阈值进行比较,进而判断香气组分之间的协同程度^[17]。以基本的二元混合物为例,若是混合物均能独立显示各自香气则两者无相互作用,则测定结果显示为实测阈值等于理论阈值;当两者表现出掩蔽作用时,则实测阈值高于理论阈值;当两者表现出加成作用时,则测定阈值正好与某一单个组分阈值的一半相等;当两者表现出协同作用时,则测定的混合物阈值小于单个阈值的一半。江南大学的唐柯教授团队^[18]在对冰葡萄酒中风味化合物的研究中利用阈值法发现1-辛烯-3-醇、异戊酸乙酯和 β -大马酮的阈值相对于干型葡萄酒有明显提升且三者之间有明显协同作用。高丽娇等^[19]则在筛选高甜度阈值的蜂蜜时发现了多种产生协同作用的甜性风味化合物。此方法便于操作,对于阈值浓度下风味化合物的协同作用有着较好的研究效果。

(2) OAV法。OAV即气味活性值。通过将理论OAV值与实际测得的OAV值进行比较来判断香气成分之间的作用关系^[2]。其中理论OAV值指的是香气混合物中各组分OAV

值之和, 实测OAV值指的是通过混合物各组分浓度之和与混合物实测阈值的比值。若实测OAV值与理论OAV值相等, 则为加成作用; 若实测OAV值与理论OAV值的比值大于1, 则为协同作用, 反之则为掩盖作用。通过公式可以表现为:

$$\text{实测OAV} / \text{理论OAV} = \frac{\sum_1^n \text{浓度} / \text{实测阈值}}{\sum_1^n \text{OAV}}$$

此法对于多元混合物体系的协同作用研究有较好的效果, Hudson等通过气味条件反射实验对多元气味混合物阈值进行研究, 发现混合物成分越复杂, 实测的OAV值就越小, 组分之间越容易发生掩盖作用^[20]。

2.2.2 协同作用数据处理方法

(1) σ - τ 图。根据文献报道, 在1979年, Enrique教授团体^[21]在Miyazawa等^[22]的“矢量模型”基础是提出了一种更精确的代替二元混合物中嗅觉定量相互作用的模型——“U模型”, 并通过“U模型”得到的实验数据吻合了“矢量模型”的结果, 以二元混合物A与B为例, 其表达式为 $\tau(A/B)=I(A/B)/(I_A+I_B)$ 。 τ 是指将X, Y 2种风味化合物中任一香气强度与两者香气总强度之比, σ 代表混合物的香气强度与各成分的香气强度之间的比值 $\sigma=I_{\text{mix}}/(I_A+I_B)$ ^[23], I 代表各自香气强度。通过上述公式得结果后, 在 σ - τ 图上进行绘制(如图1所示)。以横纵坐标值1.0为分界线, 通过 σ 值大于1、等于1和小于1来说明协同、无作用和掩盖作用, 并根据不同 σ 值在图中进行表示。此方法最大的特点在于直观清晰地体现数据结果, 同时明确了各种作用之间的边界。Wise等^[24]通过 σ - τ 图法分析了西班牙白葡萄酒中的花香味、甜味与3-巯基己酯和芳樟醇之间的协同作用有关。

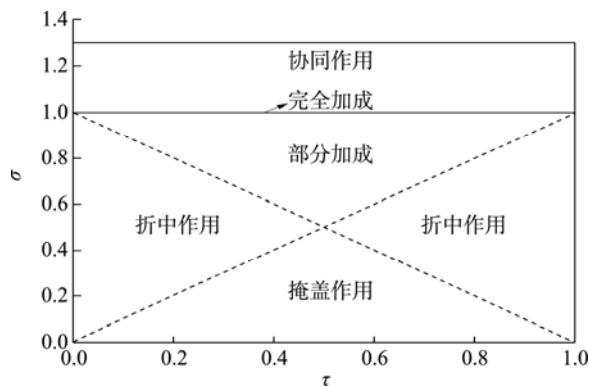


图1 σ - τ 图
Fig.1 σ - τ graph

(2) S型曲线法。这种方法起源于经济学, 将心理学和概率学相结合, 广泛应用于分类评定模型与逻辑回归模型中。此模型为 $P=1/(1+e^{-(x-t)/D})$ ^[25], 在香气协同应用中, 将各个浓度下香气化合物被检测到的概率设定为 P , 并且将阈值代入 t , x 设定为浓度的对数, D 为函数斜率, 随后根据概率学模型计算出理论二元混合物阈值, 将实测阈值通过3

点选配法得出, 并预制比较(如图2所示)。Díaz等^[26]在对葡萄酒中酯类浓度的测定中, 通过S型曲线法测得支链羧基化合物因其香韵结构相似而产生协同作用。

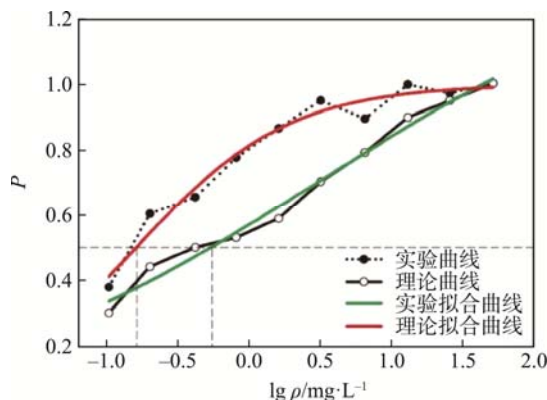


图2 S型曲线
Fig.2 S-curve

以上4种宏观研究方法各有优劣。阈值法的操作简便, 实验结果清晰, 对于阈值水平下香气物质之间的协同作用有着良好的判别, 但此方法受限于浓度因素的影响, 对于非阈值水平的香气物质无法进行有效判断。OVA法能广泛应用于多元混合物之间协同作用的判断, 它综合考虑了香气物质阈值和浓度之间的关系, 证明了大部分香气物质之间属于加成关系, 但此方法对于阈值数值的计算不够精确。S型曲线法的优势之处在于对三点选配法所得的结果进行数学模型拟合, 使阈值测定结果的精确度大幅提高, 且结果通过图表显示更为直观。 σ - τ 图比起S型曲线在结果显示中更为清晰, 在图中可以直观地看出香气物质之间是掩盖、折中、部分加成还是协同作用。

2.2.3 微观法

微观法的建立来源于Buck等^[6]所发现的气味受体的多基因家族表达。由于香气分子在于嗅觉受体结合会产生生理变化, 通过研究嗅神经受体神经元对香气物质刺激的响应特性, 监测细胞钙离子和电生理变化等手段, 间接研究香气成分之间的相互作用^[27-29]。Frijters等^[30-32]通过神经元钙离子成像技术对ORIGI神经元受体与香气物质结合后钙离子水平的变化, 发现了红酒中乙酸异戊酯和威士忌内酯具有掩盖作用。国内姜教授^[33]团队在研究中发现了钙离子在嗅觉信号转导和适应过程中起到较大作用, 气味分子通过与神经元纤毛上的特异性受体结合后到达动作电位的第二信使, 同时引起细胞内外 Ca^{2+} 浓度变化, 并以此来判断气味分子之间的协同作用。但目前对于嗅神经细胞的研究尚不成熟, 且微观法操作较为复杂困难, 常规香气协同的研究仍以宏观手段为主。

2.3 食品中的香气协同作用

Adhikari等^[34]对食品的研究中发现了单个风味化合物在脂肪、蛋白质和碳水化合物存在时风味表现会发生变化,同时它与其他物质的协同作用也会发生改变。因此,所有的食品风味不能完全笼统地规在一起研究,而要在不同食物中具体分析。关于食品香气协同的研究中目前在乳制品、酒类和肉类制品较为多见,主要是这些食品中所含的风味物质较为全面且具有一定的代表性,因此下文以这3类食品为例进行说明。

2.3.1 乳制品中香气协同作用

乳制品挥发性风味组分以脂肪酸类、脂类化合物、醛类、酸类、烯炔、杂环类和酮类化合物为主^[35-37]。以奶酪为例,所含挥发性风味物质已超过100种,最重要的有乙酸、丁酸、己酸、辛酸、硫化氢、谷氨酸、甲硫醇及羰基化合物以及非挥发性化合物,如多肽、短肽及游离氨基酸^[38]。罗天洪等^[39]在对传统宫廷奶酪的风味物质研究中发现其中的甲苯、乙醇、苯甲醛、2-庚酮、乙酸乙酯、乙酸这6种风味物质发生了加成或协同作用使得宫廷奶酪风味具有独特的酒、乳融合香气且果味、花香强烈与普通切达干酪有很大不同。以色列的Afzal等^[40]则发现切达干酪中的三种支链醛(3-甲基丁醛、2-甲基丁醛和2-甲基丙醛)都存在时能赋予奶酪强烈的坚果风味;此外,我国朱教授团队^[41]则证实了3种支链醛由于香韵特征结构相似,能够产生协同作用。

2.3.2 酒类中香气协同作用

酿酒作为人类文化的一部分,目前已经有大量学者对于酒的风味展开深入探究。虽然所有的酒主要都是由水和乙醇构成,但不同酒类其中微量风味化合物的不同造成了风味之间的云泥不同,如白酒的浓烈绵甜;黄酒的馥郁鲜甜;啤酒的干爽香甜;葡萄酒的优雅甘甜等^[42-45],都是由其中特定风味化合物决定的。比如国内团队^[46]在对清香型茅台酒风味鉴定中发现了当水溶液中乙醇浓度增加时会使如 β -大马士酮、异戊醛等风味物质阈值大幅升高,进而产生掩盖作用。有研究团队则通过阈值法对白酒体系中35对酯类香气物质(如乙酸乙酯、异戊酸乙酯、辛酸乙酯、己酸乙酯等)进行研究,其中9组具有相似结构的香气物质表现出了较强的协同效果,5组香气相似但结构不相同的物质也表现出了较强协同效果,这个结果符合了香气协同的规律^[45]。Cameleyre等^[47]团队研究了高级醇对红葡萄酒果香的影响,实验中发现分别在含有3-甲基丁醇或丁醇的稀释酒精溶液中添加以不同浓度混合的5种高级醇混合物会使嗅觉阈值提高,并通过模型果酒确定了高级醇对红酒中果香味有掩盖作用。

2.3.3 肉类中香气协同作用

对于肉类的风味,大部分人往往停留在烹饪方式带来的感官体验上,而不同肉类本身就具有一定量风味化合

物,这些化合物或是形成了肉的腥味,或是在烹饪过程中被香料所掩盖,或是与香料中的香气物质作用激发出令人愉悦的肉香^[48]。Lee等^[49]在研究不饱和脂质氧化时,发现2种脂质氧化产物庚醛和(*E,Z*)-3,5-辛二烯-2-酮是鱼类鱼腥味的主要来源,且两者香气相近,相互发生协同作用。此外,黄艳梅等^[50]则在传统酱制猪肉的风味探究中先通过气相色谱-质谱联用确定挥发性香气成分,再通过阈值的检测确定了(邻伞花烃、萜烯类)等多组香气组分在酱制过程中的协同作用。

3 结论

食品香气协同的研究并非是简单的学科,虽然当前对于特定食品如酒类、肉类、乳制品等香味协同的研究已经有了一定的成果积累,但鉴于食品种类繁多,规模庞大,仍有大量问题需要探究。当前食品风味协同的研究热点以及难点在于探究香气化合物之间的协同机制并进行调控,包括如何研究出更全面更系统的香气协同方法使实验结果更精确具体;如何从风味化合物的合成代谢途径、作用机理等方面找出最为合适的调控手段;如何在考虑到工业生产的效率、成本、设备等问题后将理论化为实际产品同时使产品的质量风味得到提升满足更多消费者等。鉴于食品风味是消费者选择食品的重要指标,因此,全面完善食品风味协同的机制,建立系统、快速、有效的调控手段对提高整个食品行业的发展升级有重要意义。

参考文献

- [1] 肖作兵,朱建才,牛云蔚,等. 香气成分的协同作用研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2018, 36(4): 1-7.
Xiao ZB, Zhu JC, Niu YW, et al. Synergistic effect of aromatic compounds [J]. J Food Sci Technol, 2018, 36(4): 1-7.
- [2] Baker RA. Response parameters including synergism-antagonism in aqueous odor measurement [J]. Ann NY Acad Sci, 1964, 116(116): 495-503.
- [3] Baker RA, James H. Novel anthraquinones from stationary cultures of *Fusarium oxysporum* [J]. J Ferment Bioeng, 1998, 85(4): 359-361.
- [4] Moulton DG, Tucke RD. Electrophysiology of the olfactory system [J]. Ann NY Acad Sci, 1964, 116(2): 380-428.
- [5] Vicente F. Revisiting psychophysical work on the quantitative and qualitative odour properties of simple odour mixtures: A flavour chemistry view. Part 2: Qualitative aspects. A review [J]. Flavour Frag J, 2012, 27(3): 201-215.
- [6] Buck L, Axel R. A novel multigene family may encode odorant receptors: A molecular basis for odor recognition [J]. Cell, 1991, 65(1): 175-187.
- [7] Yagi K, Murat K, Hirata S. Optimized coordinates for anharmonic vibrational structure theories [J]. J Chem Phys, 2012, 137(20): 20-41.
- [8] Tuein L. A spectroscopic mechanism for primary olfactory reception [J]. Chem Senses, 1996, 21(6): 773-791.
- [9] Amooore JE. Stereochemical and vibrational theories of odour [J]. Nature, 1971, 233(5317): 270-271.

- [10] Schmiedeberg K, Shirokova E, Weber HP, *et al.* Structural determinants of odorant recognition by the human olfactory receptors OR1A1 and OR1A2 [J]. *J Struct Biol*, 2007, 159(3): 0–412.
- [11] Chess A, Buck L, Dowling MM, *et al.* Molecular biology of smell: Expression of the multigene family encoding putative odorant receptors [J]. *Cold Spring Harbor Symp Quant Biol*, 1992, 57(12): 505–516.
- [12] Charlier L, Jérémie T, Ronin C, *et al.* How broadly tuned olfactory receptors equally recognize their agonists. human OR1G1 as a test case [J]. *Cell Mol Life Sci*, 2012, 69(24): 4205–4213.
- [13] Kajiya K, Inaki K, Tanaka M, *et al.* Molecular bases of odor discrimination: Reconstitution of olfactory receptors that recognize overlapping sets of odorants [J]. *J Syst Integr Neurosci*, 2001, 21(16): 6018–25.
- [14] Wang B, Zhang GH, Wang J, *et al.* Analysis of volatile compounds in traditional hurood from inner mongolia region by SPME-GC-MS [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2015, 31(12): 378–386.
- [15] Enrique C, Abraham MH. Dose-response functions for the olfactory, nasal trigeminal, and ocular trigeminal detectability of airborne chemicals by humans [J]. *Chem Senses*, 2016, 41(1): 3–14.
- [16] Zhu JC, Chen F, Wang LY, *et al.* Evaluation of the synergism among volatile compounds in oolong tea infusion by odour threshold with sensory analysis and E-nose [J]. *Food Chem*, 2017, 221: 1484–1490.
- [17] Ferreira V. Revisiting psychophysical work on the quantitative and qualitative odour properties of simple odour mixtures: A flavour chemistry view. Part 1: Intensity and detectability. A review [J]. *Flavour Fragrance J*, 2012, 27(2): 124–140.
- [18] 唐柯, 马玥, 徐岩, 等. 冰葡萄酒重要风味化合物嗅觉阈值的研究[J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(1): 148–151.
- Tang K, Ma Y, Xu Y, *et al.* Study on olfactory threshold of important flavor compounds in ice wine [J]. *Food Ferment Ind*, 2016, 42(1): 148–151.
- [19] 高丽娇, 刘佳霖, 程尚, 等. 基于模糊评判的蜂蜜感官评价及阈值分析 [J]. *食品科学*, 2014, 35(22): 190–193.
- Gao LQ, Liu JL, Cheng S, *et al.* Sensory evaluation and threshold analysis of honey based on fuzzy evaluation [J]. *Food Sci*, 2014, 35(22): 190–193.
- [20] Ferreira V. Revisiting psychophysical work on the quantitative and qualitative odour properties of simple odour mixtures: A flavour chemistry view. Part 2: Qualitative aspects. A review [J]. *Flavour Fragrance J*, 2012, 27(2): 201–215.
- [21] Enrique J, Cometto M, Abraham MH. Dose-response functions for the olfactory, nasal trigeminal, and ocular trigeminal detectability of airborne chemicals by humans [J]. *Chem Senses*, 2016, 41(1): 3–14.
- [22] Miyazawa T, Gallagher M, Preti G, *et al.* Psychometric functions for ternary odor mixtures and their unmixed components [J]. *Chem Senses*, 2009, 34(9): 753–761.
- [23] Miyazawa T, Gallagher M, Preti G, *et al.* Odor detection of mixtures of homologous carboxylic acids and coffee aroma compounds by humans [J]. *J Agric Food Chem*, 2009, 57(21): 9895–9901.
- [24] Wise PM, Miyazawa T, Gallagher M, *et al.* Human odor detection of homologous carboxylic acids and their binary mixtures [J]. *Chem Senses*, 2007, 32(5): 475–482.
- [25] Cometto JE, Abraham MH. Odor detection by humans of lineal aliphatic aldehydes and helional as gauged by dose-response functions [J]. *Chem Senses*, 2010, 35(4): 289–299.
- [26] Diaz M, Consuelo, Schneider. Formation pathways of ethyl esters of branched short-chain fatty acids during wine aging [J]. *J Agric Food Chem*, 2005, 53(9): 3503–3509.
- [27] Mountassir F, Belloir C, Briand L, *et al.* Encoding odorant mixtures by human olfactory receptors [J]. *Flavour Fragrance J*, 2016, 31(5): 400–407.
- [28] Laska M, Hudson R. Comparison of the detection threshold of odour mixtures and their components [J]. *Chem Senses*, 1991, 16(6): 651–662.
- [29] Arthur V, Jean-Pierre R. Dendritic integration in olfactory sensory neurons: a steady-state analysis of how the neuron structure and neuron environment influence the coding of odor intensity [J]. *J Comput Neurosci*, 2003, 5(3): 243–266.
- [30] Frijters JR. Psychophysical models for mixtures of tastants and mixtures of odorants [J]. *Ann Ny Acad Sci*, 1987, 510(1): 67–78.
- [31] Charlier L, Topin J, Ronin C, *et al.* How broadly tuned olfactory receptors equally recognize their agonists. Human OR1G1 as a test case [J]. *Cell Mol Life Sci*, 2012, 69(24): 4205–4213.
- [32] Chaput R, Mamountassir FE. Interactions of odorants with olfactory receptors and receptor neurons match the perceptual dynamics observed for woody and fruity odorant mixtures [J]. *Eur J Neurosci*, 2012, 35(4): 584–597.
- [33] 羡慕, 张罗, 韩德民. 钙离子在嗅觉信号转导和适应中的作用[J]. *国际耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2009, 33(5): 306–308.
- Xian M, Zhang L, Han DM. The role of calcium ions in olfactory signal transduction and adaptation [J]. *Int J Otolaryngol Head NECK Surg*, 2009, 33(5): 306–308.
- [34] Adhikari K, Hein KA, Elmore JR, *et al.* Flavor threshold as affected by interaction among three dairy-related flavor compounds [J]. *J Sens Stud*, 2006, 21(6): 626–643.
- [35] 李志国, 宗学醒, 闫清泉, 等. 奶酪风味形成的研究进展[J]. *乳业科学与技术*, 2019, 42(1): 58–61.
- Li ZG, Zong XX, Yan QQ, *et al.* Study on cheese flavor formation [J]. *Dairy Sci Technol*, 2019, 42(1): 58–61.
- [36] 刘程, 谢广发, 孙剑秋, 等. 我国黄酒酿造微生物的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(8): 374–380.
- Liu C, Xie GF, Sun JQ, *et al.* Research progress on microbial brewing of rice wine in China [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2016, 37(8): 374–380.
- [37] Ribeiro SC, Stanton C, Bo Y, *et al.* Conjugated linoleic acid production and probiotic assessment of *Lactobacillus plantarum* isolated from Pico cheese [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2018, 90(14): 403–411.
- [38] Al-Baarri AN, Legowo AM, Arum SK, *et al.* Extending shelf life of indonesian soft milk cheese (Dangke) by lactoperoxidase system and lysozyme [J]. *Int J Food Sci*, 2018, 2018(2): 1–7.
- [39] 罗天淇, 张健, 余志坚, 等. 传统宫廷奶酪挥发性风味物质研究[J]. *中国乳品工业*, 2019, 47(4): 16–21.
- Luo TQ, Zhang J, Yu ZJ, *et al.* Study on volatile flavor compounds of traditional palace cheese [J]. *Chin Dairy Ind*, 2019, 47(4): 16–21.
- [40] Afzal MI, Ariceaga CC, Boulahya KA, *et al.* Biosynthesis and role of 3-methylbutanal in cheese by lactic acid bacteria: Major metabolic pathways, enzymes involved, and strategies for control [J]. *Crit Rev Food Sci*, 2017, 57(2): 399–406.
- [41] Zhu JC, Chen F, Wang LY, *et al.* Evaluation of the synergism among volatile compounds in Oolong tea infusion by odour threshold with

- sensory analysis and E-nose [J]. Food Chem, 2017, 221: 1484–1490.
- [42] Daan S, Davidp DS, Bregt U, *et al.* Contribution of staling compounds to the aged flavour of lager beer by studying their flavour thresholds [J]. Food Chem, 2009, 114(4): 1206–1215.
- [43] Ou YY, Li C, Zhou Y, *et al.* Rapid analysis of adulterated Chinese liquor by extractive electrospray ionization mass spectrometry [J]. Acta Chim Sin, 2013, 71(12): 16–25.
- [44] Lytrag, Tmpere S, Zhang S, *et al.* Olfactory impact of dimethyl sulfide on red wine fruity esters aroma expression in model solution [J]. Int J Vine Wine Sci, 2014, 48(1): 75–85.
- [45] Lytrag, Tmpere S, Zhang S, *et al.* Distribution and organoleptic impact of ethyl 2-methylbutanoate enantiomers in wine [J]. J Agric Food Chem, 2014, 62(22): 5005–5010.
- [46] 姚征民. 清香型白酒特征香气成分鉴定及香气协同作用研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2018.
- Yao ZM. Study on key aroma synergy and identification of characteristicaroma components of light aromaliquor [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2018.
- [47] Cameleyre M, Lytra G, Tempere S, *et al.* Olfactory impact of higher alcohols on red wine fruity ester aroma expression in model solution [J]. J Agric Food Chem, 2015, 63(44): 9777–9788.
- [48] Zhang L, Zhen DW, Fan MD, *et al.* Effect of oxidized and non-oxidized chicken fat on the formation of meat flavor in a thermal reaction flavoring preparation system [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2017, 17(8): 229–238.
- [49] Lee DS, Kim E, Schwarz N. Something smells fishy: Olfactory suspicion cues improve performance on the Moses illusion and Wason rule discovery task [J]. J Exp Soc Psychol, 2015, 59(12): 47–50.
- [50] 黄艳梅, 邹延军. 微波辅助酱制生产酱肉肉制品的工艺优化[J]. 食品工业科技, 2016, 37(16): 290–295.
- Huang YM, Huan YJ. Optimization of microwave-assisted sauce production process [J]. Sci Technol Food Ind, 2016, 37(16): 290–295.

(责任编辑: 韩晓红)

作者简介



陈 臣, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品生物技术。
E-mail: chenchen@sit.edu.cn



田怀香, 博士, 教授, 主要研究方向为食品风味化学与食用香精。
E-mail: tianhx@sit.edu.cn