

doi:10.3969/j.issn.2095-6002.2018.04.001

文章编号:2095-6002(2018)04-0001-07

引用格式: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 Zuobing, ZHU Jiancai, NIU Yunwei, et al. Synergistic effect of aromatic compounds[J]. Journal of Food Science and Technology, 2018,36(4):1-7.

香气成分的协同作用研究进展

肖作兵^{1,2}, 朱建才^{1,2}, 牛云蔚¹, 王品品¹, 孙小鑫¹, 王若琳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.江南大学食品学院,江苏无锡 214122)

摘要:天然产物中香气成分繁多且结构各异,这些香气成分能客观地反映天然产物的风味特点。从嗅觉产生的机理、特征香气分子形成理论和香气物质间协同作用研究方法等方面对天然产物的香气研究进展进行阐述,即通过嗅觉受体与香气分子结合,激活并传导到大脑皮层,最终完成香气感知,解释了嗅觉产生过程;从分子振动理论和识别理论角度,解释了天然产物特征香气形成原因;从阈值法、S型曲线法、OAV法、 σ - τ 图法等宏观层面,钙离子成像法和细胞电生理等微观层面的两个角度,解释了香气物质间的相互协同作用方法,并总结了存在的问题,对未来研究方向进行展望。

关键词:香气协同;分子振动理论;识别理论;S型曲线法;钙离子成像法

中图分类号: TS202.3

文献标志码: A

自然界中存在成千上万种不同的香气成分,生物嗅觉系统可以识别这些香气分子,以获得对外界环境的直观感觉联系。香气分子通过对嗅觉器官的刺激或者激活作用,产生了各种各样的香气。天然产物中香气成分繁多,包含了酯类、醛类、内酯类、萜类、醇类、羰基以及含硫、含氮等化合物。这些香气成分能客观地反映天然产物的风味特点,是食品特性中与健康和营养关系最密切的品质。天然产物香气的形成不是各个化合物气味的简单加和,而是由这些化合物相互作用最终形成的。由于不同香韵香气成分之间关联的复杂性和作用的多样性,很难客观、快速有效地确定香气协调、天然逼真的天然产物香精组成与配方结构。目前只能借助于传统调香师对香气成分之间的感性经验,经过不断的实验而得到优化。因此,探究天然产物香气成分及其不同香韵结构之间的协同作用机制等科学问题,已经成为天然产物香精特征香气调控技术能否从实验室走向产业化、制约香精行业发展的关键瓶颈问题。本文

从嗅觉产生机理、特征香气形成理论和香气成分间相互协同作用的研究方法等方面进行阐述。

1 嗅觉产生理论

嗅觉是人的本能反应,它同视觉、听觉、触觉一样,构成了人类的基本感知能力。Buck和Axel两位教授对嗅觉系统识别机制进行了大量深入的研究,发现了嗅觉受体基因超家族^[1],大大推动了人们对嗅觉的认知水平。在香气的感受过程中,香气分子溶解在鼻粘液的水-脂质环境中,首先与绑定蛋白结合形成复合物,之后再与嗅觉受体特异性绑定,导致与之偶联的G-蛋白活化并脱离。脱离的G-蛋白激活腺嘌呤环化酶,使得细胞内第二信使cAMP增加,Ca²⁺等大量阳离子通过cAMP-门控通道涌进,进而产生动作电位。从而把香气分子的化学信号转换为电信号,并从神经元直接传递到嗅球^[2],从嗅球开始逐次传递,最终传播到嗅觉皮层,实现嗅觉的感知^[3]。由于他们的杰出贡献,获得了

收稿日期:2018-06-01

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFA0200304);国家自然科学基金资助项目(2147614090)。

作者简介:肖作兵,男,教授,博士生导师,主要从事香气协同与控制释放方面的研究。

2004年诺贝尔生理学或医学奖。

2 特征香气形成理论

虽然 Buck 和 Axel 教授揭示了嗅觉产生的机制,但是并没有进一步阐明天然产物果香、花香等不同特征香气形成的原因。针对这个问题,学者从香气成分的形状结构、官能团、立体构象、电子特性等方面为出发点,提出了重要的香气形成理论,目前公认的理论主要有两个,即分子振动理论和识别理论。其中识别理论包括形状结构理论、立体结构理论和电子拓扑学理论。本节重点介绍了分子振动理论和识别理论中的立体结构理论和电子拓扑学理论。

2.1 分子振动理论

1996年,英国伦敦大学的 Turin 博士在总结旧理论的基础上,以全新的观点提出了新的分子振动理论^[4]。该理论是基于非弹性电子隧道光谱(IEsT)发展起来的一种生物光谱理论,是振动光谱的非光学形式。该理论认为香气分子与香气接收器中蛋白质结合,可使香气接收器处于激活或空置两种状态,见图1。

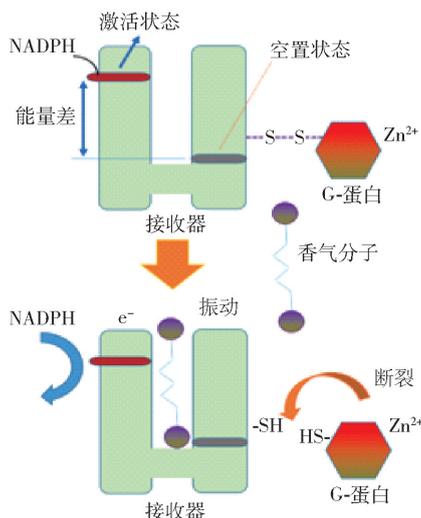


图1 分子振动理论中香气分子与气味接收器作用

Fig.1 Role of aroma molecules and odor receptors in molecular vibrational theory

由图1可知,这两种状态之间具有一定的能量差。当香气分子的振动能量等于上述的能量差时会被激活。气味分子进入气味接收器与之结合,使它失去一个电子。双硫键断开,G-蛋白产生嗅觉信号传至大脑。谷胱甘肽还原酶的辅酶(NADPH)在此过程中充当可溶性电子捐赠器的作用。

虽然分子振动理论根据大量的实验数据,一定

程度上阐述了各种香气的产生,特别是有效解释结构差异明显,且具有类似香气的问题。但依然存在几个难以解释的问题,如该理论并不能解释各种香气成分的强度,以及同一种香气成分其香气强度随浓度变化的问题。

2.2 识别理论

2.2.1 立体结构理论

1971年,Amoore教授提出了香气成分立体结构理论^[5],该理论认为一种化合物的特殊香气是由其分子形状和大小来决定的,只有当香气分子的立体结构能够进入嗅觉器官中的气味接收器内才能被感知,如图2。该理论很好地解释了一些具有相同官能团的分子立体结构相近的化合物香气相近的问题。但是该理论很难解释化学结构差异明显而香气接近的香气成分。并且该理论同样没有解决不同浓度香气成分呈现不同香气和同一个人不同心理状态下会产生不同嗅觉香气的问题。

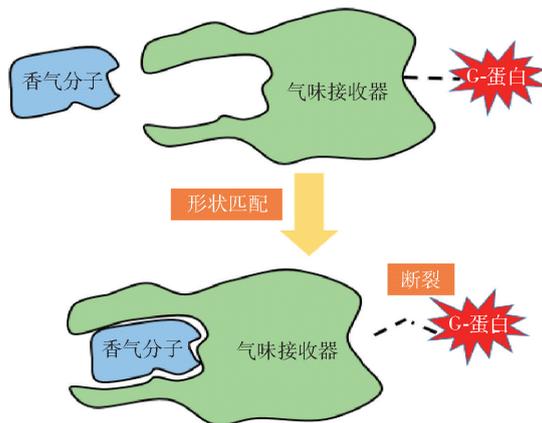


图2 立体结构理论中香气分子与气味接收器作用

Fig.2 Role of aroma molecules and odor receptors in structure theory

2.2.2 电子拓扑学理论

电子拓扑学理论主要是以龙涎香成分为例子进行研究,提出了“龙涎三角”理论^[6]。该理论是第一个将分子的电子特性和构象一起进行研究而提出来的电子拓扑理论,开拓了一种新的研究方法,具有一定的理论价值。从这个理论可以看出,化合物香气可能与电子分布、构成分子的轨道等物理参数,特别是最低空轨道和最高占有轨道有一定关系。

3 香气成分间的协同作用研究方法

自然界中存在大量的香气成分,通过对嗅觉器官的刺激或激活作用,产生了各种各样的香气。天

然产物整体香气不是各个香气成分简单的加和,而是通过复杂的协同作用最终形成。香气成分之间的相互作用,总体上分为宏观和微观两个层面。宏观层面表现为香气分子混合后化学或物理化学作用^[7-8];微观层面发生在鼻腔神经末梢嗅觉受体感受器上^[9-10],通过特定神经元细胞的电生理作用,使来自不同受体的信号相互作用^[11-12]。

3.1 宏观层面协同作用研究方法

宏观层面协同作用研究方法主要有4种,分别为阈值法、S型曲线法、OAV法和 σ - τ 图,这些方法主要通过香气成分组合前后的阈值、OAV、香韵强度值的变化,判定成分之间的协同作用。

3.1.1 阈值法

该方法按照各组分的阈值浓度进行混合,并通过三点选配法(3-AFC)进行阈值测定,最后将实际测定混合物阈值与理论计算得到的混合物阈值进行比较,从而判断香气协同程度^[10,13]。通过阈值法研究表明,香气成分之间的作用与成分的结构、香气特征有一定关系。结构或香气相似的香气成分具有协同或加成作用,而结构或香气不同的成分往往具有掩蔽作用或者无作用。2017年,本课题组对乌龙茶中24种香气物质阈值浓度进行协同研究^[13]。结果表明,2-甲基丁醛和3-甲基丁醛、反-2-庚烯醛和反-2-辛烯醛等结构、香气相似的成分具有协同或加成作用,而乙酸乙酯与乙酸、2-甲基丁醛与乙酸丁酯等结构或香气差异明显的成分具有掩蔽、抑制作用。2009年,Daan等^[14]对啤酒中的26种陈化风味物质在阈值浓度下进行研究,得出了具有类似结构的不饱和和烯醛之间有明显的相加或者协同作用,而不同结构和香型的化合物之间,相互作用小的结论。阈值法需将香气成分稀释到阈值水平,只能研究阈值浓度下香气成分之间的相互作用,并没有考虑到浓度因素对相互作用影响。因此该方法对指导香精配方的设计方面具有局限性。

3.1.2 S型曲线法

该方法通过三点选配法测得A、B混合香气成分10个系列浓度点下的正确检测比例 P ,绘制浓度- P 曲线,应用S型曲线 $y = 1/(1 + e^{-Ax})$ 进行拟合得到实验值。定义 $P = 0.5$ 时,对应的横坐标即为阈值。A、B混合后,通过Feller加合模型计算理论 P_{AB} ,即 $P_{AB} = P_A + P_B - P_A \times P_B$,绘制浓度-正确检测比例 P_{AB} 曲线,并进行拟合,计算理论值。若混合物实测阈值高于理论值,则发生掩盖现象;若低于理

论阈值,则发生协同作用,见图3^[15-19],图中OT为阈值, R 为相关系数。法国波尔多大学Lytra Georgia团队在这方面做了大量的工作。他们采用S型曲线法对红酒中香气物质之间的相互作用进行了研究,发现亚阈浓度2-羟基-4-甲基戊酸乙酯^[15]、(2S)-2-甲基丁酸乙酯^[16]、二甲基三硫醚^[17]能增强红酒果香香韵强度,降低果香香韵的阈值,这些成分与果香香韵成分发生了协同作用;而添加5种实测浓度的高级醇于果香韵(13种乙酸酯类和乙酯类香气物质)时,果香韵的强度值下降,阈值变大,即高级醇对果香韵具有抑制作用^[20]。从上面的研究内容可以看出,S型曲线法综合了香气成分的阈值、浓度等因素的相互作用,弥补了阈值法的局限性。而采用数学拟合的方式计算阈值,使得阈值准确性大大提高。此外,该方法扩展了体系范围,除研究二元体系,还可以研究香韵多元成分之间的相互作用,并以图形形式直观表现。因此,在研究香气成分相互协同作用时,S型曲线法具有明显的优势。

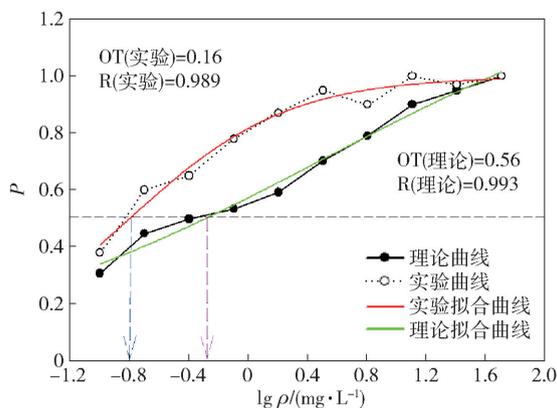


图3 香气成分协同作用S型曲线

Fig. 3 S-curve of synergistic effect of aroma compounds

3.1.3 OAV法

该方法通过混合物的实测OAV(odoractivity value)与理论OAV的比值来判断混合物中组分间的相互作用^[21-23]。其中混合物的实测OAV是混合物浓度与混合物实测阈值的比值;理论OAV值是混合物中各个组分的OAV值之和。该方法表明,香气成分之间相互作用以加成为主,协同和掩盖作用较少。Culleré等^[23]采用OAV法研究9种重要的氧化醛类物质,研究发现这些化合物之间或者与其他香气成分之间以加成作用为主。混合物中香气成分的个数对相互作用也有影响,个数越多,则相互作用偏向于加成和掩盖。Laska等^[24]采用OAV法对三元混合物、六元混合物和十二元混合物体系进行研究,

结果表明随着混合物体系复杂度增加,混合物的理论与实验 OAV 比值下降,香气成分之间以掩盖作用为主。Guadagni 等^[25]采用 OAV 法研究混合物体系中香气成分作用关系,结果表明香气成分之间一般都发生加成作用。和 S 型曲线法类似,OAV 法同样综合了香气成分的阈值、浓度等因素的相互作用,弥补了阈值法的局限性,适用于近阈值浓度香气成分之间的作用。与 S 型曲线法相比,此方法测定的阈值,其准确性有所欠缺。

3.1.4 σ - τ 图法

该方法是由 Patte 和 Laffort^[26]于 1979 年提出的 $\sigma = F(\tau)$ 模型,见图 4。 τ 是指 A (或 B) 的香气强度与两者的香气强度之和间的比值,其中 $\tau_A = I_A / (I_A + I_B)$ 或者 $\tau_B = I_B / (I_A + I_B)$, σ 代表混合物的香气强度与各成分(在混合之前)的香气强度之间的比值 $\sigma = I_{mix} / (I_A + I_B)$,它反映相互作用程度。根据相互作用级别将该图划分为若干部分,实验点的位置反映相互作用水平,当混合物的香气强度与未混合之前各组分香气强度之和相等时,则混合物处于完全加成作用($\sigma = 1$);当混合物香气强度比其组成部分的总和更为强烈时,则为协同作用($\sigma > 1$);当混合物的香气强度比其各组成的总和要弱时,是折中或者掩盖作用($\sigma < 1$)^[20, 26-32]。 σ - τ 图法以香气成分强度值为考察指标,适用于近阈值或超阈值浓度下香气成分之间的相互作用。该方法综合考虑 σ 、 τ 值,并以图形形式直观展示,更加全面揭示了香气成分相互作用。

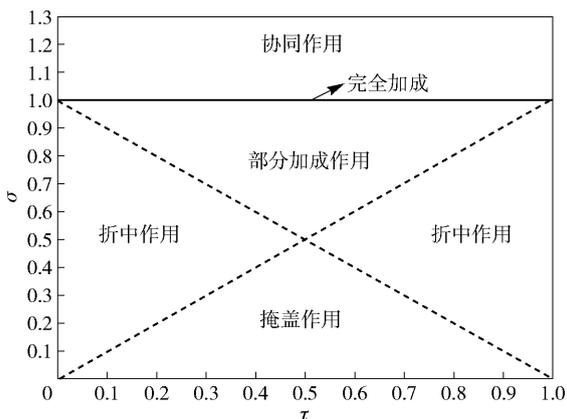


图4 香气成分协同作用 σ - τ 图

Fig 4 σ - τ picture of synergistic effect of aroma compounds

该方法表明,香气成分之间的相互协同作用与浓度有关。低浓度或者中等浓度时,香气成分之间更容易表现为协同或者加成作用;高浓度时,香气成

分之间往往具有掩盖、抑制作用。Cameleyre 等^[20]采用 σ - τ 图的方法,研究了葡萄酒中 5 种高级醇对 13 种酯类化合物重组溶液香气的影响。实验结果表明,不同浓度高级醇对重组溶液的协同作用存在明显的差异,浓度适中时表现协同作用,而浓度高时表现为掩盖作用。因此,香气成分之间相互作用的强弱与浓度有关。Ferreira^[21-22]采用 σ - τ 图法总结之前文献报道的 520 对混合物数据,结果表明在超阈值水平下,混合物香气强度与组分香气强度之和的比值基本小于 1,即表现为掩盖作用。Lytra 等^[28]研究红酒中香气物质之间的相互协同作用,结果表明高浓度下,二乙酰、乙偶姻、乙酸和 γ -丁内酯对红酒果香韵具有掩盖作用。

3.2 微观层面协同作用研究方法

Buck 和 Axel 的研究表明^[33-34],嗅觉系统能识别和分辨大量不同的气味分子,起始于嗅神经元纤毛上的嗅觉受体与气味分子的相互作用。香气的识别可以是一个或者多个嗅觉受体作用的结果。嗅觉受体具有一定数量的活性位点^[35-37]。因此,香气物质须采用竞争或者非竞争方式占据作用位点。而不同香气成分与受体活性位点的结合能力存在差异。当不同香气成分之间存在竞争活性位点时,往往表现为掩盖作用;不同香气成分之间存在相互协作或者非竞争活性位点时,往往表现为协同作用。直接研究香气物质与活性位点的作用比较困难,但是可以通过研究嗅神受体神经元对香气物质刺激的响应特性^[38-40],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。

香气成分之间的相互作用模式与成分浓度有关。低浓度或者中等浓度时,香气成分之间更容易表现为协同或者加成作用;高浓度时,香气成分之间往往具有掩盖、抑制作用。El Mountassir 等^[27]采用神经元钙离子成像技术,研究不同浓度单一和混合香气成分(辛醛、3-甲硫基丙醛、香茅醛)对 4 种嗅觉受体蛋白(OR1G1、OR52D1、OR1A1、OR2W1)的激活效果,监测钙离子的浓度变化,计算刺激条件下细胞的响应个数,并以 σ - τ 图形式判定香气成分之间相互作用。结果表明,含有 4 种受体蛋白的细胞对辛醛与高浓度香茅醛混合的刺激,钙离子浓度发生改变,且细胞响应个数低于单个成分刺激反应的总和,即发生了掩盖或加成作用。Chaput 等^[41]研究红酒中乙酸异戊酯和威士忌内酯与 OR1G1 受体相互作用。相比乙酸异戊酯单一成分,加入高浓度的威

士忌内酯时,OR1G1神经元活性明显减弱,即乙酸异戊酯和威士忌内酯发生了掩盖作用;而低浓度时,乙酸异戊酯和威士忌内酯发生了协同作用。Duchamp-Viret等^[42]以小白鼠为研究对象,考察甲位突厥酮、铃兰醛、新铃兰醛等香气成分嗅觉刺激下神经元的电生理反应,并绘制浓度与神经元响应曲线。结果表明,甲位突厥酮和铃兰醛的混合体系在阈值浓度和中等浓度条件下,响应曲线的斜率大于甲位突厥酮、铃兰醛单一成分斜率,故呈现为协同作用。

当不同香气成分相互协作或者互不干扰占据位点时,更容易发生协同作用;不同香气成分相互竞争活性位点时,更容易发生掩盖作用。而当神经元去极化作用达到最大化、受体蛋白饱和时,香气成分之间协同作用向加成或者掩盖作用转化。这就解释了香气成分在低浓度下为协同作用,高浓度下为加成或掩盖作用。

4 问题与展望

本文从嗅觉产生机理、特征香气形成理论和香气协同方法等方面进行阐述,重点介绍了宏观和微观两方面对香气协同方法。香气、嗅觉是一个极其复杂的问题,集化学、物理学、生理学和心理学等多门学科知识为一体。虽然科研人员对嗅觉受体基因的组成结构、香气形成、香气协同等方面的研究已经取得了较大的进展,但还有很多问题需要进一步深入研究才能解决。

1) 香气成分阈值差异问题。不同的香气成分阈值存在差异,如醇类、酸类成分的阈值明显大于酯类、含硫香气成分,故酯类、含硫成分更容易被人体所感受,造成这个差异的原因至今未能有效解释。2) 在不同心理状态下,人们对同个香气成分有不同的香气描述。按照现有理论,香气的产生是主客体(成分与人体器官)之间相互作用的结果,香气成分与受体蛋白的结合方式、位点相对固定,因此人体对香气成分的描述也应不变。但是,人们在不同时间、心理状态下,对香气成分的香气特征描述往往存在着差异。针对这个问题,目前还没有有效的解释。3) 香气协同作用的基质问题。天然产物香气成分组成复杂,这些香气成分之间存在着复杂的协同作用,并形成了特定的香气。而研究者简单地以两种香气成分为研究对象,考察了不同浓度、配比条件下的阈值变化、对香韵强度的影响,进而阐明两者之间

的可能存在的协同作用。但选取的这些体系偏理想化,并没有考虑到不同基质体系对协同作用的影响。4) 香气协同作用研究方法单一。目前香气协同方面的研究,大多采用某种单一的方法进行,仅通过简单的添加或遗漏来表明香气成分之间是否具有协同或掩盖效果,没有形成系统的研究方法,并且没有综合考虑各个方法的优缺点和适用范围。

本文通过综述香气产生及形成机理、香气物质间的相互作用方法,研究天然产物香气成分以及香韵结构之间的协同作用规律。目前香气协同方面的研究更多专注于理论层面,并没有涉及实际应用价值。只有将两者结合起来,通过香气协同作用机制指导设计出天然逼真的水果等香精产品,在实际应用中验证香气协同作用机制的准确性,实现天然产物特征香气有效调控,为快速、合理构建香精体系提供理论指导。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] MOMBAERTS P. Genes and ligands for odorant, vomeronasal and taste receptors [J]. *Nature Review Neuroscience*, 2004, 5(4): 263 - 278.
- [3] FIRESTEIN S. How the olfactory system makes sense of scents [J]. *Nature*, 2001, 413(6852): 211 - 218.
- [4] TURIN L. A spectroscopic mechanism for primary olfactory reception [J]. *Chemical Senses*, 1996, 21(6): 773 - 791.
- [5] AMOORE J E. Stereochemical and vibrational theories of odour [J]. *Nature*, 1971, 233(5317): 270 - 271.
- [6] BERSUKER I B, DIMOGLO A S, GORBACHOV M Y, et al. Structural and electronic origin of ambergris odor of cyclic compounds [J]. *Nouveau Journal De Chimie*, 1985, 9(3): 211 - 218.
- [7] BERGLUND B, BERGLUND U, LINDVALL T. Psychological processing of odor mixtures [J]. *Psychological Review*, 1976, 83(6): 432 - 441.
- [8] WALKER J C, HALL S B, WALKER D B. Human odor detectability: new methodology used to determine threshold and variation [J]. *Chemical Senses*, 2003, 28(9): 817 - 826.
- [9] HOLLEY A, DUCHAMP A, REVIAL M F, et al. Qualitative and quantitative discrimination in the frog olfactory receptors: analysis from electrophysiological data [J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1974, 237

- (1): 102–114.
- [10] BRODIN M, LASKA M, OLSSON M J. Odor interaction between bourgeonal and its antagonist undecanal [J]. *Chemical Senses*, 2009, 34(7): 625–630.
- [11] MOULTON D G, TUCKER D. Electrophysiology of the olfactory system[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1964, 116(2): 380–428.
- [12] VALOVA I, GUEORGUIEVA N, TROESCHER F, et al. Modeling of inhibition/excitation firing in olfactory bulb through spiking neurons [J]. *Neural Computing & Applications*, 2007, 16(4/5): 355–372.
- [13] ZHU J C, CHEN F, WANG L L, et al. Evaluation of the synergism among volatile compounds in Oolong tea infusion by odour threshold with sensory analysis and E-nose[J]. *Food Chemistry*, 2017, 221: 1484–1490.
- [14] DAAN S, DAVIDP D S, BREGT U, et al. Contribution of staling compounds to the aged flavour of lager beer by studying their flavour thresholds [J]. *Food Chemistry*, 2009, 114: 1206–1215.
- [15] LYTRA G, TEMPERE S, DE R G, et al. Distribution and organoleptic impact of ethyl 2-hydroxy-4-methylpentanoate enantiomers in wine[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2012, 60(6): 1503–1509.
- [16] LYTRA G, TEMPERE S, DE R G, et al. Distribution and organoleptic impact of ethyl 2-methylbutanoate enantiomers in wine [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2014, 62(22): 5005–5010.
- [17] LYTRA G, TEMPERE S, ZHANG S, et al. Olfactory impact of dimethyl sulfide on red wine fruity esters aroma expression in model solution[J]. *International Journal of Vine and Wine Sciences*, 2014, 48(1): 75–85.
- [18] COMETTO-MUÑOZ J E, ABRAHAM M H. Dose-response functions for the olfactory, nasal trigeminal, and ocular trigeminal detectability of airborne chemicals by humans[J]. *Chemical Senses*, 2016, 41(1): 3–14.
- [19] TEMPERE S, CUZANGE E, REVEL G D, et al. Olfactory masking effect of ethylphenols: characterization and elucidation of its origin[J]. *Food Quality & Preference*, 2016, 50: 135–144.
- [20] CAMELEYRE M, LYTRA G, TEMPERE S, et al. Olfactory impact of higher alcohols on red wine fruity ester aroma expression in model solution [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2016, 63(44): 9777–9788.
- [21] 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[J]. *Flavour & Fragrance Journal*, 2012, 27(2): 124–140.
- [22] FERREIRA V. Revisiting psychophysical work on the quantitative and qualitative odour properties of simple odour mixtures; a flavour chemistry view. Part 2; qualitative aspects[J]. *Flavour & Fragrance Journal*, 2012, 27(3): 201–215.
- [23] CULLERÉ L, JUAN C A, FERREIRA V. An assessment of the role played by some oxidation-related aldehydes in wine aroma [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2007, 55(3): 876–881.
- [24] LASKA M, HUDSON R. A comparison of the detection thresholds of odour mixtures and their components [J]. *Chemical Senses*, 1991, 16(6): 651–662.
- [25] GUADAGNI D G, MIERS J C, VENSTROM D W. Concentration effect on odor addition or synergism in mixtures of methyl sulfide and tomato juice[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 34(6): 630–632.
- [26] PATTE F, LAFFORT P. An alternative model of olfactory quantitative interaction in binary mixtures [J]. *Chemical Senses*, 1979, 4(4): 267–274.
- [27] EL MOUNTASSIR F, BELLOIR C, BRIAND L, et al. Encoding odorant mixtures by human olfactory receptors [J]. *Flavour & Fragrance Journal*, 2016, 31(5): 400–407.
- [28] LYTRA G, TEMPERE S, REVEL G D, et al. Impact of perceptive interactions on red wine fruity aroma[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2012, 60(50): 12260–12269.
- [29] SAN-JUAN F, FERREIRA V, CACHO J, et al. Quality and aromatic sensory descriptors (mainly fresh and dry fruit character) of Spanish red wines can be predicted from their aroma-active chemical composition[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2011, 59(14): 7916–7924.
- [30] CAMPO E, FERREIRA V, ANA E A, et al. Prediction of the wine sensory properties related to grape variety from dynamic-headspace gas chromatography-olfactometry data[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2005, 53(14): 5682–5690.
- [31] ATANASOVA B, THOMA-DANGUIN T, LANGLOIS D, et al. Perceptual interactions between fruity and woody notes of wine[J]. *Flavour & Fragrance Journal*, 2004, 19(6): 476–482.
- [32] FRIJTERS J E. Psychophysical models for mixtures of tastants and mixtures of odorants[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1987, 510(1): 67–78.
- [33] BUCK L B, BIGELOW J M, AXEL R. Alternative splicing in individual *Aplysia neurons* generates neuropeptide diversity[J]. *Cell*, 1987, 51: 127–133.
- [34] CHESS A, BUCK L, DOWLING M M, et al. Molecular biology of smell; expression of the multigene family enco-

- ding putative odorant receptors [J]. Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology, 1992, 57: 505–516.
- [35] SCHMIEDEBERG K, SHIROKOVA E, WEBER H P, et al. Structural determinants of odorant recognition by the human olfactory receptors OR1A1 and OR1A2[J]. Journal of Structural Biology, 2007, 159(3): 400–412.
- [36] PETERLIN Z, LI Y, SUN G, et al. The importance of odorant conformation to the binding and activation of a representative olfactory receptor [J]. Chemistry & Biology, 2008, 15(12): 1317–1327.
- [37] CHARLIER L, TOPIN J, RONIN C, et al. How broadly tuned olfactory receptors equally recognize their agonists. Human OR1G1 as a test case[J]. Cellular & Molecular Life Sciences Cmls, 2012, 69(24): 4205–4213.
- [38] 羨慕, 韩德民, 张罗. 细胞内钙离子释放在嗅觉信号转导机制中的作用[J]. 临床耳鼻咽喉头颈外科杂志, 2010, 24: 940–944.
- [39] 陈立华, 杨于嘉. 神经元细胞内钙离子的生理与测定方法[J]. 国际神经病学神经外科学杂志, 1996(1): 60–63.
- [40] KAJIYA K, INAKI K, TANAKA M, et al. Molecular bases of odor discrimination; reconstitution of olfactory receptors that recognize overlapping sets of odorants[J]. Journal of Neuroscience, 2001, 21(16): 6018–6025.
- [41] CHAPUT M A, MOUNTASSIR F E, ATANASOVA B, et al. Interactions of odorants with olfactory receptors and receptor neurons match the perceptual dynamics observed for woody and fruity odorant mixtures[J]. European Journal of Neuroscience, 2012, 35(4): 584–597.
- [42] DUCHAMP-VIRET P, DUCHAMP A, CHAPUT M A. Single olfactory sensory neurons simultaneously integrate the components of an odour mixture[J]. European Journal of Neuroscience, 2003, 18(10): 2690–2696.

Synergistic Effect of Aromatic Compounds

XIAO Zuobing^{1,2}, ZHU Jiancai^{1,2}, NIU Yunwei¹, WANG Pinpin¹, SUN Xiaoxin¹, WANG Ruolin¹
(1. Department of Perfume and Aroma Technology, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China;
2. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Plenty of volatile compounds with different structures existed in natural products, which could objectively reflect the flavor characteristics of natural products. This paper reviewed the research progress of aroma forming mechanism, characteristic aroma formation theory and the synergistic method of aroma. The olfactory receptor combines with the aroma molecules to activate and transmit to the cerebral cortex then the body perceives the aroma. The molecular vibration theory and recognition theory were expounded to explain the possible causes of characteristic aroma formation. The methods of synergistic effect of aromatic compounds in natural products were clarified from the microscopic perspectives of threshold, S-curve, OAV, and σ - τ method, and the macroscopic of calcium ion imaging method and cell electrophysiology. The existing problems have been summarized and the future research is prospected.

Keywords: aroma synergy; molecular vibration; recognition theory; S-curve; calcium ion imaging

(责任编辑:李 宁)