

# 咖啡主要烘焙风味物质的形成及变化规律

吕文佳<sup>1</sup>, 刘云<sup>1</sup>, 杨凯舟<sup>1,2</sup>, 翟晓娜<sup>1</sup>, 刘飞<sup>1</sup>, 张春月<sup>1</sup>, 冷小京<sup>1,\*</sup>

(1. 中国农业大学, 食品科学与营养工程学院, 北京 100083;

2. 北京莱古拉咖啡有限公司, 北京 100085)

**摘要:**咖啡以其独特的风味和功能特性受到人们的喜爱。烘焙温度及烘焙时间决定了咖啡的烘焙程度, 并对咖啡风味物质的产生及变化产生重要影响。咖啡主要烘焙风味物质是与咖啡风味直接相关且代表性强的香气成分, 本文通过综合分析烘焙程度与咖啡主要风味物质的形成和变化规律的关系, 为系统了解和掌握精品咖啡烘焙工艺提供科学参考。

**关键词:**咖啡, 烘焙, 风味物质, 变化规律

## Formation and characteristics of the main roasted coffee flavour compounds

LV Wen-jia<sup>1</sup>, LIU Yun<sup>1</sup>, YANG Kai-zhou<sup>1,2</sup>, ZHAI Xiao-na<sup>1</sup>, LIU Fei<sup>1</sup>, ZHANG Chun-yue<sup>1</sup>, LENG Xiao-jing<sup>1,\*</sup>

(1. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Beijing Chocolat Coffee Co., Ltd., Beijing 100085, China)

**Abstract:** Coffee is a popular beverage for its unique flavour and functional properties. Roasting degree, influenced by roasting temperature and roasting time, has significant effect on the formation and variation of the coffee flavor compounds. Main roasted coffee flavour compounds is directly related to coffee flavour, and has a great representativeness of coffee flavour. Through analysis of the relationships between the roasting degree and the roasted coffee flavour compounds, this review provided a scientific reference to utilize speciality coffee roasting process.

**Key words:** coffee; roasting; flavour compounds; variation

中图分类号: TS273

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2015)03-0394-07

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2015.03.077

随着生活水平的提高, 咖啡这一传统的西方饮料逐渐受到国内人们的关注。咖啡生豆风味较差, 不宜冲煮饮用<sup>[1]</sup>, 经过适当的烘焙处理, 可引发咖啡生豆所含成分如绿原酸、葫芦巴碱、多糖、脂肪和蛋白质等物质在不同程度上的美拉德、斯特克降解、焦糖化等系列化学反应<sup>[2]</sup>, 生成包括呋喃类、吡嗪类、吡啶类、吡咯类、醛酮类、硫化物及酚类和有机酸等挥发性呈香物质<sup>[3]</sup>, 形成为人所熟知和欢迎的咖啡特征风味。

传统烘焙工艺以浅度、中度和深度等色差词汇, 通过咖啡豆在加热过程中颜色的变化来描述烘焙程度。然而有文献指出, 咖啡豆的颜色并不能准确反

映烘焙程度, 因为不同的烘焙条件也可使咖啡豆达到相同的颜色<sup>[4]</sup>, 但由于烘焙时间和温度的不同, 咖啡豆中发生化学反应和风味物质的含量也不同, 因此不能单纯用颜色来判断烘焙程度。同时, 由于烘焙设备存在差异性, 烘焙条件应用范围也不统一, 因此, 通过测定不同烘焙条件下咖啡中风味物质含量变化来判断烘焙程度较颜色更为准确。

咖啡的特征风味物质只有经过特定的烘焙程序才能较好地形成。控制烘焙条件对获得良好的风味非常重要, 烘焙不足或过度, 都会降低甚至破坏咖啡应有的风味品质。本文通过综合分析和总结烘焙条件与咖啡主要风味物质的形成和变化的关系, 为系统了解和掌握咖啡烘焙工艺提供科学参考。

### 1 咖啡烘焙的阶段特点

按物化性质的综合变化, 咖啡的烘焙过程可分高温脱水、高温反应以及常温冷却三个阶段<sup>[5,7]</sup> (图1)。咖啡风味物质的形成主要发生在第二阶段。

**高温脱水:**在这个阶段, 由于咖啡生豆内含 10%~12% 的水分, 使得豆体温度不会高于 100℃。当水

收稿日期: 2014-06-10

作者简介: 吕文佳(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工与贮藏工程。

\* 通讯作者: 冷小京(1966-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 可食用膜、食品微胶囊及纳米胶囊、功能性乳品。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31171771)。

分含量降低至6%左右,豆体温度开始升高<sup>[8]</sup>。

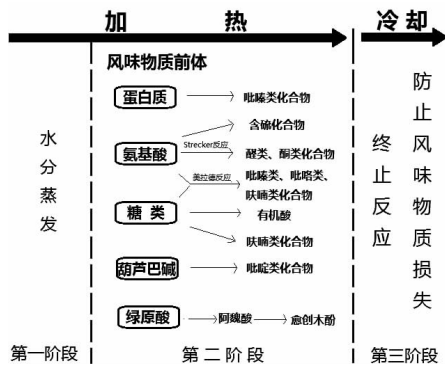


图1 咖啡烘焙过程的三个阶段<sup>[5-7]</sup>

Fig.1 Three stages during coffee roasting<sup>[5-7]</sup>

高温反应:当豆表面温度升至170℃左右,豆内风味物质前体开始发生化学反应。多糖受热分解形成有机酸,使咖啡产生酸味。低聚糖首先受热分解为还原糖(葡萄糖和果糖等),之后与游离氨基酸的氨基发生美拉德反应生成吡嗪类、呋喃类、醛类和酮类化合物等风味物质<sup>[8]</sup>。 $\alpha$ -氨基酸与二羰基化合物受热发生斯特克降解反应,生成相应的醛类和酮类物质。蛋白质、绿原酸和葫芦巴碱等物质也会热分解<sup>[9]</sup>。上述过程伴随包括CO<sub>2</sub>在内的大量气体及挥发性呈香物质的释放(5~12L/kg),导致豆体内压过大,发生爆裂,咖啡豆呈现淡棕色。当温度继续升至190℃左右时,有机酸和部分风味物质过度受热分解,纤维质碳化,导致第二次爆裂,油脂开始渗出表面,咖啡酸味和香气下降,类黑精增加,咖啡豆呈现深褐色<sup>[8,10]</sup>。

常温冷却:咖啡在烘焙结束之后立即离开热源终止反应,在常温下通风冷却,避免持续高温过度破坏芳香物质<sup>[5]</sup>。

## 2 烘焙过程中咖啡风味物质的产生及变化规律

在烘焙过程中,咖啡主要风味物质含量的变化是多样的。例如,咖啡因、大马酮等在整个烘焙过程中的含量几乎不发生变化,吡啶类、吡咯类等随着烘焙程度的加深呈线性增加,绿原酸随烘焙程度加深而减少,而吡嗪类、醛酮类、含硫化合物等的含量随烘焙程度的加深先增加后减少,呈钟形变化。咖啡主要风味物质见表1。

### 2.1 烘焙过程中含量较为稳定的风味物质

咖啡因是一种黄嘌呤生物碱化合物,呈典型的苦味<sup>[15]</sup>,是咖啡中较为重要的风味物质。咖啡因热稳定性强,在烘焙过程中含量较为稳定。蔡瑞玲等研究表明,云南阿拉比卡小粒种咖啡豆在230℃条件下,烘焙5、10、15、20和25min,其咖啡因含量平均在1.45%左右,在15min后轻微下降,但无显著性差异<sup>[16]</sup>。Casal等(2000)对巴西阿拉比卡和象牙海岸罗布斯塔两种咖啡豆进行不同程度的烘焙,发现在140、160、180、200、220、240℃条件下烘焙15min后,阿拉比卡咖啡豆中的咖啡因含量在13.3mg/kg左右,罗布斯塔咖啡豆中咖啡因含量在20.5mg/kg左右,在温度高于200℃时,含量由轻微下降,但无显著性差异<sup>[17]</sup>。造成咖啡因含量轻微下降的原因可能是较强的烘焙程度使咖啡豆内部压力增大,同时具有多孔性,即使烘焙温度高于咖啡因的沸点(178℃),也会阻碍咖啡因的升华,从而使咖啡因的含量只有轻微

表1 咖啡主要风味物质的感官特点

Table 1 Main flavour compounds in roasted coffee beans

含量变化规律	化合物名称 <sup>a</sup>	分子式	感官特点 <sup>b</sup>
较稳定	咖啡因	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> N <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	苦味 <sup>[11]</sup>
	$\beta$ -大马酮	C <sub>13</sub> H <sub>18</sub> O	果香、花香味 <sup>[12]</sup>
持续下降	绿原酸	C <sub>16</sub> H <sub>18</sub> O <sub>9</sub>	涩感 <sup>[11]</sup>
	吡啶类化合物 <sup>[13]</sup>		
	吡啶	C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> N	特殊的臭味
	3-乙基吡啶	C <sub>7</sub> H <sub>9</sub> N	烟草味
	3-乙基-4-甲基吡啶	C <sub>8</sub> H <sub>11</sub> N	坚果味
	2-乙酰基吡啶	C <sub>7</sub> H <sub>7</sub> ON	类似玉米、饼干味
	吡咯类化合物 <sup>[7]</sup>		
持续上升	甲基吡咯	C <sub>5</sub> H <sub>7</sub> N	类似谷物味
	1-甲基-2-乙酰基吡咯	C <sub>7</sub> H <sub>9</sub> ON	坚果香和甜香
	N-糠基吡咯	C <sub>9</sub> H <sub>9</sub> ON	榛子香气
	2-丙酰基吡咯	C <sub>7</sub> H <sub>9</sub> ON	烘烤味
	含硫化合物 <sup>[12]</sup>		
	2-糠基硫醇	C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> OS	烘烤味和肉汤味
	甲基硫醇	CH <sub>4</sub> S	类似甘蓝味
	二甲基三硫化物	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> S <sub>3</sub>	类似甘蓝味
	3-甲基-2-丁烯-1-硫醇	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> S	鱼腥味
	3-巯基-3-甲基甲酸乙酯	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub> S	令人不悦的烘烤味

续表

含量变化规律	化合物名称 <sup>a</sup>	分子式	感官特点 <sup>b</sup>
先上升后下降	呋喃类化合物 <sup>[7]</sup>		
	3-呋喃甲醇	C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	特殊的苦辣气味
	2-呋喃甲醛	C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	烘烤味、土豆味
	2-甲基呋喃	C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> O	醚样气味
	5-甲基糠醛	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	焦糖味
	乙酸糠酯	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	果香、药香、辛香
	2-呋喃甲醇丙酸酯	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	青香蕉香味
	吡嗪类化合物 <sup>[7]</sup>		
	2-甲基吡嗪	C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> N <sub>2</sub>	烘烤和焦糊味
	2,3-二甲基吡嗪	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub>	辛辣味
	2,5-二甲基吡嗪	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub>	坚果味
	三甲基吡嗪	C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> N <sub>2</sub>	青草香
	2-乙基-5-甲基吡嗪	C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> N <sub>2</sub>	焦糖味
	2-乙基-3,5-二甲基吡嗪	C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> N <sub>2</sub>	烘烤味、土味
	2-乙酰基吡嗪	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> ON <sub>2</sub>	烘烤味
	醛类、酮类化合物 <sup>[7]</sup>		
	丙醛	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	水果香
	2-甲基丁醛	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	焦糖味、水果味
	异戊醛	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	苹果香
	甲硫基丙醛	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> OS	烤土豆的香
	香草醛	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	香草味
	2,3-丁二酮	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	奶油味
	2,3-戊二酮	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	奶油味
	己醛	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	青草香
	4-甲基-3-乙基环戊烷-1,2-二酮	C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	香甜、焦糖味
有机酸 <sup>[1]</sup>			
乙酸	CH <sub>3</sub> COOH	辛辣味	
2-甲基丁酸	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	甜味	
柠檬酸	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub>	酸味	

注:a 给出的化合物名称来自咖啡风味物质相关文献;b 相应的化合物对应的感官特点查阅于相关的文献及香料香料辞典。

的下降<sup>[18]</sup>。

大马酮是由 β-胡萝卜素降解形成的<sup>[19]</sup>,具有果香味和花香味<sup>[20]</sup>。Mayer 等对来自哥伦比亚和肯尼亚的三种不同阿拉比卡咖啡豆进行不同程度的烘焙时产生的香气成分分析时发现,在浅、中和深度烘焙条件下产生的大马酮的平均含量均在 0.22、0.24、0.25mg/kg 左右,没有随着烘焙程度的加深而发生显著性变化<sup>[21]</sup>。

绿原酸是奎宁酸与肉桂酸盐类(咖啡酸盐,阿魏酸盐,异阿魏酸盐,芥子酸盐等)合成的酯类物质<sup>[22]</sup>,同时也是一种酚类化合物,占咖啡物质组成的 6%~12%<sup>[23]</sup>。有研究表明,绿原酸与其降解产物奎宁酸会形成咖啡风味中的涩感<sup>[24]</sup>。绿原酸不仅是风味物质,同时也是前体物质。在烘焙过程中,绿原酸受热分解,酯键断裂,形成奎宁酸及阿魏酸、肉桂酸、咖啡酸等物质,含量不断减少,因此咖啡的涩感也会随着烘焙程度的增加而降低。绿原酸受热分解形成阿魏酸,之后阿魏酸脱羧形成的 4-乙炔基愈创木酚具有丁香味和香辛料的气味,4-乙炔基愈创木酚进一步在受热条件下发生氧化反应<sup>[25]</sup>,形成具有塑料味和

烟熏味的愈创木酚,能引起深度烘焙咖啡中的烟熏味,愈创木酚进一步受热分解生成苯酚(图 2)。绿原酸中的 5-FQA 反应路径如图 2 所示。Moon 等研究表明,埃塞俄比亚、尼加拉瓜和苏门答腊的阿拉比卡咖啡豆在经 230℃ 12min,240℃ 14min,250℃ 17min 以及 250℃ 21min 四种条件下分别烘焙后,绿原酸的含量均随烘焙程度的加深,由起始状态的 64.7mg/g 平均值下降至 0.5mg/g,其中在轻度烘焙时,绿原酸含量已下降约 50%<sup>[26]</sup>。蔡瑞玲等研究表明,将云南小粒种咖啡豆在 230℃ 下烘焙 5~25min,绿原酸的含量可由 3.29% 降至 0.48%<sup>[16]</sup>。

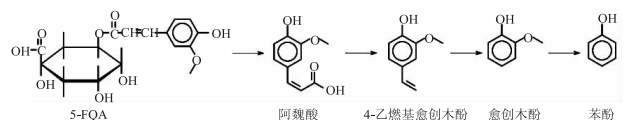


图 2 5-FQA 生成 4-乙炔基愈创木酚和愈创木酚反应路径<sup>[25]</sup>

Fig.2 Proposed degradation pathway of 5-feruloylquinic acid<sup>[25]</sup>

## 2.2 烘焙过程中含量逐渐增加的风味物质

吡啶是含有一个氮原子的六元杂环化合物。咖啡烘焙过程中产生的烷基吡啶具有烘烤和焦糊味,而酰基吡啶具有饼干风味<sup>[27]</sup>。Bakes 等研究表明葫芦巴碱受热分解是吡啶类化合物的一条产生途径<sup>[28]</sup>, Baltes 等研究表明羟基氨基酸的热分解是吡啶的又一形成途径<sup>[29]</sup>,而 Flament 等注意到脯氨酸与糖类物质发生的美拉德反应也可形成吡啶类物质<sup>[30]</sup>。Baggenstoss 等在实验中发现,吡啶的生成需要较高的温度,一旦开始生成,由于咖啡中存在大量的前体物质,其含量会随着时间的延长不断上升,即在低温长时(228℃持续 660s)烘焙中的最大生成量会高于高温短时(260℃持续 160s)最大生成量;而在 228℃下持续烘焙时,吡啶的含量也会不断上升,在 40min 时可达 586mg/kg<sup>[31]</sup>。Moon 等人对埃塞俄比亚耶加雪啡、尼加拉瓜和苏门答腊的两支咖啡豆进行 230℃ 12min, 240℃ 14min, 250℃ 17min 以及 250℃ 21min 条件下的烘焙,同样证明吡啶的含量随着烘焙程度的上升而不断升高,并导致咖啡焦糊味和苦味的加深<sup>[32]</sup>。

吡咯是含有一个氮原子的五元杂环化合物,呈坚果香和烘烤味。目前在咖啡的风味物质中鉴别出的吡咯类化合物主要有 2-甲基吡咯、N-糠基吡咯、2-乙酰基-1-甲基吡咯和 2-乙酰基-1-甲基吡咯等。吡咯类物质在咖啡烘焙过程中产生途径有 3 条,其一是葫芦巴碱的热分解,其二是羟脯氨酸可与美拉德反应的中间产物反应生成烷基吡咯、酰基吡咯<sup>[37]</sup>,另外 Baltes 等人通过实验证明,羟基氨基酸的热分解也可形成烷基吡咯。Baggenstoss 等人实验结果表明,N-甲基吡咯的生成不仅受到时间的影响,温度也可影响其浓度,高温短时烘焙(HTST)生成的最大浓度高于低温长时烘焙(LTLT),即提高烘焙时间和烘焙温度都可增加 N-甲基吡咯的生成量。当在 232℃条件下延长烘焙时间到 35min 时,N-甲基吡咯的含量会持续升高至约 5.0mg/kg,随后保持平稳<sup>[31]</sup>。Moon 等人对埃塞俄比亚、尼加拉瓜和苏门答腊的三种咖啡豆采用四种由浅到深的条件进行烘焙,实验结果表明,1-甲基-2-乙酰基吡咯和 2-乙酰基吡咯的含量会随着烘焙程度的加深显著提高,但加深烘焙程度时,其含量轻微下降<sup>[32]</sup>。这可能与烘焙设备以及烘焙程度定义存在差异有关。

含硫化合物是咖啡烘焙过程中较为重要的芳香物质,如 2-糠基硫醇、甲基硫醇<sup>[13]</sup>、二甲基三硫、2-甲基-3-呋喃硫醇、3-甲基-2-丁烯醛-1-硫醇等<sup>[33]</sup>。其中 2-糠基硫醇是咖啡较为主要的风味物质,具有烘烤味和肉汤味<sup>[14]</sup>。Luigi 等通过生物模型实验发现,戊糖(核糖、木糖等)或己糖(葡萄糖、鼠李糖等)与半胱氨酸在烘焙条件下进行美拉德反应会生成较高含量的糠基硫醇<sup>[34]</sup>。有文献报道,咖啡中含硫风味物质的前体大多是含硫氨基酸<sup>[23]</sup>,如蛋氨酸受热分解可形成类似甘蓝味的甲基硫醇,随后可进一步生成具有同样味道的二甲基三硫醚<sup>[35]</sup>。Baggenstoss 等发现,由于咖啡中存在其大量的前体物质,糠基硫醇的

浓度在烘焙过程中随着烘焙程度的增加而不断上升,在低温长时烘焙(228℃ 11min)后达到 6.5mg/kg。高温短时烘焙(260℃ 160s)能产生最大含量的甲基硫醇,说明甲基硫醇在较高温度下更容易形成<sup>[31]</sup>,因此较深的烘焙会引起咖啡中强烈的令人不愉悦的焦糊气味。

## 2.3 烘焙过程中含量先增加后下降的风味物质

呋喃是由四个碳原子和一个氧原子组成的五元芳环杂环有机物。含有此五元芳环的化合物通常是呋喃的同系物。呋喃类化合物在咖啡豆中的含量约为 3.6~6.1mg/kg<sup>[36]</sup>。呋喃甲醇、糠醛、5-甲基糠醛、糠醛乙酸酯、糠醛甲酸、2-甲基呋喃,具有令人愉悦的焦香味,是咖啡的重要风味物质<sup>[37]</sup>。咖啡呋喃类物质的形成机制涉及蔗糖、鼠李糖<sup>[38]</sup>及阿拉伯半乳糖的热分解<sup>[39]</sup>、美拉德反应、焦糖化反应、多不饱和脂肪酸的氧化<sup>[40]</sup>,如亚油酸和亚麻酸,以及抗坏血酸及其衍生物的分解等,其中糖类物质的热分解是呋喃主要的产生途径。谢明勇等综述了食品中呋喃形成的主要机制,如图 4 所示<sup>[41]</sup>。Moon 等人对埃塞俄比亚耶加雪啡、尼加拉瓜和苏门答腊的两支咖啡豆进行 230℃ 12min, 240℃ 14min, 250℃ 17min 以及 250℃ 21min 条件下的烘焙,发现糠醛、2-乙酰基呋喃、5-甲基糠醛和呋喃甲醇在 240℃ 14min 条件下达到最高含量,糠醛乙酸酯在 250℃ 17min 条件下达到最高,之后都会随着烘焙程度的加深而降低。但 5-羟甲基糠醛的含量会随着烘焙程度的加深而不断下降,进一步生成 5-甲基糠醛<sup>[26]</sup>。糠醛及其衍生物在受热条件下进一步分解形成糠酸,随后脱羧产生 CO<sub>2</sub><sup>[42]</sup>。而 Altaki 等对巴西咖啡豆在 140、170 和 200℃烘焙 6min 后测量,注意到呋喃的含量分别为 22、52、138ng/mL,并随着烘焙程度的增强不断上升<sup>[3]</sup>。

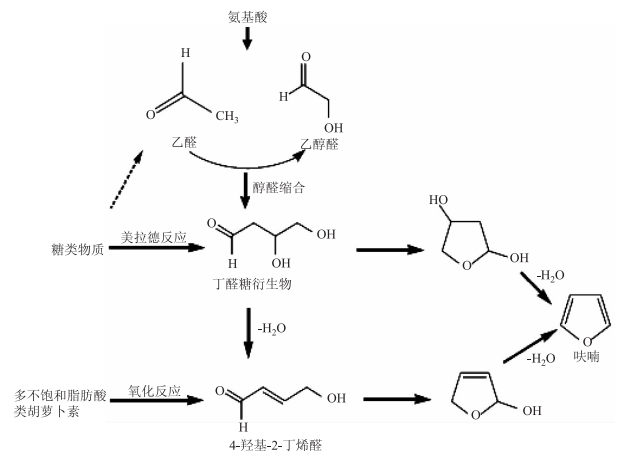


图 3 几种主要的前体物形成呋喃的途径<sup>[41]</sup>

Fig.3 Proposed pathways and precursors of furan<sup>[41]</sup>

吡嗪是 1,4 位含两个氮杂原子的六元杂环化合物,是一种有较强气味的芳香类化合物<sup>[14]</sup>,在咖啡香气中已经鉴别出的吡嗪类化合物多达 81 种,包括 2-甲基吡嗪、2,3-二甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪,三甲基吡嗪、2-乙基-3,5-二甲基吡嗪、2,3-二乙基-5-甲基吡嗪等<sup>[16]</sup>。根据 Baltes 等的研究表明,咖啡烘

焙过程中产生的烷基吡嗪,主要是由含羟基的氨基酸,如丝氨酸和苏氨酸受热分解而形成的<sup>[29]</sup>。同时,吡嗪和烷基吡嗪也是美拉德反应的产物<sup>[27]</sup>。Amrani 等人通过不同的生物模型表明戊糖和己糖(例如果糖、葡萄糖和阿拉伯糖)是生成烷基吡嗪的重要前体。蔗糖的分解产物(如二羰基化合物)与 $\alpha$ -氨基酸发生斯特克降解反应,生成二氢吡嗪,随后被氧化成为相应的烷基吡嗪。其中,丙氨酸和甘氨酸的斯特克降解产物乙醛和甲醛,在形成烷基吡嗪分子的侧链时发挥了重要的作用<sup>[43-44]</sup>。Hashim 等人对阿拉比卡咖啡豆在 187、199、205、207 及 213℃ 烘焙 10min 后,显示吡嗪及几种烷基吡嗪的含量在 205℃ 时达到最大,之后随温度上升而下降。感官评价结果显示在 199℃ 下的中度烘焙咖啡最受评价者喜欢,而 213℃ 下过度烘焙的咖啡则评价很低。对罗布斯塔咖啡豆在 185℃ 下分别烘焙 9min 30s、10min 25s、11min、11min 45s 及 13min 后,显示吡嗪及烷基吡嗪在 10min 25s 下含量最高,之后随着烘焙时间的延长而降低,感官评价结果显示烘焙 11min 的咖啡受喜爱程度显著高于其他的烘焙条件,而在烘焙 13min 后,因咖啡已被过度烘焙,最不受喜欢<sup>[45]</sup>。Schenker 等人的研究结果显示,对阿拉比卡咖啡豆进行高温短时(260℃ 160s)和低温长时(228℃ 660s)烘焙时,2-乙基-3,5-二甲基吡嗪和丙基吡嗪的最大含量无显著差别,但随着烘焙时间的延长,二者的含量都是先上升后下降。2-乙基-6-甲基吡嗪、2-乙基-5-甲基吡嗪、2,3,5-三甲基吡嗪和 2-乙基-3-甲基吡嗪的含量在中度烘焙之前已达到最大随后降低,说明生成吡嗪所需要的反应活化能较低<sup>[44]</sup>。吡嗪类化合物之所以含量减少有可能是因为受热使六元环结构断裂,生成含氮的烯炔类二碳和三碳化合物,进一步挥发<sup>[46]</sup>。

在咖啡烘焙过程中, $\alpha$ -氨基酸与 $\alpha$ -二羰基化合物反应失去一分子 CO<sub>2</sub> 而成为少一个碳原子的醛类及氨基酮,这一过程叫做斯特克降解反应<sup>[47]</sup>。该反应所生成的酮类和醛类物质如 2-甲基丁醛、3-甲基丁醛、甲硫基丙醛、乙酰基丙酮等是产生香气的重要因素<sup>[48]</sup>。不仅斯特克降解反应可以生成醛类和酮类的风味物质,美拉德反应也可形成。Yaylayan 等的模型实验提出 2,3-丁二酮可以由葡萄糖和甘氨酸或脯氨酸发生美拉德反应形成,2,3-戊二酮可由葡萄糖和丙氨酸发生的美拉德反应形成,这两者都具有黄油的风味<sup>[49]</sup>,而咖啡中具有青草香的己醛则是通过脂质氧化反应形成的。Baggenstoss 等通过实验表明,斯特克醛类和酮类物质的含量在烘焙的起始阶段快速上升,随后随着温度的继续升高而下降,并且两类物质在高温短时烘焙条件(260℃ 160s)下生成的最大量明显高于低温长时间的烘焙(228℃ 660s)。例如甲基丁醛、乙醛、2,3-丁二酮、2,3-戊二酮等,在此阶段其含量可上升 50%~200%,而已醛的含量在烘焙起始的 2min 内会快速上升至最大值,约为 4mg/kg,随后降低<sup>[31]</sup>。由于醛类和酮类物质具有羰基结构,性质较为活泼,容易在高温条件下与其他物质发生

反应,因此继续受热会使得醛类和酮类物质含量下降。所以在中度烘焙的条件下,咖啡具有更多的果香味、花香和奶油味,随着烘焙程度的加深,这类的香气逐渐减少。

咖啡烘焙过程中还会产生有机酸,如甲酸<sup>[50]</sup>、乙酸、柠檬酸和苹果酸等,使咖啡风味中带有辛辣感和酸味<sup>[51]</sup>。咖啡中的有机酸是由多糖受热分解而来<sup>[52]</sup>,Ginz 等对咖啡豆在不同温度下烘焙 3min 后发现,当烘焙温度从 140 上升到 240℃ 时,甲酸和乙酸的含量分别由 0、0.4g/kg 上升到最大值 2、2.4g/kg,但当温度继续升高到 280℃,两者的含量都下降到 0.5g/kg<sup>[53]</sup>。Moon 对埃塞俄比亚、尼加拉瓜和苏门答腊的三种咖啡豆进行不同程度的烘焙,之后测定各挥发性组分含量,发现乙酸的含量在中度烘焙(240℃ 14min)时达到最大,当烘焙程度增大时,含量逐渐减少<sup>[32]</sup>。甲酸和乙酸在高温条件下易挥发,而柠檬酸会受热分解为柠康酸、戊二酸和琥珀酸等,苹果酸受热分解成富马酸和马来酸<sup>[54]</sup>,所以中度烘焙的咖啡豆酸味明显,而深度烘焙的咖啡酸味会降低。

### 3 总结与展望

在烘焙过程中,咖啡的前体物质受热会发生系列复杂的化学反应而形成大量复杂的风味物质,目前可检测出的约 1000 余种挥发性物质<sup>[26]</sup>,与咖啡风味直接相关且代表性强的香气成分约 30 余种。此外还存在不少规律性不强的风味物质,如二甲基二硫醚、二甲基三硫化物等。对于咖啡风味物质的研究,在单一品种、单一组分的变化规律有不少较集中的数据,但对于不同风味物质在形成过程中的相互作用规律、特定风味物质的变化与咖啡整体风味相关性等方面的研究还比较少。另外,国际上对于精品咖啡烘焙程度并没有统一的量化标准,常以烘焙后咖啡豆的颜色作为经验衡量指标,因此构建一种“咖啡主要成分含量-烘焙时间、烘焙温度-风味物质含量和种类”的模型,对于精准控制烘焙条件,优化适合不同产地不同品种的咖啡豆烘焙工艺,以获得最佳的咖啡风味很有帮助。

### 参考文献

- [1] 丁胜,周娟,王艳萍. 印尼罗布斯塔咖啡豆应用于咖啡饮料开发的研究[J]. 饮料工业, 2010(4): 18-22.
- [2] Petisca C, Pérez-Palacios T, Farah A, et al. Furans and other volatile compounds in ground roasted and espresso coffee using headspace solid-phase microextraction: Effect of roasting speed [J]. Food and Bioproducts Processing, 2013, 91(3): 233-241.
- [3] Altaki M S, Santos F J, Galceran M T. Occurrence of furan in coffee from Spanish market: Contribution of brewing and roasting [J]. Food Chemistry, 2011, 126(4): 1527-1532.
- [4] Dutra E R, Oliveira L S, Franca A S, et al. A preliminary study on the feasibility of using the composition of coffee roasting exhaust gas for the determination of the degree of roast [J]. Journal of Food Engineering, 2001, 47(3): 241-246.
- [5] Franca A S, Mendonça J C F, Oliveira S D. Composition of

- green and roasted coffees of different cup qualities[J].LWT-Food Science and Technology,2005,38(7):709-715.
- [6] Dorfner R, Ferge T, Yeretian C, *et al.* Laser mass spectrometry as on-line sensor for industrial process analysis: process control of coffee roasting[J].Analytical Chemistry,2004,76(5):1386-1402.
- [7] Gonzalez-Rios O, Suarez-Quiroz M L, Boulanger R, *et al.* Impact of "ecological" post-harvest processing on coffee aroma: II.Roasted coffee[J].Journal of Food Composition and Analysis,2007,20(3):297-307.
- [8] Yeretian C, Jordan A, Badoud R, *et al.* From the green bean to the cup of coffee: investigating coffee roasting by on-line monitoring of volatiles [J]. European Food Research and Technology,2002,214(2):92-104.
- [9] Goodman B A, Pascual E C, Yeretian C. Real time monitoring of free radical processes during the roasting of coffee beans using electron paramagnetic resonance spectroscopy [J]. Food chemistry,2011,125(1):248-254.
- [10] Bhumiratana N, Adhikari K, Chambers IV E. Evolution of sensory aroma attributes from coffee beans to brewed coffee[J].LWT-Food Science and Technology,2011,44(10):2185-2192.
- [11] Buffo R A, Cardelli, Freire C. Coffee flavour: an overview [J]. Flavour and Fragrance Journal,2004,19(2):99-104.
- [12] Blank I, Sen A, Grosch W. Potent odorants of the roasted powder and brew of Arabica coffee[J].Zeitschrift für Lebensmittel -Untersuchung und Forschung,1992,195(3):239-245.
- [13] Silwar R, Lüllmann C. Investigation of aroma formation in Robusta coffee during roasting[J].Café,cacao,thé,1993,37(2):145-152.
- [14] Schenker S, Heinemann C, Huber M, *et al.* Impact of roasting conditions on the formation of aroma compounds in coffee beans [J].Journal of Food Science,2002,67(1):60-66.
- [15] 韩洪波,杨春琳,李敏杰. HPLC 测定小粒种咖啡不同部位咖啡因含量[J].食品研究与开发,2013,34(6):85-88.
- [16] 蔡瑞玲,韩英素,赵晋府,等.焙炒条件对咖啡风味影响的研究[J].饮料工业,2004,6(6):32-37.
- [17] Casal S, Beatriz Oliveira M, Ferreira M A. HPLC/diode-array applied to the thermal degradation of trigonelline, nicotinic acid and caffeine in coffee [J]. Food Chemistry,2000,68(4):481-485.
- [18] Macrae R. Nitrogenous components [M]//Coffee. Springer Netherlands,1985:115-152.
- [19] Yang Z, Baldermann S, Watanabe N. Formation of Damascenone and its Related Compounds from Carotenoids in Tea [J].Tea in Health and Disease Prevention,2012.
- [20] Silwar R, Lüllmann C. Investigation of aroma formation in Robusta coffee during roasting[J].Café,cacao,thé,1993,37(2):145-152.
- [21] Mayer F, Czerny M, Grosch W. Influence of provenance and roast degree on the composition of potent odorants in Arabica coffees[J].European Food Research and Technology,1999,209(3-4):242-250.
- [22] Jaiswal R, Patras M A, Eravuchira P J, *et al.* Profile and characterization of the chlorogenic acids in green Robusta coffee beans by LC-MS n: Identification of seven new classes of compounds[J].Journal of Agricultural and Food Chemistry,2010,58(15):8722-8737.
- [23] Farah A, Monteiro M C, Calado V, *et al.* Correlation between cup quality and chemical attributes of Brazilian coffee [J]. Food Chemistry,2006,98(2):373-380.
- [24] Grosch W. Flavour of coffee. A review [J]. Food/Nahrung,1998,42(06):344-350.
- [25] Dorfner R, Ferge T, Kettrup A, *et al.* Real-time monitoring of 4-vinylguaiacol, guaiacol, and phenol during coffee roasting by resonant laser ionization time-of-flight mass spectrometry [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2003,51(19):5768-5773.
- [26] Moon J K, Yoo H S, Shibamoto T. Role of roasting conditions in the level of chlorogenic acid content in coffee beans: correlation with coffee acidity [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2009,57(12):5365-5369.
- [27] Van Boekel M. Formation of flavour compounds in the Maillard reaction [J]. Biotechnology advances,2006,24(2):230-233.
- [28] Bakes W, Bochmann, G Bochmann G. Model reactions on roast aroma formation. I. Reaction of serine and threonine with sucrose under the conditions on coffee roasting and identification of new coffee aroma compounds [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,1987,35(3):340-346.
- [29] Baltés W, Bochmann G. Model reactions on roast aroma formation. IV: Mass spectrometric identification of pyrazines from the reaction of serine and threonine with sucrose under the conditions of coffee roasting [J]. Zeitschrift für Lebensmittel -Untersuchung und -Forschung.1987,184:485-493.
- [30] Flament I, Bessière-Thomas Y. Coffee flavor chemistry [M]. Chichester, UK: Wiley,2002.
- [31] Baggenstoss J, Poisson L, Kaegi R, *et al.* Coffee roasting and aroma formation: Application of different time-temperature conditions [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2008,56(14):5836-5846.
- [32] Moon J K, Shibamoto T. Role of roasting conditions in the profile of volatile flavor chemicals formed from coffee beans [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2009,57(13):5823-5831.
- [33] Czerny M, Mayer F, Grosch W. Sensory study on the character impact odorants of roasted Arabica coffee [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,1999,47(2):695-699.
- [34] Poisson L, Schmalzried F, Davidek T, *et al.* Study on the role of precursors in coffee flavor formation using in-bean experiments [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2009,57(21):9923-9931.
- [35] Parliment T H, Kolor M G, Rizzo D J. Volatile components of Limburger cheese [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,1982,30(6):1006-1008.
- [36] Crews C, Castle L. A review of the occurrence, formation and analysis of furan in heat-processed foods [J]. Trends in Food

Science & Technology, 2007, 18(7):365-372.

[37] Buffo R A, Cardelli - Freire C. Coffee flavour: an overview [J]. Flavour and Fragrance Journal, 2004, 19(2):99-104.

[38] Poisson L, Kerler J, Schmalzried F, *et al.* Coffee Flavour Modulation - Favouring the Formation of Key Odorants upon Roasting [C]//22nd International Conference on Coffee Science, ASIC 2008, Campinas, SP, Brazil, 14 - 19 September, 2008. Association Scientifique Internationale du Café (ASIC), 2009: 360-363.

[39] De Maria C A B, Trugo L C, Neto F R, *et al.* Composition of green coffee water-soluble fractions and identification of volatiles formed during roasting [J]. Food Chemistry, 1996, 55(3): 203-207.

[40] Fisk I D, Kettle A, Hofmeister S, *et al.* Discrimination of roast and ground coffee aroma [J]. Flavour, 2012, 1(1):14.

[41] 谢明勇, 黄军根, 最少平. 热加工食品中呋喃的研究进展 [J]. 食品与生物技术学报, 2010, 29(1).

[42] Petisca C, Pérez-Palacios T, Pinho O, *et al.* Optimization and Application of a HS - SPME - GC - MS Methodology for Quantification of Furanic Compounds in Espresso Coffee [J]. Food Analytical Methods, 2014, 7(1):81-88.

[43] Amrani - Hemaimi M, Cerny C, Fay L B. Mechanisms of formation of alkylpyrazines in the Maillard reaction [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1995, 43(11):2818-2822.

[44] Müller R, Rappert S. Pyrazines: occurrence, formation and biodegradation [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2010, 85(5):1315-1320.

[45] Hashim L, Chaveron H. Use of methylpyrazine ratios to monitor the coffee roasting [J]. Food Research International, 1995, 28(6):619-623.

[46] Kiefer J H, Zhang Q, Kern R D, *et al.* Pyrolyses of aromatic

azines: pyrazine, pyrimidine, and pyridine [J]. The Journal of Physical Chemistry A, 1997, 101(38):7061-7073.

[47] Dart S K, Nursten H E, Clarke R J, *et al.* Coffee chemistry [J]. Coffee Chemistry, 1985, 1.

[48] 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]. 安徽师范大学学报: 自然科学版, 1993, 16(2):79-84.

[49] Yaylayan V A, Keyhani A. Origin of 2,3-pentanedione and 2,3-butanedione in D-glucose/L-alanine Maillard model systems [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1999, 47(8):3280-3284.

[50] Gdel Campo G, Berregi I, Caracena R, *et al.* Quantitative determination of caffeine, formic acid, trigonelline and 5-(hydroxymethyl) furfural in soluble coffees by <sup>1</sup>H NMR spectrometry [J]. Talanta, 2010, 81(1):367-371.

[51] Ky C L, Louarn J, Dussert S, *et al.* Caffeine, trigonelline, chlorogenic acids and sucrose diversity in wild Coffee arabica and canephora accessions [J]. Food Chemistry, 2001, 75(2):223-230.

[52] Moreira A S P, Coimbra M A, Nunes F M, *et al.* Roasting-induced changes in arabinotriose, a model of coffee arabinogalactan side chains [J]. Food chemistry, 2013, 138(4):2291-2299.

[53] Ginz M, Balzer H H, Bradbury A G W, *et al.* Formation of aliphatic acids by carbohydrate degradation during roasting of coffee [J]. European Food Research and Technology, 2000, 211(6):404-410.

[54] Bähre F, Maier H G. Electrophoretic clean-up of organic acids from coffee for the GC/MS analysis [J]. Fresenius' journal of analytical chemistry, 1996, 355(2):190-193.

## 《食品工业科技》扩增审稿专家的通知

首先感谢广大读者和作者对《食品工业科技》杂志的支持与帮助。

近年来《食品工业科技》杂志投稿量大幅增加,并且由于食品科学稿件覆盖面广,交叉学科多,现有审稿专家很难满足读者希望稿件及时审回的要求。为了进一步缩短审稿时间,及时发布稿件评审情况,本刊拟增加审稿专家,希望得到相关领域专业人士的支持。

审稿专家需同时符合以下基本条件:

- 1、食品、生物、营养、化学、分析检测及相关专业。
- 2、具有较高的专业英文水平。
- 3、高级职称。
- 4、以第一作者或通讯作者在中文核心期刊发表论文5篇以上。
- 5、能及时将稿件审回。

请有意者提供真实姓名、出生年、职称、学历、单位、联系电话、电子信箱、详细通信地址及自己最擅长的研究方向,并列举五篇最能体现您学术水平的论文。

以上信息发送至 food100419@163.com。

收到您提交的信息后,杂志社组织遴选,对入选的审稿专家,我们会给您发送采编平台专家审稿区的用户名和密码。编辑部会根据您的研究方向提交送审稿件,审稿方式为登陆我刊网站在线审稿。编辑部会定期按审稿数量和我刊审稿费标准邮寄审稿稿酬。

谢谢支持!

《食品工业科技》杂志社