

咖啡豆的化学之旅

何绮婷*

南方科技大学化学系, 广东 深圳 518055

摘要: 咖啡豆烘焙的方法由也门的阿拉伯人发明, 随后他们将该方法传到埃及与土耳其, 最后传至全世界。本文从化学的角度认识咖啡豆, 围绕以下几方面内容进行详细介绍: 阿拉比卡和罗布斯塔两种咖啡豆品种的鉴定、咖啡烘焙过程中的化学过程以及咖啡豆的孔隙结构。

关键词: 咖啡与化学; 咖啡烘焙; 咖啡豆

中图分类号: G64; O6

The Chemical Journey of Coffee Beans

Qiting He *

Department of Chemistry, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, Guangdong Province, China.

Abstract: The method of roasting coffee beans was invented by the Arabs of Yemen, who then spread the method to Egypt and Turkey, and finally worldwide. This paper provides a detailed understanding of coffee beans from a chemical perspective, including discussions on identification of two coffee bean varieties—Arabica and Robusta, the chemical process of coffee roasting, and the pore structure of coffee beans.

Key Words: Coffee and chemistry; Coffee roasting; Coffee bean

1 引言

咖啡具有提神功效和社交作用, 喝咖啡逐渐成为了社交待客的一种生活方式, 咖啡馆也成为了创作交流和传播思想的场所。2020年诺贝尔化学奖得主Emmanuelle Charpentier与Jennifer Doudna两位科学家于2011年在波多黎各咖啡馆首次相见, 在头脑风暴中刺激了灵感的诞生, 经过大量的实验失败之后, 她们的团队终于开发出了一种用于基因编辑技术的方法^[1]。由此可见, 在咖啡馆中的思想交流偶然间促进了人类的进步。

在咖啡馆里常说的“单品咖啡”是由地理位置决定、包含单一品种的咖啡, 这种咖啡通常具有独特的风味, 这些风味来自于其生长环境中的不同因素, 比如海拔、气候、土壤等。所谓的“咖啡地带”位于南北回归线之间, 该生长地区提供适度的日照和雨量, 温度稳定在20 °C左右, 土壤肥沃多孔。咖啡树原产于非洲亚热带地区以及亚洲南部的一些岛屿, 后来从非洲出口至世界各国。位于东非高原的埃塞俄比亚所处的这片沃土是人类文明的起源地之一, 也是咖啡的发源地, 因其具有特殊的地质学、微气候学和生物学等特征, 土壤所含元素非常丰富, 拥有世界上遗传多样性最丰富的咖啡植物。而位于阿拉伯半岛西南端的也门具有延绵的高原地带, 根据历史的记载, 人们在此地对咖啡植物进行广泛培育种植, 在也门渐渐出现了世界上第一个咖啡交易市场和第一个咖啡种植园。

收稿: 2022-10-26; 录用: 2022-12-19; 网络发表: 2023-01-13

*通讯作者, Email: heqt@sustech.edu.cn

基金资助: 南方科技大学高等教育教学改革项目(Y01211823)

在15世纪以前,咖啡长期被阿拉伯世界所垄断,被欧洲人称为“阿拉伯咖啡”(Arabian/Arabic coffee)。最初,主要的贸易方式依靠骆驼陆运。再后来,日渐繁荣的咖啡贸易在红海沿岸的也门摩卡港实现了水运。咖啡豆烘焙的方法由也门的阿拉伯人发明,随后传到埃及与土耳其。16世纪咖啡豆从阿拉伯半岛运到小亚细亚,进入奥斯曼帝国,叙利亚的两兄弟在君士坦丁堡(现土耳其伊斯坦布尔)开了第一家咖啡馆,之后咖啡文化逐渐传至全世界。截至目前,世界主要的咖啡产地分布在巴西、越南、哥伦比亚、印度尼西亚、埃塞俄比亚、洪都拉斯、印度、墨西哥、秘鲁和乌干达等地区。

三种原产于非洲热带地区的咖啡树品种(*Coffea species*):阿拉比卡(*C. arabica*, Arabica)、罗布斯塔(*C. canephora*, Robusta)和利比里亚(*C. liberica*, Liberian, 产量占比1%–5%)已成功用于商业种植。在咖啡馆中常见的咖啡豆品种是阿拉比卡和罗布斯塔,它们具有各自独特的品质和用途,其常见的差异与风味特征、生长条件有关,导致了它们明显的价格差异。这两种咖啡豆品种有什么区别呢?如何鉴别呢?在烘焙过程中咖啡豆发生了哪些化学变化呢?让我们开启这趟“咖啡豆的化学之旅”!本文将重点介绍如何通过化学方法鉴别阿拉比卡和罗布斯塔两种咖啡,以及咖啡豆在烘焙过程中涉及的化学反应。

2 阿拉比卡咖啡和罗布斯塔咖啡

阿拉比卡咖啡(又称小果咖啡)原产于东非大裂谷的埃塞俄比亚高原地区。自从咖啡豆在阿拉伯地区被冲泡成美味的饮料,这种具有异域风情的咖啡文化渐渐地被传至其他地区。1753年,植物学家卡尔·林奈(Carolus Linnaeus)误以为该咖啡品种源自中东阿拉伯地区而赋予学名“*Coffea arabica* L.”,翻译成中文即“阿拉比卡咖啡”。目前阿拉比卡咖啡豆的主要产地分布在巴西、哥伦比亚、肯尼亚、埃塞俄比亚、危地马拉、也门等地区。阿拉比卡树木容易受到害虫的伤害和咖啡锈病的影响,通常在高海拔地区(600–2200米)的山坡上生长。为了获得好的收成,它们需要一个稳定的气候,对生长环境要求特别高。位于也门境内阿拉伯高原的塞拉特山脉被火山岩覆盖,火山土壤的黏土富含水分,其火山灰和熔岩石提供了丰富的磷元素^[2],能产出香气较好的阿拉比卡咖啡品种,因此也门出产的咖啡闻名至今。由此可见,土壤元素的组分构成非常重要,还可以弥补生长条件中海拔高度的不足,比如在海拔500–800米生长的夏威夷科纳(Hawaii Kona)是品种较好的阿拉比卡咖啡。

19世纪末,罗布斯塔咖啡(又称中果咖啡)被发现于非洲大陆西岸的热带丛林里。该咖啡品种得名于“Robust”具有的坚韧本性,它能够在“咖啡地带”的低海拔地区(0–800米)和多样化的气候中生长,可以适应更高的温度、更多的阳光直射和更恶劣的气候变化,使其成为一种更具弹性和“健壮”的咖啡。目前罗布斯塔咖啡豆的主要产地分布在印度尼西亚、印度和越南等地。与阿拉比卡咖啡相比,罗布斯塔咖啡抗病害能力更强,具有更多的抗氧化剂,更不容易受感染,风味更加强烈,具有约两倍的咖啡因含量。它呈现出与众不同的泥土香味是由于其更高的吡嗪类物质(比如甲基吡嗪和二甲基吡嗪)含量,苦味显得更加浓郁。

阿拉比卡咖啡和罗布斯塔咖啡生长所需的气候条件截然不同。此外,与罗布斯塔树木相比,阿拉比卡树木的生长速度更慢,咖啡树结出的果实咖啡樱桃(Coffee cherry)成熟需要更长的时间。阿拉比卡生豆尺寸较大、较长,而罗布斯塔生豆尺寸较小、呈圆形。相较而言,阿拉比卡咖啡种植过程更加困难,其具有的特殊香气使得其被选用来制作价格较高的单品咖啡。与之相反,罗布斯塔咖啡通常被选用来制作价格较低的速溶咖啡。

那么,如何通过化学方法来鉴别阿拉比卡和罗布斯塔这两种咖啡豆品种呢?意大利帕多瓦大学Stefano Mammi团队使用核磁共振碳谱(¹³C NMR)法和高效液相色谱(HPLC)法对咖啡生豆咖啡油中的咖啡醇(Cafestol, C₂₀H₂₈O₃, 图1左)和咖啡豆醇(Kahweol, C₂₀H₂₆O₃, 图1右)进行定性和定量分析^[3]。咖啡油(Coffee oil)是一种通过有机溶剂萃取、从咖啡豆中提取得到的脂质部分。咖啡醇是从咖啡油的不可皂化部分中获得的,它是一种使咖啡产生略微油性和苦味的物质,具有强烈的气味。

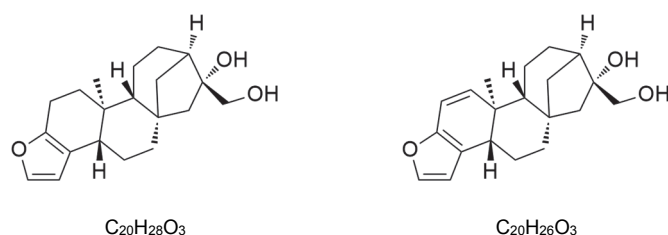


图1 咖啡醇(左)和咖啡豆醇(右)

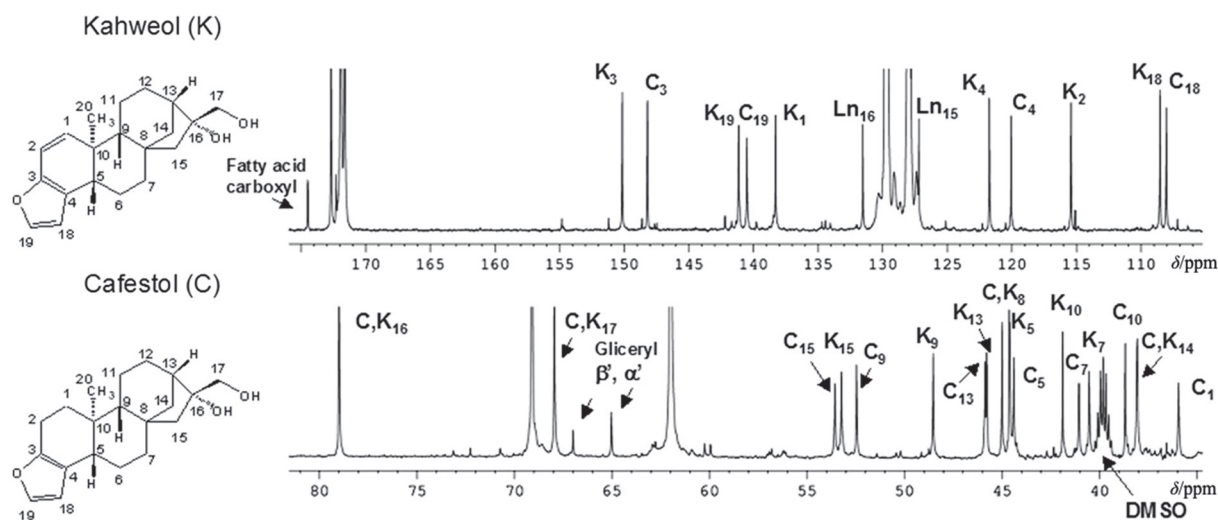
由表1中的数据对比可发现：阿拉比卡和罗布斯塔这两种咖啡豆品种均含有咖啡醇，但后者的咖啡醇含量相对较少；阿拉比卡咖啡具有较高浓度的咖啡豆醇，而罗布斯塔咖啡中咖啡豆醇的含量却非常低。由图1可知，咖啡醇和咖啡豆醇的化学结构非常相似，分子式中均含有20个碳原子，属于呋喃二萜类化合物，但由阿拉比卡生豆提取的咖啡醇和咖啡豆醇的核磁共振碳谱结果表明这两种结构中碳原子的化学位移峰位置存在着明显差异(图2)。

咖啡醇和咖啡豆醇都具有抗氧化、消炎的特性以及血管生成抑制剂、凋亡诱导剂和抗肿瘤药的作用，除此之外，咖啡醇还具有降血糖的作用。与咖啡醇不同，咖啡豆醇很难被分离进行研究。采用DIN 10779-HPLC法分析可知：虽然罗布斯塔咖啡中咖啡豆醇的含量很低，但其咖啡油中含有另一种化学物质16-O-甲基咖啡醇(16-O-Methylcafestol, $C_{21}H_{30}O_3$)，而阿拉比卡咖啡中不含该物质(表1)。

表1 ^{13}C NMR测定生豆咖啡油中的微量成分(使用DIN^{*}法测定二萜类化合物)^[3]

品种	产地	咖啡豆醇(Kahweol)		咖啡醇(Cafestol)		16-O-甲基咖啡醇(16-O-Methylcafestol)	
		DIN (g/kg oil)	NMR (g/kg oil)	DIN (g/kg oil)	NMR (g/kg oil)	DIN (g/kg oil)	NMR (g/kg oil)
阿拉比卡	巴西	26.9	29.5	35.3	28.9	0	0
	肯尼亚	17.8	24.8	28.6	28.7	0	0
	哥伦比亚	10.0	25.6	17.7	28.4	0	0
	危地马拉	36.3	28.8	57.0	32.9	0	0
罗布斯塔	印度	0.4	0.5	8.8	14.6	6.0	9.1

^{*}DIN 10779: 咖啡和咖啡产品的分析——烘焙咖啡豆中16-O-甲基咖啡醇含量的测定——HPLC法(德国标准化学会, 柏林, 1999)

图2 阿拉比卡生豆中咖啡豆醇(K)和咖啡醇(C)的 ^{13}C NMR谱^[3]

DMSO- d_6 , 含Ln: 亚麻酸

此外, 可以通过核磁共振氢谱(^1H NMR)法对两种生豆咖啡油进行对比分析, 在图3中可发现罗布斯塔样品中归属于咖啡豆醇(K)的信号谱峰几乎消失, 而在 δ 3.13处的甲基特征信号峰表明存在16-O-甲基咖啡醇, 这是一种典型的化学标记法(Chemical labeling)应用。因此, 根据对16-O-甲基咖啡醇的化学分析测定, 可以检测高价格的阿拉比卡咖啡产品中是否混入了低价格的罗布斯塔咖啡。

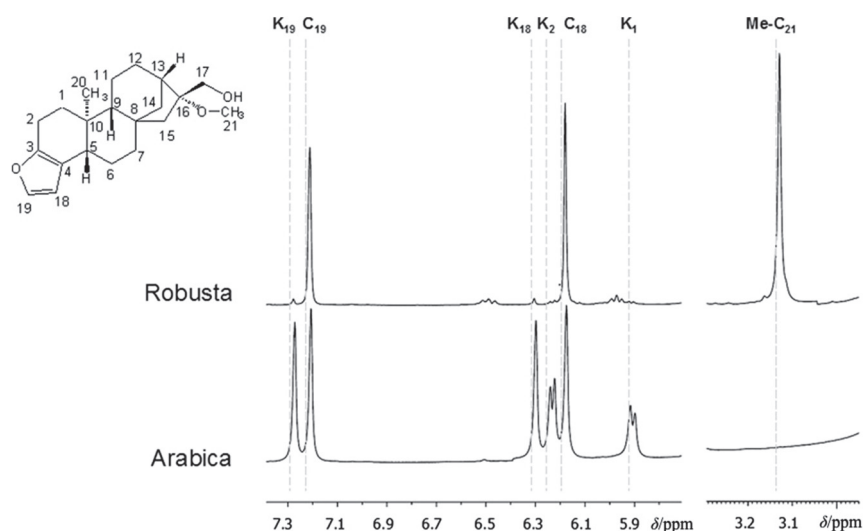


图3 罗布斯塔和阿拉比卡生豆在 ^1H NMR谱中的部分二萜信号峰^[3]

CDCl_3 , 图中结构为16-O-甲基咖啡醇

3 咖啡烘焙的化学之旅

咖啡的好坏, 全在火候和等待的时间。时候不到, 太嫩发酸; 火候过了, 老了没味道。烘焙的目的在于开发咖啡的风味和香气, 在咖啡的苦涩和酸涩之间建立平衡, 为不同品种的咖啡找到其风味的特性。烘焙既是物理过程, 也是化学过程, 可改变咖啡豆的颜色、大小和形状, 咖啡豆变大, 重量减少。如图4中所示, 咖啡豆在烘焙过程中的颜色从蓝绿灰色变成浅米色, 最后是泛着珠光的棕色。咖啡豆在烘焙过程中究竟发生了哪些化学变化呢?



图4 咖啡豆在烘焙过程中的颜色变化

电子版为彩图

将咖啡生豆加热至高温, 凸显出咖啡中的天然风味。在表2中总结了咖啡烘焙过程中的主要现象, 随着温度的缓慢升高, 咖啡豆的水分逐渐蒸发, 呈现出黄色。紧接着是一爆至二爆等变色过程, 咖啡豆颜色由浅褐色逐渐变成中-深褐色。热量是咖啡烘焙的基本元素, 随着温度的不断升高, 引起了一系列剧烈的化学变化, 包括热解、氧化、还原、水解、聚合和脱羧等化学反应: 糖分变成了焦糖; 氨基酸降解, 生成了不同种类的嘌呤和吡嗪类化合物; 芳香化合物、酸和其他风味成分被生成、平衡或改变, 增添了咖啡的风味(Flavor)、酸度(Acidity)、余韵(Aftertaste)和醇度(Body)。在图5中列出了咖啡豆烘焙过程中常见的7种风味化合物: 乳酸(Lactic acid)、苹果酸(Malic acid)、柠檬酸(Citric acid)、奎尼酸(Quinic acid)、绿原酸(Chlorogenic acid)、咖啡因(Caffeine)和丁香酚(Eugenol)。

表2 咖啡烘焙过程中的现象

烘焙过程	现象	咖啡豆颜色
缓慢升温		
首次变色	水分蒸发	黄色
一爆	吸热反应：糖分开始发生焦糖化	浅褐色
快速二次变色	快速释放油脂	中褐色
二爆	放热反应	中-深褐色
停止烘焙	用新鲜的冷空气冷却或喷水	
烘焙后脱气	咖啡研磨前释放二氧化碳	

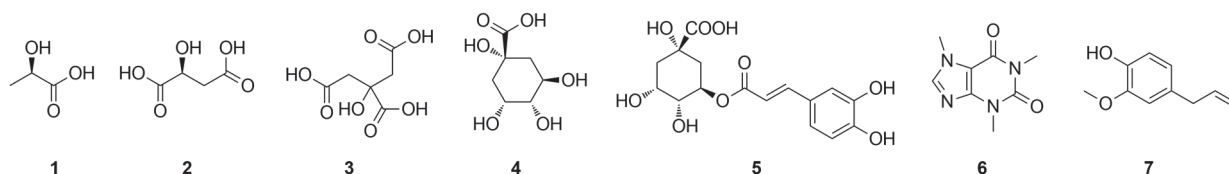


图5 咖啡豆烘焙过程中常见的7种风味化合物

1. 乳酸($C_3H_6O_3$); 2. 苹果酸($C_4H_6O_5$); 3. 柠檬酸($C_6H_8O_7$); 4. 奎尼酸($C_7H_{12}O_6$);
5. 绿原酸($C_{16}H_{18}O_9$); 6. 咖啡因($C_8H_{10}N_4O_2$); 7. 丁香酚($C_{10}H_{12}O_2$)

美国精品咖啡协会(SCAA)以焦糖化数值(Agtron number)来判定烘焙度：数值越高，表示焦糖化越低，烘焙度越浅；数值越低，表示焦糖化越深，烘焙度越深(图6)。咖啡豆表皮呈现出的深色与咖啡豆中蔗糖的焦糖化有直接关系。然而，未焦糖化的糖更甜。因此，为了最大限度地提高甜度，尽量减少蔗糖的焦糖化，但又不能烤得太浅，否则苦味化合物不能进行热降解。咖啡烘焙师大多选择在一爆结束和二爆不到一半时就停止烘焙，不会烘到二爆过程的一半以上，以防咖啡豆中的油脂冲破表皮。

咖啡豆完整的表皮可以将内部的风味物质在烘焙结束后仍保留在内部，减少它们因外溢而失去这些特殊的风味。浅焙咖啡豆可保留咖啡豆原有的更多风味，突出了花香和柑橘香气。随着咖啡烘焙得越深，这些微妙的味道可能会被更多的巧克力味和坚果味所覆盖。如果咖啡烘焙得特别深，就会令人口感变得非常苦涩。为了尽可能减少风味的流失，尽可能地留住咖啡采摘那一刻的原味，对于单品咖啡来说，最好选择浅度烘焙，因为深度烘焙会盖掉一些味道。



图6 以焦糖化数值来判定烘焙度

电子版为彩图

此外, 咖啡豆在烘焙过程中的色素生成(Pigment production)主要涉及以下三类反应: 美拉德反应、焦糖化反应和氧化反应。

3.1 美拉德反应

美拉德反应(Maillard reaction), 又称羰氨反应(Amino-carbonyl reaction), 是广泛分布于食品工业的非酶促褐变反应(Non-enzymatic browning), 如常见的煎牛排、煎饺、烘焙咖啡豆、烘烤饼干、烘烤面包、烤棉花糖等过程。在咖啡豆烘焙过程中, 美拉德反应通常快速在约140–170 °C开始进行, 之后在较高的温度下, 焦糖化反应(170–200 °C)和随后的裂解(~220 °C)变得更加明显。

美拉德反应让咖啡豆变成棕色, 还原糖类的羰基与氨基酸、蛋白质的氨基经过一系列复杂反应, 最终生成棕黑色的大分子物质类黑素(Melanoidin), 并产生除了甜味以外更可口的鲜味^[4]。在此过程中产生了数百上千种不同的风味化合物, 包括还原酮、醛和杂环化合物, 体现出宜人可口的风味和诱人的色泽。然而, 高温亦有利于形成一种称为丙烯酰胺(Acrylamide)的可能致癌物。在图7中, Mottram等人推测了美拉德反应产物经由史崔克降解(Strecker degradation)最终形成丙烯酰胺的可能途径^[5]。

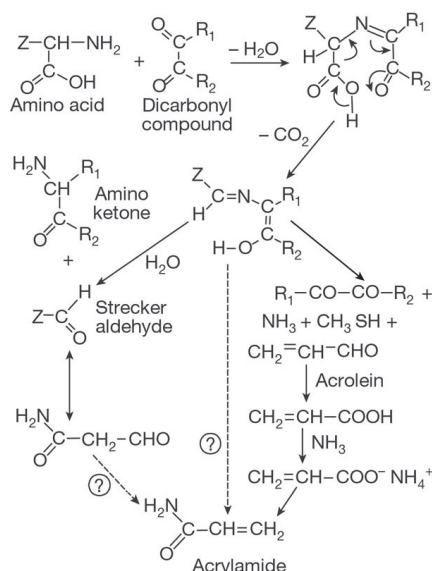


图7 形成丙烯酰胺的可能途径^[5]

1912年, 法国化学家路易斯·卡米拉·美拉德(Louis Camille Maillard, 1878–1936)发表了一篇论文, 描述了在高温下氨基酸与糖之间的反应^[6]。1953年, 非裔美国化学家约翰·爱德华·霍奇(John Edward Hodge, 1914–1996)将这个反应正式命名为“美拉德反应”^[7], 为其建立了一套反应机制。

根据Hodge模型, 美拉德反应分为三个阶段: (1) 糖的羰基与蛋白质或氨基酸的氨基反应, 生成水和不稳定的糖胺(Glycosylamine); (2) 糖胺异构化成席夫碱, 转化成亚胺正离子、烯胺醇等构型, 经过Amadori重排反应(图8), 最后产生一系列氨基酮糖(Aminoketose)化合物; (3) 当氨基酮糖化合物经历进一步的重排、转化、加成和聚合反应时, 产生许多具有不同风味、香气和颜色的小分子化合物(如吡嗪、吡啶、吡咯、呋喃类化合物等)。

3.2 焦糖化反应

焦糖化反应(Caramelization)发生在比美拉德反应更高的温度下, 一般从170 °C开始。与美拉德反应一样, 焦糖化也是一种非酶促褐变反应。但与美拉德反应不同的是, 焦糖化是热解反应, 而不是与氨基酸的反应, 反应物仅涉及糖分子, 比如二糖蔗糖在焦糖化时被分解成单糖——果糖和葡萄糖。

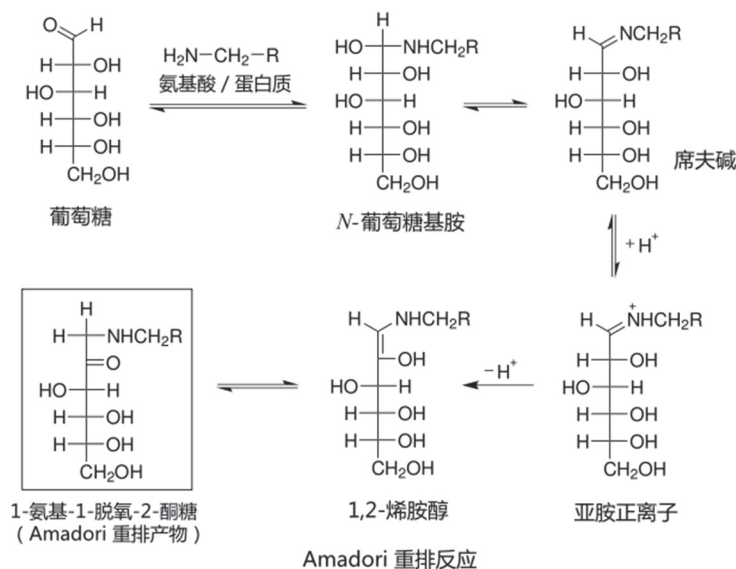


图8 美拉德反应机制中的Amadori重排反应

焦糖化是糖的褐色化过程，广泛用于烹饪，在此过程中获得的棕色源于糖的三组脱水聚合产物：焦糖酐(Caramelans, $\text{C}_{24}\text{H}_{36}\text{O}_{18}$)、焦糖烯(Caramelens, $\text{C}_{36}\text{H}_{50}\text{O}_{25}$)和焦糖素(Caramelins, $\text{C}_{125}\text{H}_{188}\text{O}_{80}$)。

此外，在咖啡豆烘焙的焦糖化过程中，更多具有挥发性的醛酮类小分子化合物被热解释放出来，比如2,3-丁二酮(2,3-butanedione, Diacetyl)常被认为是具有特殊奶油香味的风味化合物，而呋喃酮(Furaneol)贡献出了特殊的焦糖味。焦糖化反应实则降低了食物的甜度，却增加了风味的复杂性。

3.3 氧化反应

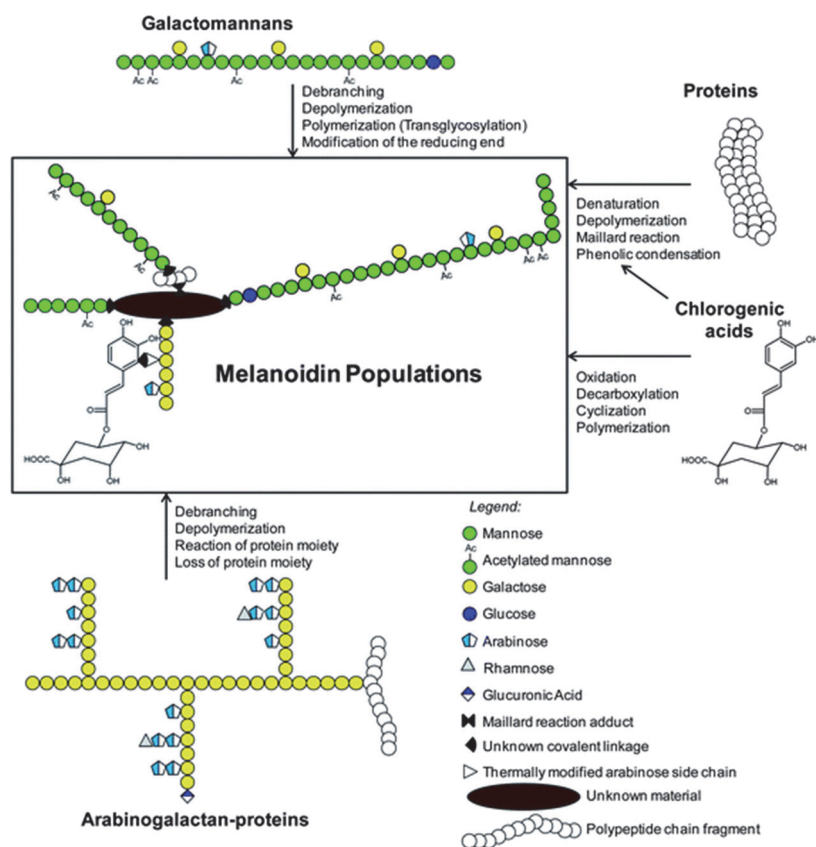
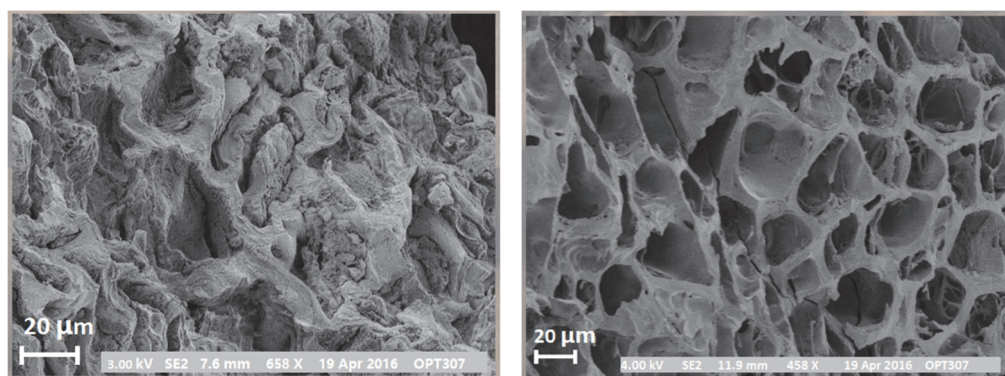
氧化反应是食品组分发生酶促或非酶促褐变的原因之一。在焦糖色素生产过程中，美拉德反应和焦糖化反应的产物可能相互作用发生氧化反应生成大型分子，从而提高了产物的着色力，反应过度则会生成黑褐色树脂状的高分子化合物类黑素(Melanoidin)，降低了产品的质量^[8]。

Nunes和Coimbra等人认为多糖、蛋白质和绿原酸(酚类化合物)参与了咖啡类黑素的形成(图9)，推测该过程中包含了可能发生的半乳甘露聚糖(Galactomannan)聚合反应，并在咖啡类黑素结构分析中鉴定出了美拉德反应产物的结构部分^[4]。但咖啡类黑素形成的确切机制以及多糖、蛋白质和绿原酸之间的连接方式仍不清楚，关于咖啡类黑素的结构表征在未来仍然是一个重要的研究课题。

4 咖啡豆的孔隙结构

在咖啡豆烘焙过程中，豆内的物质成分参与了各类化学反应，除此之外，咖啡豆还会失去水分。水的蒸发造成咖啡豆内部压力的增强和气体的逸出，因此改变了咖啡豆的体积，而咖啡豆的孔隙结构也会发生相应的物理变化。罗切斯特大学化学系Rebeckah Burkes在“Coffee Beans”(咖啡豆)一文中介绍了咖啡生豆和咖啡熟豆的孔隙结构区别^[9]，通过扫描电子显微镜照片对比发现：咖啡生豆的结构非常紧密结实，不见孔隙；相比之下，咖啡熟豆的密度显著降低，具有明显的网状孔隙结构(图10)。

热风烘焙咖啡豆不仅可以形成颜色和风味化合物，还会导致咖啡豆微观结构的完全改变。Escher团队使用体积法、水银孔隙率测定法(Mercury porosimetry)和电子显微镜技术来研究咖啡豆在不同烘焙条件下得到的产品的结构特性。该团队研究发现烘焙条件对微观结构有着较大的影响：与低温烘焙的咖啡豆相比，高温烘焙的咖啡豆具有更大的豆体积和孔体积，在细胞壁中具有更大的微孔，较大的微孔可以促进更快的脱气^[10]。

图9 咖啡类黑素形成示意图^[4,8]图10 咖啡生豆(左)和咖啡熟豆(右)的孔隙结构对比图^[9]

咖啡豆的孔隙结构深受烘焙过程和条件的影响。烘焙过程中使用热空气可以影响孔隙结构，进而影响咖啡豆内的传质过程。在进行手冲咖啡操作时，使用热水冲泡经研磨得颗粒尺寸合适的咖啡粉，可观察到研磨后的咖啡豆经历冲泡时明显的迅速释放二氧化碳的脱气过程。这些二氧化碳产生于烘焙过程中二爆前的裂解过程，它们被暂时“储存”在了咖啡豆内部的孔隙结构中。

5 结语

曾有典故：“欧洲人挡得住土耳其人的弓箭，却挡不住土耳其咖啡^[11]。”这足以说明这种提神醒脑、补充精力的咖啡饮料在世界各地的传播效果非凡，具有特殊的奇妙魅力。不管是1836年丹麦商人在广州(今十三行)开设了没有华人敢光顾的中国第一家咖啡馆，还是1905年法国人在蒙自开设

的云南最早的咖啡吧“滇越铁路酒吧间”，亦或是战争后期在上海租界开设的咖啡馆带动了新的潮流，咖啡文化无疑逐渐渗透在了当时和当今国内“弄潮儿”的生活当中。咖啡成为了人们思维交流的触发器和加速器，咖啡馆变成了思想碰撞的交流场所。

南方科技大学“化学与生活”科普专栏《咖啡×化学》系列科普视频发布在化学系微信公众号、知乎(Dr.HO)和B站(Dr_HO)等平台，化学知识点专业性较高，视频画面素材精美，具有独特的艺术审美风格，深受广大观众的喜爱。将咖啡化学融入“化学与探索”全校公选课中，介绍咖啡文化、咖啡豆烘焙及冲煮过程中的化学原理，学生在课堂上不仅能品尝咖啡的不同风味，还能了解手冲咖啡和意式浓缩中的操作细节和化学知识点。第一集视频《咖啡豆的化学之旅》^[12]以地点“串联”的模式浅述咖啡的文化历史发展，从化学的角度认识咖啡豆。本文重点介绍了如何鉴别阿拉比卡和罗布斯塔两种咖啡、咖啡豆在烘焙过程中涉及的化学反应以及咖啡豆的孔隙结构，给咖啡烘焙者提供了化学指南。

参 考 文 献

- [1] The Nobel Prize in Chemistry 2020. [2020-10-07]. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2020/summary/>
- [2] 格洛丽亚·蒙特内格罗, 克里斯蒂娜·希鲁兹. 咖啡简史: 一本美妙的咖啡终极指南. 谢巧娟, 译. 苏州: 古吴轩出版社, 2020: 9.
- [3] D'amelio, N.; De Angelis, E.; Navarini, L.; Schievano, E.; Mammi, S. *Talanta* **2013**, *110*, 118.
- [4] Moreira, A. S.; Nunes, F. M.; Domingues, M. R.; Coimbra, M. A. *Food Funct.* **2012**, *3* (9), 903.
- [5] Mottram, D. S.; Wedzicha, B. L.; Dodson, A. T. *Nature* **2002**, *419*, 448.
- [6] Maillard, L. C. *Compt. Rend.* **1912**, *154*, 66.
- [7] Hodge, J. E. *J. Agric. Food Chem.* **1953**, *1*, 928.
- [8] Nunes, F. M.; Coimbra, M. A. *Phytochem. Rev.* **2010**, *9*, 171.
- [9] Burkez, R. Coffee Beans. University of Rochester. [2018-11-27]. <http://www2.optics.rochester.edu/workgroups/cml/opt307/spr16/beckah>
- [10] Schenker, S.; Handschin, S.; Frey, B.; Perren, R.; Escher, F. J. *Food Sci.* **2000**, *65* (3), 452.
- [11] 黄蜀云. 咖啡云南. 昆明: 云南人民出版社, 2009: 139.
- [12] 南科大化学系科普专栏《化学与生活》| 第五期 咖啡豆的化学之旅. [2021-05-28]. <https://mp.weixin.qq.com/s/ECitmk8BghXeJLFZ9pR6pQ>