

萃取温度对咖啡液风味的影响

封华明^{1,2,3}, 宋佳慧^{1,2,3}, 李国华^{1,4}, 丁胜⁴, 田福⁴, 夏熠珣^{1,2,3}, 钟芳^{1,2,3*}

¹ 江南大学食品学院 江苏无锡 214122

² 江南大学 未来食品科学中心 江苏无锡 214122

³ 中国轻工业食品感官科学与技术重点实验室 江苏无锡 214122

⁴ 上海康识食品科技有限公司 上海 201103)

摘要 本研究旨在探讨不同萃取温度对咖啡液中化学成分及风味特性的影响,以优化常压萃取工艺并提升咖啡风味品质。调整萃取温度(55~95℃),分析不同烘焙度(浅烘焙度、中烘焙度、深烘焙度)咖啡的挥发性与非挥发性物质以及感官特性,研究温度对其化学成分和风味形成的影响。采用气相色谱-质谱(GC-MS)和高效液相色谱(HPLC)技术定量分析咖啡液中的化学成分,并结合描述性感官评价方法系统评估感官风味特征。结果显示,萃取温度对挥发性物质的释放和非挥发性成分的溶解均有显著影响($P<0.05$)。高温萃取(95℃和85℃)增强了咖啡液的萃取率($>22%$)及苦涩感,而低温条件下酸味及焦糖味更加突出。感官评价结合定量分析结果表明,高温萃取提升了物质的提取效率,然而会损失部分香气化合物,低温萃取可以保留更多的关键香气成分。不同烘焙度的咖啡在不同萃取温度下的化学成分与感官特性存在显著差异;高温更适合深烘焙样品的全面提取,而低温萃取对浅、中烘焙咖啡的香气保留具有优势。本研究为咖啡萃取工艺的优化提供了理论支持,未来将结合其它变量(如压力、萃取时间)进行多维研究,以全面揭示咖啡风味的形成机制及调控策略。

关键词 萃取温度;咖啡风味;挥发性化合物;描述性分析

文章编号 1009-7848(2026)01-0200-14 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2026.01.018

咖啡以丰富、复杂的风味和多样化的化学成分而备受关注。其感官特性来源于挥发性和非挥发性物质的相互作用,包括醇类、酯类等挥发性化合物赋予的香气,以及有机酸、咖啡因等非挥发性化合物决定的酸、苦等味觉平衡。咖啡风味不仅与咖啡豆的品种^[1]、处理方式^[2-3]、烘焙方式^[4-5]密切相关,还受萃取条件的显著影响,而萃取温度被认为是决定化学成分提取效率与风味形成的关键因素之一^[6]。

有研究表明,热萃取与冷萃取对咖啡液中挥发性化合物的提取效果差异显著^[7-8]。热萃取能显著提高各类成分的溶解效率^[9],然而高温易导致挥发性化合物逸散或降解^[10-11]。相较之下,冷萃取通过较缓慢的提取过程或超声等物理辅助技术,保留了更多易损的香气化合物^[12]。目前,这些方面的研究多集中于特定条件,未能全面揭示不同萃取温度对化学成分动态变化的影响机制。此外,意式萃取通常依赖高压条件,而冷萃取强调设备辅助,

两者的试验结果均难以单独、系统地反映温度对咖啡风味的影响。

基于上述研究现状及存在问题,本研究提出假设:在常压条件下,通过调控萃取温度,可以平衡咖啡液化学成分的提取与保留效率。为验证这一假设,本研究采用化学分析与感官评价相结合的方法,系统考察萃取温度对咖啡滋味和气味成分提取效率的影响,并探讨分子间相互作用对风味特性的协同效应。研究结果将为优化咖啡萃取工艺提供科学依据,同时为提升其风味品质提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

咖啡因(1000 mg/L溶于甲醇)、绿原酸(HPLC, $\geq 98%$)、葫芦巴碱(HPLC, $\geq 98%$)、苹果酸($\geq 98%$)、柠檬酸($\geq 98%$)、乳酸($\geq 98%$)、丁二酸($\geq 99.5%$)、酒石酸($\geq 99%$),上海创赛科学仪器有限公司。

1.2 仪器与设备

SPER JOLLY Electronic 咖啡豆研磨机,意大

收稿日期: 2025-01-10

第一作者: 封华明,男,硕士

通信作者: 钟芳 E-mail: fzhong@jiangnan.edu.cn

利 Mazzer 公司; T5 电位滴定仪、ME104E 电子天平, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司; A560 型双光束紫外可见分光光度计, 翱艺仪器(上海)有限公司; 便携式数显糖度计 PAL-1, 日本 Atago 公司; ICA-3M 冷水机, 上海 Kansa Refrigeration 公司; Waters 2695 高效液相色谱仪, 美国 Waters 公司; Waters XBridge C18 液相色谱柱 (250 mm × 4.6 mm i.d., 5 μm), 美国 Waters 公司; 7890B GC System-5977B GC/MSD 气相色谱-质谱联用仪, 美国安捷伦公司; 50/30 μm DVB/CAR/PDMS、2 cm 萃取纤维头, 美国 Supelco 公司。

1.3 方法

1.3.1 咖啡样品准备 用咖啡豆研磨机将咖啡豆研磨成咖啡粉, 以过筛率控制粒径(60%的颗粒过 8 目筛网, 35%的颗粒过 14 目筛网)。按照 1:11 的粉水质量比, 在不同温度下(95, 85, 75, 65, 55 °C) 保温浸泡 15 min, 然后立刻使用 270 目筛网分离咖啡渣和咖啡液, 将咖啡液迅速冷却至 10 °C。

1.3.2 萃取率测定 使用去离子水调零后, 用滴管吸取 2~3 滴咖啡液滴, 至数显糖度计棱镜表面, 按下 STAR 键开始测量, 得到 Brix°值。同一样品重复测量 3 次。测量 Brix°值后, 采用公式(1)计算萃取率:

$$\text{萃取率}(\%) = \frac{\text{Brix}^\circ \times \text{咖啡液质量}}{\text{咖啡粉质量}} \times 100 \quad (1)$$

1.3.3 pH 值和可滴定酸度测定 准确称量 40 mL 咖啡液于滴定仪配套量杯中, 以 60%转速预搅拌 10 s, 然后由仪器自动滴加 0.1 mol/L 的 NaOH 标准溶液直至样品 pH=8.00, 记录初始 pH 值、NaOH 标准溶液消耗体积。同一样品重复测量 3 次。

1.3.4 类黑素含量测定 取 1 mL 咖啡液用蒸馏水稀释 5 倍, 使用紫外分光光度计, 测量 420 nm 处的吸光度。

1.3.5 有机酸含量的检测 有机酸含量按照《食品安全国家标准 食品有机酸的测定》(GB 5009.157—2016)方法检测。

1.3.6 咖啡因、绿原酸和葫芦巴碱的检测 色谱柱为 Xbridge C18 (4.6 mm×250 mm), 柱温为 25 °C。紫外检测器检测波长; 葫芦巴碱 256 nm; 咖啡因 276 nm; 绿原酸 320 nm。A 相为 1%磷酸水, B

相为甲醇。等度洗脱: 88% A, 12% B; 流速为 1.0 mL/min, 进样量 10 μL。

1.3.7 挥发性成分检测

1.3.7.1 顶空固相微萃取方法 准确称量 5.00 g 新鲜制备的咖啡, 放入 20 mL 顶空瓶中, 加入 10 μL 质量浓度为 0.01 mg/mL 的邻二氯苯作为内标, 盖上硅胶盖。样品在 45 °C 下保温吸附 45 min。同一样品重复测量 3 次。

1.3.7.2 GC-MS 方法 色谱条件: DB-WAXUI 色谱柱, 以 5 °C/min 的速率升温至 120 °C, 然后以 10 °C/min 的速率升温至 230 °C, 维持 5 min。以高纯氦为载气, 不分流, 流速 0.8 mL/min, 萃取头放入进样口解吸 5 min, 进样口温度 250 °C。

质谱条件: EI 电离源; 离子源温度 280 °C, 传输线温度 280 °C, 电子轰击能量 70 eV, 全扫描模式, 质量范围 33~350。

1.3.8 不同有机酸处理对挥发性成分释放情况的影响 在 55 °C 萃取条件下, 所得样品迅速冷却至 10 °C, 用不同种类有机酸(绿原酸、苹果酸、柠檬酸、乳酸、丁二酸、酒石酸)调节 pH 值至 5.0±0.1, 然后在 95 °C 水浴中继续密封加热 15 min。加热结束后, 将样品迅速冷却至室温(25 °C)并按照 1.3.7 节的方法测量挥发性成分含量。

1.3.9 描述性分析 根据 ISO 8586:2023 标准招募并培训了 12 名感官评价小组成员(9 名女性, 3 名男性, 平均年龄 20 岁), 他们均来自江南大学食品学院。研究获得了江南大学医学伦理委员会的伦理批准(编号: JNU20221201IRB03)。在培训初期, 黑咖啡的感官描述词汇是根据美国精品咖啡协会(SCAA)开发的“咖啡风味轮”确定的。随后, 在初步品尝完每个咖啡样品后, 小组成员重新确定了各种描述词。小组组长对这些描述词进行整理, 删除了多余的主观用语, 并选择频率较高的客观描述词。通过与评估员进行协商一致的讨论, 明确并定义了适合保留的描述词, 并为后续培训确定了参考标样。

在接受 20 次培训后, 小组成员将根据其区分能力、可重复性和小组一致性接受评估。只有在这 3 个方面都达到标准后, 他们才能进行正式的样本测试。小组成员接受了培训, 以评估他们的区分能力、可重复性和一致性。一个由 12 人组成的合

格评估小组采用定量描述性分析方法,使用15点(0~15)量表和定量值估计方法对样品进行评估。在样品评估过程中,用30 mL透明、一次性、无味的品尝杯盛装20 mL黑咖啡。样品通过随机3位数编码后呈递,每个样品均评估2次,以确保所收集感官数据的可靠性。

2 结果与分析

2.1 基础属性

通过调整萃取温度,首先测定了咖啡液的基础理化属性。研究结果(表1)显示,Brix°值和萃取率均随萃取温度的降低显著下降,表明在较高温度下,可溶性物质的提取效率更高^[9]。此外,吸光度

的变化反映了类黑素提取效果受温度影响显著,随着萃取温度的下降,类黑素的含量明显减少。

在酸度相关参数方面,pH值和可滴定酸度的变化趋势一致。萃取温度降低时,pH值显著升高,而可滴定酸度显著下降。然而,pH值的变化幅度较小,在相同烘焙度样品组内,波动范围仅为0.2~0.3。这一现象表明,萃取温度的变化可能导致酸性物质在溶液中的含量和组成发生改变^[13]。

为进一步探讨萃取温度对咖啡液品质的影响,本文对不同萃取条件下的样品进行了描述性感官分析,旨在明确温度变化对咖啡液感官品质的影响。

表1 不同萃取温度所得咖啡的基本属性

Table 1 Basic properties of coffee liquid extracted at different temperatures

咖啡样品	Brix°	萃取率/%	吸光度	pH	消耗标准 NaOH 溶液体积/mL
EL95	2.467 ^c	27.133 ^c	0.941 ^d	4.917 ^a	6.515 ^c
EL85	2.017 ^d	22.183 ^d	0.768 ^c	5.006 ^b	5.419 ^d
EL75	1.800 ^e	19.800 ^e	0.616 ^b	5.061 ^c	5.196 ^c
EL65	1.667 ^b	18.333 ^b	0.574 ^{ab}	5.095 ^d	4.774 ^b
EL55	1.483 ^a	16.317 ^a	0.509 ^a	5.113 ^d	4.120 ^a
EM95	2.400 ^c	26.400 ^c	0.963 ^c	5.070 ^a	5.989 ^c
EM85	2.033 ^d	22.367 ^d	0.819 ^d	5.163 ^b	5.183 ^d
EM75	1.833 ^c	20.167 ^c	0.705 ^c	5.259 ^c	4.597 ^c
EM65	1.700 ^b	18.700 ^b	0.656 ^b	5.281 ^{cd}	4.181 ^b
EM55	1.533 ^a	16.867 ^a	0.562 ^a	5.301 ^d	3.749 ^a
ED95	2.417 ^c	26.583 ^c	1.082 ^d	5.164 ^a	5.648 ^c
ED85	2.233 ^{bc}	24.567 ^{bc}	0.956 ^c	5.270 ^b	5.168 ^d
ED75	2.183 ^{ab}	24.017 ^{ab}	0.908 ^{bc}	5.352 ^c	4.932 ^c
ED65	2.033 ^{ab}	22.367 ^{ab}	0.850 ^{ab}	5.420 ^d	4.265 ^b
ED55	1.983 ^a	21.817 ^a	0.793 ^a	5.478 ^c	3.983 ^a

注:EL、EM、ED分别代表浅烘焙、中烘焙、深烘焙样品;55、65、75、85、95分别代表萃取温度(°C);同一烘焙度样品组中,不同肩标字母表示有显著差异($P<0.05$)。

2.2 描述性分析结果

萃取温度的变化对不同烘焙度咖啡样品的基本滋味强度产生了显著的影响,并呈现出一定的规律性。酸味强度随着萃取温度的降低而显著下降,且不同烘焙度样品间的变化幅度存在显著差异。例如:浅烘焙样品在95 °C萃取时的酸味强度高达8分,而在55 °C时降至3分;中烘焙样品的酸味强度从最高的4.9分降至最低的1.5分;深烘

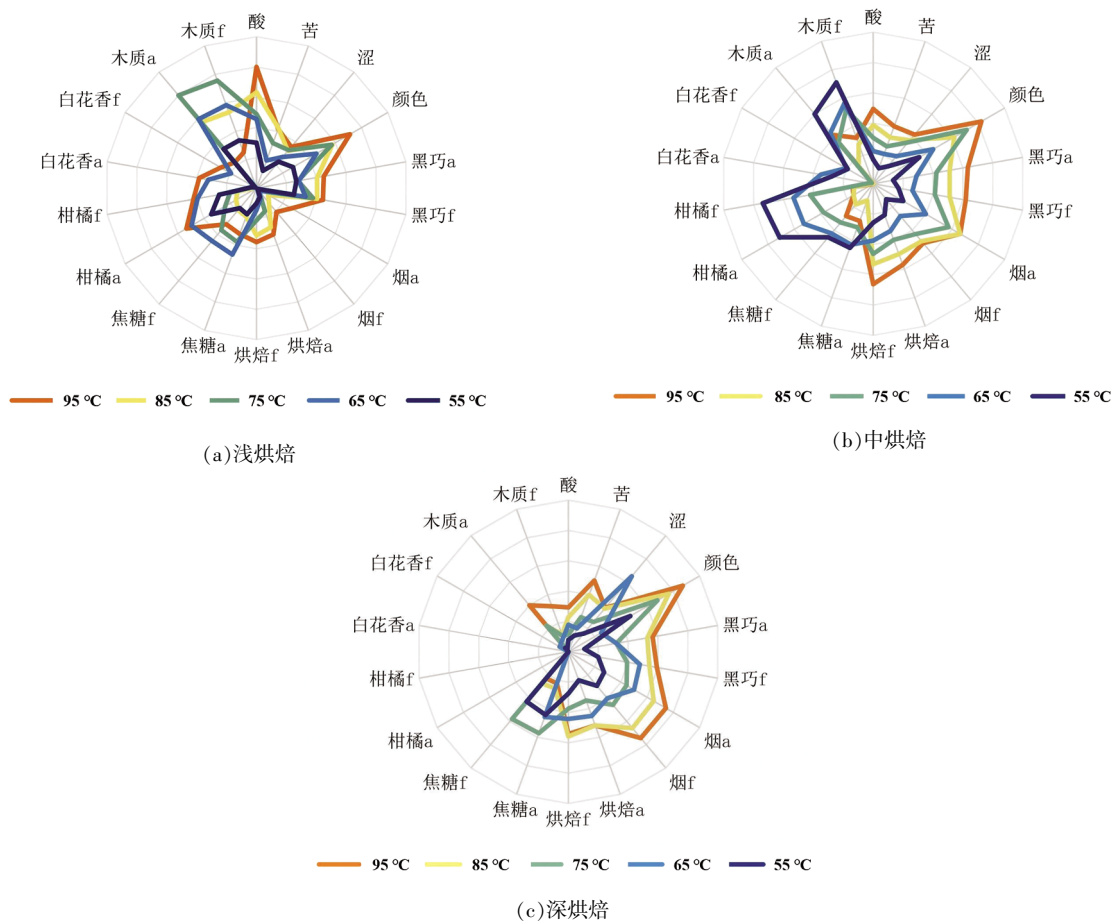
焙样品在高温萃取时,酸味强度为2.9分,而在55 °C萃取时,仅为0.8分,几乎不可感知。

相比之下,涩味和苦味的变化幅度相对较小,且不同烘焙度样品间差异不显著。涩味强度从4~5分左右随温度下降至约1分,苦味强度则由高温萃取时的3.5~4分降至低温时的1.5~2分。

在气味强度方面,萃取温度对不同挥发性香气化合物的影响较为复杂^[14]。烟味、黑巧克力味和

烘焙味的感知强度在高温萃取条件下较高,并随着萃取温度下降逐渐减弱。焦糖味则呈现相反的趋势,在较低温度(55 °C)下,浅烘和中烘焙样品的焦糖味最为显著,而深烘焙样品的焦糖味在 75 °C 时最强。但总体而言,55~75 °C 之间不同烘焙度样品的焦糖味强度差异不显著。

上述风味轮廓变化符合前期关于冷萃和热萃方式造成的感官差异的讨论^[8]。咖啡液的基本滋味主要由非挥发性可溶性物质贡献,而风味则源于挥发性香气化合物^[15-16]。为进一步探讨不同萃取温度对咖啡液感官品质的影响机制,下一步将对这两类关键化学成分进行定性和定量分析。



注:a 表示嗅闻的鼻前香气属性,f 表示通过品尝的鼻后香气属性。

图 1 不同烘焙度咖啡样品感官轮廓

Fig.1 Sensory profile of coffee samples with different roast levels

2.3 不同温度对非挥发性物质的影响

共检测 9 种非挥发性呈味物质的含量(见表 2 和图 2)。结果显示,苹果酸和乳酸的含量最高,不论萃取温度如何变化,在不同样品中的含量均在 1 mg/mL 左右;富马酸的含量最少,含量在 0.01~0.03 mg/mL 范围内。随着萃取温度降低,各物质的含量均显著减少。值得注意的是,在低萃取温度时(55~65 °C),物质的含量变化并不显著。

在不同烘焙度下,可溶性呈味物质受萃取温度的影响程度不同。取最高萃取温度(95 °C)和最低萃取温度(55 °C),检测出的各物质含量变化做对比(表 3),结果显示酒石酸、苹果酸、乳酸、富马酸在浅烘焙咖啡中的变化程度更为剧烈,而柠檬酸、丁二酸则在中烘焙样品中的变化程度更大。葫芦巴碱和咖啡因受温度影响的变化量均小于 20%,咖啡因含量受温度影响的程度随着烘焙度

加深而增强。

下降相同温度梯度时,对比不同温度区间非挥发性物质含量的变化情况。由表4可知,大部分可溶性呈味物质的含量在萃取温度下降到85℃时,减少的幅度最大。酒石酸含量的最大减少量发

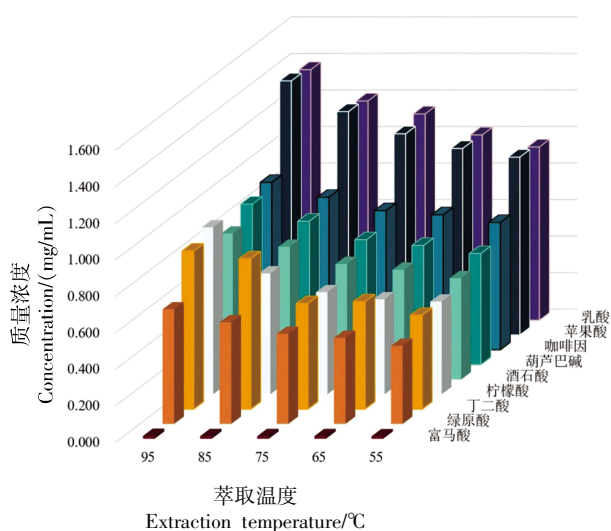
生在从85℃下降到75℃的过程中,而乳酸和丁二酸的减少峰值则出现在从75℃下降到65℃之间。结果表明,萃取温度对非挥发性呈味物质的提取效率具有明显的阶段性影响。

表2 不同萃取温度所得咖啡中非挥发性物质含量(mg/mL)

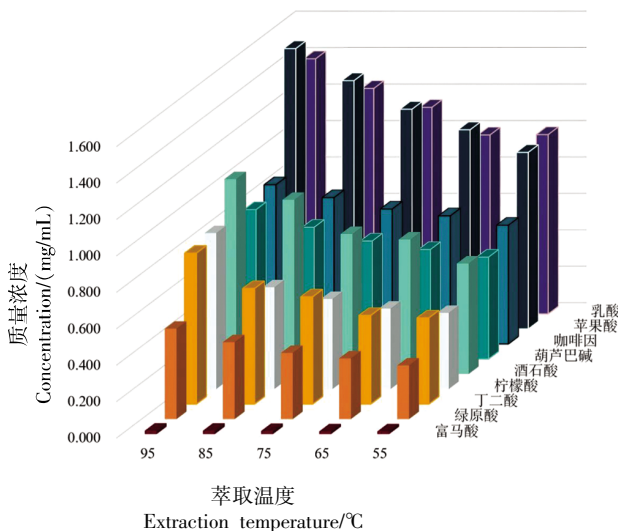
Table 2 Content of non-volatile substances in coffee extracted at different temperatures (mg/mL)

咖啡样品	丁二酸	富马酸	酒石酸	绿原酸	柠檬酸	苹果酸	乳酸	葫芦巴碱	咖啡因
EL95	0.865 ^c	0.015 ^c	0.799 ^d	0.627 ^d	0.914 ^c	1.391 ^d	1.372 ^c	0.878 ^d	0.917 ^d
EL85	0.823 ^c	0.014 ^b	0.726 ^c	0.556 ^c	0.662 ^b	1.223 ^c	1.200 ^b	0.785 ^c	0.835 ^c
EL75	0.578 ^{ab}	0.014 ^b	0.632 ^b	0.493 ^b	0.559 ^a	1.101 ^b	1.129 ^b	0.684 ^b	0.762 ^b
EL65	0.588 ^b	0.014 ^b	0.601 ^{ab}	0.471 ^b	0.520 ^a	1.021 ^a	1.015 ^a	0.652 ^{ab}	0.739 ^b
EL55	0.514 ^a	0.013 ^a	0.555 ^a	0.427 ^a	0.507 ^a	0.974 ^a	0.948 ^a	0.608 ^a	0.697 ^a
EM95	0.828 ^c	0.019 ^c	1.070 ^d	0.496 ^c	0.856 ^d	1.539 ^d	1.400 ^c	0.820 ^c	0.874 ^c
EM85	0.634 ^b	0.019 ^{bc}	0.956 ^c	0.422 ^d	0.559 ^c	1.362 ^c	1.237 ^b	0.723 ^d	0.803 ^d
EM75	0.589 ^b	0.017 ^b	0.768 ^b	0.363 ^c	0.494 ^b	1.206 ^b	1.133 ^b	0.648 ^c	0.741 ^c
EM65	0.486 ^a	0.015 ^a	0.738 ^b	0.333 ^b	0.441 ^a	1.093 ^b	0.982 ^a	0.601 ^b	0.703 ^b
EM55	0.473 ^a	0.015 ^a	0.606 ^a	0.294 ^a	0.418 ^a	0.969 ^a	0.984 ^a	0.559 ^a	0.652 ^a
ED95	0.808 ^d	0.027 ^c	1.194 ^d	0.281 ^d	0.836 ^d	1.466 ^c	1.169 ^a	0.714 ^c	0.831 ^d
ED85	0.679 ^c	0.023 ^b	1.080 ^c	0.250 ^c	0.717 ^c	1.344 ^b	1.128 ^a	0.671 ^b	0.795 ^{cd}
ED75	0.646 ^c	0.022 ^a	1.063 ^{bc}	0.238 ^{bc}	0.637 ^{bc}	1.341 ^b	1.098 ^a	0.651 ^b	0.783 ^{bc}
ED65	0.566 ^b	0.021 ^a	1.029 ^{ab}	0.221 ^{ab}	0.548 ^{ab}	1.294 ^b	1.049 ^a	0.613 ^a	0.756 ^{ab}
ED55	0.512 ^a	0.021 ^a	0.991 ^a	0.210 ^a	0.512 ^a	1.167 ^a	0.718 ^a	0.579 ^a	0.725 ^a

注:EL、EM、ED分别代表浅烘焙、中烘焙、深烘焙样品;55、65、75、85、95分别代表萃取温度(℃);同一烘焙度样品组中,不同肩标字母表示有显著差异($P<0.05$)。



(a)浅烘焙



(b)中烘焙

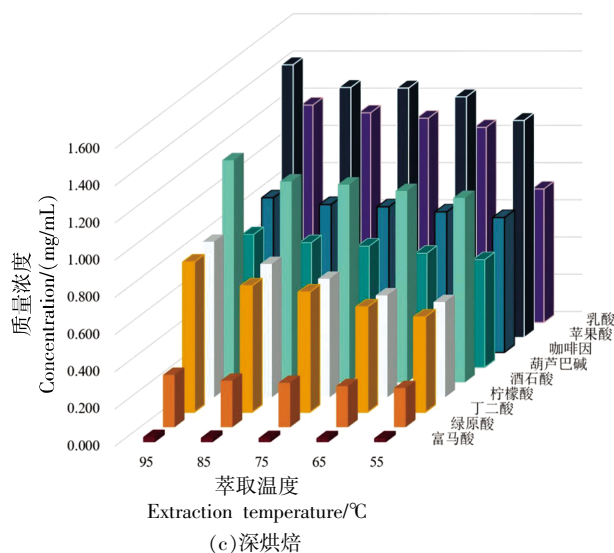


图 2 不同烘焙度咖啡样品非挥发性呈味物质含量

Fig.2 Content of non-volatile substances in coffee extracted at different temperatures

表 3 萃取温度由 95 °C 降低至 55 °C 时不同烘焙程度的非挥发性呈味物质萃取量减少程度对比 (%)

Table 3 Comparison of the reduction in extraction of non-volatile substances extracted from coffee beans of different roasting degrees when the extraction temperature is lowered from 95 °C to 55 °C (%)

烘焙度	酒石酸	苹果酸	乳酸	柠檬酸	丁二酸	富马酸	葫芦巴碱	咖啡因	绿原酸
浅烘焙	31.90	30.17	32.80	36.46	24.76	44.62	18.40	15.31	22.54
中烘焙	20.46	21.33	16.96	43.07	36.06	17.94	19.18	18.56	31.19
深烘焙	19.24	21.14	23.54	29.74	26.65	29.68	17.16	19.13	13.03

表 4 萃取温度由 95 °C 降低至 55 °C 时不同温度梯度的非挥发性呈味物质萃取量减少程度对比 (%)

Table 4 Comparison of the reduction degree of non-volatile flavor substances extraction amount at different temperature gradients when the extraction temperature is decreased from 95 °C to 55 °C (%)

温度梯度	酒石酸	苹果酸	乳酸	柠檬酸	丁二酸	富马酸	葫芦巴碱	咖啡因	绿原酸
95 °C→85 °C	4.01	6.92	4.20	11.12	6.82	9.49	5.09	5.24	9.69
85 °C→75 °C	8.05	5.97	6.66	7.29	6.16	6.50	4.12	3.16	0.82
75 °C→65 °C	5.00	5.53	7.61	8.50	9.94	8.24	4.30	4.64	5.96
65 °C→55 °C	6.80	5.80	5.97	9.51	6.24	6.52	4.73	4.63	7.43

2.4 不同温度对挥发性风味物质的影响

2.4.1 萃取温度对整体挥发性物质种类分布的影响 咖啡中包含数百种挥发性香气化合物，不同化合物可能提供相似的风味，而单一化合物在不同浓度下，也可能带来类似的感官感受^[17]。因此，研究这些化合物在整体挥发性成分中的分布比例，对于深入解析咖啡风味特性具有重要意义。本研究通过计算样品中挥发性成分的总含量，并分析各类物质的分布比例，进一步探讨萃取温度对

其影响。

结果显示(图 3),虽然咖啡豆的处理工艺会对挥发性成分产生初始影响^[18-19],但是萃取温度的变化显著影响了这些化合物的提取含量。具体而言,浅烘焙样品中醛类化合物占比最高,其次为吡嗪类和醇类化合物;中烘焙样品的挥发性成分分布与浅烘焙样品相似,而酯类化合物的含量更高;深烘焙样品中则以吡嗪类和酯类化合物为主,同时醇类、酚类和呋喃类化合物总占比超过 11%。值

得注意的是,无论萃取温度如何变化,各类挥发性成分的分布比例保持相对稳定。

然而,萃取温度的升高对部分化合物的含量产生了显著影响。吡咯类和酚类化合物在不同烘焙度样品中,均随温度升高而增加,而醛类和酯类化合物的含量则表现出下降趋势。对于醇类和吡

嗪类化合物,温度的影响更为复杂。醇类化合物在浅烘和中烘样品中呈现出随温度升高先增加后减少的趋势;而吡嗪类化合物的含量变化规律因烘焙度而异:浅烘样品中表现为波动下降,中烘样品中基本保持不变,深烘样品中则显示波动上升。

	EL55	EL65	EL75	EL85	EL95	EM55	EM65	EM75	EM85	EM95	ED55	ED65	ED75	ED85	ED95
苯	1.77	1.82	1.76	1.82	1.55	1.68	1.84	1.49	2.00	1.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
吡啶	4.64	5.02	5.58	4.59	3.11	4.64	2.91	2.07	0.18	2.43	8.86	8.90	8.49	7.50	7.94
吡咯	8.37	8.09	8.54	8.94	9.53	8.57	9.14	9.39	9.09	9.70	5.36	5.55	5.61	5.80	6.15
吡嗪	16.25	16.80	16.06	15.94	13.51	17.00	15.36	16.54	17.49	17.15	16.01	16.05	16.38	16.03	17.21
醇	12.69	12.89	12.74	13.07	11.69	11.06	11.32	11.94	12.47	12.00	11.53	11.53	11.83	12.65	13.58
酚	5.71	5.63	5.83	6.57	8.43	5.55	5.80	6.92	6.58	7.57	14.19	13.72	14.25	15.61	16.36
呋喃	7.18	6.92	7.43	6.96	6.48	6.85	7.59	7.72	8.34	7.95	11.34	12.07	12.82	12.77	11.35
醚	3.83	3.39	3.33	2.72	2.51	2.59	2.01	1.99	2.01	2.01	3.63	3.21	2.73	2.48	2.68
噻啶	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.37	0.40	0.55	0.37	0.52
醛	32.37	32.57	31.70	32.52	37.77	25.62	28.93	28.64	27.19	28.68	9.51	9.63	9.72	10.53	11.29
炔烃	0.48	0.48	0.50	0.57	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.68	0.44	0.44	0.49	0.52
噻唑	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
酸	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.39	0.30	0.24	0.25	0.49	0.42	0.32	0.33	0.28
酮	1.65	1.07	1.72	1.97	1.22	1.38	1.43	0.71	1.35	0.97	1.08	1.23	1.05	1.00	0.86
烷烃	0.09	0.19	0.25	0.21	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.25	0.44	0.26	0.46
酰胺	0.80	0.86	0.78	0.86	0.95	0.88	0.90	0.97	0.97	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
酯	4.17	4.27	3.77	3.27	2.48	14.03	12.38	11.33	12.08	8.81	16.77	16.59	15.36	14.20	10.80

注:EL,EM,ED分别代表浅烘焙、中烘焙、深烘焙样品;55,65,75,85,95分别代表萃取温度(°C);热图中颜色表示该类物质在总物质中的相对占比,红色调代表较高比例,蓝色调代表较低比例,颜色梯度与占比数值呈正相关。

图3 不同烘焙度样品中各类挥发性化合物含量的分布比例热图(%)

Fig.3 Heatmap of the distribution ratio of various volatile compounds in samples of different roasting degrees (%)

2.4.2 萃取温度对挥发性物质含量的影响 图4展示了不同样品中挥发性物质含量的热图,红色越深表明物质含量越高,蓝色越深则表明含量越低。基于咖啡豆烘焙度的影响^[4-5,20-21],整体挥发性成分可划分为两大类:第1类物质主要在浅烘和中烘样品中含量更高,包括吡嗪类和醛类化合物;第2类物质则以酚类和呋喃类化合物为主。除这两类之外,其它化合物(如吡咯类、吡啶类、烷烃类)在所有样品中均有分布。

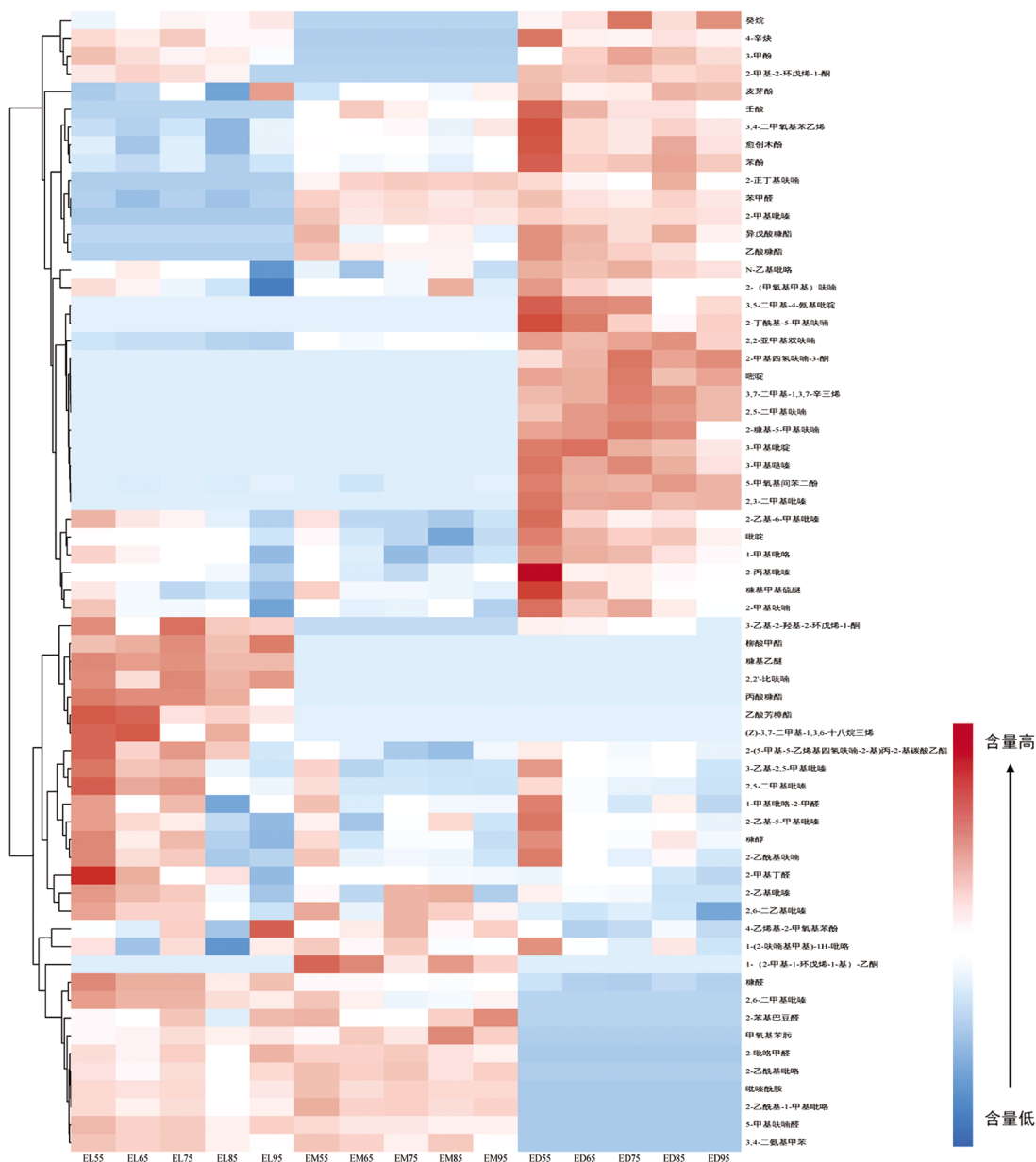
总体而言,大部分挥发性物质的含量随萃取温度的升高而减少。尤其是以下化合物,其含量与温度变化具有显著相关性:2-(甲氧基甲基)呋喃、2-乙酰基呋喃、2-甲基呋喃、2,5-二甲基吡嗪、2-乙基-5-甲基吡嗪、2-乙基-6-甲基吡嗪、3-乙基-2,5-甲基吡嗪、糠醇、2-甲基丁醛和糠基甲基硫醚。这些化合物具有较高的挥发性,在高温萃取条件下容易逸出,导致其在样品中的含量显著减少^[11]。

此外,化学结构的特性也影响某些化合物对萃取温度的敏感性。呋喃类化合物因其呋喃环结

构对热较为敏感,在高温条件下易发生开环或分解,生成其它小分子副产物^[22-23]。含有功能基团(如甲氧基或羰基)的化合物也更容易在高温环境中发生热分解或化学反应^[10,24-25]。此外,常压高温萃取环境中,咖啡中的有机酸含量较高,同时含氧量充足,这种酸性、高氧环境进一步促进了氧化、缩合或聚合反应的发生,影响了这些物质的稳定性^[26]。

值得注意的是,美拉德反应的产物类黑素也会显著影响挥发性成分的释放行为。有研究表明^[27-28],类黑素能够通过共价相互作用与吡嗪类、甲氧基苯酚类、萜烯类和芳香族硫醇类化合物结合,其结合亲和力较高。此外,不同分子质量的类黑素对香气化合物的结合能力存在差异,分子质量>50 ku和5~10 ku的类黑素与挥发性化合物的结合亲和力相对更强^[29]。

为了探讨萃取温度通过影响非挥发性成分进而影响挥发性香气化合物的释放规律,本研究进一步检测了pH值变化后,咖啡样品中的香气化合物的释放情况,以及不同萃取温度下,上述两种分子质量的类黑素含量变化。



注:EL、EM、ED 分别代表浅烘焙、中烘焙、深烘焙样品;55、65、75、85、95 分别代表萃取温度(℃)。

图 4 不同烘焙度样品中各类挥发性化合物含量热图(mg/mL)

Fig.4 Heat map of the content of various volatile compounds in different roast-level samples (mg/mL)

2.5 不同萃取温度下挥发性风味物质释放的影响因素

2.5.1 不同有机酸处理对挥发性成分的影响 在仅改变 55℃萃取样品的 pH 值后,发现只有糠醇、2-乙酰基吡咯、苯酚和 2-吡咯甲醛 4 种物质的含量出现显著变化。与空白组对比,在加入有机酸调节 pH 值的试验组中,这些物质的含量均显著升高,这是因为酸性环境能很好的促进糖类和氨基

酸类的水解^[30],从而生成少量上述挥发性成分。

在改变样品 pH 值并且在高温(95℃)下加热后,发现有挥发性物质发生了显著变化。与 2.4.2 节中的结果一致,空白高温组中各物质的含量显著低于空白低温组。在高温组内,不同有机酸调节 pH 值后的试验组中,有 21 种物质发生了显著变化(表 5)。这些物质具体可分为 3 类:第 1 类物质大多为含氮或含氧的杂环化合物,它们的含量在

表5 不同有机酸处理对挥发性物质含量的影响(μg/g)

		The influence of different organic acid treatments on the content of volatile substances (μg/g)													
挥发性物质		55- 丁二酸	55- 酒石酸	55- 绿原酸	55- 苹果酸	55- 乳酸	55- 柠檬酸	55- 空白	95- 丁二酸	95- 酒石酸	95- 绿原酸	95- 苹果酸	95- 乳酸	95- 柠檬酸	95- 空白
1-甲基吡咯		0.025 ^a	0.021 ^a	0.017 ^a	0.019 ^a	0.018 ^a	0.013 ^a	0.027 ^a	0.015 ^{bc}	0.015 ^{abc}	0.017 ^c	0.009 ^a	0.018 ^c	0.014 ^{abc}	0.010 ^{ab}
吡啶		0.188 ^c	0.112 ^{abc}	0.139 ^{abc}	0.109 ^{abc}	0.102 ^{ab}	0.072 ^a	0.169 ^{bc}	0.174 ^{bc}	0.124 ^{ab}	0.202 ^c	0.085 ^c	0.131 ^{ab}	0.116 ^{ab}	0.129 ^{ab}
2-(甲氧基甲基)咪喃		0.020 ^a	0.019 ^a	0.015 ^a	0.010 ^a	0.015 ^a	0.006 ^a	0.015 ^a	0.018 ^{bc}	0.017 ^{bc}	0.021 ^c	0.011 ^a	0.017 ^{bc}	0.014 ^{ab}	0.009 ^b
2,5-二甲基吡嗪		0.023 ^b	0.023 ^{ab}	0.019 ^{ab}	0.019 ^{ab}	0.017 ^{ab}	0.016 ^a	0.015 ^a	0.024 ^{bc}	0.025 ^{bc}	0.029 ^c	0.015 ^a	0.024 ^{bc}	0.019 ^{ab}	0.013 ^a
2,3-二甲基吡嗪		0.008 ^a	0.008 ^a	0.007 ^a	0.006 ^a	0.006 ^a	0.005 ^a	0.006 ^a	0.008 ^{bc}	0.009 ^{cd}	0.010 ^d	0.005 ^a	0.009 ^{bc}	0.007 ^b	0.005 ^a
2-乙酰基咪喃		0.056 ^b	0.055 ^b	0.044 ^{ab}	0.046 ^{ab}	0.040 ^{ab}	0.035 ^a	0.040 ^{ab}	0.058 ^{bc}	0.056 ^{abc}	0.069 ^c	0.035 ^{ab}	0.056 ^{abc}	0.043 ^{ab}	0.034 ^a
乙酸糠酯		0.218 ^a	0.216 ^a	0.169 ^a	0.175 ^a	0.154 ^a	0.143 ^a	0.146 ^a	0.122 ^b	0.110 ^b	0.140 ^b	0.066 ^c	0.117 ^b	0.122 ^b	0.062 ^a
糠醇		0.257 ^{bc}	0.272 ^c	0.205 ^{abc}	0.209 ^{abc}	0.189 ^{ab}	0.138 ^a	0.170 ^a	0.266 ^{abc}	0.302 ^{bc}	0.344 ^c	0.179 ^a	0.287 ^{bc}	0.208 ^{ab}	0.178 ^a
2-乙酰基-1-甲基吡咯		0.019 ^{ab}	0.020 ^b	0.016 ^{ab}	0.017 ^{ab}	0.014 ^{ab}	0.016 ^{ab}	0.013 ^a	0.022 ^c	0.020 ^{bc}	0.025 ^c	0.013 ^{ab}	0.021 ^{bc}	0.018 ^{abc}	0.010 ^a
1-(2-咪喃基甲基)-1H-吡咯		0.037 ^b	0.038 ^b	0.030 ^{ab}	0.034 ^{ab}	0.026 ^{ab}	0.033 ^{ab}	0.025 ^a	0.043 ^c	0.033 ^{abc}	0.046 ^c	0.023 ^{ab}	0.038 ^{bc}	0.032 ^{abc}	0.018 ^a
2-乙酰基吡咯		0.013 ^{bc}	0.016 ^c	0.013 ^{bc}	0.013 ^{bc}	0.010 ^{ab}	0.011 ^{ab}	0.008 ^a	0.016 ^{abc}	0.017 ^{bc}	0.023 ^c	0.011 ^{ab}	0.017 ^{bc}	0.014 ^{ab}	0.009 ^a
苯酚		0.011 ^{ab}	0.017 ^c	0.015 ^{bc}	0.016 ^{bc}	0.011 ^{ab}	0.008 ^a	0.009 ^a	0.006 ^a	0.019 ^{bc}	0.025 ^c	0.011 ^{ab}	0.020 ^{bc}	0.016 ^{abc}	0.012 ^{ab}
2-吡咯甲醛		0.016 ^{cd}	0.019 ^d	0.015 ^{bcd}	0.016 ^{cd}	0.012 ^{ab}	0.013 ^{abc}	0.010 ^a	0.020 ^{bc}	0.018 ^{abc}	0.025 ^c	0.013 ^{ab}	0.019 ^{abc}	0.016 ^{ab}	0.011 ^a
异戊酸糠酯		0.007 ^b	0.003 ^{ab}	0.005 ^b	0.007 ^b	0.005 ^{ab}	0.000 ^a	0.004 ^{ab}	—	—	—	—	—	—	—
2-甲基四氢咪喃-3-酮		0.005 ^b	0.004 ^b	0.004 ^b	0.003 ^{ab}	0.003 ^{ab}	0.000 ^a	0.002 ^{ab}	—	—	—	—	—	—	—
3-甲基吡啶		0.002 ^b	0.000 ^a	0.002 ^{ab}	0.000 ^{ab}	0.000 ^a	0.002 ^{ab}	0.001 ^{ab}	—	—	—	—	—	—	—
N-乙基吡咯		—	—	—	—	—	—	—	0.002 ^{ab}	0.004 ^{bc}	0.004 ^c	0.002 ^a	0.003 ^{bc}	0.004 ^{bc}	0.001 ^a
3-乙基-2,5-甲基吡嗪		—	—	—	—	—	—	—	0.024 ^{ab}	0.036 ^c	0.035 ^c	0.019 ^a	0.029 ^{bc}	0.028 ^{bc}	0.015 ^a
糠基甲基硫酸酯		—	—	—	—	—	—	—	0.012 ^b	0.012 ^b	0.013 ^b	0.008 ^a	0.013 ^b	0.014 ^b	0.005 ^a
3,3-二甲基丙烯酸		—	—	—	—	—	—	—	0.000 ^a	0.015 ^b	0.008 ^{ab}	0.010 ^{ab}	0.015 ^b	0.006 ^{ab}	0.000 ^a
4-乙基-2-甲氧基苯酚		—	—	—	—	—	—	—	0.010 ^a	0.007 ^a	0.010 ^a	0.005 ^a	0.009 ^a	0.008 ^a	0.005 ^a

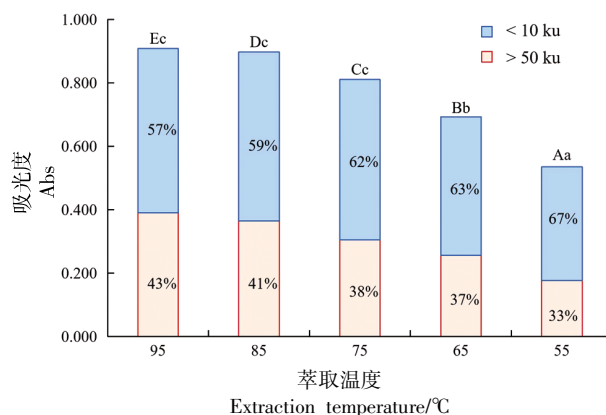
注:55,95 分别代表萃取温度(℃);同一温度样品组中,不同肩标字母表示有显著差异($P<0.05$);“—”表示未检出。

酸性加热条件下较空白组而言显著增多,这是因为高温虽然加快了物质挥发损失和氧化速率^[14,23],但是也在一定程度上促进了糖类脱水和 Strecker 降解^[30],使得咖啡液中微量的糖类与氨基酸转化为含氮杂环等挥发性化合物^[31];第 2 类物质包括异戊酸糠酯、2-甲基四氢呋喃-3-酮和 3-甲基吡啶,它们在高温下稳定性较差^[32],并且可能是含氮或含氧杂环化合物生成的重要前体^[30,33],所以它们在样品加热后几乎消失;第 3 类化合物则由 *N*-乙基吡咯、3-乙基-2,5-甲基吡嗪、糠基甲基硫醚、3,3-二甲基丙烯酸和 4-乙基-2-甲氧基苯酚构成,高温正是它们生成所需要的条件,而酸性环境也能促进相关的前体分解,加速环化与缩合反应^[34-36],所以在低温样品中(55 °C)很难检测到它们。

2.5.2 萃取温度对不同分子质量类黑素含量的影响 基于 2.1 节的结果(表 1),可以确定类黑素总含量与萃取温度之间存在单调相关性。随萃取温度的下降,咖啡样品中的类黑素含量显著减少,这一趋势在所有烘焙度样品中均保持一致。因此,为深入探讨萃取温度对不同分子质量类黑素的影响,本研究在设定温度范围内(55~95 °C)选取中烘焙样品,采用超滤分离法对类黑素的分子质量分布进行进一步分析。

结果显示(图 5),类黑素总含量随萃取温度下降呈现显著的下降趋势,且不同分子质量(> 50 ku 和 < 10 ku) 范围内的类黑素均遵循这一规律。然而,两种分子质量的类黑素在萃取温度变化过程中的含量变化存在差异:对于分子质量 > 50 ku 的类黑素,其含量随着萃取温度的降低持续显著减少;而分子质量 < 10 ku 的类黑素,虽然整体上也呈下降趋势,但在萃取温度从 95 °C 降低至 75 °C 时并未表现出显著差异,当温度进一步降低时,含量变化才逐渐显现显著性。

此外,不同分子质量类黑素的相对含量比例也随萃取温度发生变化。在 95 °C 时,> 50 ku 与 < 10 ku 类黑素的含量比例接近 1:1;而在 55 °C 时,< 10 ku 类黑素的含量约为 > 50 ku 类黑素的 2 倍。这一现象可能与分子质量对溶解度的影响有关^[37]。低分子质量类黑素由于具有较高的溶解度,在低温条件下更易溶解于水;相反,高分子质量类黑素的溶解度较低,在低温萃取条件下溶出量有限。随



注:不同大写字母表分子质量>50 ku 的类黑素含量在样品间具有显著性差异($P<0.05$);不同小写字母表分子质量<10 ku 的类黑素含量在样品间具有显著性差异($P<0.05$)。

图 5 萃取温度对中烘焙样品中不同分子质量类黑素含量的影响

Fig.5 Effect of extraction temperature on the content of melanoidins of different molecular weights in medium roasted samples

着萃取温度升高,高分子质量类黑素的溶解度得以改善,其溶出量随之增加,从而缩小了两种分子质量类黑素在咖啡液中的含量差距。

3 讨论

在萃取温度改变后,咖啡样品中焦糖味随着温度降低呈逐渐增强的趋势。一方面,在低温条件下,含量更多的吡嗪类物质是焦糖味的重要贡献因素之一^[8,26,38-40];另一方面,由焦糖味的感知机制可知,低温样品中有机酸含量减少导致酸味强度降低,从而影响了与甜味强相关的焦糖味,使其获得更高的评分^[41]。

研究还发现,咖啡因变化趋势与其它非挥发性物质(如有机酸类)不尽相同。酸类物质在低烘焙度样品中的含量更多,因而在萃取条件发生变化时,浅、中烘焙度样品的差异更大。有研究表明,烘焙程度对咖啡豆中咖啡因含量的影响不大,然而当萃取过程开始时,深烘焙样品中咖啡因的萃取动力学变化明显快于其它烘焙度的样品^[42]。此外,参考脱因咖啡的制备工艺^[43]发现 70 °C 时脱因效率更高,这也很好地解释了咖啡因的萃取效率下降,峰值出现在 65~75 °C 这一温度范围内的原因。

在 pH 值对挥发性成分影响的结果中,加入苹果酸的样品在加热后虽然改变了挥发性成分的含量,但与空白组之间并无显著差异($P>0.05$)。苹果酸的结构和酸性特性决定了其对化学反应的影响较为温和^[44-46]。因此,在相同条件下,苹果酸对挥发性物质的影响不如酒石酸、绿原酸或柠檬酸显著。苹果酸的主要作用可能是微调体系的 pH 值,而不是直接参与化学反应或生成挥发性物质^[47-48]。

4 结论

本研究系统探讨了不同萃取温度对咖啡液中挥发性和非挥发性化学成分的影响。结果显示,随着萃取温度的降低,Brix°值、萃取率和酸度相关参数显著下降,表明较高的萃取温度有助于提高可溶性物质的提取效率。感官分析表明,高温萃取增强了对烟熏味和烘焙味的感知,而焦糖味则在低温条件下更为突出。非挥发性呈味物质(如咖啡因和各类有机酸)的含量也随萃取温度降低而减少,这种变化最终导致酸、苦、涩 3 种滋味的强度显著减弱。此外,在高温条件下,挥发性化合物的含量显著减少,尤其是吡嗪类、呋喃类和醛类物质。研究进一步发现,非挥发性物质中的各类有机酸不仅降低了体系的 pH 值,还在高温条件下发生了化学反应,从而影响挥发性成分中含氮或含氧杂环化合物的含量。然而,由于苹果酸的化学结构较为稳定,它对挥发性化合物的影响较为有限。

参 考 文 献

- [1] CAPORASO N, WHITWORTH M B, CUI C H, et al. Variability of single bean coffee volatile compounds of Arabica and robusta roasted coffees analysed by SPME-GC-MS[J]. Food Research International, 2018, 108: 628-640.
- [2] WANG Y B, WANG X Y, QUAN C X, et al. Optimizing commercial Arabica coffee quality by integrating flavor precursors with anaerobic germination strategy[J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101684.
- [3] LIU C J, YANG N, YANG Q, et al. Enhancing Robusta coffee aroma by modifying flavour precursors in the green coffee bean[J]. Food Chemistry, 2019, 281: 8-17.
- [4] 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.
- [5] FRANCA A S, OLIVEIRA L S, OLIVEIRA R C S, et al. A preliminary evaluation of the effect of processing temperature on coffee roasting degree assessment[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 92(3): 345-352.
- [6] CORDOBA N, FERNANDEZ -ALDUENDA M, MORENO F L, et al. Coffee extraction: A review of parameters and their influence on the physicochemical characteristics and flavour of coffee brews [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 96: 45-60.
- [7] RAO N Z, FULLER M, GRIM M D. Physicochemical characteristics of hot and cold brew coffee chemistry: The effects of roast level and brewing temperature on compound extraction[J]. Foods, 2020, 9(7): 902.
- [8] BATALI M E, LIM L X, LIANG J, et al. Sensory analysis of full immersion coffee: Cold brew is more floral, and less bitter, sour, and rubbery than hot brew[J]. Foods, 2022, 11(16): 2440.
- [9] DAS P R, KIM Y, HONG S J, et al. Profiling of volatile and non-phenolic metabolites-Amino acids, organic acids, and sugars of green tea extracts obtained by different extraction techniques [J]. Food Chemistry, 2019, 296: 69-77.
- [10] FENG L H, CUI H P, CHEN P S, et al. Promoted formation of pyrazines and sulfur-containing volatile compounds through interaction of extra-added glutathione or its constituent amino acids and secondary products of thermally degraded *N*-(1-deoxy-d-ribulos-1-yl)-glutathione[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(29): 9095-9105.
- [11] HEO J, ADHIKARI K, CHOI K S, et al. Analysis of caffeine, chlorogenic acid, trigonelline, and volatile compounds in cold brew coffee using high-performance liquid chromatography and solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry[J]. Foods, 2020, 9(12): 1746.
- [12] PORTELA C D S, ALMEIDA I F D, REIS T A D D, et al. Effects of brewing conditions and coffee species on the physicochemical characteristics, preference and dynamics of sensory attributes perception

- in cold brews[J]. *Food Research International*, 2022, 151: 110860.
- [13] BATALI M E, COTTER A R, FROST S C, et al. Titratable acidity, perceived sourness, and liking of acidity in drip brewed coffee[J]. *ACS Food Science & Technology*, 2021, 1(4): 559–569.
- [14] FIGUEROA PAREDES D A, ASSOF M, SÁNCHEZ R J, et al. Partial dealcoholization of a Malbec wine through pervaporation with a PDMS membrane: Effect of operation temperature on process economics, volatile aroma composition and sensory properties[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 335: 126076.
- [15] GIACALONE D, DEGN T K, YANG N, et al. Common roasting defects in coffee: Aroma composition, sensory characterization and consumer perception[J]. *Food Quality and Preference*, 2019, 71: 463–474.
- [16] HU G L, PENG X R, GAO Y, et al. Effect of roasting degree of coffee beans on sensory evaluation: Research from the perspective of major chemical ingredients[J]. *Food Chemistry*, 2020, 331: 127329.
- [17] YU M G, XIE Q G, SUN H, et al. Characterization of odor properties of human milk: Effect of inter-individual nutrient differences on key odor-active compounds and odor attributes[J]. *Food Chemistry*, 2024, 431: 137091.
- [18] 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.
- [19] SENINDE D R, CHAMBERS E IV, CHAMBERS D. Determining the impact of roasting degree, coffee to water ratio and brewing method on the sensory characteristics of cold brew Ugandan coffee[J]. *Food Research International*, 2020, 137: 109667.
- [20] AKIYAMA M, MURAKAMI K, IKEDA M, et al. Characterization of flavor compounds released during grinding of roasted robusta coffee beans [J]. *Food Science and Technology Research*, 2005, 11(3): 298–307.
- [21] BAGGENSTOSS J, POISSON L, KAEGI R. Coffee roasting and aroma formation: Application of different time-temperature conditions[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56: 5836–5846.
- [22] ELWARDANY A, ES-SEBBAR E, KHALED F, et al. A chemical kinetic study of the reaction of hydroxyl with furans[J]. *Fuel*, 2016, 166: 245–252.
- [23] WILSON C L. Reactions of furan compounds. Part IV. High-temperature decomposition of the vapours of tetrahydrofuronitrile and methyl tetrahydrofuroate to give 2,3-dihydrofuran and cyclopropanealdehyde [J]. *Journal of the Chemical Society*, 1945, 1(1): 58–61.
- [24] HEO J, ADHIKARI K, CHOI K S, et al. Analysis of caffeine, chlorogenic acid, trigonelline, and volatile compounds in cold brew coffee using high-performance liquid chromatography and solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Foods*, 2020, 9(12): 1746.
- [25] XIA X, ZHOU T, ZHANG H, et al. Simultaneously enhanced formation of pyrazines and furans during thermal degradation of the glycyl-l-glutamine amadori compound by selected exogenous amino acids and appropriate elevated temperatures[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71(10): 4346–4357.
- [26] WU H J, VIEJO C G, FUENTES S, et al. The impact of wet fermentation on coffee quality traits and volatile compounds using digital technologies[J]. *Fermentation*, 2023, 9(1): 68.
- [27] HOFMANN T, SCHIEBERLE P. Chemical interactions between odor-active thiols and melanoidins involved in the aroma staling of coffee beverages[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(2): 319–326.
- [28] SUN Z C, LIN Y C, QU F, et al. Influence of aroma binding factors of coffee matrix on characteristic aroma in a model system[J]. *LWT*, 2024, 211: 116930.
- [29] GIGL M, FRANK O, GABLER A, et al. Key odorant melanoidin interactions in aroma staling of coffee beverages [J]. *Food Chemistry*, 2022, 392: 133291.
- [30] YAYLAYAN V A, KAMINSKY E. Isolation and structural analysis of Maillard polymers: Caramel and melanoidin formation in glycine/glucose model system[J]. *Food Chemistry*, 1998, 63(1): 25–31.
- [31] MAGA J A, SIZER C E, MYHRE D V. Pyrazines in foods[J]. *C R C Critical Reviews in Food Tech-*

- nology, 1973, 4(1): 39-115.
- [32] BOEKEL M A J S V. Formation of flavour compounds in the Maillard reaction [J]. *Biotechnology Advances*, 2006, 24(2): 230-233.
- [33] 袁春伟. Maillard 反应中吡嗪形成的研究 [J]. *东南大学学报*, 1990(4): 138-141.
- YUAN C W. Study of pyrazines formation in Maillard reaction [J]. *Journal of Southeast University*, 1990(4): 138-141.
- [34] YU H, ZHANG R Y, YANG F W, et al. Control strategies of pyrazines generation from Maillard reaction [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 112: 795-807.
- [35] ZHENG Y, BROWN S, LEDIG W O, et al. Formation of sulfur-containing flavor compounds from reactions of furaneol and cysteine, glutathione, hydrogen sulfide, and alanine/hydrogen sulfide [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1997, 45(3): 894-897.
- [36] TRESSL R, KERSTEN E, NITTKA C, et al. Formation of sulfur-containing flavor compounds from [13C]-labeled sugars, cysteine, and methionine [M]// *Sulfur Compounds in Foods*. Washington, DC: American Chemical Society, 1994: 224-235.
- [37] DING X F, ZHANG Y B, LI J, et al. Structure, spectral properties and antioxidant activity of melanoidins extracted from high temperature sterilized lotus rhizome juice [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 270: 132171.
- [38] ZHAI H N, DONG W J, TANG Y M, et al. Characterization of the volatile flavour compounds in Yunnan Arabica coffee prepared by different primary processing methods using HS-SPME/GC-MS and HS-GC-IMS [J]. *LWT*, 2024, 192: 115717.
- [39] FREITAS V V, BORGES L L R, CASTRO G A D, et al. Influence of roasting levels on chemical composition and sensory quality of Arabica and Robusta coffee: A comparative study [J]. *Food Bioscience*, 2024, 59: 104171.
- [40] CHARLES M, ROMANO A, YENER S, et al. Understanding flavour perception of espresso coffee by the combination of a dynamic sensory method and in-vivo nosespace analysis [J]. *Food Research International*, 2015, 69: 9-20.
- [41] PARAVISINI L, MORETTON C, GOUTTE-FANGEAS C, et al. Caramel flavour perception: Impact of the non-volatile compounds on sensory properties and in-vitro aroma release [J]. *Food Research International*, 2017, 100: 209-215.
- [42] SPIRO M, HUNTER J E. The kinetics and mechanism of caffeine infusion from coffee: The effect of roasting [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1985, 36(9): 871-876.
- [43] CHINDAPAN N, PUANGGOEN C, DEVAHASTIN S. Caffeine removal and compositions losses from whole Robusta coffee beans during conventional and ultrasound-assisted aqueous decaffeination [J]. *Journal of Food Engineering*, 2025, 387: 112349.
- [44] CHEN Y W, JIANG J Q, LI Y K, et al. Enhancing physicochemical properties, organic acids, antioxidant capacity, amino acids and volatile compounds for 'Summer Black' grape juice by lactic acid bacteria fermentation [J]. *LWT*, 2024, 209: 116791.
- [45] SANTANATOGLIA A, CAPRIOLI G, RICCIUTELLI M, et al. Quantification of two derivatives of malic acid first-time discovered in coffee: Influence of postharvest processing method [J]. *Food Chemistry*, 2024, 460: 140644.
- [46] CHI Z, WANG Z P, WANG G Y, et al. Microbial biosynthesis and secretion of l-malic acid and its applications [J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2016, 36(1): 99-107.
- [47] MICHELINI S, TOMADA S, KADISON A E, et al. Modeling malic acid dynamics to ensure quality, aroma and freshness of Pinot blanc wines in South Tyrol (Italy) [J]. *OENO One*, 2021, 55(2): 159-179.
- [48] CHIDI B S, BAUER F F, ROSSOUW D. Organic acid metabolism and the impact of fermentation practices on wine acidity - A review [J]. *South African Journal for Enology and Viticulture*, 2018, 39(2): 315-329.

Effect of Extraction Temperature on Coffee Flavor

FENG Huaming^{1,2,3}, SONG Jiahui^{1,2,3}, LI Guohua^{1,4}, DING Sheng⁴, TIAN Fu⁴, XIA Yixun^{1,2,3}, ZHONG Fang^{1,2,3*}

¹*School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu*

²*Science Center for Future Foods, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu*

³*Key Laboratory of Food Sensory Science and Technology, China National Light Industry, Wuxi 214122, Jiangsu*

⁴*KangShi (Shanghai) Food Science and Technology Co., Ltd., Shanghai 201103*

Abstract This study aimed to investigate the effects of different extraction temperatures on the chemical composition and flavor characteristics of coffee brews, in order to optimize atmospheric-pressure extraction and improve coffee flavor quality. Extraction temperatures (55–95 °C) were adjusted to analyze the volatile and non-volatile compounds and sensory characteristics of coffees with different roast degrees (light, medium, and dark), and to examine how temperature influences their chemical composition and flavor formation. Gas chromatography–mass spectrometry (GC–MS) and high-performance liquid chromatography (HPLC) were used to quantitatively analyze chemical components in coffee brews, and descriptive sensory evaluation was conducted to systematically assess sensory attributes. The results showed that extraction temperature significantly affected both the release of volatile compounds and the dissolution of non-volatile components ($P < 0.05$). High-temperature extraction (95 °C and 85 °C) increased extraction yield (>22%) and bitterness/astringency, whereas acidity and caramel notes were more pronounced at lower temperatures. Combined sensory and quantitative analyses indicated that high-temperature extraction improved extraction efficiency but led to the loss of some aroma compounds, while low-temperature extraction preserved more key aroma components. Significant differences in chemical composition and sensory properties were observed among coffees of different roast degrees at different extraction temperatures; higher temperatures were more suitable for comprehensive extraction of dark-roasted coffee, whereas lower temperatures were advantageous for aroma retention in light and medium roasts. This study provides theoretical support for optimizing coffee extraction processes, and future work will integrate other variables (e.g., pressure and extraction time) for multidimensional research to further elucidate the mechanisms and control strategies of coffee flavor formation.

Keywords extraction temperature; coffee flavor; volatile compounds; descriptive analysis