

冲泡方式对咖啡胶体颗粒性质 及抗氧化特性的影响

高观祯^{1,2} 饶平凡^{1,2} 韩 成² 汪惠勤^{1,2} 山云辉³

(1. 福建技术师范学院食品与生物工程学院, 福建 福清 350300; 2. 中科院—浙江工商大学联合食品与营养研究中心, 浙江 杭州 310035; 3. 德宏黑柔咖啡有限公司, 云南 芒市 678400)

摘要: [目的] 探究手冲、法式压滤及土耳其式 3 种典型冲泡方式对咖啡化学成分、胶体结构及抗氧化活性的影响, 阐明胶体颗粒在活性物质递送中的作用机制。[方法] 制备 3 种咖啡样液, 测定其理化成分并表征胶体性质。利用超滤技术分离真溶液相与胶体相, 对比评估其体外化学抗氧化活性与胞内抗氧化活性。[结果] 土耳其式咖啡溶出率高但热诱导导致胶体团聚; 手冲咖啡构建了均一的纳米级胶体; 法式压滤咖啡形成以脂质为骨架的微纳米颗粒。超滤试验证实了咖啡体系中存在基质掩蔽与拮抗效应。抗氧化性评价表明, 土耳其式咖啡体外化学抗氧化活性最高, 但手冲与法式压滤咖啡分别凭借胶体的纳米尺寸效应或表面疏水特性, 在细胞模型中表现出更优的生物利用度。[结论] 冲泡方式通过调控胶体颗粒的粒径、组分及表面性质决定活性物质的生物利用度。除了物质浓度外, 胶体微观结构是提升咖啡胞内抗氧化功效的关键因素。

关键词: 咖啡; 胶体颗粒; 冲泡方式; 体外化学抗氧化活性; 胞内抗氧化活性

Effect of brewing methods on colloidal particle properties and antioxidant characteristics of coffee

Gao Guanzhen^{1,2} Rao Pingfan^{1,2} Han Cheng² Wang Huiqin^{1,2} Shan Yunhui³

(1. College of Food and Bioengineering, Fujian Polytechnic Normal University, Fuqing, Fujian 350300, China; 2. Shanghai Institutes for Biological Sciences Chinese Academy of Sciences-Zhejiang Gongshang University Joint Centre for Food and Nutrition Research, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou, Zhejiang 310035, China; 3. Dehong Blacksoft Coffee Co., Ltd., Mangshi, Yunnan 678400, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of three typical brewing methods—hand drip, French press, and Turkish coffee—on the chemical composition, colloidal structure, and antioxidant activity of coffee, and to elucidate the mechanism of colloidal particles in the delivery of bioactive compounds. [Methods] Three types of coffee samples are prepared using the respective brewing methods. Their physicochemical components are determined and colloidal properties are characterized. The true solution phase and colloidal phase are separated by ultrafiltration, and their *in vitro* chemical and intracellular antioxidant activities are comparatively evaluated. [Results] Turkish coffee exhibits the highest extraction yield, but thermal induction causes colloidal aggregation. Hand drip forms a homogeneous nanoscale colloidal system, while French press forms micron- and nanoparticles with a lipid-based skeleton. Ultrafiltration experiments confirm the existence of matrix masking and antagonistic effects in the coffee system. Antioxidant evaluation reveals that Turkish coffee exhibits the highest *in vitro* chemical antioxidant activity, whereas hand drip and French press demonstrate superior bioavailability in cellular models,

基金项目: 云南省院士专家工作站项目 (编号: 202305AF150013); 福建省高校产学研联合创新科技计划项目 (编号: 2023N5014); 福建省中青年教育科研项目 (科技类) (编号: JAT231074)

通信作者: 饶平凡 (1957—), 男, 浙江工商大学教授, 博士。E-mail: pingfan.rao@gmail.com

收稿日期: 2025-12-27 **改回日期:** 2026-03-12

引用格式: 高观祯, 饶平凡, 韩成, 等. 冲泡方式对咖啡胶体颗粒性质及抗氧化特性的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(7): 128-135.

Citation: Gao Guanzhen, Rao Pingfan, Han Cheng, et al. Effect of brewing methods on colloidal particle properties and antioxidant characteristics of coffee[J]. Food & Machinery, 2026, 42(7): 128-135.

attributed to the nanoscale size effect or surface hydrophobic properties of their colloids, respectively. [Conclusion] Brewing methods determine the bioavailability of bioactive compounds by regulating the particle size, composition, and surface properties of colloidal particles. In addition to compound concentration, the colloidal microstructure is a key factor in enhancing the intracellular antioxidant efficacy of coffee.

Keywords: coffee; colloidal particles; brewing methods; *in vitro* chemical antioxidant activity; intracellular antioxidant activity

流行病学研究^[1-3]表明,长期摄入咖啡与2型糖尿病、心血管疾病及神经退行性疾病的发病风险呈负相关。传统食品化学研究主要关注咖啡因、绿原酸、类黑精等小分子化合物的溶出规律及其体外化学抗氧化活性^[4-6]。然而,实际咖啡冲泡液并非均相真溶液,而是由真溶液(离子、小分子)、胶体(多糖—蛋白质—多酚复合物)、乳浊液(脂质油滴)及悬浊液(细胞壁碎片)共同构成的复杂多相胶体体系^[7]。在该体系中,各组分通过氢键、疏水相互作用等非共价键形成超分子结构。冲泡过程中的热能与机械能诱导蛋白质、多糖及两亲性分子发生自组装,形成具有特定粒径和表面电荷的胶体颗粒^[8]。这些颗粒的理化性质受到冲泡参数(温度、压力、过滤介质孔径等)的显著影响。

现有研究多致力于通过优化冲泡参数以提高风味物质提取率,或利用体外化学法(如DPPH法、ORAC法等)评价其总抗氧化能力^[9-10]。然而,这些化学法均在均相体系中进行,忽视了胶体颗粒作为活性物质载体对其生物利用度的调控作用^[11]。近年来,关于食品加工诱导纳米结构(incidental nanoparticles, INPs)的研究^[12]指出,这些纳米结构可作为生物活性物质的载体,通过改变溶解度或介导胞吞作用,显著影响其生物利用度。

研究假设:冲泡过程中形成的胶体颗粒是影响活性物质细胞摄取率的关键载体,拟选取手冲(hand drip, HD)、法式压滤(french press, FP)及土耳其式(turkish coffee, TC)3种在传质动力学与固液分离机制上存在显著差异的冲泡方式,旨在阐明冲泡工艺如何通过改变胶体微观结构(化学组成、粒径分布、电位特性),进而影响活性物质的细胞抗氧化活性(cellular antioxidant activity, CAA),以期从胶体基质角度解析咖啡健康功效的加工依赖性。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与设备

咖啡豆:浅烘焙卡蒂姆(*Coffea arabica* L. var. Caturra, 云南德宏)咖啡豆,沈阳黑精泽咖啡工作室;

没食子酸、无水咖啡因、5-咖啡酰奎宁酸、槲皮素、Trolox等标准品、2',7'-二氯荧光黄双乙酸盐(DCFH-DA)、2,2'-偶氮二异丁基脒二盐酸盐(AAPH)、荧光素钠、溴化四氮唑(MTT)、2,2'-联氨-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺

酸(ABTS):美国Sigma-Aldrich公司;

无水葡萄糖、蒽酮、考马斯亮蓝G-250、福林酚等:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

MEM培养基、PBS/Hank's缓冲液(HBSS)、0.25% EDTA-胰酶、双抗(青霉素、链霉素)、谷氨酰胺:美国GIBCO公司;

胎牛血清:以色列Biological Industries公司;

细胞培养耗材:美国Corning公司;

小鼠单核巨噬细胞白血病细胞(RAW 264.7):中国科学院细胞库;

电动磨豆机:EVCB-8B-C型,日本Hario株式会社;

纳米粒度电位仪:Nano-ZS 90型,英国马尔文公司;

紫外可见分光光度计:UV-5100型,日立科学仪器(北京)有限公司;

多功能酶标仪:FlexStation 3型,美国Molecular Devices公司;

冻干机:Alpha 1-2 LD plus型,德国Christ公司。

1.2 咖啡样液制备

1.2.1 样品预处理 烘焙参数:入豆质量1 kg,烘焙至一爆结束出豆(出豆温度210℃,时间11 min 30 s)。试验前使用电动磨豆机研磨,过40目标准筛以控制粒径分布。

1.2.2 冲泡方法 为保证结果的可比性,粉水比为1:15(g/mL),使用Milli-Q超纯水。

(1)手冲咖啡(HD):参照文献[13]。称取10.0 g咖啡粉置于V60陶瓷滤杯及配套木浆滤纸上。注入30 mL 100℃热水预浸泡30 s以释放二氧化碳,以同心圆方式平稳注水至150 mL,总萃取时间控制在2 min 30 s。400×g离心15 min,收集上清液。

(2)法式压滤咖啡(FP):参照文献[14]。称取10.0 g咖啡粉置于预热的法压壶中,一次性注入150 mL 100℃热水,搅拌均匀后静置5 min。缓慢压下金属滤网,倒出咖啡液。400×g离心15 min,收集上清液。

(3)土耳其式咖啡(TC):参照文献[15]。称取10.0 g咖啡粉置于铜制长柄壶中,加入150 mL冷纯水。加热至沸腾,待泡沫升至壶口时离火,重复加热—沸腾—离火循环3次。冷却后过400目滤布,400×g离心15 min,收集上清液。

1.2.3 超滤分离 取4 mL咖啡样液置于标称截留相对分子质量为1×10⁵的超滤离心管中,4℃、4 800×g离心

20 min。收集外管滤液命名为“溶液相”;内管截留物用等体积纯水重悬,命名为“胶体相”。

1.3 化学成分分析

1.3.1 抽提率 参照 GB 5009.3—2016 中的冻干法,取定量咖啡样液于-80 ℃预冻 12 h 后进行冷冻干燥,计算干物质含量与抽提率^[16]。

1.3.2 总多酚含量 参照 GB/T 35810—2018 中的福林酚法,结果以没食子酸当量表示^[17]。

1.3.3 总糖含量 参照 GB 5009.8—2016 中蒽酮—硫酸法,结果以葡萄糖当量表示^[18]。

1.3.4 蛋白质含量 采用考马斯亮蓝法测定,结果以牛血清蛋白(BSA)当量表示^[7]。

1.3.5 油脂含量 参照 GB 5009.6—2016 中哥特里—罗紫法^[19]。

1.3.6 咖啡因与绿原酸含量 采用高效液相色谱(HPLC)法^[20]。色谱柱为 Daisogel-C₁₈ (5 μm);流动相 A 为 0.2% 醋酸水溶液—乙腈(体积比 91:9);流动相 B 为水—乙腈(体积比 1:4)。采用梯度洗脱程序,流速 1.0 mL/min,柱温 25 ℃,咖啡因检测波长 280 nm,绿原酸检测波长 327 nm,进样量 20 μL。

1.4 胶体学特性表征

将样品适当稀释后,使用纳米粒度电位仪测定。25 ℃平衡 120 s,于 173°散射角及 633 nm 下进行动态光散射(DLS)分析,记录平均粒径(Z-average)、多分散性指数(PDI)、光散射强度(DCR)及 Zeta 电位^[21]。

1.5 抗氧化活性分析

1.5.1 体外化学抗氧化活性 采用氧自由基吸收能力(ORAC)、ABTS 自由基清除能力及铁离子还原能力(FRAP)3 种方法测定,结果以 Trolox 当量或 Fe²⁺ 当量表示^[22]。

1.5.2 胞内抗氧化活性(CAA) 参照 Ding 等^[23]的方法。采用 RAW 264.7 巨噬细胞模型,将细胞接种于 96 孔板培养 24 h,加入无毒浓度的样品及 DCFH-DA 探针共孵育 1 h。洗涤后加入 AAPH 诱导氧化应激,使用酶标仪监测荧光强度变化(激发波长 485 nm/发射波长 535 nm)。计算荧光曲线下面积(AUC),结果以槲皮素当量(mmol/L

QE)表示。

1.6 数据分析

所有试验重复 3 次,结果以“平均值±标准差”表示。使用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析(ANOVA)及 Duncan 多重比较,显著性水平设定为 $P<0.05$ 。

2 结果与讨论

2.1 对咖啡溶液化学成分的影响

由表 1 可知,TC 抽提率高达 24.00%,显著高于其他两种方式($P<0.05$),与 Wang 等^[24]的研究结论一致。TC 工艺中的沸腾状态提供了持续的热能输入与强烈的流体湍流,提高了对流与扩散,降低了固液界面的传质阻力,从而加速了胞内物质的释放^[25]。此外,根据 Arrhenius 方程,高温提高了体系热能,使更多多糖和蛋白质分子达到解吸所需的活化能,显著加快了其从基质表面的解吸和向液相的迁移速率,这也解释了 TC 组中高分子量物质溶出比例更高的现象^[26]。

相比之下,FP 采用静态浸泡模式,其传质过程主要受 Fick 扩散定律控制。随着萃取时间的延长,咖啡粉颗粒表面的浓度边界层逐渐增厚,加之水温随时间自然衰减,固液相间的传质驱动力显著下降^[27]。因此,FP 中各组分溶出量均处于最低水平,符合静态固液萃取的一般规律。

在油脂提取方面,TC 中油脂含量最高(1.88 mg/mL),主要归因于沸腾过程中的机械搅拌作用。强烈的剪切力促进了脂质的乳化及分散,使其形成稳定的乳浊液^[28]。值得注意的是,尽管 FP 使用了孔径较大的金属滤网,理论上对脂质的截留作用较弱,但其实测油脂含量(1.37 mg/mL)低于经致密滤纸过滤的 HD(1.68 mg/mL),表明萃取效率(温度维持与动力学条件)对油脂释放的贡献度可能超过了过滤介质的截留效应。同时,HD 中较高的油脂保留率也提示,咖啡油脂可能常与蛋白质、多糖和美拉德产物等形成稳定的界面膜,在热冲过程中可能形成具有纳米级粒径的脂质乳浊液,这种稳定的纳米乳液能够穿透滤纸的微孔结构,从而在滤液中被检出^[29]。

表 1 不同冲泡方式下咖啡的理化成分含量[†]

Table 1 Physicochemical compositions of coffee prepared by different brewing methods

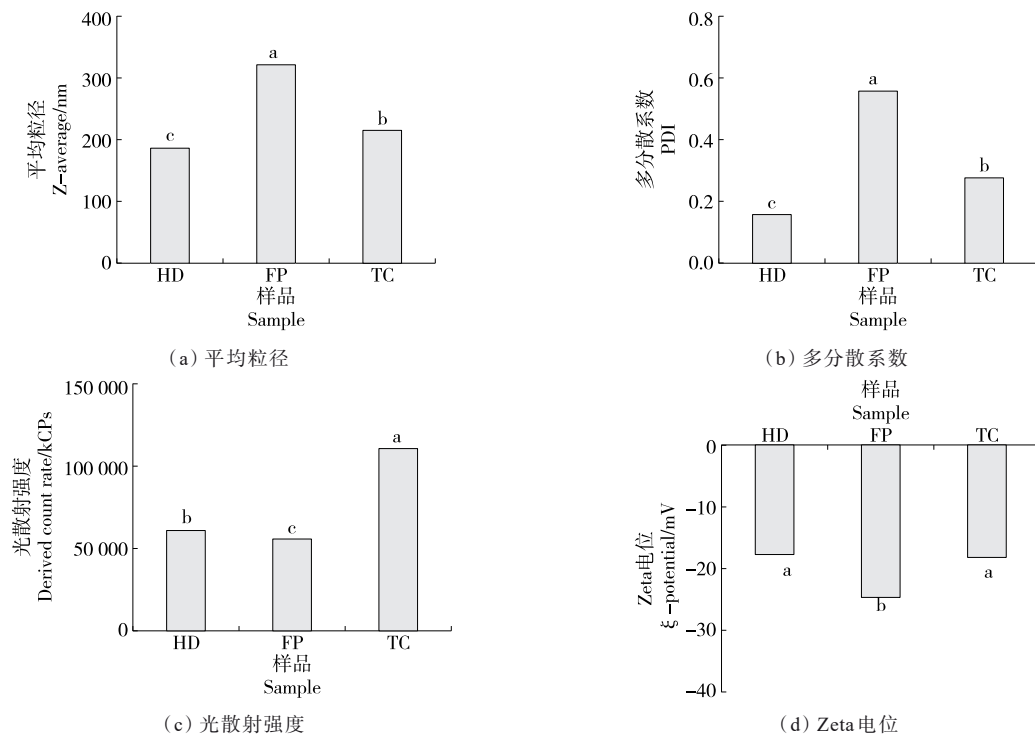
样品	抽提率/%	总糖/ (mg·mL ⁻¹)	蛋白质/ (mg·mL ⁻¹)	油脂/ (mg·mL ⁻¹)	总酚/ (mg·mL ⁻¹)	咖啡因/ (mg·mL ⁻¹)	绿原酸/ (mg·mL ⁻¹)
HD	19.80±0.36 ^b	3.11±0.14 ^b	0.26±0.04 ^b	1.68±0.11 ^b	3.05±0.18 ^b	1.27±0.14 ^b	0.36±0.04
FP	14.60±0.18 ^c	2.17±0.15 ^c	0.14±0.02 ^c	1.37±0.09 ^c	2.28±0.20 ^c	1.20±0.11 ^b	0.36±0.05
TC	24.00±0.12 ^a	4.01±0.15 ^a	0.45±0.03 ^a	1.88±0.13 ^a	3.64±0.15 ^a	1.83±0.18 ^a	0.45±0.04

[†] 同列小写字母不同表示组间差异显著($P<0.05$)。

2.2 对咖啡胶体颗粒性质的影响

由图1~图2可知,HD中形成了粒径约188 nm,PDI约0.16的窄分布胶体体系,接近单分散。纸滤的微米级孔道对细胞壁碎片和大尺寸油滴产生显著筛分效应,仅允许纳米级胶体聚集进入滤液。相比之下,FP的平均粒径最大(322.40 nm)且PDI最高(0.56),表明该体系多分散性较高,且混杂了胞壁碎片和不稳定脂质聚集。TC

的光散射强度(>110 kCPs)显著高于其他两组,表明其体系中悬浮颗粒浓度最高,与Elsahoryi等^[30]的描述一致;但其较高的PDI值(0.28)也提示体系中存在不同尺寸颗粒的团聚现象,这可能与高温诱导的蛋白变性及其与油脂的共聚集有关。3种冲泡方式形成的胶体颗粒的Zeta电位为 $-18\sim-25$ mV,表明3种冲泡方式产生的胶体颗粒具有一定的稳定性。



字母不同表示组间差异显著($P < 0.05$)

图1 不同冲泡方式下咖啡胶体颗粒性质

Figure 1 Colloidal properties of coffee prepared by different brewing methods

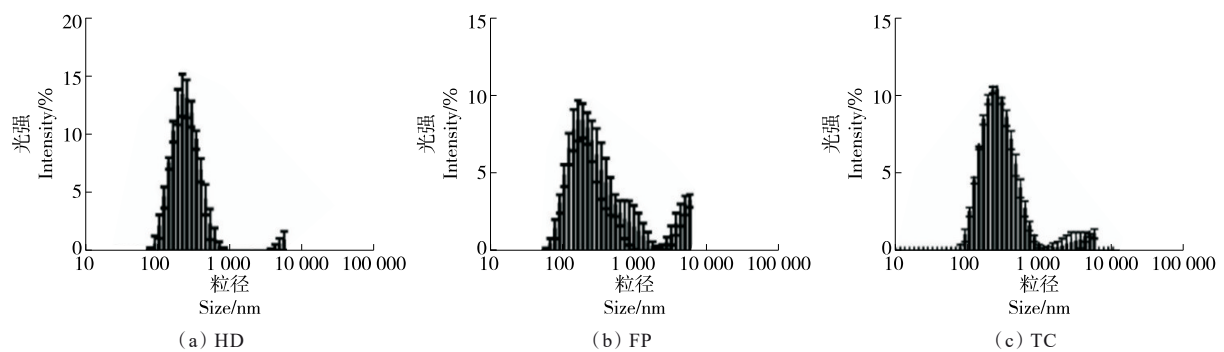


图2 不同冲泡方式下咖啡的粒径光强分布

Figure 2 Size intensity distribution of coffee prepared by different brewing methods

由表2可知,不同冲泡方式下胶体颗粒的化学组成存在显著差异。TC胶体相的总糖与蛋白质含量最高,是由于沸腾状态下的热能与剪切力促进了细胞壁多糖与胞内

蛋白的共溶出。这些生物大分子在热诱导下发生相互作用,形成了“多糖—蛋白质—油脂”三元复合胶体骨架。

HD与FP均采用热水,但两者胶体相的蛋白质含量

差异显著,反映了传质动力学的影响:HD 为动态萃取过程,持续注入的热水维持了较高的固液浓度梯度,驱动溶解度较低的结构性蛋白质溶出并参与胶体构建。相比之下,FP 为静态浸泡体系,随着渗透压降低,萃取迅速趋于平衡状态。在缺乏持续热扰动且传质驱动力衰减的条件下,蛋白质释放受限,导致 FP 中形成了以疏水相互作用为驱动的“多糖—油脂”二元胶体。这也解释了 FP 的油糖比显著高于 HD 和 TC。

值得关注的是,所有样品分相后的油脂总量均高于原液测定值,表明咖啡原液中可能存在显著的“基质掩蔽效应”,与 Chen 等^[31]提出的食品基质学观点一致,即脂质

可能被多糖—蛋白质复合物严密包裹形成“核—壳”结构,阻碍了常规溶剂提取。超滤过程的物理剪切作用破坏了这种包埋结构,从而释放了被掩蔽的脂质。

胶体骨架的化学组成进一步决定了其对生物活性物质的负载行为。TC 和 HD 胶体富含蛋白质与多糖复合物,这些大分子通过疏水微环境与氢键等非共价作用能有效结合多酚^[32],导致其胶体相总酚含量显著高于缺乏蛋白质的 FP。相反,咖啡因和绿原酸主要分布于溶液相中,表明这些强极性小分子倾向于以游离态存在,不易被胶体颗粒物理吸附,与 Ambadi 等^[33]的研究结果一致。

表 2 不同冲泡方式下咖啡原液及超滤分相后的化学成分分布[†]

Table 2 Distribution of chemical components of coffee brews and their fractions prepared by different brewing methods

		mg/mL					
样品	组分	总糖	蛋白质	油脂	总酚	咖啡因	绿原酸
HD	原液	3.11±0.14 ^b	0.26±0.04 ^b	1.68±0.11 ^a	3.05±0.18 ^b	1.27±0.14 ^b	0.36±0.04
	胶体相	1.03±0.10 ^b	0.09±0.02 ^b	2.00±0.12 ^a	0.36±0.03 ^b	0.06±0.00 ^a	0.01±0.00
	溶液相	1.24±0.11 ^b	0.07±0.03 ^b	2.26±0.10	2.59±0.12 ^a	1.22±0.11 ^{ab}	0.34±0.04 ^b
FP	原液	2.17±0.15 ^c	0.14±0.02 ^c	1.37±0.09 ^b	2.28±0.20 ^c	1.20±0.11 ^b	0.36±0.05
	胶体相	0.50±0.03 ^c	ND	1.64±0.10 ^b	0.29±0.03 ^b	0.03±0.00 ^b	0.01±0.00
	溶液相	1.18±0.07 ^b	0.08±0.01 ^b	2.34±0.11	1.84±0.15 ^b	1.10±0.11 ^b	0.32±0.03 ^b
TC	原液	4.01±0.15 ^a	0.45±0.03 ^a	1.88±0.13 ^a	3.64±0.15 ^a	1.83±0.18 ^a	0.45±0.04
	胶体相	1.56±0.04 ^a	0.20±0.02 ^a	1.69±0.13 ^b	1.11±0.10 ^a	0.03±0.00 ^b	0.01±0.00
	溶液相	1.45±0.06 ^a	0.17±0.01 ^a	2.10±0.14	2.78±0.11 ^a	1.47±0.17 ^a	0.43±0.03 ^a

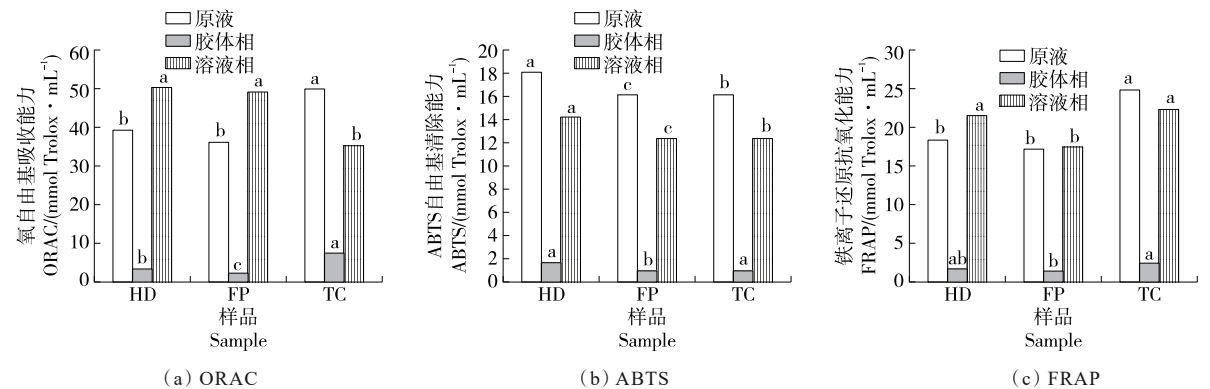
[†] 同列小写字母不同表示同组分的不同样品组间差异显著($P<0.05$)。

2.3 对咖啡胞内外抗氧化活性的影响

由图 3 可知,各组活性强度均呈现 TC>HD>FP 的趋势,与各组酚类物质的绝对浓度高度正相关。分相数据表明,溶液相贡献了主要的胞外化学抗氧化活性,符合传统的“浓度主导”理论,即在均相体系中,抗氧化能力取决

于游离活性分子的总电子转移或氢原子转移能力^[34]。

由表 3 可知,TC 在化学评价中活性最高,但其胞内抗氧化活性最低;化学活性中等的 HD 和较弱的 FP 表现出较高的胞内活性。这种“活性反转”现象表明,除化学成分浓度外,生物利用度可能是影响胞内活性的关键因素。



字母不同表示同相中不同样品间差异显著($P<0.05$)

图 3 不同冲泡方式下咖啡原液及各相的胞外化学抗氧化活性

Figure 3 Extracellular antioxidant activity of coffee brews and their fractions prepared by different brewing methods

Capuano 等^[11]研究指出,食品基质的微观结构显著影响活性物质的细胞摄取。TC 胶体体系中存在的大尺寸团聚体可能因尺寸效应受到细胞膜的阻滞,限制其摄取率。

分相分析进一步揭示了胶体颗粒作为纳米载体在胞内抗氧化中的潜在机制。在胞外化学法中,HD 胶体相的活性约为原液的 9%,与其较低的总酚含量相符。但在胞内模型中,HD 胶体相的活性显著高于其化学预测值,甚至高于 HD 原液。比活分析显示,HD 组胶体相的比活约为溶液相的 5 倍。这种差异提示可能存在纳米载体效应:HD 中形成的均一纳米颗粒(约 188 nm)处于细胞胞吞作用的典型尺寸区间(50~200 nm)^[35]。这些胶体颗粒可能

包裹或吸附了亲水性抗氧化剂,协助其跨膜进入细胞,从而显著提高了递送效率^[36]。

FP 胶体颗粒粒径较大(322 nm),理论上不利于胞吞,但其仍表现出较高的胞内活性。结合其高脂质占比(脂质/多糖比约为 3.3)的化学组成,推测 FP 颗粒具有较高的表面疏水性。根据相似相溶原理,疏水表面更易与细胞膜磷脂双分子层发生相互作用(如吸附或膜融合)^[37],这可能部分补偿了粒径较大带来的不利影响。相比之下,TC 颗粒虽然较小,但其富含多糖和蛋白质的亲水表面可能形成了水化层,限制了其与疏水性细胞膜的亲和力,与 Sanità 等^[38]的研究结论相符。

表 3 不同冲泡方式下咖啡各组分的胞内抗氧化活性及比活[†]

Table 3 Intracellular antioxidant activity and specific activity of different fractions from coffee prepared by different brewing methods

样品	抗氧化活性/(mmol·L ⁻¹ QE·mL ⁻¹)			比活/(mmol·L ⁻¹ QE·mg ⁻¹ Pheno)		
	原液	胶体相	溶液相	原液	胶体相	溶液相
HD	26.92±0.36 ^a	28.88±0.16 ^a	40.76±0.08 ^a	8.83±0.12 ^a	80.22±0.44 ^a	15.74±0.03 ^a
FP	25.40±1.28 ^a	20.72±0.16 ^b	24.40±3.20 ^b	11.14±0.56 ^a	71.45±0.55 ^b	13.26±1.74 ^b
TC	18.72±0.64 ^b	11.36±1.20 ^c	23.04±1.36 ^c	5.14±0.18 ^b	10.23±1.08 ^b	8.29±0.49 ^b

† 同列小写字母不同表示组间差异显著($P<0.05$)。

此外,原液的胞内活性明显低于各分相活性之和,提示原液基质中可能存在拮抗效应。这可能源于未分离的大分子/胶体通过非共价相互作用吸附部分小分子抗氧化剂,从而限制其跨界面扩散与跨膜转运,或在细胞膜表面与游离分子竞争受体/转运通道,降低其有效胞内暴露水平^[39-40]。超滤分离消除了这种基质干扰,从而释放了潜在活性。

3 结论

研究利用多相态解析技术,揭示了咖啡体系中加工工艺—胶体结构—生物活性的内在关联,修正了传统仅依赖体外化学指标的评价体系。结果表明,冲泡动力学与热力学条件决定了胶体颗粒的骨架组成与微观形貌。土耳其式的高温湍流虽然降低了传质阻力,提高了总固形物提取率,但热诱导作用促使“多糖—蛋白质—油脂”形成致密且多分散的三元团聚体;手冲通过滤纸的筛分效应,构建了粒径分布均一(约 188 nm)的纳米胶体体系;而法式压滤受限于静态扩散机制,导致结构性蛋白溶出受阻,形成了缺乏蛋白质、以“多糖—油脂”为核心的疏水性微米颗粒。咖啡复杂体系中存在显著的“基质掩蔽”与“活性拮抗”效应。研究证实,胶体骨架通过物理包埋(核—壳结构)对脂质产生掩蔽效应,导致常规检测低估了其真实含量。此外,原液的胞内抗氧化活性显

著低于各分相之和,揭示了原液基质的“非加和性”特征:大分子胶体基质可能通过非共价键束缚活性小分子,或在细胞表面产生竞争性抑制,从而限制了活性物质的跨膜转运。咖啡呈现显著的“体外化学—胞内抗氧化活性反转”,表明胞内抗氧化效应可能更多受胶体结构介导的细胞可利用性调控。尽管土耳其式咖啡因高浓度酚类表现出最强的化学抗氧化活性,但其大尺寸团聚体限制了细胞摄取。相反,手冲咖啡凭借均一的纳米尺寸优势,可能通过诱导网格蛋白介导的胞吞作用(纳米载体效应)进入细胞;法式压滤咖啡则得益于其独特的“高脂质/无蛋白”表面特性,利用相似相溶原理增强了与细胞膜的亲和力。两者均显著提升了单位酚类的胞内抗氧化效率。

综上,通过调控冲泡工艺改变胶体性质(尺寸效应或疏水效应)可有效提升咖啡的健康功效。但该研究仍存在一定局限:① 仅比较了 3 种典型冲泡方式,尚未进一步解耦水温、萃取时间、研磨粒度和过滤介质等单一工艺因素的影响;② 胶体颗粒的核—壳结构、表面疏水性及活性物质负载方式仍主要基于组成和分相结果推测,缺乏直接结构证据;③ 胞内抗氧化活性的提升机制仍需通过摄取通路验证、模拟消化和肠屏障模型进一步确认。后续研究可重点结合多尺度结构表征、细胞摄取机制解析和消化稳定性评价,建立“冲泡工艺—胶体结构—生物利用

度”的定量关联模型。

参考文献

- [1] Zhou H N, Li J, Zhang C, et al. Impact of coffee consumption on mortality in patients with cardiovascular and cerebrovascular diseases: a cohort study[J]. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 2025, 35(7): 103855.
- [2] Ma L, Hu Y, Alperet D J, et al. Beverage consumption and mortality among adults with type 2 diabetes: prospective cohort study[J]. *BMJ*, 2023, 381: e073406.
- [3] Zhang T J, Song J G, Shen Z F, et al. Associations between different coffee types, neurodegenerative diseases, and related mortality: findings from a large prospective cohort study[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2024, 120(4): 918-926.
- [4] Lemos M F, De Andrade Salustriano N, De Souza Costa M M, et al. Chlorogenic acid and caffeine contents and anti-inflammatory and antioxidant activities of green beans of conilon and Arabica coffees harvested with different degrees of maturation[J]. *Journal of Saudi Chemical Society*, 2022, 26(3): 101467.
- [5] Tores De La Cruz S, Iriondo-Dehond A, Herrera T, et al. An assessment of the bioactivity of coffee silverskin melanoidins [J]. *Foods*, 2019, 8(2): 68.
- [6] Rojas-González A, Figueroa-Hernández C Y, González-Rios O, et al. Coffee chlorogenic acids incorporation for bioactivity enhancement of foods: a review[J]. *Molecules*, 2022, 27(11): 3 400.
- [7] 高观祯, 饶平凡, 徐瑶, 等. 咖啡制备工艺对胶体颗粒形成及抗氧化特性的影响[J]. *食品与机械*, 2025, 41(9): 1-7.
Gao G G, Rao P F, Xu Y, et al. Effects of coffee preparation processes on colloidal particle formation and antioxidant properties[J]. *Food & Machinery*, 2025, 41(9): 1-7.
- [8] Gao G Z, Wang H Q, Zhou J W, et al. Isolation and characterization of bioactive proteoglycan-lipid nanoparticles from freshwater clam (*Corbicula fluminea* Muller) soup[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(5): 1 610-1 618.
- [9] Córdoba N, Moreno F L, Osorio C, et al. Chemical and sensory evaluation of cold brew coffees using different roasting profiles and brewing methods[J]. *Food Research International*, 2021, 141: 110141.
- [10] Liu H M, Liu D D, Wang W L, et al. Dual-frequency countercurrent ultrasonic-assisted extraction of the cold brew coffee and *in situ* real-time monitoring of extraction process[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2024, 111: 107118.
- [11] Capuano E, Janssen A E M. Food matrix and macronutrient digestion[J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2021, 12: 193-212.
- [12] Han H, Ke L J, Wang H Q, et al. Incidental nanoparticles in black tea infusion: carriers of bioactives fortifying protection on intestinal mucosal cells against oxidative stresses[J]. *Food Biophysics*, 2022, 17(2): 209-220.
- [13] Várady M, Tauchen J, Klouček P, et al. Effects of total dissolved solids, extraction yield, grinding, and method of preparation on antioxidant activity in fermented specialty coffee[J]. *Fermentation*, 2022, 8(8): 375.
- [14] Janda K, Jakubczyk K, Baranowska-Bosiacka I, et al. Mineral composition and antioxidant potential of coffee beverages depending on the brewing method[J]. *Foods*, 2020, 9(2): 121.
- [15] Demir Y, Bertan S. Spatial distribution of Türkiye's local Turkish coffee kinds[J]. *Journal of Ethnic Foods*, 2023, 10(1): 32.
- [16] Jiamjariyatam R, Samosorn S, Dolsophon K, et al. Effects of drying processes on the quality of coffee pulp[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(10): e16876.
- [17] 陈亚蓝, 陈顺心, 侯贺丽, 等. 微生物固态发酵芡实工艺优化及抗氧化活性分析[J]. *食品与机械*, 2025, 41(11): 152-159.
Chen Y L, Chen S X, Hou H L, et al. Process optimization for microbial solid-state fermentation of euryale ferox and antioxidant activity analysis[J]. *Food & Machinery*, 2025, 41(11): 152-159.
- [18] 潘章超, 王勇, 吴莉, 等. 暗褐脉柄牛肝菌发酵液多糖的分离纯化与结构表征[J]. *食品与机械*, 2024, 40(7): 12-16.
Pan Z C, Wang Y, Wu L, et al. Isolation, purification and structure characterization of the polysaccharide from the fermentation broth of *Phlebopus portentosus*[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(7): 12-16.
- [19] Watanabe Y, Hirokawa M, Furukawa A, et al. Improvements in extraction yield by solid phase lipid extraction from liquid infant formula and human milk, and the fatty acid distribution in milk TAG analyzed by joint JOCS/AOCS official method Ch 3a-19[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 970837.
- [20] Awwad S, Issa R, Alnsour L, et al. Quantification of caffeine and chlorogenic acid in green and roasted coffee samples using HPLC-DAD and evaluation of the effect of degree of roasting on their levels[J]. *Molecules*, 2021, 26(24): 7 502.
- [21] Malm A V, Corbett J C W. Improved dynamic light scattering using an adaptive and statistically driven time resolved treatment of correlation data[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 13519.
- [22] Munteanu I G, Apetrei C. Analytical methods used in determining antioxidant activity: a review[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, 22(7): 3 380.
- [23] Ding Y N, Rao P F, Zhou J W, et al. Arginine Maillard reaction products recovered damaged immune cells[J]. *npj Science of Food*, 2025, 9: 164.
- [24] Wang X J, Lim L T. Modeling study of coffee extraction at different temperature and grind size conditions to better

- understand the cold and hot brewing process[J]. Journal of Food Process Engineering, 2021, 44(8): e13748.
- [25] Yüksel A N, Özkara Barut K T, Bayram M. The effects of roasting, milling, brewing and storage processes on the physicochemical properties of Turkish coffee[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 131: 109711.
- [26] Rivas S, Santos V, Parajó J C. Effects of hydrothermal processing on miscanthus $\times$ giganteus polysaccharides: a kinetic assessment[J]. Polymers, 2022, 14(21): 4732.
- [27] Hobbi P, Okoro O V, Delporte C, et al. Kinetic modelling of the solid-liquid extraction process of polyphenolic compounds from apple pomace: influence of solvent composition and temperature[J]. Bioresources and Bioprocessing, 2021, 8(1): 114.
- [28] Hariyatno S P, Paramita V, Amalia R. The effect of surfactant, time and speed of stirring in the emulsification process of soybean oil in water[J]. Journal of Vocational Studies on Applied Research, 2021, 3(1): 21-25.
- [29] Feng J L, Berton-Carabin C C, Guyot S, et al. Coffee melanoidins as emulsion stabilizers[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 139: 108522.
- [30] Elshahoryi N A, Ibrahim M O, Alhaj O A, et al. Acute cardiovascular effects of Turkish coffee assessed by VO_2 test: a randomized crossover trial[J]. Nutrients, 2025, 17(5): 823.
- [31] Chen M T, Yuan M D, Bu T, et al. The mechanism of weakening fat-induced matrix interference by deep eutectic solvents promoting fat phase transfer: a case of aflatoxin B1 detection by lateral flow immunoassay in 26 food matrices[J]. Food Chemistry, 2025, 493: 145886.
- [32] Shahidi F, Dissanayaka C S. Phenolic-protein interactions: insight from *in-silico* analyses – a review[J]. Food Production, Processing and Nutrition, 2023, 5(1): 2.
- [33] Ambadi T S, Clements H D, Baniasadi H, et al. Small-molecule properties define partitioning into biomolecular condensates[J]. Nature Chemistry, 2024, 16(11): 1794-1802.
- [34] Liang N J, Kitts D D, Wang X W, et al. Phenolic acid composition of coffee cascara in connection with antioxidant capacity: a geographic assessment[J]. Antioxidants, 2025, 14(5): 502.
- [35] Sousa De Almeida M, Susnik E, Drasler B, et al. Understanding nanoparticle endocytosis to improve targeting strategies in nanomedicine[J]. Chemical Society Reviews, 2021, 50(9): 5397-5434.
- [36] Khalil I, Yehye W A, Etxeberria A E, et al. Nanoantioxidants: recent trends in antioxidant delivery applications[J]. Antioxidants, 2020, 9(1): 24.
- [37] Villanueva M E, Lanterna A E, Vico R V. Hydrophobic silver nanoparticles interacting with phospholipids and stratum corneum mimic membranes in Langmuir monolayers[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 543: 247-255.
- [38] Sanità G, Carrese B, Lamberti A. Nanoparticle surface functionalization: how to improve biocompatibility and cellular internalization[J]. Frontiers in Molecular Biosciences, 2020, 7: 587012.
- [39] Ellingson M O, Bevan M A. Direct measurements & simplified models of colloidal interactions & diffusion with adsorbed macromolecules[J]. Soft Matter, 2024, 20(34): 6808-6821.
- [40] Gogou G, Koutsoni O S, Stathopoulos P, et al. Direct *in vitro* comparison of the anti-leishmanial activity of different olive oil total polyphenolic fractions and assessment of their combined effects with miltefosine[J]. Molecules, 2022, 27(19): 6176.