



天津科技大学学报

Journal of Tianjin University of Science & Technology

ISSN 1672-6510, CN 12-1355/N

《天津科技大学学报》网络首发论文

题目：白茶茶汤沉淀物的形成、结构表征及调控研究
作者：陈璐，黄亚平，叩银娇，常凯乐，刘安军
DOI：10.13364/j.issn.1672-6510.20250182
收稿日期：2025-12-05
网络首发日期：2026-09-03
引用格式：陈璐，黄亚平，叩银娇，常凯乐，刘安军. 白茶茶汤沉淀物的形成、结构表征及调控研究[J/OL]. 天津科技大学学报.
<https://doi.org/10.13364/j.issn.1672-6510.20250182>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。



DOI: 10.13364/j.issn.1672-6510.20250182

白茶茶汤沉淀物的形成、结构表征及调控研究

陈璐, 黄亚平, 叩银娇, 常凯乐, 刘安军

(天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457)

摘要: 沉淀问题对茶饮料的质量和稳定性构成了严重挑战。为研究白茶茶汤沉淀物的形成过程和结构特征, 将白茶茶汤放置在 4 °C 贮藏 40 d 后, 观察到沉淀出现黑白分层现象, 利用化学分析方法和傅里叶红外光谱等方法对其进行成分分析和结构表征, 结果表明, 黑色可逆沉淀主要在前 30 d 形成, 主要成分包括茶多酚(38.61%)、茶氨酸(5.77%)和咖啡碱(4.43%)等, 白色不可逆沉淀主要在 20~40 d 形成, 其成分包括草酸盐和大量矿物质元素等, 草酸钙结晶度为 64.12%。采用添加螯合剂和碳水化合物方法调控茶汤沉淀, 结果表明, 添加 0.1 mmol/L 食品级 Na₂EDTA 或 0.5 g/mL 果糖对茶汤沉淀的抑制效果相对显著, 这些结果为改善白茶饮料稳定性提供了理论基础。

关键词: 白茶; 沉淀; 结构特征; 调控

中图分类号: TS275.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510 (0000)00-0000-00

Formation, Structural Characterization and Regulatory Research of Sediment in White Tea Infusion

CHEN Lu, HUANG Yaping, KOU Yinjiao, CHANG Kaile, LIU Anjun

(College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: The sedimentation problem poses a serious challenge to the quality and stability of tea beverages. To study the formation process and structural characteristics of the sediment in the tea infusion of white tea, the tea infusion of white tea was placed at 4°C and refrigerated for 40 days. It was observed that the sediment showed a black and white stratification phenomenon. Chemical analysis methods and Fourier transform infrared spectroscopy were used to analyze the components and characterize the structure. The results showed that the black reversible sediment mainly formed in the first 30 days. The main components included tea polyphenols (38.61%), theanine (5.77%), and caffeine (4.43%), etc. The white irreversible precipitate mainly formed on the 20th to 40th day, and its components included oxalates and a large number of mineral elements, etc. The crystallinity of calcium oxalate was 64.12%. The sediment of tea infusion was regulated by adding chelating agents and carbohydrates. The results showed that adding 0.1 mmol/L food grade Na₂EDTA or 0.5 g/mL fructose had a relatively significant inhibitory effect on the sediment of tea infusion. These results provided a theoretical basis for improving the stability of white tea beverages.

Key words: white tea; sediment; structural characteristics; regulation

白茶是中国传统六大茶类之一, 距今已有两百年历史^[1], 因其口感清甜且具备多种保健功效深受人们喜爱。研究表明, 白茶的主要活性成分包括茶多酚、氨基酸、黄酮化合物和咖啡碱等^[2], 具有抗氧

化^[3]、抗癌^[4]、降血压^[5]、减肥^[6]等功效。

白茶茶汤在长期冷藏过程中, 由于生化成分之间的相互作用, 容易出现明显的浑浊现象, 降低了感官品质, 并且影响人体对营养成分的吸收。这种

收稿日期: 2025-12-05; 修回日期: 2026-02-24

作者简介: 陈璐(2000—), 女, 河北张家口人, 硕士研究生; 通信作者: 刘安军, 教授, laj@tust.edu.cn

浑浊现象也常见于绿茶、红茶、啤酒、白酒和苹果汁^[7-10]等饮品。目前,关于调控沉淀产生的方法主要有螯合剂法、添加碳水化合物法、生物酶法、吸附法和包埋法等^[11]。生物酶法受外部条件影响较大,成本较高,吸附法和包埋法会减少茶多酚等活性成分的含量,因此本文选用添加螯合剂和碳水化合物调控白茶茶汤沉淀的生成。

目前对白茶茶汤沉淀的研究较少,本研究分析白茶茶汤在低温贮藏条件下可逆沉淀和不可逆沉淀的化学成分、结构特征和基础调控方法,旨在提升白茶饮料的质量,为减少白茶沉淀提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料

寿眉白茶(3年),产自中国福建省;无水乙醇、甲醇、乙腈、二氯甲烷,乙酸、磷酸、葡萄糖、果糖、蔗糖、酒石酸氢钾、柠檬酸钾,分析纯,天津市江天化工技术股份有限公司;中性红、三氟乙酸(TFA)、单糖标准品,分析纯,天津科密欧化学试剂有限公司;儿茶素标准品、茶氨酸标准品、茶黄素标准品,色谱纯,天津索罗门生物科技有限公司;有机酸标准品,色谱纯,北京迈瑞达科技有限公司;咖啡碱标准品,色谱纯,天津艾杰科生物科技有限公司,食品级 Na_2EDTA ,上海枫晴化工有限公司。

ST-16R型高速冷冻离心机、ICS-5000+型离子色谱仪、NicoletS50型傅里叶变换红外光谱仪、电感耦合等离子体发射光谱仪,赛默飞世尔科技公司;FD-1A-50型真空冷冻干燥机,上海仪电科学仪器有限公司;Synergy HTX型酶标仪,美国伯腾仪器有限公司;1260infinityI型高效液相色谱仪,安捷伦科技有限公司;SU3800扫描电子显微镜,日立公司;RigakuX射线衍射仪,日本Rigaku公司;UV-2700紫外可见分光光度计,日本岛津公司。

1.2 白茶茶汤制备

将茶叶(20~60目)用蒸馏水(茶叶与水质量比为1:50)在80℃下浸提20 min。提取液经双层300目布过滤后,迅速冷却至室温;4℃、5000g高速离心15 min获得上清液,上清液进行巴氏杀菌(90℃10 min)。

1.3 茶汤沉淀形成观察及分离制备

茶汤在4℃贮藏40 d,每隔10 d进行拍照记录,4℃、10000g高速离心20 min获取总沉淀,总沉淀中加入30 mL蒸馏水,60℃加热30 min;摇匀后,4℃、10000g离心15 min,所得沉淀和上清液分别

是不可逆沉淀和可逆沉淀,冷冻干燥后称质量,贮藏进行后续分析。

总沉淀在60℃水浴加热30 min,既能让可逆沉淀充分溶解,便于后续离心,又不会因温度过高破坏可逆沉淀中的活性成分,同时避免新的不可逆反应,但应注意避免加热时间过长导致部分热敏性物质发生微量降解。

1.4 茶汤及沉淀成分分析

茶汤的透光率测定:采用紫外可见分光光度法,以超纯水作为空白,测定640 nm下不同贮藏时间茶汤的透光率。茶汤的澄清度与其透光率呈正相关关系。

茶汤的色差分析:采用色差仪对不同贮藏时间的茶汤进行色差测定^[12], L^* 、 a^* 和 b^* 分别对应明度、红绿色度和黄蓝色度。

常见化学成分测定:分别采用福林酚法^[13]、考马斯亮蓝法^[14]、苯酚硫酸法^[15]、氯化铝比色法^[16]测定茶多酚、蛋白质、总糖、总黄酮。

儿茶素和咖啡碱测定:采用高效液相色谱法(HPLC)测定^[17]。准确称取没食子酸(GA)、没食子儿茶素(GC)、表没食子儿茶素(EGC)、表没食子儿茶素没食子酸酯(EGCG)、表儿茶素(EC)、没食子儿茶素没食子酸酯(GCG)、儿茶素(C)和咖啡碱(CAF)标准品。色谱条件:C18色谱柱(250 mm×4.6 mm,5 μm),柱温35℃,流量0.5 mL/min,进样量10 μL,紫外检测波长278 nm,流动相A为0.5%冰乙酸水溶液,流动相B为甲醇。梯度洗脱程序:0~10 min,100%~80%A;10~35 min,80%~55%A;35~40 min,55%~55%A;40~45 min,55%~100%A。

茶氨酸测定:参考文献[18]方法并做少量修改,以L-茶氨酸为标准品,采用HPLC法进行样品分析。

茶黄素测定:以茶黄素为标准品^[19],采用HPLC法进行样品分析。

有机酸测定:参考文献[20]方法并稍作修改。以草酸、苹果酸、乙酸、柠檬酸和琥珀酸作为标准品,采用HPLC法进行样品分析。

单糖组成分析:以鼠李糖、阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖、木糖和甘露糖为标准品,采用离子色谱法^[21]进行测定。样品和标准溶液在分析前均经酸处理。离子色谱条件:色谱系统Dionex ICS-2500,色谱柱CarboPac A20(3 mm×150 mm),双脉冲安培检测器,柱温30℃,流动相A为纯水,流动相B为NaOH溶液,流动相C为NaAc溶液,流量0.45 mL/min,三元梯度程序。

元素组成分析: 采用电感耦合等离子体发射光谱法^[22]定量分析矿物元素。取 0.5 g 样品, 用 6 mL 浓硝酸消解, 消解完全后, 用蒸馏水定容至 100 mL。

1.5 结构分析

采用扫描电子显微镜 (SEM) 对沉积物形态进行观察。在高真空条件下进行, 加速电压为 10.0 kV, 图像分别在 2000 倍和 4000 倍的放大倍数下采集。

采用能量色散 X 射线光谱仪 (EDS) 进行元素组成分析。分析前, EDS 探测器使用金元素进行校准, 元素定量分析在 20 kV 下进行, 每个点的采集时间为 60 s。

采用傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR) 对不可逆沉淀进行检测^[22]。分析前, 将样品与 KBr 粉末按质量比 1 : 150 混合研磨, 在 400~4000 cm^{-1} 内采集光谱数据, 光谱分辨率设置为 2 cm^{-1} , 扫描 32 次。

采用 X 射线衍射仪 (XRD) 表征不可逆沉淀的晶体结构, 用 Cu-K α 辐射 ($\lambda=1.5406 \text{ \AA}$)。衍射图谱的获取条件: 发散狭缝 (DS) 1°; 防散射狭缝 (SS) 1°; 接收狭缝 (RS) 0.3 mm; 连续扫描模式下扫描速率 2 ($^{\circ}$)/min, 2θ 扫描范围为 5~90°。利用 MDI Jade 9.0 软件, 通过将观测到的衍射峰与 ICDD 数据库中的参考图谱进行匹配完成物相鉴定。

1.6 白茶茶汤沉淀基础调控

1.6.1 不同螯合剂对白茶茶汤沉淀形成的影响

向茶汤中分别加入 0.1 mmol/L 和 1 mmol/L 的食品级 Na₂EDTA、柠檬酸钠、酒石酸氢钾, 85 °C 搅拌 20 min, 4 °C、10000g 高速离心 15 min, 得到澄清的茶汤, 经灌装、灭菌(90°C, 10 min), 4 °C 贮藏 20 d 观察沉淀形成。

1.6.2 不同糖类对白茶茶汤沉淀形成的影响

向茶汤中添加不同质量浓度的果糖、葡萄糖和蔗糖, 90 °C 加热 10 min 后进行灭菌和灌装, 4 °C 贮藏 20 d 观察沉淀形成。

1.7 数据分析

采用 SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析 (ANOVA) 统计分析, Duncan 多重范围检验用于评估均值间的显著性差异, $P < 0.05$ 被认为具有统计学意义。每个实验重复 3 次, 结果以“平均值和标准差”表示。

2 结果与分析

2.1 贮藏期沉积物观测

低温通过减缓氧化过程 (如儿茶素的分解) 和分子运动保持茶汤品质。白茶茶汤 40 d 沉淀形成观察、沉淀量变化及茶汤透光率变化如图 1 所示。

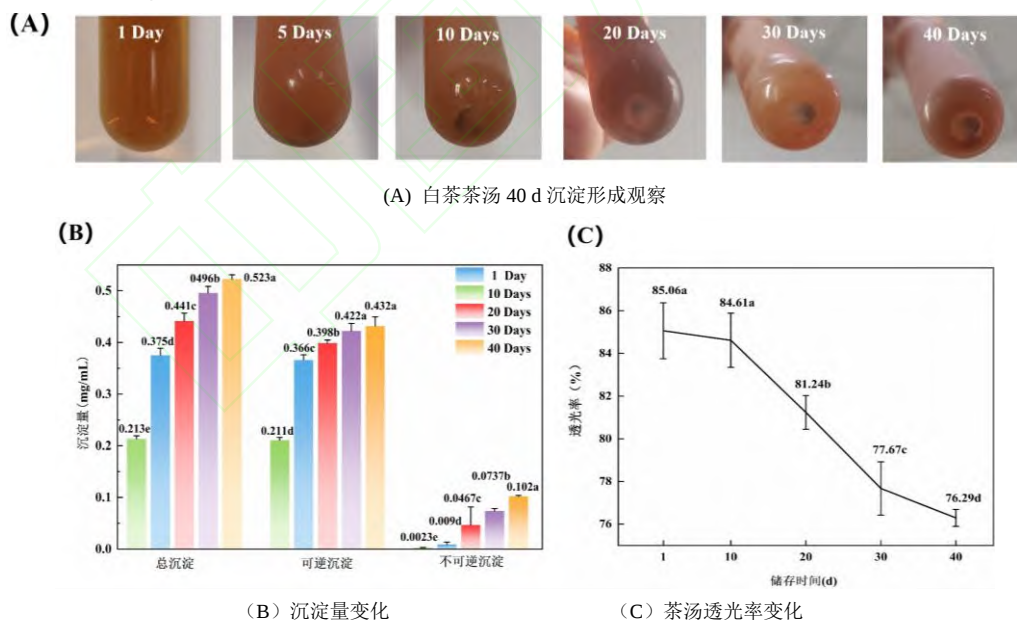


图 1 白茶茶汤 40 d 沉淀形成观察、沉淀量变化及茶汤透光率变化

Fig. 1 40 Days observation on sediment formation of white tea infusion, change in sediment content and in light transmittance of tea infusion

由图 1 (A) 可知, 白茶茶汤中的沉淀物出现明显黑白分层, 沉淀量随贮藏时间的延长而持续增加。贮藏 5 d 时, 茶汤中首次出现少量明显的黑色沉淀, 茶汤逐渐呈现分层现象; 贮藏 10 d 时, 黑色沉淀占

主导, 开始形成微量白色沉淀; 贮藏 10~20 d 时, 黑色沉淀逐渐增加, 而白色沉淀显著上升; 贮藏 20~30 d 时, 两种沉淀均缓慢增长; 贮藏 40 d 时, 黑色和白色沉淀的量基本稳定。黑色和白色沉淀物经 60 °C

加热 30 min 后, 大部分黑色沉淀物在茶汤中重新溶解, 而白色沉淀物保持稳定, 未进一步溶解。结合图 1 (B) 和图 1 (C) 沉淀量和透光率的变化可知, 在前 40 d, 总沉淀量呈显著上升趋势, 茶汤贮藏 40 d 后的总沉淀量相比于第 1 天增长了 2.5 倍; 在前 30 d, 可逆沉淀量显著增长, 30~40 d, 沉淀量趋于稳定, 在 20~40 d, 不可逆沉淀量显著增长, 总体来看, 可逆沉淀仍占主体 (82.6%~99.06%), 而透光率则呈下降趋势, 降幅为 8.77%, 30 d 后下降速率减缓并逐渐进入稳定阶段, 这与实际观察茶汤结果一致。

2.2 色差分析

贮藏期间茶汤色差变化见表 1。

表 1 贮藏期间茶汤色差变化

Tab. 1 Color difference changes of white tea infusion within

40 days of storage

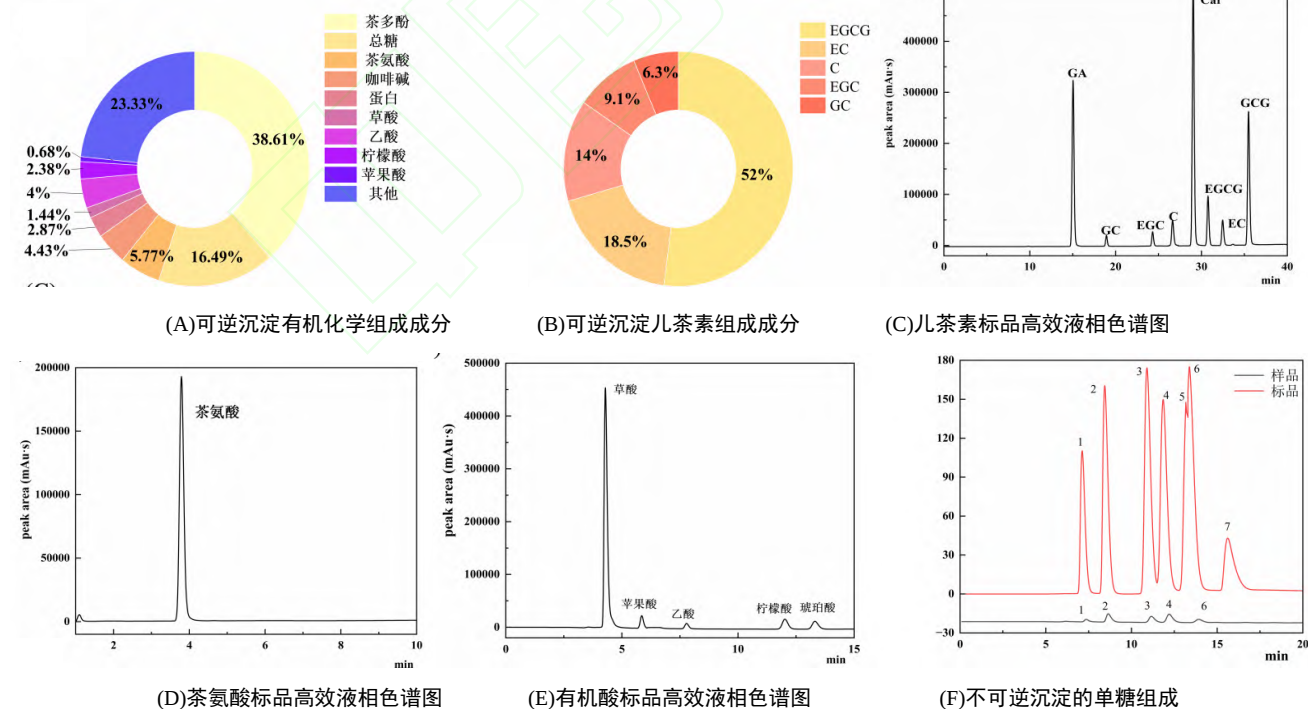
贮藏时间/d	<i>L</i>	<i>a</i> *	<i>b</i> *	ΔE
1	45.16 ^b	2.14 ^d	2.38 ^d	23.46 ^b
10	46.73 ^a	2.65 ^c	2.97 ^c	20.76 ^c
20	42.62 ^c	2.73 ^c	2.93 ^c	16.5 ^d
30	38.59 ^d	3.66 ^b	3.67 ^b	25.1 ^b
40	35.68 ^e	3.89 ^a	3.79 ^a	26.9 ^a

注: 数据以 3 次重复值的平均值表示, 表中不同字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$)。

随着贮藏时间的延长, *L* 显著下降约 9.48%, 表明茶汤颜色变深; *a** 上升, 红色调增加; *b** 值持续上升, 反映出茶汤中黄色调的持续存在。在贮藏过程中, 茶汤会变暗并呈现更红的色调, 这主要归因于茶多酚的氧化聚合以及美拉德反应的影响^[23-24]。影响茶叶色泽的儿茶素首先被酶氧化为邻醌, 随后这些邻醌转化为茶黄素、茶红素或茶褐素。随着储存时间的延长, 茶黄素和茶红素的含量逐渐减少, 而茶褐素的含量持续增加, 从而使茶汤颜色变深、呈红褐色。此外, 美拉德反应对色泽的影响具有阶段性。在储存的早期阶段, 蛋白质分解并释放出氨基酸; 在储存的后期阶段, 这些氨基酸与糖类发生反应生成黄色化合物, 增加了茶汤的黄色。

2.3 贮藏期间上清液和沉淀物中的化学成分分析

白茶茶汤沉淀的有机化学组成如图 2 所示。由图 2 (A) 可知, 可逆沉淀由 76.7% 的已知成分和 23.3% 其他成分组成, 其中茶多酚、总糖、茶氨酸 (图 2D)、咖啡碱 (图 2C)、有机酸 (图 2E) 和蛋白质为主要成分, 分别占总沉淀的 38.61%、16.49%、5.77%、4.43%、8.50% 和 2.87%。绿茶茶汤沉淀物富含多酚 (29.86%~78.66%)、总糖 (14.47%~27.62%)、咖啡碱 (2.35%~10.43%) 等^[25]。



注: 1-鼠李糖; 2-阿拉伯糖; 3-半乳糖; 4-葡萄糖; 5-木糖; 6-甘露糖; 7-果糖。

图 2 白茶茶汤沉淀的有机化学组成

Fig. 2 Organic chemical composition of white tea infusion sediment

儿茶素、茶黄素、类黄酮及没食子酸是主要的多酚类成分^[26]。在儿茶素(图 2B)中, EGCG 含量最高, 其比例由高到低依次为 EGCG>EC>C>EGC>GC, 分别占总儿茶素的 52.04%、18.55%、14%、9.1%和 6.35%。在茶黄素中, 仅检测到 TF, 占 0.2%。这是因为白茶发酵程度极低, 导致多酚类物质氧化程度轻微, 儿茶素在氧化酶作用下发生聚合, 形成可忽略量的茶黄素和茶红素。相比之下, 红茶经过充分发酵, 已检测到超过 20 种茶黄素单体, 总量可达 2%^[27]。有机酸也是可逆沉淀的关键成分, 其中乙酸占比最高。其比例由高到低依次为乙酸>柠檬酸>草酸>琥珀酸>苹果酸, 分别占可逆沉淀的 4%、2.4%、1.4%、0.9%和 0.7%。研究表明, 乙酸是白茶中的主要有机酸。与此类似, 在绿茶和红茶浸出物中也检测到了有机酸^[4]。

采用离子色谱法对不可逆沉淀中的单糖组成进行分析, 结果如图 2F 所示。沉淀物中含有五种单糖: 鼠李糖、阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖和甘露糖。其中, 葡萄糖含量相对较高, 为主要单糖成分, 而其他四种单糖的含量相对较低。根据从不同浓度标准品构建的标准曲线, 计算得出摩尔比为 0.56 : 2.19 : 1.85 : 2.67 : 1.12。

白茶茶汤中可逆沉淀化学成分含量及成分与透光率之间关联性见表 2。在 4 °C 贮藏 40 d, 白茶的上清液和沉淀物的化学组成均发生了动态变化。随着时间的推移, 上清液中多种金属元素和有机成分的含量普遍呈现下降趋势。主要金属元素 (Ca、Fe、Al、Mg、Zn、Cu、K、Mn、Ni) 的含量均有所降低, 且该降低过程的起始时间存在显著差异: Ca、Mg、Fe、Cu、Zn、Al 和 Mn 在前 20 d 内显著减少, 而 K 和 Ni 的减少则延迟至第 30 d。这是因为与 Ca^{2+} 和 Fe^{3+} 相比, K^{+} 和 Ni^{2+} 与酚羟基和羧基的配位能力较弱, 因此达到形成不溶性络合物临界浓度所需时间更长^[28]。茶多酚、蛋白质、黄酮类、茶黄素、咖啡碱、有机酸 (草酸、乙酸、柠檬酸、苹果酸、琥珀酸) 以及儿茶素 (GC、EGC、EGCG、EC、C) 的含量逐渐降低, 且大多数成分的下降主要发生在前 20 d 内。茶多酚是决定上清液化学性质的核心成分, 含量最高, 占主要有机物质的 32.75%~36.52%。相比之下, 总糖含量在前 10 d 略有增加, 随后趋于稳定。然而, 茶氨酸含量随贮藏时间增加, 源于其对胶体颗粒的吸附作用。低温条件下, 布朗运动减弱导致胶体沉积, 促使茶氨酸解吸并释放至上清液^[29]。

表 2 白茶茶汤中可逆沉淀化学成分含量及成分与透光率之间关联性

Tab. 2 Content of reversible and irreversible sediments in white tea infusion and the correlation

化学成分	上清液					可逆沉淀				相关系数
	0d	10d	20d	30d	40d	10d	20d	30d	40d	
茶多酚/ (μg/mL)	637.79 ^a	585.87 ^b	514.87 ^c	510.48 ^{cd}	508.21 ^d	365.87 ^c	379.57 ^b	381.36 ^{ab}	385.62 ^a	-0.984*
蛋白/ (μg/mL)	43.45 ^a	38.85 ^b	30.78 ^c	26.64 ^d	25.61 ^d	20.14 ^c	22.83 ^b	28.36 ^a	28.69 ^a	-0.921
总糖/ (μg/mL)	236.45 ^b	270.23 ^a	208.91 ^c	200.34 ^d	200.16 ^d	128.62 ^c	151.65 ^b	150.64 ^b	164.69 ^a	-0.875
黄酮/ (μg/mL)	72.56 ^a	68.51 ^b	53.51 ^c	49.68 ^d	48.31 ^d	49.74 ^c	53.02 ^b	55.37 ^a	56.31 ^a	-0.916
茶氨酸/ (μg/mL)	98.63 ^d	104.78 ^c	110.22 ^b	113.63 ^a	102.03 ^b	178.58 ^a	128.59 ^b	120.36 ^c	125.36 ^{bc}	0.838
茶黄素/ (μg/mL)	0.09 ^a	0.08 ^b	0.05 ^c	0.02 ^d	0.01 ^d	0.12 ^d	0.30 ^c	0.50 ^b	0.66 ^a	-0.959*
咖啡碱/ (μg/mL)	95.24 ^a	92.36 ^b	85.64 ^c	73.01 ^d	70.65 ^e	54.77 ^d	65.84 ^c	68.64 ^b	88.54 ^a	-0.863
柠檬酸/ (μg/mL)	60.69 ^d	60.12 ^d	68.45 ^a	68.13 ^b	67.35 ^c	45.21 ^c	46.30 ^b	46.40 ^b	47.61 ^a	-0.787
乙酸/ (μg/mL)	90.12 ^a	90.65 ^a	89.23 ^b	88.69 ^b	87.36 ^c	75.68 ^b	78.81 ^a	79.46 ^a	79.89 ^a	-0.672
苹果酸/ (μg/mL)	15.18 ^c	15.56 ^a	15.45 ^b	15.56 ^{ab}	15.69 ^a	10.85 ^c	13.83 ^a	13.16 ^b	13.56 ^a	-0.979
琥珀酸/ (μg/mL)	19.46 ^b	19.12 ^c	19.59 ^a	19.42 ^b	18.68 ^d	15.43 ^b	18.49 ^a	18.69 ^a	18.87 ^a	-0.672
草酸/ (μg/mL)	42.12 ^a	40.64 ^b	40.12 ^c	38.69 ^d	31.32 ^e	22.59 ^c	26.54 ^b	27.46 ^b	28.69 ^a	-0.972*
GA/ (μg/mL)	25.61 ^a	24.59 ^b	20.69 ^c	17.70 ^d	15.36 ^e	7.64 ^c	8.12 ^b	8.18 ^b	8.97 ^a	-0.888
EGC/ (μg/mL)	8.53 ^a	8.22 ^b	3.67 ^c	2.81 ^d	2.12 ^e	2.18 ^c	2.87 ^b	2.95 ^b	3.15 ^a	-0.917
EGCG/ (μg/mL)	19.98 ^a	19.17 ^b	15.21 ^c	15.97 ^c	13.68 ^d	17.26 ^c	17.61 ^b	17.51 ^b	18.10 ^a	-0.984*
GC/ (μg/mL)	3.21 ^a	2.38 ^b	1.69 ^c	1.47 ^d	1.35 ^d	1.43 ^c	2.15 ^b	2.32 ^a	2.21 ^b	-0.784
EC/ (μg/mL)	5.69 ^a	5.33 ^b	4.56 ^c	4.14 ^d	3.84 ^e	5.81 ^c	5.98 ^b	6.07 ^b	6.45 ^a	-0.989*
C/ (μg/mL)	6.54 ^a	6.43 ^a	5.78 ^b	5.46 ^b	4.98 ^c	3.89 ^c	4.45 ^b	4.64 ^b	4.87 ^a	-0.897
Ca/ (μg/g)	654.39 ^a	538.49 ^b	531.49 ^{bc}	518.52 ^c	419.36 ^d	85.78 ^d	111.72 ^c	115.77 ^b	152.63 ^a	-0.978*

Mg/ (μg/g)	2679.36 ^a	2540.36 ^b	2137.65 ^c	1931.69 ^d	1432.59 ^e	368.32 ^c	389.65 ^b	393.49 ^b	456.39 ^a	-0.418
Fe/ (μg/g)	71.45 ^a	64.51 ^b	71.46 ^a	64.51 ^b	63.65 ^b	52.69 ^c	64.59 ^b	63.59 ^b	71.69 ^a	-0.921
Cu/ (μg/g)	8.64 ^b	7.97 ^{cd}	8.19 ^c	7.67 ^d	10.59 ^a	4.36 ^c	14.15 ^a	10.47 ^b	12.40 ^{ab}	-0.592
Zn/ (μg/g)	48.69 ^a	35.79 ^b	31.69 ^c	35.79 ^b	35.79 ^b	19.68 ^b	17.67 ^b	25.69 ^a	26.79 ^a	-0.838
Al/ (μg/g)	724.07 ^a	691.07 ^b	681.46 ^c	690.75 ^b	687.36 ^c	324.32 ^d	389.21 ^c	423.47 ^b	426.98 ^a	-0.886
K/ (μg/g)	67268.71 ^a	62843.97 ^b	64190.21 ^b	61163.20 ^c	58963.4 ^d	24491.31 ^c	25412.39 ^c	28714.39 ^b	31548.69 ^a	-0.947
Mn/ (μg/g)	1213.65 ^a	1189.76 ^b	1079.62 ^c	1096.37 ^c	1057.36 ^d	324.36 ^a	303.57 ^b	328.63 ^a	314.78 ^a	0.075
Ni/ (μg/g)	8.71 ^a	8.69 ^{ab}	8.64 ^b	8.117 ^c	7.667 ^d	1.58 ^c	3.54 ^a	3.36 ^b	3.49 ^{ab}	-0.716

注：数据以3次重复值的平均值表示，表中不同字母表示组间差异显著（ $P < 0.05$ ）；*表示化学成分与透光率显著相关。

可逆沉淀是指茶汤贮藏过程中底部形成的黑色物质。大多数成分随贮藏时间延长含量更高，如表2所示，可逆沉淀中主要有机成分为茶多酚、总糖、黄酮类、咖啡碱、蛋白质和草酸等，它们在贮藏前30 d内迅速积累，是初始沉淀形成过程的关键组成部分。高水溶性茶氨酸在此阶段下降。金属元素含量，在第30至40 d间出现显著上升，这表明后期金属元素通过桥接多酚或草酸中的阴离子基团等方式稳定沉淀物结构，钾和钙含量较高。

在茶叶的加工与贮藏过程中，冲泡后茶汤的透明度常表现出不稳定性。这种透明度的变化可能与茶汤中某些化学成分之间的相互作用有关，例如多酚与蛋白质的络合反应，贮藏温度升高会加速儿茶素的降解，最终导致茶汤透明度发生变化^[30]。由表2可知，透光率与多种成分浓度呈显著负相关，如 Ca^{2+} （ $r=-0.978$, $P<0.05$ ）、茶多酚（ $r=-0.984$, $P<0.05$ ）、茶黄素（ $r=-0.959$, $P<0.05$ ）、草酸（ $r=-0.972$, $P<0.05$ ）、EGCG（ $r=-0.984$, $P<0.05$ ）和EC（ $r=-0.989$, $P<0.05$ ）。这些结果表明，当这些成分含量较高时，透光率降低，茶汤浑浊度增大，导致沉淀物积累量增加。这些发现与早期报道一致，即 Ca^{2+} 、咖啡碱和多酚会促进绿茶浓缩液中沉淀的形成^[25]。相反，茶氨酸与透光率呈显著正相关（ $r=0.838$, $P<0.05$ ）。在果汁中添加富含脯氨酸和羟脯氨酸的明胶，可通过与多酚竞争性结合，阻止其与其他促浑浊活性蛋白的相互作用，从而抑制浑浊现象的产生^[31]。

不可逆沉淀主要指贮藏过程中形成的白色沉积物。在40 d的贮藏期间，白茶茶汤中不可逆沉淀化学成分含量见表3。不可逆沉淀中金属元素（Ca、

Mg、Fe、Cu、Zn、Al、K、Mn、Ni）的浓度均呈现快速上升趋势，其中Ca的增长率最快，表明其对不可逆沉淀形成具有显著贡献。

表3 白茶茶汤中不可逆沉淀化学成分含量

Tab. 3 Content of irreversible sediments in white tea

化学成分	infusion			
	10 d	20 d	30 d	40 d
Ca/ (μg/g)	2487.29 ^d	2893.45 ^c	3591.36 ^b	4119.68 ^a
Mg/ (μg/g)	2865.32 ^c	3039.02 ^b	2720.60 ^b	3125.46 ^a
Fe/ (μg/g)	87.69 ^d	94.36 ^c	136.49 ^b	149.37 ^a
Cu/ (μg/g)	21.39 ^c	30.69 ^{ab}	31.71 ^a	28.35 ^b
Zn/ (μg/g)	121.37 ^b	95.69 ^c	135.69 ^a	131.69 ^a
Al/ (μg/g)	712.63 ^d	843.26 ^c	856.21 ^b	901.13 ^a
K/ (μg/g)	3546.39 ^d	4897.69 ^c	5648.36 ^b	6147.69 ^a
Mn/ (μg/g)	363.56 ^c	344.51 ^d	376.58 ^b	401.36 ^a
Ni/ (μg/g)	1.65 ^b	1.32 ^b	3.65 ^a	3.04 ^a

注：数据以3次重复值的平均值表示，表中不同字母表示组间差异显著（ $P < 0.05$ ）。

2.4 沉淀微观结构特征

为阐明白茶茶汤中可逆沉淀和不可逆沉淀的结构特性，采用扫描电子显微镜和能量色散X射线光谱法进行分析，结果如图3所示。由图3A可知，不可逆沉淀呈现不规则形态、小尺寸（1~5 μm）、粗糙表面及聚集状态。图3B是在高倍镜下，可见大量具有规则短棒状的颗粒，这是晶体物质的典型特征。相比之下，可逆沉淀颗粒非常小（1~3 μm）、分散性良好，表面相对光滑且被非晶态基质包裹（图3C）。这种现象可能是由茶多酚、蛋白质等茶大分子形成的非晶态三维凝胶网络所致。

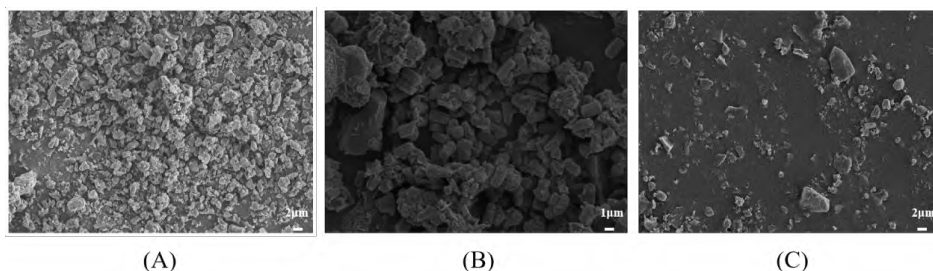


图 3 不可逆沉淀(2 μm(A)和 1 μm(B)) 和可逆沉淀(C)的电镜照片

Fig. 3 Scanning electron microscopy images of Irreversible sediment (2 μm(A) and 1 μm(B)) and Reversible sediment(C).

采用 EDS 对沉淀物进行元素分析。如表 4 所示, 与可逆沉淀中的钙(0.1%)相比, 不可逆沉淀中的含量显著更高(2.9%)。结合其规则的晶体形态, 这些结果证实不可逆沉淀中的晶体为钙盐。可逆沉淀中碳(C)和氧(O)的总含量为 98.95%, 还含有少量钾(K, 0.5%), 可能来源于可溶性钾盐。这表明可逆沉淀主要由茶多酚、蛋白质等大分子通过氢键等非共价键组装形成的复合物构成, 并能包裹可溶性离子。这种组成特征为可逆溶解性提供了根本解释。

表 4 可逆沉淀和不可逆沉淀的元素分析

Tab. 4 Elemental analysis of Reversible sediment and Irreversible sediment in white tea

元素	可逆沉淀	不可逆沉淀
C/%	75.00	72.30
O/%	23.95	19.10
P/%	0.10	0.00
S/%	0.10	0.00
K/%	0.50	4.30
Ca/%	0.10	2.90
Fe/%	0.05	0.30
Mg/%	0.20	1.10
共计/%	100.00	100.00

2.5 傅里叶变换红外光谱和 X 射线衍射分析

白茶不可逆沉淀通过傅里叶变换红外光谱和 X 射线衍射分析, 结果如图 4 所示。

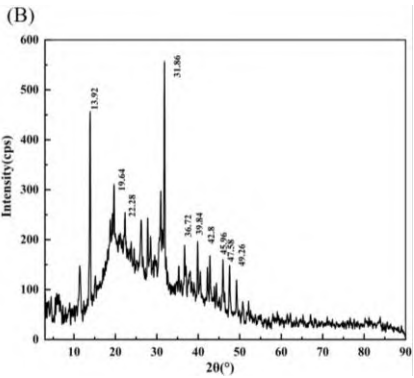
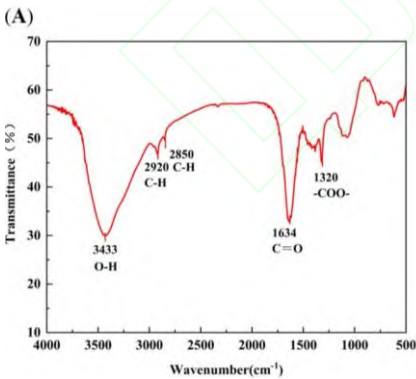


图 4 不可逆沉淀的红外分析光谱(A)和 XRD (B)

Fig. 4 FT-IR (A) and XRD (B) of Irreversible sediment

由图 4A 可知, 不可逆沉淀显示出几个明显的吸收峰: 3433 cm⁻¹ 处的宽峰归属于 O—H 伸缩振动, 表明沉淀物中存在大量相关的氢键^[32], 这些氢键来源于含羟基的化合物, 尤其是醇类和酚类。2920 cm⁻¹ 和 2850 cm⁻¹ 处的弱吸收峰是由碳水化合物中甲基(—CH₃)和亚甲基(—CH₂)的 C—H 伸缩振动引起的, 这是多糖的典型特征^[33]。1634 cm⁻¹ 处的峰对应于酰胺 I 带(肽键上的 C=O 伸缩振动), 表明不可逆沉淀中存在蛋白质^[34]。1634 cm⁻¹ 和 1320 cm⁻¹ 处的峰分别对应草酸中的不对称—COO—伸缩振动和对称—COO—伸缩振动^[35]。与草酸钙标品的光谱特征一致, 这一观察结果表明不可逆沉淀中存在草酸钙。

由图 4B 可知, 观察到的尖锐衍射峰与扫描电子显微镜(图 3B)观察到的规则晶体形貌一致, 共同证实了其高结晶度。XRD 图谱在 2θ = 13.92°、19.64°、22.28° 和 31.86° 处显示出明显的峰, 在 36.72°~49.26° 处有若干弱峰。通过峰拟合法计算得到不可逆沉淀的结晶度为 64.12%。主要衍射峰的位置与草酸钙一水合物的标准衍射图谱(JCPDS 卡号 20-0233)完全吻合。结合上述结晶度和衍射特征, 可确定不可逆沉淀中的晶相为草酸钙一水合物。

2.6 白茶茶汤沉淀的调控

2.6.1 螯合剂

螯合剂对白茶茶汤沉淀量和透光率的影响如图 5 所示。

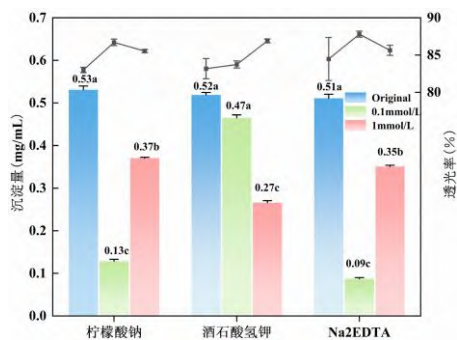


图5 螯合剂对白茶茶汤沉淀量和透光率的影响

Fig. 5 The effect of chelating agents on the sedimentation amount and transmittance of white tea infusion

向白茶茶汤中添加螯合剂可以显著减少茶汤沉淀生成,不同螯合剂抑制效果有显著差异,柠檬酸钠和食品级 Na_2EDTA 抑制效果较好,酒石酸氢钾相对较差。四元羧酸盐 Na_2EDTA 和三元羧酸盐柠檬酸钠与金属离子结合,形成多个稳定的五元环或六元环,以此螯合金属离子,而二元羧酸盐酒石酸钠和金属离子结合只能单个稳定的五元环^[36]。柠檬酸钠处理后白茶茶汤沉淀量呈显著降低趋势,且 0.1 mmol/L 处理的茶汤沉淀量显著低于 1 mmol/L,减少 75.47%,茶汤透光率在 0.1 mmol/L 也明显提高。酒石酸氢钾处理后的茶汤沉淀量随浓度增加而降低,

且 1 mmol/L 处理组的沉淀量最低,减少 48.07%。 Na_2EDTA 处理后茶汤沉淀量显著降低,且 0.1 mmol/L 处理组的沉淀量最少,减少 82.35%。添加 0.1 mmol/L 的 Na_2EDTA 可提高茶汤透光率,降低浑浊度。以上数据结果表明,0.1 mmol/L 的 Na_2EDTA 抑制茶汤沉淀生成效果最显著。

不同螯合剂对白茶茶汤上清液中化学成分的影响见表 5。与原液相比, Na_2EDTA 处理后的白茶茶汤上清液中茶多酚、总儿茶素、蛋白和咖啡碱含量差异不显著,但总糖含量显著减少,同时金属元素含量也呈显著降低趋势,1 mmol/L 处理组化学成分含量减少最多,对沉淀的抑制效果相对最好。柠檬酸钠处理后的上清液中,茶多酚、总儿茶素、蛋白和咖啡碱含量差异不显著,但 1 mmol/L 处理后总糖含量显著下降 51.06%,金属元素 Ca、Mg、Fe 和 Zn 与柠檬酸钠进行螯合反应,含量显著减少。酒石酸氢钾处理后的上清液中,茶多酚、总儿茶素、蛋白和咖啡碱含量差异不显著,大部分金属元素含量差异不显著,Mg 和 Al 与酒石酸氢钾进行螯合反应,含量显著减少。总体来说,1 mmol/L Na_2EDTA 对上清液中化学成分含量影响最显著。

表5 不同螯合剂对白茶茶汤上清液中化学成分的影响

Tab. 5 Effect of different chelating agents on the chemical components in the supernatant of white tea infusion

化学成分	原液	Na_2EDTA (mmol/L)		柠檬酸钠 (mmol/L)		酒石酸氢钾 (mmol/L)	
	0	0.1	1	0.1	1	0.1	1
茶多酚/($\mu\text{g/mL}$)	283 ^a	273 ^a	270 ^a	276 ^a	280 ^a	280 ^a	268 ^b
儿茶素/($\mu\text{g/mL}$)	57.95 ^a	53.93 ^a	47.62 ^a	57.25 ^a	61.74 ^a	63.43 ^a	55.67 ^a
总糖/($\mu\text{g/mL}$)	120.34 ^a	84.69 ^b	75.71 ^b	71.41 ^b	58.89 ^c	46.54 ^c	77.58 ^b
蛋白/($\mu\text{g/mL}$)	45.61 ^a	47.27 ^a	41.76 ^a	44.88 ^a	46.88 ^a	44.52 ^a	49.33 ^a
咖啡碱/($\mu\text{g/mL}$)	121.27 ^a	106.50 ^a	122.39 ^a	130.43 ^a	120.64 ^a	109.53 ^a	115.96 ^a
Ca/($\mu\text{g/g}$)	531.49 ^a	355.48 ^c	323.37 ^c	357.16 ^c	368.49 ^c	503.41 ^a	526.28 ^a
Mg/($\mu\text{g/g}$)	2137.65 ^a	2173.66 ^a	2082.15 ^b	2277.12 ^a	1933.81 ^b	2107.66 ^b	1931.49 ^c
Fe/($\mu\text{g/g}$)	71.46 ^a	66.11 ^b	64.75 ^b	64.19 ^b	67.16 ^b	74.37 ^a	81.66 ^a
Cu/($\mu\text{g/g}$)	8.19 ^a	7.09 ^b	7.03 ^b	9.31 ^a	8.64 ^a	8.98 ^a	10.69 ^a
Zn/($\mu\text{g/g}$)	31.69 ^a	32.79 ^a	32.14 ^a	28.21 ^b	27.43 ^b	29.08 ^a	29.16 ^a
Al/($\mu\text{g/g}$)	681.46 ^a	507.68 ^b	523.12 ^b	661.02 ^a	698.69 ^a	561.97 ^b	594.22 ^b
K/($\mu\text{g/g}$)	64190.21 ^a	62802.96 ^b	62034.77 ^b	66442.26 ^a	65156.49 ^a	64994.38 ^a	64314.34 ^a
Mn/($\mu\text{g/g}$)	1179.62 ^b	1169.34 ^b	1037.21 ^c	1189.21 ^b	1067.16 ^c	1429.37 ^a	1240.34 ^b

注:数据以3次重复值的平均值表示,表中不同字母表示组间差异显著($P < 0.05$)。

2.6.2 糖类

糖类对白茶茶汤沉淀量和透光率的影响如图 6 所示。添加糖类可显著减少茶汤沉淀的产生^[37],且果糖和蔗糖对沉淀的抑制效果更显著,主要因为果

糖的羟基数量较多且排布灵活,与茶多酚氢键结合效率最高,阻止其与蛋白质或金属离子结合的能力更强,蔗糖的糖苷键羟基活性受限,葡萄糖羟基少且位阻大,对茶汤调节作用较差^[38]。随着糖类添加

量的增加, 茶汤沉淀显著减少, 茶汤透光率增大, 果糖添加量为 0.2 g/mL 时, 茶汤沉淀发生大幅降低, 减少 41.51%, 0.5 g/mL 时, 茶汤产生的沉淀最少, 减少 77.36%。添加葡萄糖对抑制茶汤沉淀的生成影响相对较小, 添加蔗糖的茶汤沉淀量显著降低, 透光率升高, 且 0.5 g/mL 处理的沉淀量最少, 减少 64.15%。总体来看, 0.5 g/mL 果糖对沉淀抑制效果最显著。

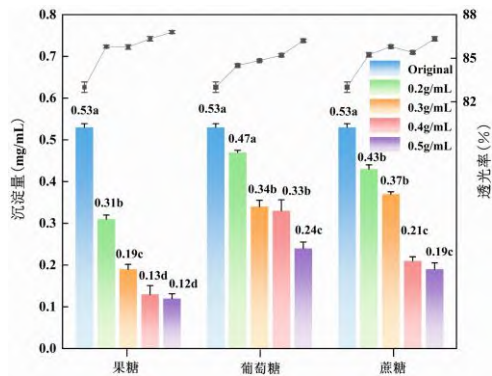


图 6 糖类对白茶茶汤沉淀量和透光率的影响

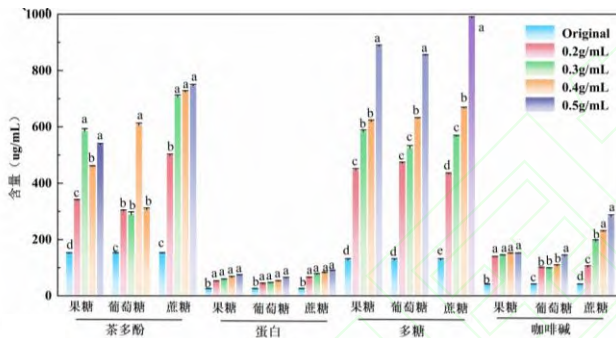


Fig. 6 The effect of carbohydrates on the sedimentation amount and transmittance of white tea infusion

糖类对白茶茶汤上清液中化学成分的影响如图 7 所示。茶多酚、总糖和咖啡碱是白茶茶汤沉淀的主要成分, 酯型儿茶素是参与沉淀生成的主要儿茶素。由图 7A 可知, 添加糖类能显著增加上清液中化学成分的浸出, 使参与沉淀形成的化学成分相对减少, 这表明添加糖类可抑制茶汤沉淀的生成, 随着果糖、葡萄糖和蔗糖添加量的增加, 上清液中茶多酚、蛋白、多糖和咖啡碱含量也随之增加, 蔗糖的影响相对更好。由图 7B 可知, 酯型儿茶素 (EGCG) 含量随糖类添加量增加显著升高, 其他儿茶素含量影响较小, 表明添加糖类可能会抑制酯型儿茶素参与到沉淀形成的过程中。总体来说, 蔗糖对白茶茶汤上清液中化学成分影响最显著。

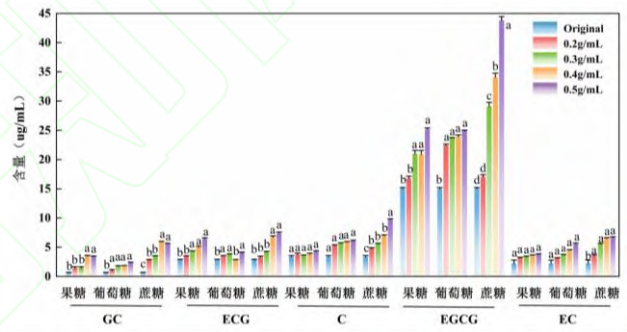


图 7 糖类对白茶茶汤上清液中化学成分的影响

Fig. 7 Effect of different carbohydrates on the chemical components in the supernatant of white tea infusion

3 结论

本文揭示了低温贮藏的白茶茶汤沉淀形成过程分为两个阶段: 快速累积期 (0~30 d) 和稳定期 (30~40 d)。茶汤沉淀出现分层现象, 形成了富含茶多酚、总糖和咖啡碱的黑色可逆沉淀物, 以及富含钙、草酸盐的白色不可逆沉淀物, 不可逆沉淀中含有结晶度为 64.12% 的草酸钙晶体。基础调控研究表明, 添加螯合剂, 0.1 mmol/L 食品级 Na_2EDTA 抑制茶汤沉淀效果相对最显著, 但在实际生产茶饮过程中要灵活合理把控用量, 避免过量使用对人体造成损害。添加碳水化合物, 0.5 g/mL 果糖对茶汤沉淀的抑制效果相对最显著。因此, 本文为控制寿眉白茶沉淀的产生提供了基础理论指导, 有望提升寿眉白茶饮料的稳定性和感官品质。

参考文献:

- [1] 缪伊雯, 周静芸, 杨春明, 等. 不同茶树品种寿眉白茶品质分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(15): 283-294.
- [2] Huang Fan, Wu Haijun, Luo Fan, et al. Effect of harvest seasons on biochemical components and volatile compounds in white teas from two cultivars[J]. Foods, 2025, 14(10): 1795.
- [3] Zhao Tiye, Huang Xiangxiang, Zhao Jian, et al. Theaflavins: an underexploited functional compound in black tea[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 154: 104755.
- [4] Chen Hongbo, Yu Fei, Kang Jiaxin, et al. Quality chemistry, physiological functions, and health benefits of organic acids from tea (*Camellia sinensis*)[J]. Molecules,

- 2023, 28(5): 23-39.
- [5] Wijesekara T, Liu Yongxiang, Xu Baojun. New insights into chemical compositions and health benefits of white tea and development of new products derived from white tea[J]. Food Science and Human Wellness, 2024, 14(11): 9250424.
- [6] Zhou Fang, Shang Bohao, Liu Changwei, et al. Comparative study of the anti-obesity effects of white tea and dark tea: Insights from microbiome and metabolomics[J]. Food research international, 2025, 202: 115666.
- [7] Xu Yongquan, Chen Gensheng, Du Qizhen, et al. Sediments in concentrated green tea during low-temperature storage[J]. Food Chemistry, 2014, 149: 137-143.
- [8] Jöbstl E, Fairclough J P A, Davies A P, et al. Creaming in black tea[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(20): 7997-8002.
- [9] Steiner E, Becker T, Gastl M. Turbidity and haze formation in beer: insights and overview[J]. Journal of the Institute of Brewing, 2010, 116(4): 360-368.
- [10] Millet M, Poupard P, Le Quéré J M, et al. Haze in apple-based beverages: detailed polyphenol, polysaccharide, protein, and mineral compositions[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(31): 6404-6414.
- [11] 石骏, 王东. 含茶提取物饮料沉淀形成机制概述及处理方法[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(08): 214-219.
- [12] Qu Di, Bo Panpan, Wen Liankui, et al. Analysis of key chemical components in aqueous extract sediments of Panax ginseng at different ages[J]. Foods, 2022, 11(8): 1161.
- [13] Matsushita K, Honda C, Nakamura Y, et al. Comparison of colorimetric methods for the analysis of total polyphenols in green tea extracts[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2024, 88(7): 798-803.
- [14] Kruger N J. The Bradford method for protein quantitation[M]. Passaic: Humana Press, 2009: 17-24.
- [15] Yue Fangfang, Zhang Jinrui, Xu Jiaxin, et al. Effects of monosaccharide composition on quantitative analysis of total sugar content by phenol-sulfuric acid method[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 963318.
- [16] 关艳丽, 李剑梅, 郭玲玲, 等. 杨树桑黄子实体总黄酮提取工艺优化及其生物活性评价[J]. 微生物学杂志, 2025, 15(4): 1-9.
- [17] Ni Hui, Chen Feng, Jiang Zedong, et al. Biotransformation of tea catechins using *Aspergillus niger* tannase prepared by solid state fermentation on tea byproduct[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 60(2): 1206-1213.
- [18] 程倩, 冯雪萍, 陈昭, 等. 高效液相色谱法测定复合果汁饮品中茶氨酸的含量[J]. 食品安全导刊, 2022, 14(24): 87-91.
- [19] Ai Yujie, Wu Qidi, Yuan Haibo, et al. Development of a rapid, accurate and efficient HPLC method for simultaneous determination of catechins and theaflavins in black tea[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 128: 105990.
- [20] Liu Meiyan, Shi Lijuan, Guo Jie, et al. Determination of organic acids for predicting sourness intensity of tea beverage by liquid chromatography-tandem mass spectrometry and chemometrics methods[J]. Journal of Separation Science, 2024, 47(9-10): 2300628.
- [21] Dai Keyao, Ding Wenjie, Li Zhentong, et al. Comparison of structural characteristics and anti-tumor activity of two alkali extracted peach gum arabinogalactan[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 279: 135407.
- [22] Qu Di, Hua Mei, Chen Jianbo, et al. Formation and characterization of irreversible sediment of ginseng extract[J]. Foods, 2021, 10(11): 2714.
- [23] Hua Jinjie, Wang Huajie, Yuan Haibo, et al. New insights into the effect of fermentation temperature and duration on catechins conversion and formation of tea pigments and theasinensins in black tea[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(7): 2750-2760.
- [24] Cloughley J B. Storage deterioration in Central African tea: changes in chemical composition, sensory characteristics and price evaluation[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1981, 32(12): 1213-1223.
- [25] Xu Yongquan, Hu Xiongfei, Tang Ping, et al. The major factors influencing the formation of sediments in reconstituted green tea infusion[J]. Food Chemistry, 2015, 172: 831-835.
- [26] Zhou Binxing, Wang Zihao, Yin Peng, et al. Impact of prolonged withering on phenolic compounds and antioxidant capability in white tea using LC-MS-based metabolomics and HPLC analysis: Comparison with green tea[J]. Food Chemistry, 2022, 368: 130855.

- [27] Jin Ge, Wang Yujie, Li Luqing, et al. Intelligent evaluation of black tea fermentation degree by FT-NIR and computer vision based on data fusion strategy[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 125: 109216.
- [28] 王元凤, 金征宇, 魏新林. 茶多糖金属络合物的制备及清除自由基活性研究[J]. 天然产物研究与开发, 2009, 21(03): 382-387.
- [29] Lin Xiaorong, Gao Xiong, Chen Zhongzheng, et al. Spontaneously assembled nano-aggregates in clear green tea infusions from *Camellia ptilophylla* and *Camellia sinensis*[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(18): 3757-3766.
- [30] Dai Qianying, Liu Sitong, Jiang Yurong, et al. Recommended storage temperature for green tea based on sensory quality[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(9): 4333-4348.
- [31] Tajchakavit S, Boye J, Bødager D, et al. Kinetics of haze formation and factors influencing the development of haze in clarified apple juice[J]. Food Research International, 2001, 34(5): 431-440.
- [32] Sharma G, Naushad M, Ala'A H, et al. Fabrication and characterization of chitosan-crosslinked-poly (alginate acid) nanohydrogel for adsorptive removal of Cr (VI) metal ion from aqueous medium[J]. International journal of biological macromolecules, 2017, 95: 484-493.
- [33] Zhang Jingyan, Liang Zijing, Zhang Kang, et al. Ultrasound-assisted extraction, characterization, and antioxidant activities of the polysaccharides from fermented *Astragalus membranaceus*[J]. Molecules, 2025, 30(5): 1159.
- [34] De Meutter J, Goormaghtigh E. Protein structural denaturation evaluated by MCR-ALS of protein microarray FTIR spectra[J]. Analytical Chemistry, 2021, 93(40): 13441-13449.
- [35] White R L. Infrared spectroscopic investigations of calcium oxalate monohydrate (Whewellite) dehydration/rehydration[J]. Minerals, 2023, 13(6): 77-83.
- [36] 欧阳健明, 谭燕华, 沈玉华. 凝胶体系中不同结构羧酸盐对草酸钙生物矿化的影响[J]. 物理化学学报, 2003, 19(04): 368-371.
- [37] 许勇泉. 绿茶茶汤及其浓缩汁沉淀形成与调控基础研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2015.
- [38] 梁月荣. 糖类和骤冷对红茶冷后浑形成的影响[J]. 浙江农业大学学报, 1995, 21(5): 519-524.