·特邀主编专栏—茶饮品全产业链生产关键技术研究与应用（客座主编：尹军峰、张建勇、许勇泉、崔宏春）·

客座主编寄语：茶业是我国农业优势产业和十大历史经典产业之一，是助力山区乡村振兴、农业增效、农民增收的支柱产业。随着经济社会的发展和人们消费需求的变化，近三十年来我国茶叶消费逐渐形成了瓶装茶饮品和现调茶饮品两大茶饮消费创新方式。以瓶装茶饮品（又称即饮茶）和现调茶饮品（又称新茶饮）为核心的茶饮产业通过激活年轻人新消费而得到快速发展，成为带动当前我国茶产业高质量可持续发展的关键突破口。基于我国茶产业发展现状，从茶饮品全产业链视角，开展茶饮品专用品种筛选、专用茶鲜叶生产、专用初精加工、深加工与设计等关键技术创新，开发高质化茶饮品，对推动我国茶产业高质量转型发展具有重要战略意义。

叶朱敏, 郭亮, 汪洁琼, 等. 不同等级黄山毛峰茶汤贮藏稳定性差异 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(11): 1−11. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070281

YE Zhumin, GUO Liang, WANG Jieqiong, et al. Comparison of Storage Stability between Infusions Made from Different Grades of Huangshan Maofeng Teas[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(11): 1−11. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070281

不同等级黄山毛峰茶汤贮藏稳定性差异

叶朱敏[1], 郭　亮[1,2], 汪洁琼[1], 陈建新[1], 汪　芳[1], 卫聿铭[1], 尹军峰[1], 许勇泉[1], 高　颖[1,*]

（1.中国农业科学院茶叶研究所, 浙江 杭州 310008;
2.安徽农业大学茶业学院, 安徽 合肥 230000）

摘　要: 绿茶饮料具有贮藏稳定性差、货架期短的问题。为了探明原料等级对绿茶饮料贮藏稳定性的影响，以一级、三级黄山毛峰绿茶为原料制备茶汤，对贮藏期间茶汤感官品质、理化特性、成分（包括基本成分、儿茶素及主要降解产物、主要黄酮醇苷、香气劣变相关挥发性化合物）的变化情况进行了研究。结果表明，三级黄山毛峰制成的茶汤（MF3）贮藏后滋味、香气、汤色变化程度小于一级黄山毛峰制成的茶汤（MF1），感官品质稳定性更强。MF3 的浊度和 pH 变化也小于 MF1。成分分析结果显示，MF1 中总儿茶素（特别是表型儿茶素）、杨梅素苷的降幅比 MF3 更大；相关性分析结果表明，贮藏过程中上述两类成分浓度的降低与滋味变差显著相关，提示它们可能是 MF1 滋味劣变更快的原因。此外，多种与茶汤熟闷气味有关的挥发性成分（如苯甲醛、苯乙醛、芳樟醇）升幅更高。这些可能是 MF1 贮藏稳定性较差的内在原因。综上，从贮藏稳定性的角度来讲，低等级黄山毛峰比高等级黄山毛峰更适合作为茶饮料生产的原料。

关键词: 绿茶饮料, 原料等级, 储藏, 稳定性, 感官品质, 熟闷
中图分类号: TS272.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)11−0001−11
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070281
本文网刊:

Comparison of Storage Stability between Infusions Made from Different Grades of Huangshan Maofeng Teas

YE Zhumin[1], GUO Liang[1,2], WANG Jieqiong[1], CHEN Jianxin[1], WANG Fang[1], WEI Yuming[1], YIN Junfeng[1], XU Yongquan[1], GAO Ying[1,*]

（1.Tea Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310008, China;
2.College of Tea Science, Anhui Agricultural University, Hefei 230000, China）

Abstract: The poor storage stability of green tea beverages results in short shelf life. To investigate the influence of raw material grade on the storage stability of green tea beverages, first-grade and third-grade Huangshan Maofeng green teas were used to prepare tea infusions. The changes in the sensory quality, physicochemical properties, and chemical composi-

收稿日期: 2025−07−25
基金项目: 国家自然科学基金项目（32202114）。
作者简介: 叶朱敏（1999−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 2602475689@qq.com。
*** 通信作者:** 高颖（1988−）, 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 茶深加工与多元化利用, E-mail: yinggao@tricaas.com。

tion (including basic components, catechins and their main degradation products, key flavonol glycosides, and volatile compounds associated with aroma deterioration) of tea infusions during storage were analyzed. The results showed that the tea infusion made from third-grade Huangshan Maofeng (MF3) exhibited fewer changes in taste, aroma, and color after storage compared with the tea infusion made from first-grade Huangshan Maofeng (MF1), indicating that MF3 had better sensory stability. Additionally, the changes in turbidity and pH of MF3 were smaller than those of MF1. The composition analysis revealed that the decrease in total catechins (particularly epicatechins) and myricetin glycosides was more pronounced in MF1 than in MF3. Furthermore, correlation analysis demonstrated a significant association between the reduction in these components and taste deterioration, suggesting their possible contributions to the less stable taste of MF1. In addition, the increase in volatile compounds (such as benzaldehyde, benzeneacetaldehyde, and linalool) associated with the retort odor was greater in MF1, which might explain the worse aroma stability of MF1. In conclusion, using lower-grade green tea as raw material for tea beverage production contributes to better storage stability of green tea beverages.

Key words: green tea beverage; raw material grade; storage; stability; sensory quality; retort odor

茶饮料是以茶叶的水浸提液或其浓缩液、茶粉等为原料，经加工而制成的饮料。根据 GB/T 21733—2008《茶饮料》，按照产品风味，可以分为茶饮料（茶汤）、调味茶饮料、复（混）合茶饮料以及茶浓缩液。近年来，茶饮料（茶汤）凭借其天然、健康的优势深受消费者的喜爱，市场逐步扩大。但由于内含成分的理化特性，茶饮料在贮藏期间易出现变色、沉淀、香气散失等问题，尤以绿茶饮料为甚[1]。绿茶饮料特征性的清香会随着储存时间的延长逐渐消失，转而呈现出熟闷气味，其浅（黄）绿明亮的汤色会逐渐加深、变暗，降低消费者购买欲望[1]。

先前的研究表明，原料、加工工艺、外源添加物、贮藏条件等因素对茶饮料品质稳定性有影响。适宜的绿茶原料不仅可以赋予绿茶饮料良好的风味，且在加工和贮藏过程中关键品质成分的转化和散失较少。袁海波等[2] 发现原料茶的杀青工艺对茶饮料香气稳定性有影响，经过蒸汽杀青和热风处理的绿茶更适合作为饮料用原料茶。对原料进行焙火处理，也可以稳定其所制茶饮料的香气品质[3]。添加蔗糖和麦芽糖一定程度上能提高绿茶饮料贮藏期间的风味稳定性[4]。灌装方式、包装材料、瓶型和贮藏温度影响茶饮料中茶多酚的降解速率[5]。另外，贮藏过程中的光照强度、含氧量也会影响茶饮料的品质稳定性[6]。

在实际生产中，有厂商注意到低等级原料制成的茶饮料似乎比高等级原料制成的茶饮料具有更好的贮藏稳定性。然而目前有关原料等级对茶饮料贮藏期间品质稳定性的研究较少，尚未明确这一现象。为探明原料等级对茶饮料稳定性的影响，本文选取一级和三级黄山毛峰作为对象，两者在嫩度与化学成分方面差异显著，有助于更清晰地观测原料等级对茶饮料稳定性的影响。通过感官审评、理化性质测定、基本成分分析等手段，多维度监测贮藏过程中茶汤的变化情况，以综合性地探明不同等级原料制成的茶汤在贮藏过程中的稳定性差异，揭示品质演变规律及其成因，以期为开发提高绿茶饮料在贮藏期的品质稳定性的新型调控技术提供理论支持，帮助解决茶饮料行业的瓶颈问题，促进产业健康发展。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

绿茶样品：一级黄山毛峰、三级黄山毛峰　谢裕大茶叶股份有限公司；咖啡碱（CAF）、没食子儿茶素（GC）、表没食子儿茶素（EGC）、儿茶素（C）、表儿茶素（EC）、没食子儿茶素没食子酸酯（GCG）、表没食子儿茶素没食子酸酯（EGCG）、表儿茶素没食子酸酯（ECG）、儿茶素没食子酸酯（CG）　美国 Sigma-Aldrich 公司；福林酚、没食子酸（GA）、氯化钠、无水磷酸氢二钠、磷酸二氢钾（纯度≥99.5%）、茶螺烷（纯度≥90.0%）　上海麦克林生化科技股份有限公司；氯化亚锡　如皋市金陵试剂厂；蒽酮　上海化学试剂采购供应五联化工厂；壬醛（纯度≥96.0%）、苯乙醛（纯度≥95.0%）、α-松油醇（纯度≥96.0%）、5,7-二羟基香豆素、水合茚三酮　上海源叶生物科技有限公司；甲酸（纯度≥98.0%）、苯甲醛（纯度≥99.0%）、香叶醇（纯度≥98.0%）、反式-β-大马烯酮、反式-β-紫罗酮（纯度≥98.0%）　阿拉丁生化科技股份有限公司（中国上海）；正构烷烃（C7~C40）、乙腈（LC-MS 级）　上海安谱实验器材有限公司；癸酸乙酯（纯度≥98.0%, GC-MS 级）、芳樟醇（≥96.0%）　梯希爱化成工业发展有限公司（中国上海）；纯净水　杭州娃哈哈集团有限公司。

HWS-24 型恒温水浴锅　上海一恒科学仪器有限公司；UNIC 2000 紫外-可见光分光光度计　上海尤尼柯仪器有限公司；CM-36dG 色差计　上海柯尼卡美能达投资有限公司；DHP-420S 电热恒温培养箱　天津塞得利斯实验分析仪器制造厂；FiveGo pH 计　上海梅特勒托利多仪器有限公司；RX-007 折光仪　日本 ATAGO 公司；浊度仪　美国哈希公司；8890 GC-5977 GC/MSD 气质联用仪　安捷伦科技（中国）有限公司；UHPLC-Q Exactive-Orbitrap MS 超高效液相色谱-四极杆轨道阱高分辨质谱联用仪　美国 Thermo Fisher 科技公司。

1.2 实验方法

1.2.1 绿茶茶汤制备　一级、三级黄山毛峰茶叶，按照茶水比 1∶100（w∶v, g∶mL），置于 60 ℃ 水浴锅浸

提 20 min，浸提结束后用滤网除去茶渣得到茶汤，后续转移至超净工作台进行无菌灌装。茶汤过膜除菌后（无菌 0.22 μm 滤膜），灌装至无菌的 125 mL 血清瓶中，每瓶 100 mL。一级黄山毛峰茶汤（MF1）、三级黄山毛峰茶汤（MF3）各灌装 15 瓶。

1.2.2　模拟贮藏实验　罐装茶汤置于 25 ℃ 恒温培养箱贮藏，于 0、7、14、21、28 d 取样（每种等级茶汤取出 3 瓶），保存于−20 ℃，待测。

1.2.3　感官审评　根据 GB/T 23776-2018《茶叶感官审评方法》对茶汤的香气和滋味采用评语与评分相结合的方式进行审评（各审评因子评分为百分制）。感官审评小组由 10 名专业评茶员组成，6 名女性、4 名男性，年龄在 23~52 岁。

茶汤的汤色使用色差仪测定（包括 L^*、a^*、b^* 值），整体色泽变化以总色差（ΔE）表示。按照公式（1）计算。

$$\Delta E = \sqrt{(L_t - L_0)^2 + (a_t - a_0)^2 + (b_t - b_0)^2} \qquad 式（1）$$

式中：L_t、a_t、b_t 代表贮藏时间 t 结束时茶饮料的 L^*、a^*、b^* 值；L_0、a_0、b_0 代表贮藏 0 d 的茶饮料的 L^*、a^*、b^* 值。

1.2.4　浊度、可溶性固形物、pH 的测定　利用浊度计、折光仪、pH 计分别测定样品的浊度、可溶性固形物含量、pH。

1.2.5　多酚、游离氨基酸、咖啡碱、可溶性糖的测定　根据 GB/T 8313-2018《茶叶中茶多酚和儿茶素含量的检测方法》、GB/T 8314-2013《茶 游离氨基酸总量的测定》、GB/T 8312-2013《茶 咖啡碱测定》分别对茶汤中的多酚、游离氨基酸、咖啡碱进行测定。采用蒽酮-硫酸比色法对茶汤中的可溶性糖含量进行测定[7]。

1.2.6　儿茶素及降解产物、黄酮醇苷类化合物的测定　按照 1.2.1 中所述方法获得除渣茶汤，过 0.22 μm 滤膜后，装至液相瓶。采用超高效液相色谱-四极杆轨道高分辨质谱联用仪对茶汤中的 8 种儿茶素（EGCG、GCG、EC、C、EGC、GC、CG、ECG）、3 种儿茶素降解产物（GA、5,7-二羟基香豆素、原儿茶酸）、7 种黄酮醇苷类化合物（杨梅素-芸香糖苷、杨梅素-半乳糖苷、槲皮素-芸香糖苷、槲皮素-半乳糖苷、山奈酚-芸香糖苷、山奈酚-半乳糖苷、山奈酚-葡萄糖苷）进行测定。

UHPLC 条件：采用 ACQUITY UPLC HSS T3 色谱柱（1.8 μm, 2.1 mm×100 mm），柱温 40 ℃。样品室温度 10 ℃，进样量 3 μL，流速 0.3 mL/min。流动相 A 为 0.1% 甲酸-水溶液，流动相 B 为纯乙腈。流动相 B 的梯度设置如下：从 5% 开始，2 min 内线性增加至 10%，6 min 内升至 35%，在 8.5 至 9.5 min 增加至 100%，随后在 10 至 12 min 内返回至 5%。

MS 条件：扫描模式为负离子，电压 3.1 kV，电离模式为电喷雾电离，MS 和 ddMS2 的分辨率分别设为 70000 和 35000。毛细管和辅助气体加热器的温度分别设为 320 ℃ 和 300 ℃。鞘气和辅助气体流量分别为 45 和 10（任意单位）。质荷比（m/z）扫描范围为 66.7~1000 Da[8]。

定性定量分析：对照标准品的保留时间和一级、二级质谱图进行定性分析，采用外标法对化合物进行定量分析。

1.2.7　茶汤香气劣变相关挥发性化合物的测定　参照 Wang 等[8] 和 Tao 等[9] 的方法，利用顶空固相微萃取（HS-SPME）提取茶汤中的挥发性化合物、气相色谱-质谱联用（GC-MS）技术进行分离鉴定。

萃取：取 30 mL 茶汤至 50 mL 顶空瓶中，加入 10 μL 1 mg/L 癸酸乙酯（作为内标，用乙醇配制）、6 g 氯化钠以及 1 个大小适配的磁力转子，盖紧盖子并轻轻摇动，置于磁力搅拌水浴锅中，转速为 200 r/min，45 ℃ 平衡 15 min。将 DVB/CAR/PDMS 萃取头（50/30 μm, 2 cm）插入装有样品的顶空瓶中，萃取 45 min。然后将萃取头插入气相色谱-质谱联用仪的进样口，250 ℃ 解吸 5 min，利用 GC-MS 进行分析。

气相色谱条件：进样口温度 250 ℃，不分流进样；高纯氦气（99.999%）作为载气，流速 1.2 mL/min；DB-5MS 毛细管柱（30 m×250 μm×0.25 μm）色谱柱，柱压 9.147 psi。柱温箱温度梯度设置如下：初始温度 40 ℃，平衡 5 min；以 5 ℃/min 的速率增加至 120 ℃，平衡 3 min；以 8 ℃/min 的速率增加至 250 ℃，平衡 5 min；以 10 ℃/min 增加至 280 ℃。

质谱条件：电子轰击离子源，离子源温度为 230 ℃，电子能量 70 eV，质量扫描范围 40~400 m/z，四极杆温度 150 ℃。

定性定量分析：利用美国国家标准与技术研究院（National Institute of Standards and Technology，NIST）谱库对化合物进行定性分析，采用内标法对化合物进行定量分析。

1.3　数据处理

采用 IBM SPSS 统计软件（版本 25.0）进行单因素方差分析，基于 Duncan 多重范围检验对均值进行多重比较，$P<0.05$ 表示有显著性差异，并采用 IBM SPSS 统计软件进行 Pearson 相关性分析。采用 Graphpad Prism 8.0 软件进行图形绘制。

2　结果与分析

2.1　感官品质的稳定性差异

如表 1 和图 1 所示，经过 28 d 的贮藏，MF1、MF3 的滋味、香气、汤色均产生了明显变化，但两者的变化程度有所差异。MF1 的滋味由鲜爽转为苦涩，MF3 的滋味由清爽转变为尚醇和。随着贮藏时间的延长，两者的滋味评分均逐渐下降，MF1 滋味得分的下降幅度比 MF3 更大，MF1 下降了 18.8%、MF3 下降了 13.2%。MF1 的香气由清高转变成为熟闷气重，MF3 的香气由纯正转变为熟闷。随着贮藏时间的增加，两者的香气得分都下降，MF1 下降幅度略高

表 1　不同等级黄山毛峰茶汤贮藏过程中的滋味和香气感官评结果

Table 1　Sensory evaluation of taste and aroma in tea infusions from different grades of Huangshan Maofeng during storage

样品名称	贮藏时间（d）	滋味		香气	
		术语	得分	术语	得分
MF1	0	鲜爽	92.33±2.88^{a}	清高	91.33±1.15^{a}
	7	鲜爽	83.67±1.54^{b}	清香略甜	88.33±1.15^{ab}
	14	较鲜爽	80.00±1.00^{b}	较熟闷	86.66±1.54^{b}
	21	略涩	78.00±5.29^{bc}	熟闷	84.00±1.00^{bc}
	28	苦涩	75.00±6.08^{c}	熟闷气重	80.66±2.87^{c}
MF3	0	清爽	88.67±1.54^{a}	纯正	86.67±2.88^{a}
	7	较清爽	85.33±3.51^{b}	略熟甜	85.00±1.00^{a}
	14	醇和	82.33±4.50^{b}	略熟闷	83.66±1.15^{b}
	21	尚醇和	79.33±6.11^{c}	较熟闷	82.00±1.00^{bc}
	28	尚醇和	77.00±7.54^{c}	熟闷	80.33±0.57^{c}

注：不同小写字母表示同一样品不同贮藏时间存在显著性差异，P<0.05。

于 MF3，MF1 得分下降了 11.7%、MF3 得分下降 7.3%。

茶汤色泽可通过 L^*、a^*、b^*值来进行量化评价。L^*值表示亮度，数值越高，茶汤色泽越亮；a^*值表示体系的红绿色度，正值越高，表示越红；b^*值表示黄蓝色度，正值越高，表示越黄。如图 1 所示，绿茶茶汤贮藏过程中，随着贮藏时间的延长，茶汤逐渐变暗、发黄，具体表现为，L^*值下降、a^*值和 b^*值升高，即亮度降低，红度、黄度增加。MF1 贮藏 21 d 后 a^*值由负转正，而 MF3 贮藏 28 d 内 a^*值始终为负。对比贮藏前后的色差可发现，MF1 的 L^*、a^*、b^*值的变化程度均大于 MF3。根据 CIE（国际照明委员会）标准（CIE15:2018（Colorimetry, 4th Edition）），MF1、MF3 的ΔE 大于 2，表明颜色产生明显变化，但同样贮藏时间内，MF1 的ΔE 值高于 MF3，说明其色泽变化更明显。

上述结果表明，MF3 比 MF1 在感官品质方面的变化更小，贮藏期间的感官品质更稳定。先前有报道，低档原料制成的罐装绿茶水在加工过程中受灭菌工序的影响较小，色香味品质比较稳定[9]。结合起来看，低等级原料制成的茶汤比高等级原料制成的茶汤有更好的感官品质稳定性，低等级原料可能更适合作为饮料用原料茶。

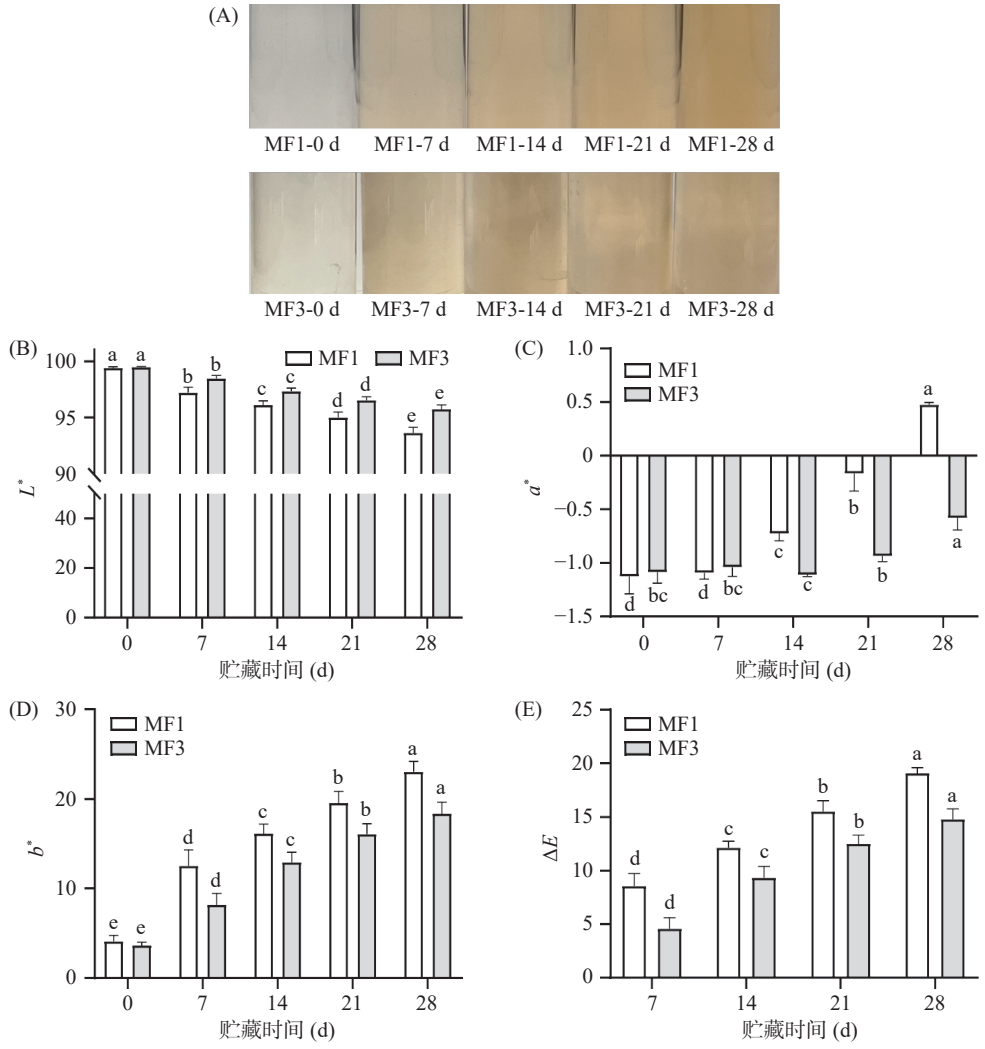


图 1　不同等级黄山毛峰茶汤贮藏过程中汤色的变化

Fig.1　Color changes of Huangshan Maofeng green tea infusions made from different grades during storage

注：（A）茶汤照片；（B）L^*值；（C）a^*值；（D）b^*值；（E）ΔE 值；不同小写字母表示存在显著性差异，P<0.05，图 3、图 5 同。

2.2　主要理化性质的稳定性差异

在贮藏过程中，茶饮料易出现浑浊、沉淀的现象，因此对贮藏期间 MF1 和 MF3 的浊度、可溶性固形物进行了测定。如图 2 所示，绿茶茶汤在贮藏过程中浊度明显上升，相比贮藏 0 d 的茶汤，MF1 上升了 234.77%、MF3 上升了 89.29%，MF1 上升幅度更大。该结果与陈玉琼等[10] 的研究结果一致。在贮藏期 28 d 内，MF1 和 MF3 的可溶性固形物含量无显著变化(图 3)。结果显示经过贮藏，茶汤中虽然形成了大粒径颗粒，但尚未大量形成沉淀。在贮藏过程中，茶汤浊度上升主要是茶汤中儿茶素等茶多酚与蛋白质、咖啡碱形成络合物导致的。该过程不仅受茶汤中相关物质浓度的影响[11]，也在一定程度上受 pH 影响。陈金定等[12] 发现，在相同贮藏条件下，高酸绿茶饮料的浊度增幅大于低酸绿茶饮料。对贮藏期间 MF1 和 MF3 的 pH 进行了测定，结果如图 4 所示，贮藏 0 d 的两者 pH 接近。随着贮藏时间延长，MF1 和 MF3 的 pH 都呈下降趋势。在贮藏 28 d 后，MF1 的 pH 降低了 1.2、MF3 的 pH 降低了 0.9，MF1 的 pH 降幅更大。贮藏过程中，茶汤 pH 的降低可能与酯型儿茶素降解形成没食子酸等酸性产物有关[13]。

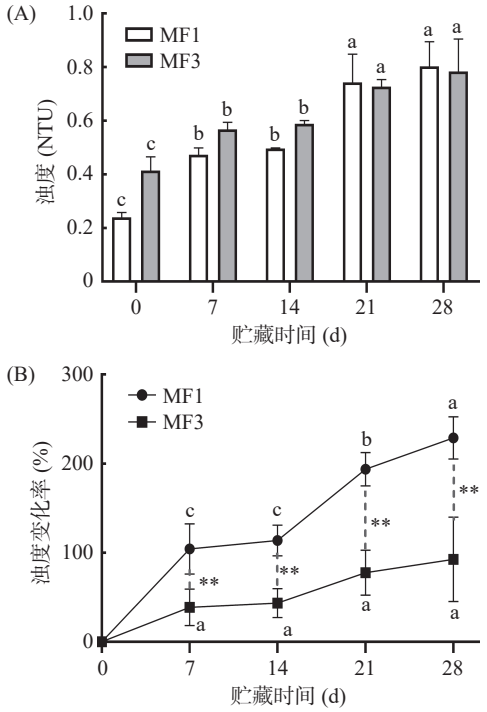


图 2　不同等级黄山毛峰茶汤贮藏过程中浊度的变化

Fig.2　Changes in turbidity of different grades of Huangshan Maofeng tea infusion during storage

注：(A)浊度值；(B)浊度变化率。不同小写字母表示该指标在不同贮藏时间之间存在显著性差异，$P<0.05$；*表示同一贮藏时间下的样品组间存在显著性差异，$^{*}P<0.05$，$^{**}P<0.01$；图 4、图 6、图 7、图 11 同。

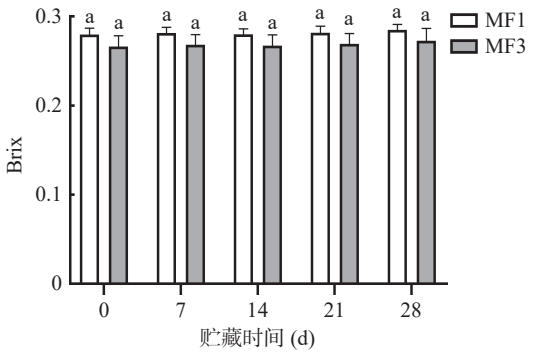


图 3　不同等级黄山毛峰茶汤贮藏过程中可溶性固形物的变化

Fig.3　Changes in soluble solids of different grades of Huangshan Maofeng tea infusion during storage

注：不同小写字母表示存在显著性差异，$P<0.05$。

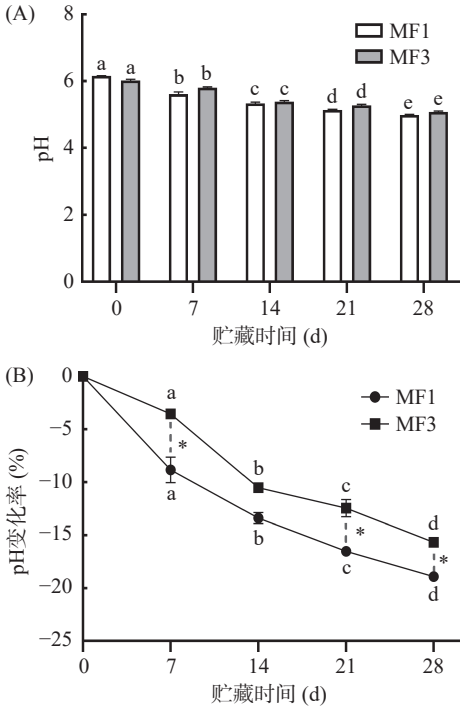


图 4　不同等级黄山毛峰茶汤贮藏过程中 pH 的变化

Fig.4　Changes in pH values of different grades of Huangshan Maofeng tea infusion during storage

注：(A)pH；(B)pH 变化率。

2.3　基本成分的稳定性差异

对茶汤中的基本成分(多酚、游离氨基酸、可溶性糖和咖啡碱)进行测定，结果如图 5 所示。在贮藏期间，MF1 和 MF3 中上述成分的含量基本无显著变化。这可能是由于贮藏实验的温度条件较为温和(25 ℃)、贮藏时期也较短(28 d)，茶汤中的成分虽然发生了改变、导致感官品质和理化性质也相应出现了显著变化，但某类成分的整体含量变化并不明显。多酚类是茶汤中非常重要的一类品质成分。后续对茶汤中的 8 种儿茶素单体、3 种儿茶素降解产物、7 种黄酮醇苷(均属于多酚类)含量进行了测定。

2.4　儿茶素及降解产物的变化差异

儿茶素类成分是茶汤中重要的风味物质和生理活性成分，也是茶汤苦、涩、回甘滋味的主要贡献者[14−15]。儿茶素类成分氧化降解形成的有色物质，与汤色的变深变暗密切相关[16]；在此过程中，它们还可与黄酮醇及其苷类物质互作，加速茶汤色泽的劣

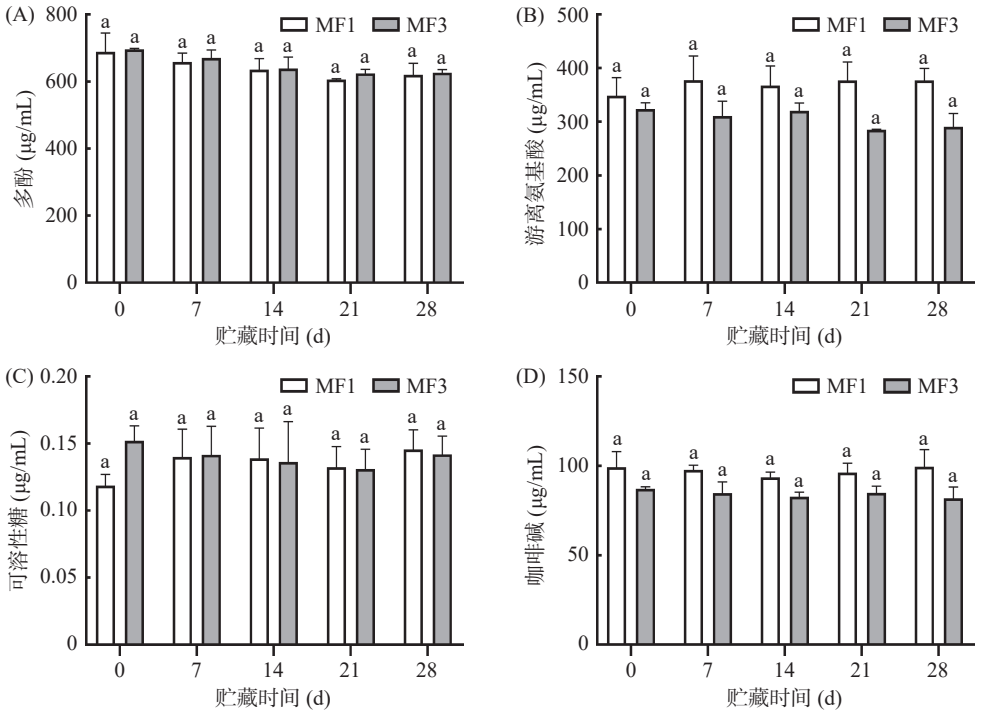


图 5　不同等级黄山毛峰茶汤贮藏过程中基本成分含量的变化

Fig.5　Changes in main components of different grades of Huangshan Maofeng tea infusion during storage

注:(A)多酚;(B)游离氨基酸;(C)可溶性糖;(D)咖啡碱。

化[17]。茶汤中的常见儿茶素有 8 种,根据构型不同,可分为表型儿茶素(EGCG、ECG、EGC、EC)和非表型儿茶素(GCG、CG、GC、C);根据 C 环 3 位上是否连有没食子酸基团,可分为酯型儿茶素(EGCG、GCG、ECG、CG)和非酯型儿茶素(EGC、GC、EC、C)。由于表型儿茶素空间位阻较大、相对不稳定,在一定条件下可通过异构化反应转变为非表型儿茶素[18]。酯型儿茶素由于酯键相对不稳定,在一定条件下可发生水解反应,降解为非酯型儿茶素和 GA[19]。

对贮藏不同时间的 MF1、MF3 中各种儿茶素含量进行测定,发现贮藏 0 d 时 MF1 中总儿茶素含量低于 MF3,在贮藏过程中 MF1 中总儿茶素降低速度较 MF3 更快,在贮藏 28 d 时 MF1 中总儿茶素降幅大于 MF3(图 6 A2)。总儿茶素的降低主要由表型儿茶素的降低引起,MF1 中表型儿茶素的降低速度较 MF3 更快、幅度更大;而非表型儿茶素的含量变化较小,MF3 中非表型儿茶素含量在贮藏期内甚至无显著变化(图 6 C1、图 6C2)。在贮藏过程中,酯型儿茶素与非酯型儿茶素含量均明显降低,非酯型儿茶素的降幅比酯型儿茶素更大;MF1 中酯型、非酯型儿茶素的降幅均大于 MF3(图 6 D2、图 6E2),GA 增幅大于 MF3(图 7 A2)。

表 2 显示了贮藏期间 MF1、MF3 中 8 种儿茶素的变化情况。CG 含量在贮藏 28 d 后,有所上升;MF1 中 GCG 在贮藏期间含量下降,MF3 中 GCG 呈小幅度上升;MF1 中 CG 在贮藏期间含量不变,MF3 中 CG 呈小幅度上升;其余儿茶素在贮藏期间含量都呈明显下降趋势。EGCG、ECG、EGC 是茶汤含量最高的三种儿茶素,其中 EGCG、EGC 下降幅度均为 MF1>MF3,ECG 无显著变化。MF1 中 GC 下降幅度也明显高于 MF3。

上述结果表明,对于儿茶素而言,MF3 稳定性优于 MF1。鉴于在贮藏期间,总儿茶素含量下降,这表明儿茶素发生了异构化和酯键水解反应以外的降解反应。有研究显示,5,7-二羟基香豆素是茶汤呈现出黄色调的标志性代谢化合物之一[20],本实验中 5,7-二羟基香豆素与 b^*值(黄度)呈显著正相关,也进一步佐证该观点。EGC 可降解产生原儿茶酸[21],该成分具有涩味,在相关研究中被鉴定为与绿茶饮料在贮藏过程中汤色变黄、涩味加重有关[22]。如图 7B1、图 7B2 所示,贮藏 28 d 时 MF1 中 5,7-二羟基香豆素的上升幅度明显大于 MF3;如图 7C1、图 7C2 所示,贮藏 7 d 后,MF1 中原儿茶酸就有明显上升,而 MF3 中原儿茶酸贮藏 28 d 后才有显著上升(P<0.05)。这与 MF1 中 EGCG、EGC 降解更快相符合,可能也是在相同贮藏时间内 MF1 汤色变黄、涩味加重更明显的原因之一。

相关性分析显示(图 8),EGCG、EGC、GC、EC 与茶汤 L^*值极显著正相关(P<0.01)、与 a^*和 b^*值显著负相关(P<0.05, P<0.01),儿茶素降解产物 5,7-二羟基香豆素、原儿茶酸与 L^*值极显著负相关(P<0.01)、与 a^*和 b^*值显著正相关(P<0.05, P<0.01),说明贮藏期间茶汤汤色变暗、变黄确实与儿茶素(特别是表型儿茶素)的降解有关。表型儿茶素还与滋味得分和 pH 呈现出极显著的正相关性(P<0.01),提示表

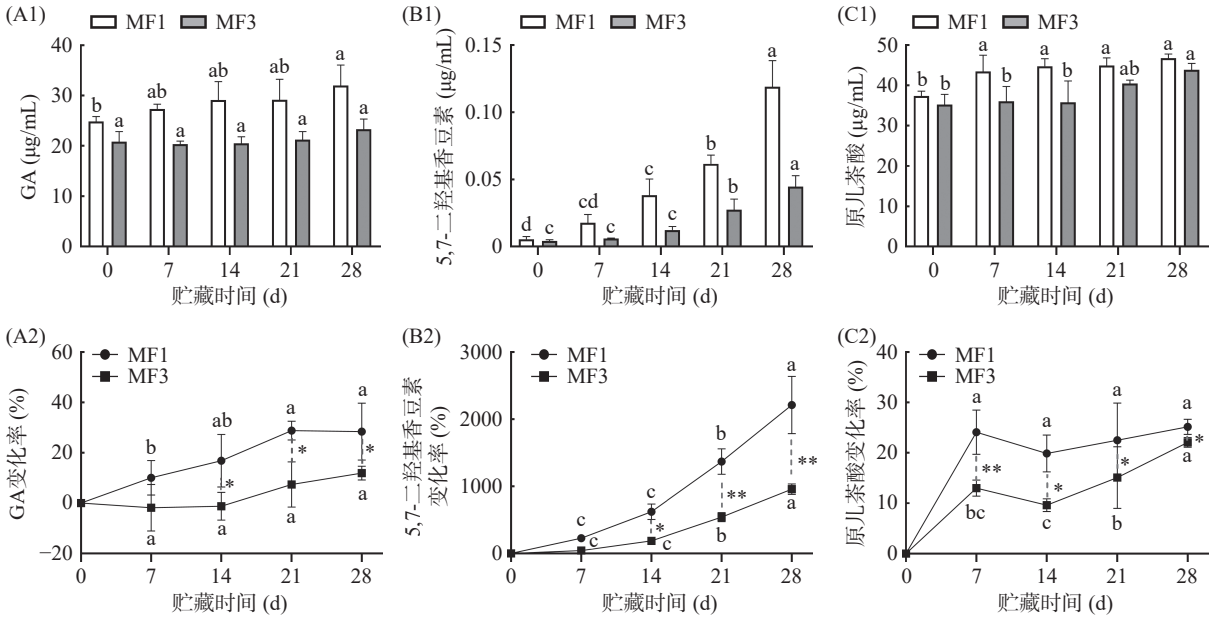


图 7　不同等级黄山毛峰茶汤贮藏过程中儿茶素降解产物含量的变化

Fig.7　Changes in the contents of catechins degradation products of different grades of Huangshan Maofeng tea infusion during storage

注:(A1)GA 含量;(A2)GA 变化率;(B1)5,7-二羟基香豆素含量;(B2)5,7-二羟基香豆素变化率;(C1)原儿茶酸含量;(C2)原儿茶酸变化率。

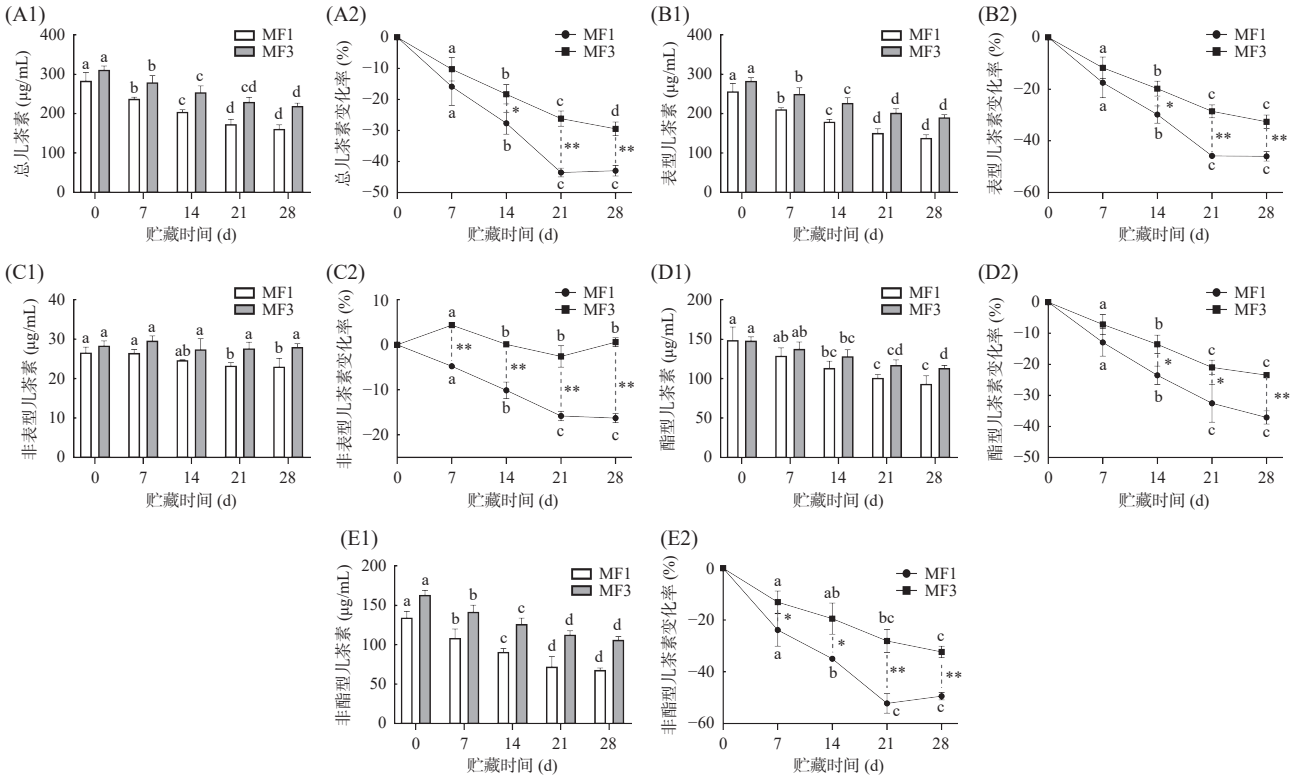


图 6　不同等级黄山毛峰茶汤贮藏过程中儿茶素类成分含量的变化

Fig.6　Changes in the contents of catechins in different grades of Huangshan Maofeng tea infusion during storage

注:(A1)总儿茶素含量;(A2)总儿茶素变化率;(B1)表型儿茶素含量;(B2)表型儿茶素变化率;(C1)非表型儿茶素含量;(C2)非表型儿茶素变化率;(D1)酯型儿茶素含量;(D2)酯型儿茶素变化率;(E1)非酯型儿茶素含量;(E2)非酯型儿茶素变化率。

型儿茶素的降解与贮藏过程中茶汤滋味的劣化和 pH 降低关联密切。EGCG 和 ECG 还与浊度呈现极显著的负相关性(P<0.01),结合先前文献中提到的多酚易与其它物质形成大粒径颗粒[11],也进一步说明了 EGCG 和 ECG 浓度较高的茶汤经过贮藏后可能更易浑浊。

2.5　黄酮醇苷类物质的变化差异

黄酮醇苷类成分是茶汤中另一类重要的风味物质和生理活性物质。先前的研究表明黄酮醇苷类物质对茶汤涩味产生影响,部分黄酮醇苷自身具有涩味,部分黄酮醇苷本身基本无味、但对咖啡因的苦味有显著增强效果[23]。黄酮醇苷类成分也是绿茶茶汤

表 2　不同等级黄山毛峰茶汤贮藏过程中各种儿茶素含量的变化

Table 2　Changes in the contents of catechin monomers in different grades of Huangshan Maofeng tea infusion during storage

物质(μg/mL)	MF1-0 d	MF1-7 d	MF1-14 d	MF1-21 d	MF1-28 d	MF3-0 d	MF3-7 d	MF3-14 d	MF3-21 d	MF3-28 d
GC	9.92±0.56^{a}	8.55±0.87^{ab}	7.6±0.16^{bc}	6.22±1.11^{cd}	6.17±0.34^{d}	10.82±0.58^{a}	10.99±0.62^{a}	9.70±1.15^{ab}	9.34±0.65^{b}	9.17±0.33^{b}
EGC	85.25±5.26^{a}	62.54±6.50^{b}	47.73±2.19^{c}	35.93±4.99^{d}	29.06±2.02^{d}	111.60±4.22^{a}	92.71±4.91^{b}	80.79±3.85^{c}	69.02±3.02^{d}	61.63±3.78^{d}
C	7.30±0.44^{a}	7.17±1.06^{a}	6.71±0.81^{a}	5.79±1.41^{a}	6.17±0.21^{a}	6.60±0.48^{a}	6.06±0.33^{ab}	5.72±0.45^{b}	5.55±0.22^{b}	5.96±0.23^{ab}
EGCG	97.98±9.57^{a}	80.68±3.89^{b}	68.03±3.42^{c}	58.87±4.03^{cd}	48.86±3.43^{d}	101.14±1.91^{a}	92.10±5.67^{b}	86.00±3.91^{b}	75.45±3.74^{c}	70.60±1.92^{c}
EC	32.23±1.62^{a}	30.23±3.24^{ab}	28.98±1.78^{ab}	24.44±5.22^{b}	26.7±1.16^{ab}	34.38±0.59^{a}	32.25±2.60^{ab}	30.15±2.52^{b}	28.96±1.31^{b}	29.57±0.95^{b}
GCG	3.55±0.31^{b}	3.97±0.03^{a}	3.83±0.27^{ab}	3.88±0.14^{ab}	3.33±0.48^{c}	5.29±0.20^{ab}	6.38±0.09^{a}	6.02±0.40^{a}	6.34±0.40^{a}	5.86±0.22^{b}
ECG	45.79±6.41^{a}	45.10±4.83^{a}	40.22±5.37^{a}	36.35±1.668^{a}	37.89±4.98^{a}	42.06±2.51^{a}	39.57±3.68^{a}	37.54±4.02^{a}	36.09±2.33^{a}	35.93±2.22^{a}
CG	6.03±0.73^{a}	6.82±0.97^{a}	6.55±0.59^{a}	6.46±0.69^{a}	7.40±1.81^{a}	5.71±0.34^{b}	6.11±0.33^{b}	6.01±0.67^{b}	6.47±0.46^{b}	7.94±1.28^{a}

注: 同行不同小写字母表示存在显著性差异, $P<0.05$。

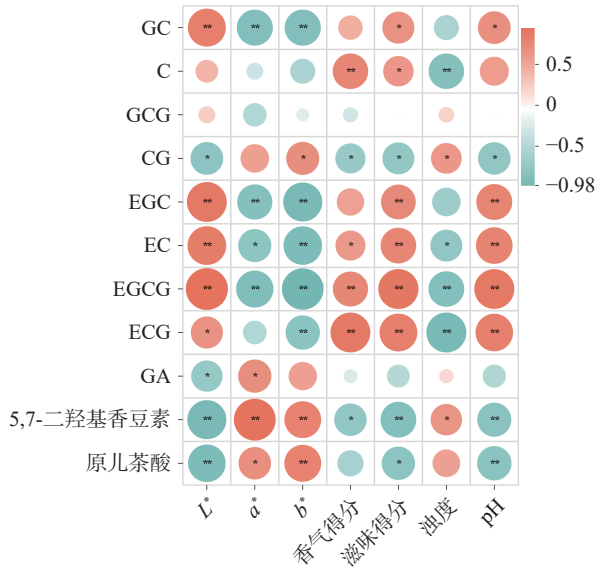


图 8　儿茶素及其降解产物与品质指标的相关性分析

Fig.8　Correlation analysis between catechins, their metabolites, and quality properties

注: *表示化合物之间显著相关($P<0.05$), **表示化合物之间极显著相关($P<0.01$), 图 9 同。

中的主要呈色物质[24]; 黄酮醇苷类物质与儿茶素共同作用是绿茶茶汤色泽劣变的主要原因。杨梅素苷、槲皮素苷、山奈酚苷是茶汤中的主要黄酮醇苷类型。

贮藏期间 7 种黄酮醇苷类物质的变化情况如图 9 所示。杨梅素苷的降幅明显大于槲皮素苷和山奈酚苷。贮藏 28 d 时, MF1 和 MF3 中杨梅素苷均值分别约降低 30%、20%; 而槲皮素苷、山奈酚苷相对稳定, 最大降幅仅约 10%。这主要是因为杨梅素 B 环上有 3 个羟基, 而槲皮素和山奈酚分别只有 2 个和 1 个羟基, 所以杨梅素苷的化学性质更为活泼、在贮藏过程中更易被降解[13]。

相关性分析显示(图 10), 杨梅素苷、槲皮素苷与 L^*值呈极显著正相关($P<0.05$), a^*、b^*值呈显著负相关, 其中单糖苷的相关性更高。李云飞[25] 发现, 在茶汤色泽劣变的过程中, 黄酮醇单糖苷的作用大于双糖苷。朱博等[26] 发现杨梅素苷与绿茶茶汤的红绿度、黄蓝度呈显著负相关, 这与本实验的实验结果一致。杨梅素苷、槲皮素苷、山奈酚-芸香糖苷与滋味

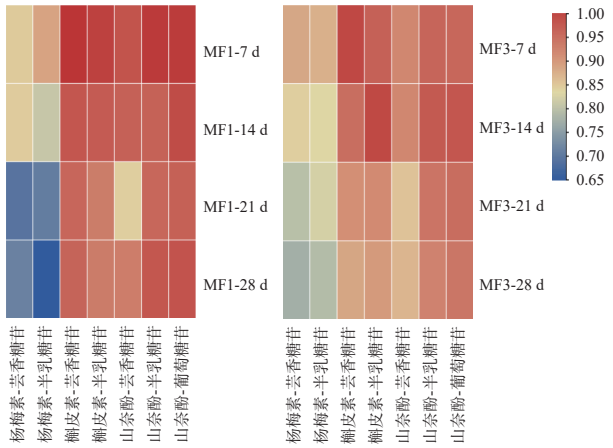


图 9　不同等级黄山毛峰茶汤贮藏过程中黄酮醇苷含量的变化

Fig.9　Changes in the contents of flavonol glycosides in different grades of Huangshan Maofeng tea infusion during storage

注: 以贮藏 0 d 时的含量为基准, 进行差异倍数计算。

得分呈现正相关, 表明在贮藏期间这些黄酮醇苷浓度的降低与滋味变差相关联。可能的原因是这些黄酮醇苷降解生成了具有与其相似的滋味属性(苦、涩)、但阈值更低的苷元[27]。

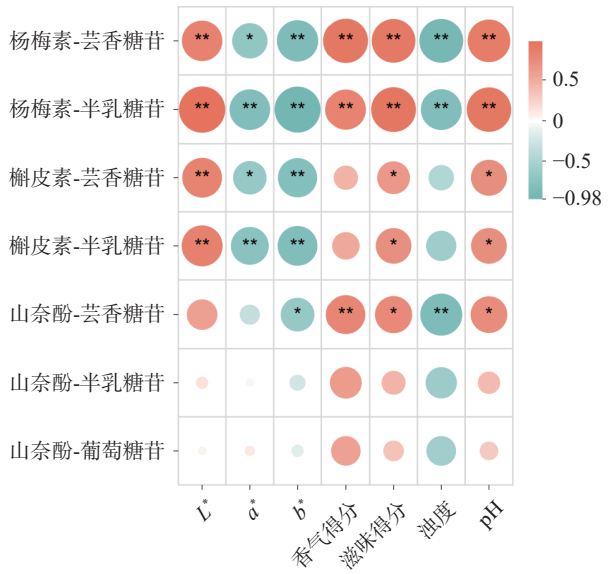


图 10　黄酮醇苷与品质指标的相关性分析

Fig.10　Correlation analysis between flavonol glycosides and quality properties

2.6　茶汤香气劣变相关挥发性化合物的变化差异

在贮藏过程中，绿茶茶汤产生熟闷气味是其香气品质劣化的主要表现。根据本研究的感官审评结果（表 1），也发现从贮藏中期（贮藏 14 d）开始，茶汤就出现熟闷气味，且随着贮藏时间延长，程度加重。因此，采用 GC-MS 对 12 种已报道的与绿茶茶汤熟闷气味有关的香气化合物进行了定量检测[8−9]。在这 12 种化合物中，除了反式-*β*-紫罗兰酮和 *α*-紫罗兰酮与熟闷气味呈负相关，其余均对熟闷气味有正向贡献。

如表 3、表 4、图 11 所示，贮藏 28 d 的茶汤样品中异戊醛、苯甲醛、苯乙醛、芳樟醇、*α*-松油醇、香叶醇、水杨酸甲酯的含量与贮藏 0 d 的茶汤相比都有明显上升，且 MF1 增幅高于 MF3；茶螺烷、反式-*β*-大马烯酮在 0 d 时未检测出、但在 28 d 时可测得，MF1 和 MF3 中含量水平接近。如图 11 所示，反式-*β*-紫

表 3　一级黄山毛峰茶汤贮藏过程中香气劣变相关挥发性化合物的含量（μg/mL）

Table 3　Content of volatile compounds related to aroma deterioration in first-grade Huangshan Maofeng tea infusion during storage (μg/mL)

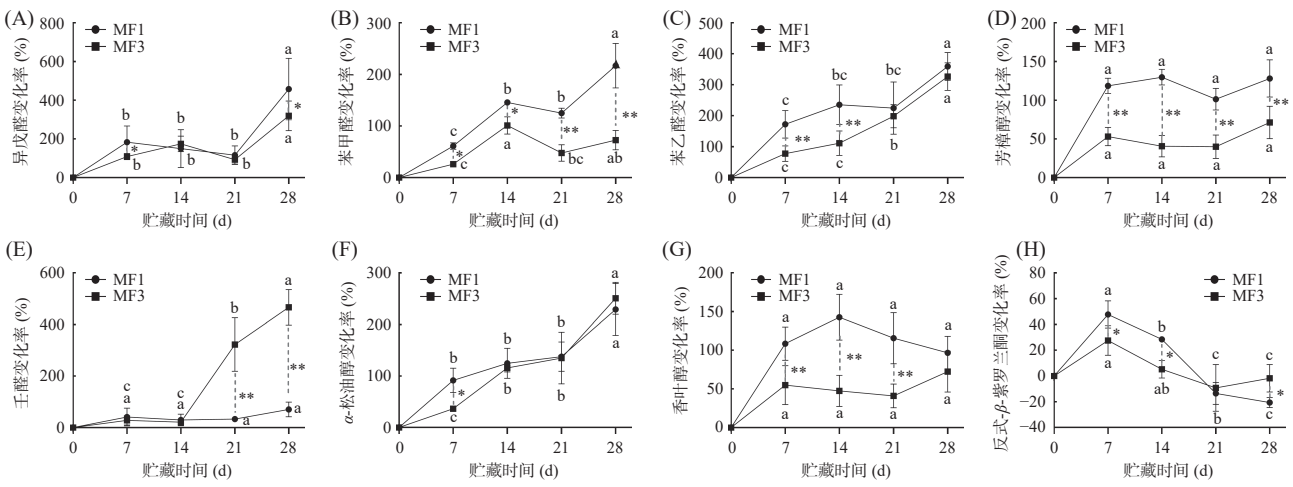
序号	物质	MF1-0 d	MF1-7 d	MF1-14 d	MF1-21 d	MF1-28 d
1	异戊醛	0.005±0.002^{c}	0.014±0.002^{b}	0.012±0.002^{b}	0.010±0.001^{bc}	0.027±0.005^{a}
2	苯甲醛	0.060±0.008^{d}	0.098±0.044^{cd}	0.173±0.020^{ab}	0.128±0.017^{bc}	0.186±0.013^{a}
3	苯乙醛	0.013±0.005^{c}	0.031±0.008^{b}	0.038±0.008^{b}	0.036±0.008^{b}	0.059±0.006^{a}
4	芳樟醇	0.546±0.017^{b}	0.976±0.122^{a}	0.976±0.268^{a}	0.985±0.098^{a}	1.229±0.085^{a}
5	香叶醇	0.294±0.082^{b}	0.492±0.084^{a}	0.569±0.125^{a}	0.513±0.084^{a}	0.566±0.093^{a}
6	反式-*β*-大马烯酮	–	–	–	–	0.008±0.003
7	壬醛	0.084±0.011^{b}	0.117±0.019^{ab}	0.091±0.027^{b}	0.112±0.011^{ab}	0.144±0.021^{a}
8	*α*−松油醇	0.026±0.008^{c}	0.031±0.027^{bc}	0.053±0.012^{abc}	0.057±0.009^{ab}	0.082±0.01^{a}
9	茶螺烷	–	0.014±0.001^{c}	0.028±0.003^{b}	0.034±0.005^{ab}	0.045±0.013^{a}
10	反式-*β*−紫罗兰酮	0.188±0.017^{ab}	0.239±0.035^{a}	0.202±0.051^{ab}	0.161±0.011^{b}	0.148±0.006^{b}
11	*α*−紫罗兰酮	0.031±0.004^{b}	0.044±0.010^{a}	0.037±0.009^{ab}	0.028±0.002^{b}	0.028±0.002^{b}
12	水杨酸甲酯	0.036±0.004^{b}	0.048±0.011^{ab}	0.049±0.010^{ab}	0.048±0.005^{ab}	0.058±0.007^{a}

注：–表示未检测出。同行不同小写字母表示存在显著性差异，P<0.05，表4同。

表 4　三级黄山毛峰茶汤贮藏过程中香气劣变相关挥发性化合物的含量（μg/mL）

Table 4　Content of volatile compounds related to aroma deterioration in third-grade Huangshan Maofeng tea infusion during storage (μg/mL)

序号	物质	MF3-0 d	MF3-7 d	MF3-14 d	MF3-21 d	MF3-28 d
1	异戊醛	0.004±0.001^{c}	0.006±0.001^{bc}	0.011±0.001^{ab}	0.008±0.002^{bc}	0.017±0.003^{a}
2	苯甲醛	0.078±0.009^{d}	0.090±0.012^{cd}	0.156±0.021^{a}	0.114±0.003^{bc}	0.134±0.013^{ab}
3	苯乙醛	0.008±0.001^{d}	0.013±0.001^{cd}	0.016±0.003^{c}	0.022±0.003^{b}	0.032±0.005^{a}
4	芳樟醇	0.584±0.049^{b}	0.800±0.057^{ab}	0.821±0.093^{ab}	0.814±0.101^{ab}	0.996±0.082^{a}
5	香叶醇	0.101±0.015^{a}	0.159±0.013^{a}	0.146±0.019^{a}	0.143±0.021^{a}	0.170±0.019^{a}
6	反式-*β*-大马烯酮	–	–	–	–	0.006±0.001
7	壬醛	0.096±0.003^{c}	0.123±0.020^{c}	0.116±0.006^{c}	0.402±0.085^{b}	0.541±0.049^{a}
8	*α*−松油醇	0.006±0.001^{b}	0.008±0.001^{b}	0.017±0.008^{b}	0.029±0.007^{ab}	0.058±0.011^{a}
9	茶螺烷	–	0.015±0.001^{c}	0.031±0.005^{b}	0.053±0.010^{a}	0.057±0.006^{a}
10	反式-*β*−紫罗兰酮	0.219±0.026^{b}	0.277±0.015^{a}	0.229±0.014^{b}	0.197±0.031^{b}	0.213±0.001^{b}
11	*α*−紫罗兰酮	0.046±0.007^{a}	0.054±0.014^{a}	0.054±0.002^{a}	0.046±0.007^{a}	0.051±0.001^{a}
12	水杨酸甲酯	0.027±0.004^{b}	0.023±0.020^{b}	0.030±0.003^{b}	0.033±0.007^{b}	0.042±0.003^{a}



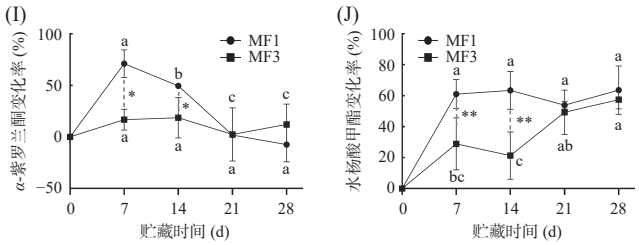


图 11 不同等级黄山毛峰茶汤贮藏过程中香气劣变相关挥发性化合物的含量变化率

Fig.11 Change rate in the contents of aroma deterioration-related volatile compounds of different grades of Huangshan Maofeng tea infusion during storage

注:(A)异戊醛;(B)苯甲醛;(C)苯乙醛;(D)芳樟醇;(E)壬醛;(F)*a*-松油醇;(G)香叶醇;(H)反式-*β*-紫罗兰酮;(I)*a*-紫罗兰酮;(J)水杨酸甲酯。

罗兰酮含量随着贮藏时间增加而降低,且 MF1 降幅高于 MF3。反式-*β*-紫罗兰酮是绿茶“清香”的关键香气活性成分[28],水杨酸甲酯对清香类香气物质有掩蔽作用[29]。Cao 等[22] 的研究表明无糖绿茶饮料在贮藏过程中香气劣变可能与反式-*β*-紫罗兰酮降低、水杨酸甲酯含量增多有关,本实验的结果与文献所述相符。窦宏亮[30] 研究发现儿茶素的氧化是导致茶饮料中香气变化的主要原因。在本实验中,贮藏过程中 MF3 的总儿茶素、主要儿茶素(如 EGCG)减少幅度小于 MF1,这可能使得生成的熟闷味关键挥发性香气成分含量也少。上述结果表明,在贮藏过程中 MF1 有更多种类的熟闷气味相关挥发性成分变幅大于 MF3,可能是贮藏后 MF1 熟闷气味比 MF3 更明显的原因。

3 结论

在本研究的贮藏条件下,MF1、MF3 的感官品质(包括滋味、香气、汤色)明显下降,出现熟闷气味、汤色变深变暗。与 MF1 相比,MF3 的感官品质稳定性更高。贮藏后,MF1 的浊度和 pH 变化较 MF3 更大,说明 MF3 在理化性质方面也比 MF1 稳定。整个贮藏过程中,MF1 和 MF3 的咖啡碱、游离氨基酸、可溶性糖、多酚含量无显著变化,但是总儿茶素含量明显下降,特别是 EGCG、EGC,降解状况严重。MF1 中儿茶素的稳定性不如 MF3,产生了更多的没食子酸、5,7-二羟基香豆素等儿茶素氧化降解产物。此外,黄酮醇苷含量也有所下降,主要由杨梅素苷降解引起,MF1 中杨梅素苷降幅大于 MF3。在挥发性成分方面,经过贮藏后,MF1 中异戊醛、苯甲醛、苯乙醛、芳樟醇、*α*-松油醇、香叶醇、水杨酸甲酯等与香气劣变有关的挥发性成分增幅大于 MF3。相关性分析结果表明,表型儿茶素、杨梅素苷与香气得分、滋味得分呈正相关,MF1 感官品质劣变较 MF3 更明显更可能是由于 MF1 中这些成分降解更严重所致。综上所述,三级黄山毛峰比一级黄山毛峰绿茶更宜作为茶饮料工业生产的原料茶。本文的研究结果不仅有助于解决茶饮料货架期短的问题,同时在实际绿茶饮料生产过程中也有利于降低企业生产成本。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 刘盼盼. 主要水质因子对清香型绿茶茶汤呈香特性及其稳定性影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014. [LIU Panpan. Study on the influence of main water quality factors on the aroma characteristics and stability of fragrant green tea soup[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.]

[2] 袁海波, 邓余良, 陈根生, 等. 不同杀青工艺原料茶加工饮料品质稳定性的研究[J]. 茶叶科学, 2012, 32(3): 236−246. [YUAN Haibo, DENG Yuliang, CHEN Gensheng, et al. Effect of raw material processing by different fixation technology on the stability with quality of tea beverage[J]. Journal of Tea Science, 2012, 32(3): 236−246.]

[3] WANG Jieqiong, DAI Zhuoshun, GAO Ying, et al. Untargeted metabolomics coupled with chemometrics for flavor analysis of Dahongpao oolong tea beverages under different storage conditions[J]. LWT, 2023, 185: 115128.

[4] 汪洁琼, 杨悦, 汪芳, 等. 蔗糖对绿茶饮料理化成分及其风味稳定性的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(4): 142−151. [WANG Jieqiong, YANG Yue, WANG Fang, et al. Effect of sucrose on the physicochemical composition and flavor stability of green tea beverages[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(4): 142−151.]

[5] 耿立波, 张丽娜. 灌装和包装材料对乌龙茶饮料品质的影响[J]. 茶叶, 2024, 50(3): 156−162. [GENG Libo, ZHANG Lina. Effects of filling and packaging materials on the quality of oolong tea drink[J]. Journal of Tea, 2024, 50(3): 156−162.]

[6] 钱奕, 卢立新. 贮藏条件对茶饮料品质影响的试验研究[J]. 包装工程, 2009, 30(11): 34−35,60. [QIAN Yi, LU Lixin. Experimental study on influence of storage condition on tea beverage quality[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(11): 34−35,60.]

[7] 张正竹. 茶叶生物化学实验教程[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009. [ZHANG Zhengzhu. Tea biochemistry experiment course[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2009.]

[8] WANG Jieqiong, GAO Ying, FENG Zhihui, et al. Chemometrics and sensomics-assisted identification of key odorants responsible for retort odor in shelf-stored green tea infusion: A case study of Biluochun[J]. Food Research International, 2024, 195: 114953.

[9] TAO Meng, GUO Wenli, LIANG Jin, et al. Unraveling the key cooked off-flavor compounds in thermally sterilized green tea beverages, and masking effect of tea raw material baking[J]. Food Chemistry, 2025, 464: 141671.

［10］陈玉琼, 张家年. 原料对罐装绿茶水品质的影响[J]. 茶叶科学, 2001, 21(2): 120−123. ［CHEN Yuqiong, ZHANG Jianian. Effects of raw material on quality of canned green tea beverage[J]. Journal of Tea Science, 2001, 21(2): 120−123.］
［11］马梦君, 罗理勇, 李双, 等. 茶多酚和咖啡碱对茶乳酪形成的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(13): 15−19. ［MA Mengjun, LUO Liyong, LI Shuang, et al. Effects of different concentrations of caffeine and tea polyphenolic compounds on the formation of tea cream[J]. Food Science, 2014, 35(13): 15−19.］
［12］陈金定, 高彦祥. 不同茶饮料贮藏过程中品质的变化[J]. 食品工业科技, 2021, 42(11): 281−289. ［CHEN Jinding, GAO Yanxiang. Quality changes of different tea beverages during storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(11): 281−289.］
［13］吴俊, 王治会, 李晶, 等. 不同贮藏时间武夷岩茶风味品质化学差异[J]. 食品科学, 2024, 45(4): 214−224. ［WU Jun, WANG Zhihui, LI Jing, et al. Dynamic changes in flavor quality of Wuyi rock tea at different storage times[J]. Food Science, 2024, 45(4): 214−224.］
［14］张英娜. 绿茶茶汤主要儿茶素呈味特性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016. ［ZHANG Yingna. Study on flavor characteristics of main catechins in green tea soup[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.］
［15］ZHANG Yingna, YIN Junfeng, CHEN Jianxin, et al. Improving the sweet aftertaste of green tea infusion with tannase[J]. Food Chemistry, 2016, 192: 470−476.
［16］WANG J Q, FU Y Q, GRANATO D, et al. Study on the color effects of (-)-epigallocatechin-3-gallate under different pH and temperatures in a model beverage system[J]. Food Control, 2022, 139: 109112.
［17］DAI Q Y, HE Y Y, HO C T, et al. Effect of interaction of epigallocatechin gallate and flavonols on color alteration of simulative green tea infusion after thermal treatment[J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54(9): 2919−2928.
［18］徐懿, 屠幼英, 钟小玉. 茶儿茶素异构化研究现状[J]. 中草药, 2008, 39(7): 1106−1109. ［XU Yi, TU Youying, ZHONG Xiaoyu. Review on epimerization of tea catechins[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2008, 39(7): 1106−1109.］
［19］LI Yuanchao, FU Yanqing, GAO Ying, et al. Enzyme-assisted dynamic extraction as a promising method to produce high-quality fresh tea juice from summer tea leaves[J]. Food Chemistry, 2025, 486: 144608.
［20］LONG Piaopiao, SU Shengxiao, HAN Zisheng, et al. The effects of tea plant age on the color, taste, and chemical characteristics of Yunnan Congou black tea by multi-spectral omics insight[J]. Food Chemistry, 2024, 21: 101190.
［21］GE Yahui, BIAN Xiqing, SUN Baoqing, et al. Dynamic profiling of phenolic acids during Pu-erh tea fermentation using derivatization liquid chromatography-mass spectrometry approach[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(16): 4568−4577.
［22］CAO Yanyan, XU Anan, TAO Meng, et al. Flavor evolution of unsweetened green tea beverage during actual storage: Insights from multi-omics analysis[J]. Food Chemistry, 2025, 481: 144039.
［23］ZHANG L, CAO Q Q, GRANATO D, et al. Association between chemistry and taste of tea: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 101: 139−149.
［24］徐鹏程, 范方媛, 陆德彪, 等. 不同品种大佛龙井茶的汤色与滋味属性特征[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2017, 43(3): 317−328. ［XU Pengcheng, FAN Fangyuan, LU Debiao, et al. Infusion color and taste characteristic of Dafo Longjing tea processed from different cultivars[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2017, 43(3): 317−328.］
［25］李云飞. 绿茶主要化学物质与汤色劣变的相关性研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2012. ［LI Yunfei. The research of the relationship between the main chemical materials of green tea and the colour deterioration[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2012.］
［26］朱博, 夏涛, 高丽萍, 等. 绿茶茶汤中黄酮醇及其苷类的测定方法以及对茶汤色度的影响[J]. 食品与发酵工业, 2009, 35(2): 146−150. ［ZHU Bo, XIA Tao, GAO Liping, et al. Study on the determination of flavonols and its glycosides and their effects on the color of green tea infusion[J]. Food and Fermentation Industries, 2009, 35(2): 146−150.］
［27］YANG Qingqing, WANG Zhirong, CHEN Xuhui, et al. Evaluation of bitter compounds in *Zanthoxylum schinifolium* Sieb. et Zucc. by instrumental and sensory analyses[J]. Food Chemistry, 2022, 390: 133180.
［28］王梦琪, 朱荫, 张悦, 等. “清香”绿茶的挥发性成分及其关键香气成分分析[J]. 食品科学, 2019, 40(22): 219−228. ［WANG Mengqi, ZHU Yin, ZHANG Yue, et al. Analysis of volatile composition and key aroma compounds of green teas with fresh scent flavor[J]. Food Science, 2019, 40(22): 219−228.］
［29］NIU Yunwei, MA Yiwei, XIAO Zuobing, et al. Characterization of the key aroma compounds of three kinds of Chinese representative black tea and elucidation of the perceptual interactions of methyl salicylate and floral odorants[J]. Molecules, 2022, 27(5): 1631.
［30］窦宏亮. 绿茶饮料在贮藏中主要生化成分和香气成分的变化及其对茶饮料品质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007. ［DOU Hongliang. Study on the change of the main Biochemistry、Aroma components as well as their influence on the flavor of green tea beverages during storage[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007.］