DOI: 10.11931/guihaia.gxzw202508029

不锈钢筐与硅酸水协同优化提升普洱熟茶小筐发酵品质

赵苗苗[1,2]，保家有[1]，殷祥艳[1]，严　亮[1,2]，谢导阳[3]，李　芬[1]，郑婷婷[1,2]，赵国斌[4]，吕才有[5,6*]
（1. 滇西应用技术大学 普洱茶学院，云南 普洱 665000；2. 普洱茶研究院，云南 普洱 665000；3. 云南贞瑞茶业有限公司，云南 普洱 665000；4. 临沧澜沧江省级自然保护区双江管护分局，云南 临沧 677000；5. 云南农业大学 茶学院，昆明 650201；6. 普洱学院 茶叶咖啡学院，云南 普洱 665000）

摘　要：普洱熟茶的小筐渥堆发酵工艺尚未标准化，为推动该工艺的规范化与品质提升，该研究以三级晒青茶为原料，采用高效液相色谱（high-performance liquid chromatography, HPLC）、顶空固相微萃-气相色谱-质谱（headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry , HS-SPME/GC-MS）、色差分析法及感官审评法，比较竹筐与不锈钢筐两种渥堆容器以及不同水质（自来水、硅酸水）对普洱熟茶品质的影响。结果表明：（1）与竹筐处理（ZK）相比，不锈钢筐处理（BX）的游离氨基酸、可溶性糖和茶褐素含量以及茶汤亮度（L*）均显著提高（$P < 0.05$），香气更加丰富、层次清晰，感官上表现为陈香纯正、滋味甜醇。（2）在不锈钢筐条件下，硅酸水（G4）处理与自来水（Z4）处理的茶汤色差参数差异不显著，但 G4 处理的茶多酚含量相对 Z4 提高 9.89%，且茶褐素含量显著高于 Z4（$P < 0.05$）；感官审评与香气成分结果进一步表明，硅酸水处理样品在茶汤醇厚度和香气协调度方面的评分均高于自来水。（3）香气分析鉴别出壬醛、α-松油醇、芳樟醇及甲氧基苯类等对普洱熟茶香气贡献较大的特征成分。综上，在小筐渥堆发酵条件下，不锈钢筐配合硅酸水对普洱熟茶品质具有协同优化作用，为普洱熟茶核心香气成分解析及小筐渥堆工艺的清洁化、标准化提供理论依据。

关键词：小筐发酵，渥堆容器，水质，普洱熟茶，品质
中图分类号：Q946　　**文献标识码：**A

Synergistic optimization of ripe Pu-erh tea quality during small-basket pile-fermentation using a stainless-steel basket and silicon water

ZHAO Miaomiao[1,2], BAO Jiayou[1], YIN Xiangyan[1], YAN Liang[1,2], XIE Daoyang[3], LI Fen[1], ZHENG Tingting[1,2], ZHAO Guobin[4], LÜ Caiyou[5,6*]

(1. *College of Tea (Pu'er), West Yunnan University of Applied Sciences,* Pu'er 665000, Yunnan, China; 2. *Pu'er Institute of Pu-erh Tea,* Pu'er 665000, Yunnan, China; 3. *Yunnan Zhenrui Tea Industry Co., Ltd.,* Pu'er 665000, Yunnan, China; 4. *Lincang Lancang River Provincial Nature Reserve Shuangjiang Management and Protection Sub-Bureau,* Lincang 677000*,* Yunnan, China; 5. *College of Tea Seience, Yunnan Agricultal University,* Kunming 650201, China; 6.*College of Tea and Coffee, Puer University,* Pu'er 665000, Yunnan, China)

Abstract: The small-basket pile-fermentation process for producing ripe Pu-erh tea has not yet been

基金项目：国家现代农业产业技术体系资助项目（CARS-19）；云南省古茶园生物多样性调查与保护；滇西应用技术大学茶产品创新与资源综合利用科技创新团队项目；2022 年云南省科技特派员项目；2023 年云南省“三区”科技人才专项。

第一作者：赵苗苗（1988—），硕士研究生，助理研究员，主要从事茶叶加工与茶叶质量安全研究，（E-mail）408925409@qq.com。
*__通信作者：__吕才有，博士研究生，教授，主要从事茶叶加工与茶叶质量安全研究，（E-mail）2495846526@qq.com。

standardized. To promote standardization and improve product quality, third-grade sun-dried green tea was used as the raw material from a seed-propagated tea landrace population. High-performance liquid chromatography (HPLC), headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME/GC-MS), color difference analysis, and sensory evaluation were employed to compare the effects of two pile-fermentation containers (a small-basket and a stainless-steel basket) and two types of brewing water (tap water and silicon water) on the quality of ripe Pu-erh tea. The results were as follows: (1) Compared with the small-basket treatment (ZK), the stainless-steel basket treatment (BX) significantly increased the levels of free amino acids, soluble sugars, and theabrownin, and enhanced liquor brightness (L*). Tea from the BX treatment exhibited a richer, more clearly layered aroma, and sensory evaluation described it as having a cleaner aged aroma and a sweeter, mellower taste. (2) Under the stainless-steel basket condition, the color difference parameters of tea infusions prepared with silicon water (G4) and tap water (Z4) did not differ significantly. By contrast, the polyphenol content in the G4 treatment was 9.89% higher than that in the Z4 treatment, and the theabrownin level was significantly higher (P<0.05). Sensory evaluation together with aroma component analysis further showed that silicon water produced infusions with greater body, higher aroma scores, and a more harmonious overall aroma profile than tap water. (3) Aroma analysis identified nonanal, α-terpineol, linalool, and methoxybenzenes as key contributors to the characteristic aroma of ripe Pu-erh tea. Taken together, the stainless-steel basket combined with silicon water exerted a synergistic effect in optimizing ripe Pu-erh tea quality during small-basket pile-fermentation. These findings provide a theoretical basis for elucidating core aroma components and for promoting cleaner and more standardized small-basket pile-fermentation.

Key words: small-basket fermentation, pile-fermentation container, water quality, ripe Pu-erh tea, quality

普洱茶属于黑茶类，是典型的后发酵茶，包括普洱生茶（紧压茶）和普洱熟茶（紧压茶、散茶）。普洱熟茶创制于 20 世纪 70 年代，其品质形成主要依赖微生物群落与内源酶共同作用的渥堆发酵过程。与生茶相比，普洱熟茶具有汤色红浓明亮、滋味醇厚顺滑、陈香明显等感官特征，并在降血脂、调节血糖和抗氧化等方面表现出一定生理活性，已成为云南特色茶产业的重要组成部分（赵岩等，2020；杨锐和孙颖，2024）。

目前普洱熟茶生产仍以传统大堆渥堆为主，该工艺一次性发酵量大（≥2.5 t）、发酵周期长（45～60 d），对场地、人工和管理条件要求较高，且堆体内部温湿度和含氧量等微环境参数存在明显空间梯度（田海霞等，2022），易导致不同批次及同一堆体不同部位之间品质差异较大。为适应清洁化与数字化加工需求，近年出现了多种小体量、可控性更好的渥堆模式，如立体小筐渥堆、密闭式发酵仓等。有研究从发酵设备结构优化、通风方式改良和翻堆策略调控等方面入手，如通过增加强制通风、设置多层发酵单元和调整翻堆频次等措施，缩短了发酵周期并提高了批次间稳定性（刘晗，2013；李云贵，2021；罗慧等，2024）。这表明小体量渥堆在工艺可控性和产品一致性方面具有潜在优势。然而，上述研究多聚焦于发酵温度、水分和翻堆制度等工艺参数，对渥堆容器材质与潮水水质等关键因素关注相对不足。现有研究在比较渥堆发酵过程中不同工艺条件的作用时，多从感官评价或若干理化指标出发，对发酵程度、品质变化等进行表征；而在小筐渥堆体系下，系统定量考察容器材质与潮水水质对关键品质指标及成品质量影响的研究仍相对有限，在一定程度上制约了小筐渥堆工艺的标准化及其在古树茶等高价值原料中的应用。小筐渥堆发酵适用于古树茶等高价值原料的小批量熟化，在满足普洱熟茶差异化需求方面具有优势，可作为传统大堆发酵的有益补充；但亦有研究表明，小筐立体发酵虽能缩短发酵周期、提高批次间稳定性，但其成品在醇厚度、陈化感及部分关键化学成分含量上仍低于传统大堆，提示在小体量体系中仍需强化发酵要素的精细调控（赵苗苗等，2022）。考虑到小筐渥堆堆体尺度较小、传热传湿特征与大堆显著不同，容器材质与结构更直接影响堆温、含水量及微生物群落建设；同时，潮水水质的矿物质组成和 pH 等理化特

征亦可能通过调节微生物代谢与酶促反应，进而作用于香气和滋味物质的形成。因此，在小筐渥堆情境下系统比较容器与水质对发酵过程及成品品质的影响，具有重要理论和应用价值。

基于此，该研究以群体种三级晒青茶为对象，选用竹筐和不锈钢筐作为渥堆容器，采用分组对比发酵试验、理化成分测定及感官审评等方法，拟探讨以下问题：（1）竹筐与不锈钢筐在小筐渥堆条件下对普洱熟茶理化及感官品质的具体影响差异；（2）在统一采用不锈钢筐条件下，硅酸水与自来水潮水对普洱熟茶理化成分及香气、滋味特征的作用特点；（3）容器材质与潮水水质在小筐渥堆体系中是否存在协同优化效应，能否据此构建适用于中小规模清洁化生产的普洱熟茶小筐渥堆工艺方案。

1 材料与方法

1.1 实验材料

发酵原料为云南省群体种三级晒青茶（样品信息见表 1）。发酵地点为云南贞瑞茶业有限公司（“普洱味熟茶”研发生产中心）发酵车间。硅酸水为商品“真硅水”（云南硅立方饮品有限公司），自来水来源于当地市政供水。其他化学试剂均为分析纯或色谱纯。

表 1 实验样品信息

Table 1 Information on experimental samples

编号 Number	处理 Treatment	容器类型 Container type	水质 Water quality	翻堆次数 Pile-turning times
YL	群体种三级晒青原料 Third-grade sun-dried green tea raw material from a tea landrace (seed - propagated) population	—	—	作为对照，不参与发酵处理 Used as a control, this sample did not undergo fermentation
ZK	竹筐发酵 Small - basket pile-fermentation	竹筐 Small-basket	自来水 Tap water	—
BX	不锈钢筐发酵 Stainless - steel basket pile - fermentation	不锈钢筐 Stainless-steel basket	自来水 Tap water	—
Z1	自来水潮水第一次翻堆 Tap water moistening — 1st turning	不锈钢筐 Stainless-steel basket	自来水 Tap water	第一次翻堆 1st turning
Z2	自来水潮水第二次翻堆 Tap water moistening — 2nd turning	不锈钢筐 Stainless-steel basket	自来水 Tap water	第二次翻堆 2nd turning
Z3	自来水潮水第三次翻堆 Tap water moistening — 3rd turning	不锈钢筐 Stainless-steel basket	自来水 Tap water	第三次翻堆 3rd turning
Z4	出堆样 End-of-pile sample (tap water)	不锈钢筐 Stainless-steel basket	自来水 Tap water	第四次翻堆 4th turning
G1	硅酸水潮水第一次翻堆 Silicon water moistening — 1st turning	不锈钢筐 Stainless-steel basket	硅酸水 Silicon water	第一次翻堆 1st turning
G2	硅酸水潮水第二次翻堆 Silicon water moistening — 2nd turning	不锈钢筐 Stainless-steel basket	硅酸水 Silicon water	第二次翻堆 2nd turning
G3	硅酸水潮水第三次翻堆 Silicon water moistening — 3rd turning	不锈钢筐 Stainless-steel basket	硅酸水 Silicon water	第三次翻堆 3rd turning
G4	出堆样 End-of-pile sample (Silicon water)	不锈钢筐 Stainless-steel basket	硅酸水 Silicon water	第四次翻堆 4th turning

注：—表示该组样品不涉及该处理/变量。

Note: — indicates that this treatment/variable is not involved in this set of samples.

1.2 仪器

高效液相色谱仪（LCMS-8045）：岛津制作所；气相色谱-质谱联用仪（GCMS-QP2020NX）：岛津制作所；色差仪（CS-280）：杭州彩谱科技有限公司；紫外分光光度计（UV-2550）：岛津(香港）有限公司等。

1.3 实验设计与方法

1.3.1 实验设计与发酵工艺

实验设计：实验分为两阶段开展。第一阶段为渥堆容器比较试验，设置竹筐（ZK）和不锈钢筐（BX）两个处理；第二阶段在统一采用不锈钢筐的条件下，比较不同潮水水质的影响，设置自来水组（Z1−Z4）和硅酸水组（G1−G4）。两阶段原料批次和发酵时间不同，虽然工艺参数一致，但实际发酵微环境难以完全相同，因此各阶段样品仅在本阶段内进行理化指标比较与统计分析，不进行跨阶段显著性检验。

原料与工艺条件：两阶段原料均为三级晒青茶 500 kg，均分为两堆（各 250 kg）。第一阶段采用圆形竹筐（直径 1.0 m、高 0.90 m）和不锈钢筐（长 2.5 m、宽 1.5 m、高 1.3 m）分别进行渥堆发酵。第二阶段统一采用不锈钢筐，在相同工艺条件下比较自来水与硅酸水两种潮水水质。自来水（pH 7.5）与硅酸水（偏硅酸 ≥ 80 mg • L^{-1}，pH 7~8.5）。统一发酵条件为：将三级晒青茶加湿至堆体含水量约 30%，装入相应容器后置于室内发酵室渥堆，发酵室环境温度约 30 ℃、相对湿度 60%；发酵过程中每 7 d 翻堆 1 次，共 4 次。出堆后将茶坯开沟摊放于通风阴凉处自然干燥至水分适宜，密封保存备用。

1.3.2 感官审评

由 8 位具有评茶员资格的人员组成审评小组，按照 GB/T 23776—2018《茶叶感官审评方法（黑茶散茶）》的要求对各茶样进行审评，最终评语由审评小组共同得出，评分取 8 位审评人员的平均分。

1.3.3 理化指标

参照 GB/T 8305—2013《茶 水浸出物测定》检测水浸出物；参照 GB/T 8314—2013《茶 游离氨基酸总量的测定》检测游离氨基酸；参照葸酮比色法检测可溶性糖；参照 GB/T 8313—2018《茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法》检测茶多酚和儿茶素；采用分光光度法测定茶多酚；采用高效液相法（HPLC）测定儿茶素；依照 GB/T 8312—2013 测定咖啡碱含量；采用 Roberts 法定量茶黄素（theaflavin, TF）、茶红素（thearubigin, TR）、茶褐素（theabrownin, TB）的含量。

1.3.4 茶汤色差测定

称取 3.0 g 茶样，加 150 mL 沸腾蒸馏水浸泡 5 min，趁热过滤，冷却至 25 ℃后，用色差仪测定茶汤的 L、a、b、ΔE 值。

1.3.5 挥发性成分分析（HS-SPME/GC-MS）

挥发性成分采用 HS-SPME 结合 GC-MS 分析。称取 0.20 g 粉碎茶样，置 20 mL 顶空瓶中，加入氯化钠和内标溶液，70 ℃ 平衡 20 min 后使用 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 纤维吸附 40 min，再插入 GC-MS 进样口解析。GC 采用 SH-5Sil-MS 毛细管柱，氦气为载气，程序升温至 220 ℃；MS 采用 EI 模式，离子化电压 70 eV，扫描范围 m/z 40~450。香气成分通过与 NIST20S 谱库及保留指数比对定性，内标法结合峰面积归一化定量或半定量。

1.4 数据分析

数据整理与作图使用 Excel 和 Origin 24 软件，差异显著性分析采用 SPSS 27 单因素方差分析（ANOVA），以 $P < 0.05$ 为显著差异，$P > 0.05$ 为差异不显著。

2 结果与分析

2.1 不同渥堆容器对普洱熟茶品质的影响

2.1.1 理化成分分析

ZK 与 BX 发酵样茶样相比，虽然水浸出物差异不显著（P>0.05），但 BX 的游离氨基酸、可溶性糖比 ZK 相对提高约 20.35%、9.96%（P<0.05），提供了更醇厚甜滑的物质基础（表 2）。这可能与不锈钢容器更有利于厌氧微生物（如黑曲霉）的增殖，其分泌的胞外酶可促进碳水化合物水解为可溶性糖，同时推动乳酸菌、酵母菌等厌氧菌群的代谢，从而优化糖类分解与氨基酸积累路径有关（Wang et al., 2014）。与 ZK 相比，BX 茶样的游离氨基酸和可溶性糖含量明显提高（P<0.05），而茶多酚含量比 ZK 相对降低约 17.82%（P<0.05），咖啡碱、没食子酸及酯型、非酯型和总儿茶素含量差异不显著（P>0.05）。说明不同容器渥堆发酵中，不锈钢筐有利于氨基酸和可溶性糖等可溶性风味物质的累积，而竹筐在多酚保留方面略占优势。总体上，两种容器发酵所得熟茶在基本成分上差异有限，但在风味相关成分比例上存在一定差别。

表 2 不同容器渥堆发酵茶样中的化学成分

Table 2 Chemical composition of pile-fermented tea samples in different containers

%

编号 Number	YL	ZK	BX
水浸出物 Water extracts	53.83±0.47a	47.57±1.12b	45.65±1.43b
游离氨基酸 Free amino acids	3.26±0.35a	2.31±0.25c	2.78±0.18ab
可溶性糖 Soluble sugars	3.79±0.13c	5.22±0.24b	5.74±0.07a
茶多酚 Tea polyphenols	29.56±0.52a	17.12±1.8b	14.07±0.49c
咖啡碱 Caffeine	2.32±0.12a	2.81±0.37a	2.90±0.43a
没食子酸 Gallic acid（GA）	0.003±0.005b	0.015±0.001a	0.013±0.004a
酯型儿茶素 Gallated catechins	9.755±0.430a	0.613±0.145b	0.702±0.332b
非酯型儿茶素 Non-gallated catechins	0.096±0.005a	0.064±0.015b	0.054±0.010b
总儿茶素 Total catechins	9.851±0.435a	0.677±0.156b	0.756±0.340b

注：数据用平均值±标准偏差表示(n=3)。同一列中不同字母代表数值间存在显著（P<0.05）。下同。

Note : Data are expressed as mean ± standard deviation (n=3). In the same column, there is a significant difference between the representative values of different letters(P<0.05). The same below.

2.1.2 茶色素与茶汤色差综合分析

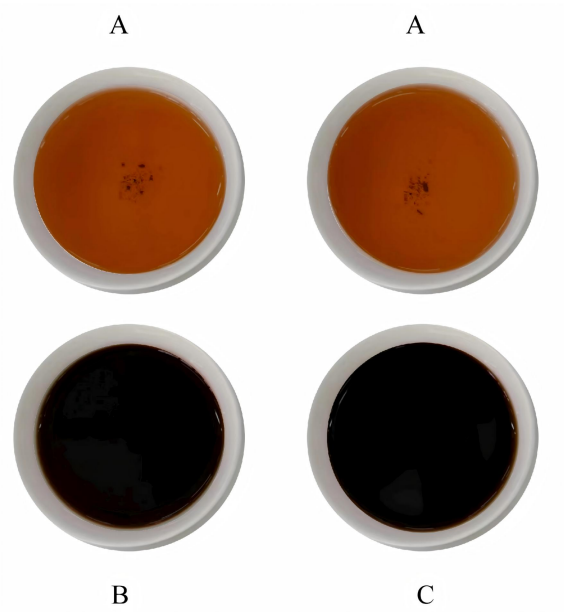
不同容器渥堆发酵对茶色素组成产生了明显影响（表 3，图 1）。与原料相比，ZK 和 BX 茶样的茶黄素（TF）含量略有增加，且 ZK 与 BX 间 TF 含量差异不显著（P>0.05）；ZK 的茶红素（TR）含量（1.32%）高于 BX（0.83%），而 BX 的茶褐素（TB）含量（5.41%）显著高于 ZK（5.01%）（P<0.05）。说明在 BX 条件下，部分茶黄素和茶红素进一步氧化聚合为茶褐素。这与 Ge 等（2019）关于熟茶茶红素（TR）高于生茶的报道一致。TB 作为熟茶发酵过程中形成的主要色素，与渥堆发酵密切相关，微生物分泌的氧化酶可将儿茶素氧化聚合生成 TB（马冰淞等，2022），这一现象亦与陈文君等（2020）提出的密闭环境可加速厌氧代谢并促进多酚氧化及色素形成的观点一致。周心如等（2024）指出，TB 是熟茶“醇厚”口感的核心物质，因此 BX 样中 TB 的较高积累可合理解释其在感官审评中呈现的更醇厚滋味。

色差结果与茶色素变化相互印证。与 ZK 相比，BX 茶样的亮度值 L 较高（P<0.05），茶汤外观更为明亮；两者 a、b 值均处于红黄色范围，ZK 的红度和黄度略高。综合 TF、TR、TB 与 L、a、b 的变化，可认为 BX 茶样在茶褐素增加的同时仍保持较高亮度，呈现“红浓而较明亮”的汤色特征。已有研究指出 TF 和 TR 与茶汤亮度间正相关，且 TF 对亮度贡献更显著（Akuli et al., 2016）。TB 总含量与茶汤亮度呈显著负相关（Ghosh et al., 2012），虽然 TB 含量在 BX 更高，其深色效果可能抵消一部分 L 值提升，但总体上 TF/TR 的亮度效应仍占主导，使亮度未显著下降；BX 的 a 值显著低于 ZK，说明其红色色调较弱，或因 TB 积累引发的暗化作用被部分中和。因此 BX 茶样较高的 TB 含量也与其后续感官审评中更高的醇厚度评分相一致。

表 3 不同容器渥堆发酵茶样中的色素含量及色差（*n*=3）

Table 3 Pigment contents and color differences of tea samples under pile-fermentation in different containers (*n*=3)

编号 Number	YL	ZK	BX
茶黄素 Theaflavin (TF) (%)	0.07±0.015b	0.08±0.001a	0.09±0.003a
茶红素 Thearubigin (TR) (%)	0.92±0.021ab	1.32±0.205a	0.83±0.287b
茶褐素 Theabrownin (TB) (%)	0.25±0.006c	5.01±0.255b	5.41±0.006a
L	20.96±1.06a	0.66±0.10c	1.79±0.74b
a	-2.12±0.11c	0.93±0.08a	0.29±0.09b
b	18.90±0.79a	0.72±0.40b	0.37±0.03b
△*E*	23.65±0.51b	27.98±0.11a	26.81±0.74a



A. 渥堆发酵的原料（YL）；**B**. 用自来水竹筐渥堆发酵的茶汤（ZK）；**C**. 用自来水不锈钢筐渥堆发酵的茶汤（BX）

A. Raw materials for pile-fermentation (YL); **B**. Tea soup produced by pile-fermentation in a small-basket with tap water (ZK); **C**. Tea soup produced by pile-fermentation in a stainless-steel basket with tap water (BX)

图 1 不同容器渥堆发酵普洱茶茶汤色泽对比

Fig. 1 Comparison of infusion color among Pu-erh teas pile-fermented in different containers

2.2 不同水质潮水发酵对普洱熟茶品质的影响

2.2.1 理化成分分析

自来水（Z1−Z4）与硅酸水（G1−G4）潮水发酵过程中主要理化指标的变化（表 4）。两种水质处理的水浸出物均呈“先降后升”趋势：第一次翻堆后显著低于原料，随后逐步回升，出堆样 Z4 和 G4 低于原料（P<0.05）。

游离氨基酸含量在发酵早期略降，中后期逐渐回升，两种水质处理间差异较小，G3 略高于 Z3，出堆样（P>0.05），Z4 和 G4 的游离氨基酸分别为 2.69% 和 2.75%，（P>0.05）。可溶性糖含量在前两个翻堆阶段处于高值区间，后期略有下降但出堆样仍高于原料（P<0.05），推测发酵过程中多糖水解和糖类再分配持续进行。茶多酚含量随发酵进程逐渐降低，出堆样明显低于原料（P<0.05）。与自来水处理相比，硅酸水处理出堆样 G4 的茶多酚含量（18.67%）相对 Z4（16.99%），提高了约 9.89%。酯型、非酯型及总儿茶素含量在两种水质下变化趋势一致，均较原料大幅下降，与高创创等（2022）报道的渥堆发酵中儿茶素降解和衍生物生成的结果相符。综上，两种水质潮水处理在理化指标随发酵进程的变化规律上基本一致，出堆阶段硅酸水处理样品的水浸出物和茶多酚

含量略高（P>0.05），而可溶性糖、游离氨基酸含量接近（P>0.05），提示硅酸水对发酵终点的影响主要体现在多酚类物质的保留与转化上。

表 4 不同水质潮水发酵茶样中的化学成分（n=3）

Table 4 Chemical composition of pile-fermented tea samples moistened with different water qualities (n=3)

%

编号 Number	水浸出物 Watere xtracts	游离氨基酸 Free amino acids	可溶性糖 Soluble sugars	茶多酚 Tea polyphenols	咖啡碱 Caffeine	没食子酸 Gallicacid（GA）	酯型儿茶素 Gallated catechins	非酯型儿茶素 Non-gallated catechins	总儿茶素 Total catechins
YL	53.83±0.47 a	3.26±0.35 a	3.79±0.13 e	29.56±0.52 c	2.32±0.12 a	0.003±0.005 e	9.755±0.430 a	0.096±0.005 def	9.851±0.435 a
Z1	33.44±0.73 f	2.42±0.04 e	6.48±0.34 b	28.93±0.57 c	2.42±0.43 a	0.052±0.011 b	3.855±1.076 b	0.275±0.068 b	4.130±1.140 b
Z2	36.35±1.10 e	2.54±0.06 cde	6.65±0.12 b	28.74±0.35 c	2.94±0.21 a	0.026±0.010 cd	2.206±0.441 c	0.204±0.030 c	2.410±0.469 c
Z3	41.74±1.00 c	2.75±0.09 bc	5.21±0.03 d	22.72±0.84 d	3.08±0.62 a	0.018±0.002 d	1.397±0.225 cde	0.136±0.012 de	1.532±0.216 cde
Z4	43.66±0.41 b	2.69±0.04 cd	5.17±0.04 d	16.99±1.43 e	2.74±0.37 a	0.006±0.003 e	1.092±0.176 de	0.090±0.013 ef	1.182±0.183 de
G1	33.38±1.16 f	2.45±0.06 de	7.14±0.15 a	27.34±1.86 c	2.63±0.60 a	0.065±0.006 a	3.537±0.701 b	0.339±0.024 a	3.876±0.725 b
G2	39.05±0.23 d	2.37±0.03 e	5.73±0.12 c	23.67±0.45 d	2.54±0.25 a	0.035±0.004 c	1.749±0.916 cd	0.205±0.036 c	1.955±0.952 cd
G3	39.00±1.75 d	2.95±0.05 b	5.20±0.08 d	21.66±2.07 d	2.56±0.29 a	0.006±0.003 e	0.734±0.070 de	0.149±0.013 d	0.883±0.076 de
G4	44.52±0.36 b	2.75±0.06 bc	5.40±0.05 d	18.67±1.22 e	2.71±0.28 a	0.005±0.001 e	0.642±0.010 e	0.067±0.007f	0.709±0.015 e

2.2.2 茶色素与茶汤色差综合分析

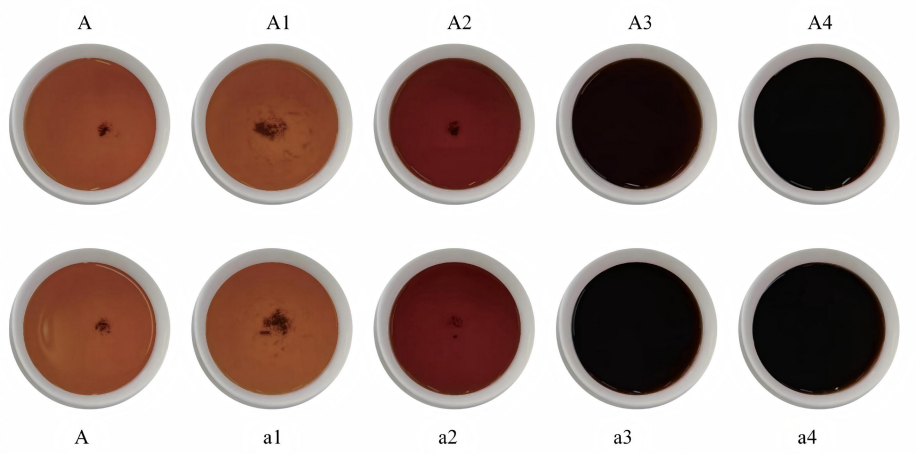
不同水质潮水发酵对茶色素含量及色差的影响（表 5）。各翻堆阶段两种水质处理的茶黄素（TF）含量差异不显著（P>0.05），出堆样 Z4 和 G4 的 TF 含量均为 0.09%。TF 作为早期氧化产物，在第一次翻堆时达最大值，伴随发酵作用被进一步氧化为 TR 和 TB（刘宸瑜等，2025）。茶红素（TR）在发酵前中期相对较高，出堆时略有回落，而茶褐素（TB）则随发酵进行逐步升高（梁名志等，2006）。发酵末期 G4 的 TB 含量（4.06%）显著高于 Z4（3.75%）（P<0.05），TB 和粗多糖具有提升普洱熟茶醇厚滋味强度的作用（Deng et al., 2022; Deng et al., 2024），助力茶汤醇厚与黏滑口感的形成（Hu et al., 2022）。表明硅酸水在不锈钢筐条件下有利于促进茶褐素的进一步生成。

色差方面，两种水质在各翻堆阶段 L、a、b 值的变化趋势基本一致（表 5，图 2），出堆样 Z4 和 G4 的 L 值较低（P>0.05），a 值和 b 值差异不显著（P>0.05），ΔE 均在 28 左右（P>0.05），说明两种水质处理对肉眼可见的茶汤颜色影响有限。对照样（YL）及发酵早期样品（Z1、G1） L 值较高，颜色相对明亮；出堆阶段 Z4 与 G4 的 L 值较低，汤色加深且两者差异不显著（P>0.05）。a 值在第二次翻堆阶段达到峰值，之后逐渐减小，表明中期渥堆阶段汤色偏红较为明显；b 值在早期样品中较高，后期略有降低。ΔE 在样品间整体处于较高水平，反映出发酵处理与原料之间以及各阶段之间色差较为明显。综合茶色素和色差结果可见，两种水质处理均经历了从“红黄明亮”向“红浓偏暗”的演变过程，硅酸水处理主要体现在 TB 含量略高，对宏观茶汤色泽的影响相对有限。

表 5 不同水质潮水发酵茶样中的色素含量及色差（*n*=3）

Table 5 Pigment contents and color difference parameters in fermented tea samples moistened with different water types (*n*=3)

编号 Number	茶黄素 Theaflavin (TF) (%)	茶红素 Thearubigin (TR) (%)	茶褐素 Theabrownin (TB) (%)	L	a	b	Δ*E*
YL	0.07±0.015b	0.92±0.021e	0.25±0.006f	20.96±1.06a	−2.12±0.11g	18.90±0.79b	23.65±0.51d
Z1	0.16±0.012a	1.64±0.132ab	1.11±0.010e	15.84±0.82c	6.73±0.34b	18.89±1.45b	23.87±1.63d
Z2	0.15±0.007a	1.79±0.082a	1.69±0.084d	5.08±0.26d	13.41±0.46a	9.39±0.54c	28.98±0.08a
Z3	0.07±0.004b	1.33±0.086c	3.59±0.161b	2.06±0.28e	4.68±0.46d	3.29±0.36d	27.26±0.16bc
Z4	0.09±0.004b	1.41±0.036c	3.75±0.055b	0.12±0.03f	0.78±0.14f	0.20±0.04e	28.51±0.02ab
G1	0.14±0.051a	1.40±0.076c	1.11±0.006e	17.92±0.81b	5.65±0.08c	23.69±1.20a	26.62±1.23c
G2	0.14±0.003a	1.45±0.041c	2.05±0.030c	5.65±0.70d	13.74±0.33a	8.65±0.38c	28.45±0.48ab
G3	0.08±0.003b	0.87±0.036e	3.64±0.030b	0.65±0.04f	3.59±0.12e	1.12±0.07e	28.29±0.03ab
G4	0.09±0.003b	1.18±0.047d	4.06±0.135a	0.10±0.03f	0.51±0.36f	0.74±0.19e	28.52±0.03ab



A. 渥堆发酵原料样（YL）；**A1**. 自来水潮水第一次翻堆样（Z1）；**A2**. 自来水潮水第二次翻堆样（Z2）；**A3**. 自来水潮水第三次翻堆样（Z3）；**A4**. 自来水潮水出堆样（Z4）；**a1**. 硅酸水潮水第一次翻堆样（G1）；**a2**. 硅酸水潮水第二次翻堆样（G2）；**a3**. 硅酸水潮水第三次翻堆样（G3）；**a4**. 硅酸水潮水出堆样（G4）。所有样品均采用不锈钢筐渥堆发酵。

A. Raw material sample prior to pile-fermentation (YL); **A1**. Tap-water moistening, sample at the 1st pile turning(Z1); **A2**. Tap-water moistening, sample at the 2nd pile turning (Z2); **A3**. Tap-water moistening, sample at the 3rd pile turning (Z3); **A4**. Tap-water moistening, end-of-pile sample (Z4); **a1**. Silicon-water moistening, sample at the 1st pile turning (G1); **a2**. Silicon-water moistening, sample at the 2nd pile turning (G2); **a3**. Silicon-water moistening, sample at the 3rd pile turning (G3); **a4**. Silicon-water moistening, end-of-pilesample (G4). All samples were pile-fermented in stainless-steel baskets.

图 2 不同潮水下不锈钢渥堆普洱茶各翻堆阶段茶汤对比

Fig. 2 Comparison of Pu-erh tea infusions at different turning stages during stainless-steel pile-fermentation under the same watering method

2.3 感官审评

不同容器发酵的熟茶感官审评评分 BX（80.6 分）优于 ZK（74.9 分）。BX 陈香、甜香浓郁，滋味甜滑醇厚；ZK 香气陈香，滋味平和，两者相比 BX 的滋味表现更加甜醇，这与不锈钢筐发酵的熟茶（BX）中氨基酸（2.78%）、可溶性糖（5.74%）、TB（5.41%）含量都显著高于竹筐发酵的（ZK）（P<0.05）及 BX 香气更丰富复杂、ZK 香气相对单一的香气分析结果相符。

在不同水质潮水的不锈钢筐渥堆发酵条件下，G 组各阶段的综合感官评分整体优于 Z 组。仅在中前期的 G2 样品中，酸味特征较为突出，导致其评分略低于 Z2，推测可能与硅酸水环境下部分产酸微生物活性增强有关。Z3 与 G3 均出现茶汤浑浊现象，可能与发酵中后期茶汤中可溶性高分子物质和微粒含量增加有关，从而在一定程度上影响了汤感外观。除上述阶段外，其余各发酵时期 G 组样品的感官评价均高于对应的 Z 组样品，最终成品 G4 的总评分（81.25）明显高于 Z4（76.25），表明硅酸水潮水对熟茶整体品质具有积极提升作用。具体而言，G4 在“醇厚顺滑”等口感指标上表现更为突出，汤感厚重，与其茶褐素（TB）含量显著高于 Z4 的理化结果相一致；G4 的香气特征为“陈香、果香浓郁”，也与香气成分分析中 Z4 偏以陈香为主，而 G4 兼具陈香与甜果香的结论相吻合（表 6，附录 1）。

表 6 茶样感官审评（n=8）

Table 6 Sensory evaluation of tea samples (n=8)

编号 No.	外形 Appearance (20%)	评分 Score	汤色 Liquor color (15%)	评分 Score	香气 Aroma (30%)	评分 Score	滋味 Taste (25%)	评分 Score	叶底 Infused leaf (10%)	评分 Score	总分 Total score
YL	墨绿紧实 Dark green, tight	82	黄绿明亮 Yellowish green, bright	75	花香浓郁 Flowery aroma, high and intensive aroma	80	醇厚回甘 Mellow and thick, sweet after taste	80	绿黄柔软 Greenish yellow, soft	70	77.85
ZK	灰褐紧结 Greyish auburn, tight and heavy	77	红褐欠亮 Reddish auburn, less bright	75	陈香 Aroma after aging	75	平和 Neutral	75	红褐粗老 Reddish auburn, coarse	70	74.9
BX	红褐紧结 Reddish auburn, tight and heavy	78	红浓欠亮 Red and thick, less bright	75	陈香、甜香浓郁 Aroma after aging and sweet aroma, high and intensive aroma	85	甜滑醇厚 Sweet and smooth, mellow and thick	85	红褐粗老 Reddish auburn, coarse	69	80.6
Z1	墨绿紧实 Dark green, tight	75	黄亮 Bright yellow	70	略带花香 Slightly flowery aroma	70	醇厚回甘 Mellow and thick, sweet after taste	75	黄绿柔软 Yellowish green, soft	70	72.25
Z2	褐稍花 Auburn, slightly mixed	74	橙红明亮 Orange red, bright	73	陈香 Aroma after aging	68	醇和回甘 Mellow and normal, sweet after taste	70	尚红褐 Slightly reddish auburn	68	70.45
Z3	褐尚润 Auburn, still bloom	78	红浓 Red and thick	75	陈香 Aroma after aging	68	纯正 Pure and normal	70	红褐 Reddish auburn	65	71.25
Z4	红褐紧结 Reddish auburn, tight and heavy	80	红褐欠亮 Reddish auburn, less bright	75	陈香浓郁 Aroma after aging, high and intensive aroma	75	醇和 Mellow and normal	76	红褐尚嫩 Reddish auburn, soft and tender	75	76.25
G1	墨绿紧实 Dark green, tight	79	黄亮 Bright yellow	75	豆香浓郁 Fresh soybean smell, high and intensive aroma	71	醇厚回甘 Mellow and thick, sweet after taste	75	绿黄柔软 Greenish yellow, soft	70	74.1
G2	黄褐紧实 Yellowish auburn, tight	78	橙红明亮 Orange red, bright	73	陈香纯正 Aroma after aging, pure and normal	70	醇和微酸 Mellow and normal, slightly sour	60	尚红褐 Slightly reddish auburn	68	69.35

G3	褐尚润 Auburn, still bloom	81	红浓欠亮 Red and thick, less bright	70	陈香 Aroma after aging	70	纯正 Pure and normal	70	红褐尚嫩 Reddish auburn, soft and tender	69	72.1
G4	红褐紧结 Reddish auburn, tight and heavy	80	红褐欠亮 Reddish auburn, less bright	70	陈香、果香浓郁 Aroma after aging and fruity aroma, high and intensive aroma	85	醇厚顺滑 Mellow and thick, smooth	87	红褐紧实 Reddish auburn, tight	75	81.25

2.4 香气成分特征及其差异

据 GC-MS 共检测出 112 种香气物质，包括酮类（20 种）、烃类（24 种）、醛类（22 种）、醇类（19 种）、酯类（20 种）、醚类（2 种）、甲基氧苯类（2 种）及其他化合物（2 种），整体香气特征为花香、果香、陈香、脂香及木香五类（附录 1）。其中 51 种仅在单一样品中检出，含量多处于低水平，构成了各样品的个性香气。原料 YL 共检测到 64 种挥发性成分，其中相当部分为特有组分，保留了晒青茶的清香特征。相比之下，ZK 和 Z2 的特有成分较少，香气以共有组分为主，缺乏标志性特征成分。

除 YL 外，其余 10 个渥堆发酵茶样中均检出壬醛、*α*-松油醇、芳樟醇、棕榈酸甲酯、呋喃醇衍生物及甲氧基苯类 6 类成分，为普洱熟茶的共性香气基础。出堆样（ZK、BX、Z4、G4）中普遍检出的甲氧基苯类（1,2,3-三甲氧基苯、1,2,4-三甲氧基苯）被认为是陈味和木香的主要气味来源（Li et al., 2024）。Wang 等（2025）的研究表明，壬醛、芳樟醇和*α*-松油醇是普洱熟茶的关键香气成分；邓洪燕等（2024）进一步指出，*α*-紫罗兰酮、*β*-紫罗兰酮、芳樟醇、苯甲醛及甲氧基苯类在不同发酵阶段主导熟茶香型的演变。综上，壬醛（玫瑰香、柑橘香、油脂香）、*α*-松油醇（松木香、花香）、芳樟醇（木香、花香、甜香）、棕榈酸甲酯（油脂香、蜡质味、脂肪味）、呋喃醇衍生物（花香、干果香）及甲氧基苯类共同构成普洱熟茶的核心香气框架，赋予其甜醇的花果香与典型陈香。

2.4.1 不同容器渥堆发酵对熟茶香气的影响

ZK 样品的挥发性成分以醇类、酯类和醛类为主，BX 样品则以醛类、酯类和酮类为主。BX 共检出 43 种挥发性成分，不仅包含 ZK 中的 12 种全部成分，还额外检测到多种醛类（如癸醛、庚醛、己醛、苯甲醛等）及酮类（如芳樟醇氧化物、香叶基丙酮等），而这些物质在 ZK 中几乎未检出，表明 BX 的香气层次更丰富，兼具花香、果香、清香及坚果甜香等多种香气特征，ZK 的香气谱型则相对集中。两者均含有芳樟醇、*α*-松油醇和苯乙醇等核心花香化合物，但 ZK 中上述成分含量更高，例如苯乙醇（玫瑰香）在 ZK 中的相对含量约为 4.9%，约为 BX（1.6%）的 3 倍，芳樟醇和 *α*-松油醇含量亦高出约 15%～20%，使其松木与花香特征更加突出。ZK 中呋喃醇衍生物含量为 31.22%，明显高于 BX 的 22.24%；同时检出并富集 1,2,4-三甲氧基苯，对陈香的形成具有一定贡献。BX 中甲氧基苯类总相对含量超过 11%，陈香特征亦较为明显。综合来看，ZK 挥发性成分种类较少而部分成分富集，香气表现偏向较为单一且强烈的陈木香；BX 挥发性成分种类更多、分布更均衡，呈现花果香与陈香并存的复合型香气特征。

2.4.2 不同水质潮水发酵对香气组成的影响

Z4（41 种）和 G4（43 种）的香气组成相似，均以酯类、醛类、醇类和酮类为主，整体均衡度和丰富度都很高，仅有少量差异。研究表明，*α*-紫罗兰酮与 *β*-紫罗兰酮均具紫罗兰花香，其中 *β* 型更为浓郁（王娟等，2022）。Z4 仅检出 *β*-紫罗兰酮（0.22%），呈现紫罗兰与木质甜香；G4 仅检出 *α*-紫罗兰酮（0.28%），虽也具有紫罗兰香，但强度较低。G4 酯类含量更高（约 33.66%，Z4 为 23.41%），尤其是亚麻酸甲酯、硬脂酸甲酯等重酯，使其香气更厚重甜润，呈现顺滑油感。酯类虽不直接带果香，但能增强甜感和圆润度。Z4 酯类含量较低，气味显得更干燥、尖锐；Z4 的甲氧基苯类占总挥发物的 12.74%（最高值），而 G4 为 8.63%，因此 Z4 陈香更浓，G4 则偏向果香与陈香并存的醇厚风格。

2.5 GC-MS 聚类热图分析

基于挥发性成分的相对含量，对各处理茶样进行聚类分析（图 3）。结果显示，芳樟醇、苯乙醇和棕榈酸甲酯等在多个样品中含量较高，是主要香气贡献物质，在热图中表现为颜色较深的聚集区域；2,3-丁二酮、醋酸甲酯、反-2-辛烯醛等低丰度成分分布较分散，对样品区分作用相对较弱。

聚类分析能有效反映茶样香气差异、GC-MS 数据结合聚类方法是评估样本差异和追溯来源的有效手段（Zheng et al., 2024）。聚类将样品划分为三大类：YL、Z1 和 G1 聚为一支，表明其挥发性成分组成较为接近；Z4 单独成类，说明其整体挥发性谱型与其他样品存在一定差异；Z2、G2、Z3、G3、BX、G4 和 ZK 则聚为一类，反映该组样品在含氧萜醇和脂肪酸酯等主要香气成分上的变化趋势相似。分支距离进一步显示，Z1 与 G1、Z2 与 G2、Z3 与 G3 的聚类关系均较紧密，说明在出堆前阶段，自来水与硅酸水潮水条件下样品的香气形成路径相近；G3 与 G4 的聚类距离较近，提示硅酸水处理在发酵后期具有一定香气稳定作用。Z4 的轻度偏离可能与其采用自来水潮水发酵、致使后期微环境更为复杂有关。总体来看，潮水水质对发酵过程中的挥发性成分生成具有重要影响，是造成熟茶出堆样香气差异的关键因素之一。

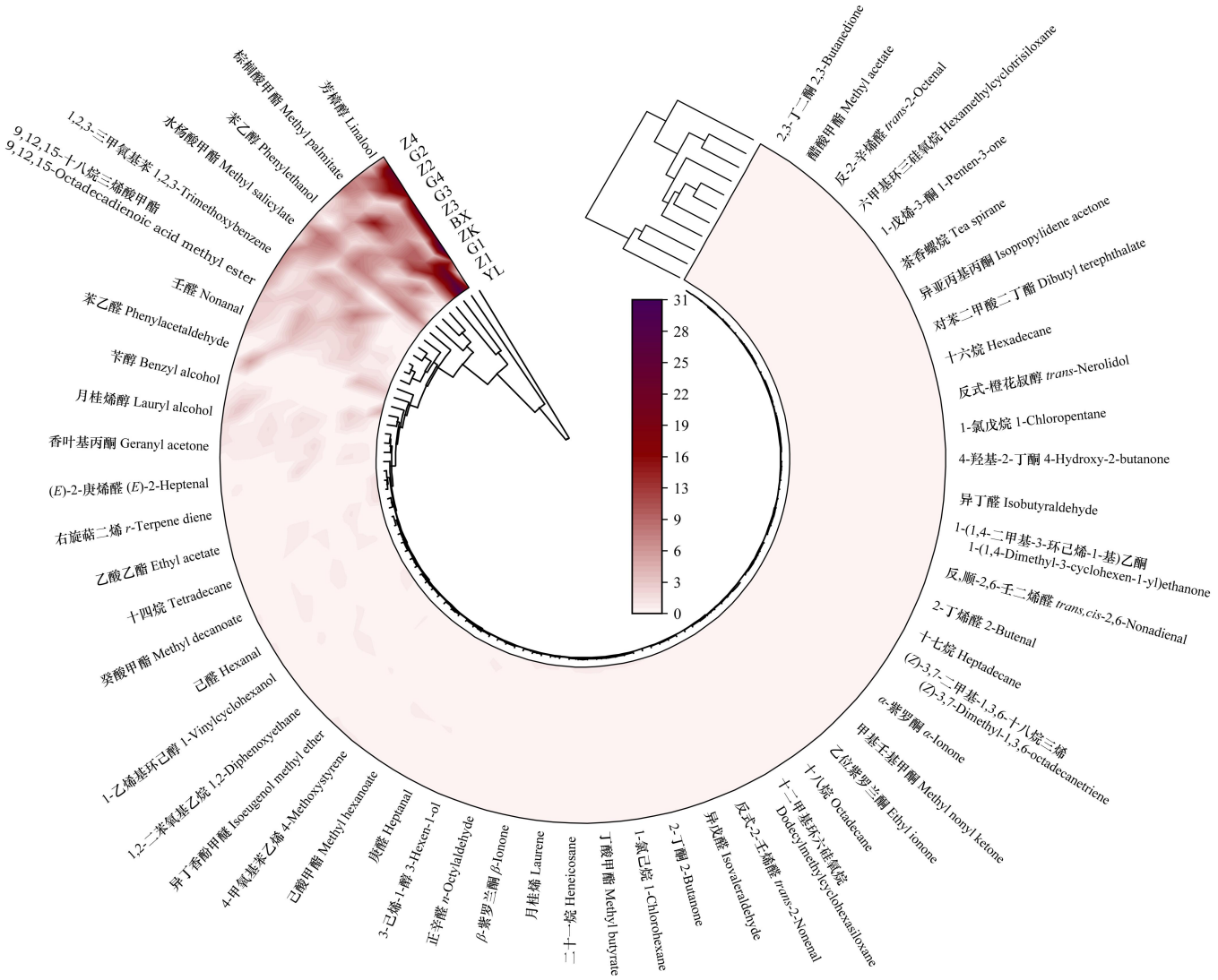


图 3 茶样的 GC-MS 聚类热图分析图

Fig. 3 Hierarchical clustering heatmap of tea samples based on GC-MS volatile profiles

3 讨论与结论

3.1 不同渥堆发酵容器对普洱熟茶品质的影响

该文表明，在相同渥堆工艺条件下，不同容器材质显著影响小筐普洱熟茶的理化和感官品质。竹筐（ZK）通气性较强，易在堆体内外形成较大的温湿度和含氧量梯度，导致局部过度氧化和熟化不均；不锈钢筐（BX）结构相对封闭，保温保湿能力更强，有利于形成较稳定、略偏厌氧的发酵环境，促进优势微生物生长及胞外酶活性，强化多糖和蛋白质的分解，并推动多酚缓慢氧化聚合为茶褐素等高聚合色素（Wang et al.，2014）。这一微环境差异 BX 茶样汤色更红亮、滋味更甜滑醇厚，而 ZK 茶样品质波动较大的感官结果相一致。GC-MS 分析进一步反映出容器材质对香气生成路径的影响。BX 茶样中醛类、酮类和酯类物质含量较高，形成较为突出的花果香和甜香特征，这与董蕊等（2024）和张珍珍等（2016）关于醛酮类物质贡献花果香的报道基本一致；ZK 茶样中甲氧基苯类和木质素降解产物占比较高，香气以木质陈香为主，层次相对单一。已有研究认为发酵容器主要通过调节堆体热湿环境影响品质（马振纲等，2010），该研究结果进一步表明，容器材质还可能通过改变堆体氧化还原状态和微生物代谢通路，调控多酚转化及香气物质生成过程。综上，渥堆容器材质是小筐普洱熟茶品质形成的重要工艺因素之一，不锈钢筐更有利于构建稳定发酵微环境，获得汤色红亮、滋味醇厚甜滑且香气较为丰富协调的普洱熟茶。

3.2 不同潮水水质对普洱熟茶品质的影响

在容器条件固定为不锈钢筐的基础上，潮水水质对小筐普洱熟茶品质亦产生了重要影响。自来水与硅酸水潮水原料后，在渥堆发酵每一阶段的茶汤色泽方面差异有限，但在内部物质转化和风味协调性上表现出明显不同。前人研究表明，茶褐素与多糖形成的复合物是熟茶“醇厚甜顺”口感的重要物质基础（Deng et al., 2024; Wang et al., 2025）。该文中硅酸水处理样品汤感更醇厚稠滑，与茶褐素等高聚合产物的累积趋势相吻合。结合 Dabravolski 等（2024）关于硅酸盐可稳定细胞膜结构、调节渗透压并维持酶活性的观点，可推测硅酸水中的偏硅酸及相关矿物成分通过调节堆体水分活度和局部 pH，为多酚氧化聚合相关酶系提供更适宜的理化环境，促进茶褐素及其复合体持续生成，从而改善汤感。香气方面，硅酸水处理在保持普洱熟茶陈香基调的同时，显著增强了花果香特征。*α*-紫罗兰酮仅在硅酸水组中检出，呋喃型芳樟醇类含量亦明显增加，赋予茶汤清雅花香与柔和甜香。硅酸水往往伴随特定的 pH 与离子组成，可能通过改变体系理化环境而影响芳香前体的水解释放与挥发物呈香。为此，该文推测含硅环境有助于芳香前体水解及芳樟醇衍生物累积，从而提升茶叶香气层次。相反，自来水样品中甲氧基苯类含量偏高，易导致陈香沉闷并掩盖花香（Xue et al., 2022; Li et al., 2024）。因此，在不锈钢筐小筐渥堆体系中，潮水水质一方面可能通过影响茶多酚及其高聚合物的生成调节汤感，另一方面可能通过改变与芳香前体相关的微生物代谢通路重塑香气谱型，是塑造“醇厚甜顺、花果香与陈香协调”熟茶风味的重要调控因素之一。

3.3 渥堆发酵容器与潮水水质的协同效应

在分别考察容器材质和潮水水质单因素作用的基础上，进一步分析二者在小筐渥堆体系中的协同效应。综合容器与水质两个因素，“不锈钢筐 + 硅酸水”小筐渥堆工艺模式在理化成分、茶汤色泽、香气层次和综合感官品质等方面表现出较为突出的综合优势，在一定程度上缓解了小筐立体发酵中醇厚度不足、香气偏单一等问题（赵苗苗等，2022），说明在小体量体系下，通过渥堆容器与潮水水质的协同优化，可以提升普洱熟茶的品质稳定性和风味多样性。鉴于该研究数据主要来源于小筐渥堆体系内部的对比，尚缺乏与传统大堆在相同原料和工艺参数条件下的系统比较，相关结论目前更适宜理解为该模式具有获得稳定优质熟茶的潜力，而非对传统大堆发酵的直接替代方案。

综上，在小筐渥堆体系中，渥堆容器材质与潮水水质是共同决定普洱熟茶理化与感官品质的关键工艺要素。不锈钢筐配合硅酸水的小筐渥堆模式具有清洁化生产的优势，并在部分工艺参数上表现出较好的可控性，能够获得醇厚甜顺、花果香与陈香协调且批次间品质相对稳定的普洱熟茶，为

中小规模企业探索清洁化小筐发酵工艺提供了可操作的思路，也为今后结合微生物群落与代谢组学研究微环境调控物质转化及风味形成机制提供了基础。

参考文献：

AKULI A, PAL A, BEJ G, et al., 2016. Machine vision system for estimation of theaflavins and thearubigins in orthodox black tea [J]. International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, 9(2): 709-731.

CHEN WJ, XU WC, XIANG J, et al., 2020. Effects of different fermentation methods on tea pigments in green brick tea [J]. Journal of Hubei Industrial Polytechnic, 33(1): 38-41. [陈文君，许文璨，向晶，等，2020. 不同发酵方式对青砖茶中茶色素含量的影响 [J]. 湖北工业职业技术学院学报，33(1)：38-41.]

DABRAVOLSKI SA, ISAYENKOV SV, 2024. The physiological and molecular mechanisms of silicon action in salt stress amelioration[J]. Plants, 13(4): 525.

DENG HY, MAO JC, WANG LF, et al., 2024. Comparative study on volatile components of raw and cooked Pu'er tea [J]. Yunnan Agricultural Science and Technology(4): 37-41. [邓洪燕，毛静春，王丽芳，等，2024. 普洱茶生茶和熟茶挥发性组分对比研究 [J]. 云南农业科技(4)：37-41.]

DENG SH, ZHANG TF, FAN S, et al., 2024. Polysaccharide conjugates' contribution to mellow and thick taste of Pu-erh ripe tea, besides theabrownin [J]. Food Chemistry: X, 23: 101726.

DENG SH, ZHOU XR, DONG HY, et al., 2022. Mellow and thick taste of Pu-erh ripe tea based on chemical properties by sensory-directed flavor analysis [J]. Foods, 11(15): 2285.

DONG R, GAO ST, ZHOU XH, et al., 2024. Analysis of aroma components of tea processed from two Yunnan tea plant species based on Liu Bao craft [J]. Science and Technology of Food Industry, 45(12): 254-264. [董蕊，高斯婷，周小慧，等，2024. 基于六堡工艺两个云南茶树品种加工茶叶的香气组分分析 [J]. 食品工业科技，45(12)：254-264.]

GAO CC, 2022. Preliminary study on polyphenols and their activity in Pu-erh tea [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology. [高创创，2022. 普洱茶中多酚类成分及其活性的初步研究 [D]. 昆明：昆明理工大学.]

GE YH, BIAN XQ, SUN BQ, et al., 2019. Dynamic profiling of phenolic acids during Pu-erh tea fermentation using derivatization liquid chromatography-mass spectrometry approach [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 67(16): 4568-4577.

GHOSH A, TUDU B, TAMULY P, et al., 2012. Prediction of theaflavin and thearubigin content in black tea using a voltammetric electronic tongue [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 116: 57-66.

HOSSAIN MA, AHMED T, HOSSAIN MS, et al., 2022. Optimization of the factors affecting BT-2 black tea fermentation by observing their combined effects on the quality parameters of made tea using response surface methodology (RSM) [J]. Heliyon, 8(2): e08948.

HU J, LIU TX, 2012. Study on change of microbes and enzyme activities of Pu-erh tea during pile-fermentation process with various water contents [J]. Science and Technology of Food Industry, 33(17): 93-97. [胡捷，刘通讯，2012. 不同潮水量下普洱茶渥堆过程中微生物及酶活变化研究 [J]. 食品工业科技，33(17)：93-97.]

HU SM, LI XL, GAO CC, et al., 2022. Detection of composition of functional component theabrowninstheabrownin in Pu-erh tea by degradation method [J]. Food Science and Human Wellness, 11(3): 643-647.

LI TH, WEI YM, LU MX, et al., 2024. Exploring microbial and moist-heat effects on Pu-erh tea volatiles and understanding the methoxybenzene formation mechanism using molecular sensory science [J]. Food Chemistry: X, 23: 101553.

LI YG, 2021. Study on numerical control three-dimensional small basket fermentation technology of Pu'er ripe tea [J]. New Agriculture(6): 27-28. [李云贵，2021. 普洱熟茶数控化立体小筐发酵技术研究 [J]. 新农业(6)：27-28.]

LIANG MZ, XIA LF, CHEN LB, et al., 2006. Study on variation of physics and chemistry index during pile-fermentation of Pu-erh tea [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin(10): 321-325. [梁名志，夏丽飞，陈林波，等，2006. 普洱茶渥堆发酵过程中理化指标的变化研究 [J]. 中国农学通报(10)：321-325.]

LIU CY, CAO KY, ZHANG YL, et al., 2025. Research progress on the activity of tea polyphenols in Pu'er tea [J]. Journal of Food Safety and Quality, 16(9): 193-198. [刘宸瑜，曹可艺，张玉丽，等，2025. 普洱茶中茶多酚活性作用研究进展 [J]. 食品安全质量检测学报，16(9)：193-198.]

LIU H, 2013. Digital Pu-erh fermentation system research [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology. [刘晗，2013. 数字化普洱茶发酵系统研究 [D]. 长春：长春理工大学.]

LONG PP, RAKARIYATHAM K, HO CT, et al., 2023. Thearubigins: formation, structure, health benefit and sensory property [J]. Trends in Food Science & Technology, 133: 37-48.

LUO H, WANG QH, SHI ZY, et al., 2024. Comparative analysis of the quality of Pu-erh ripe tea produced by different pile-fermentation methods [J]. Journal of Tea Communication, 51(1): 60-67. [罗慧，王庆华，施宗运，等，2024. 不同方法渥堆发酵的普洱熟茶品质比较分析 [J]. 茶叶通讯，51(1)：60-67.]

MA BS, WANG JC, XU CC, et al., 2022. Differences of phenolic components in Pu'er tea (raw tea) during different storage periods and their effects on antioxidant capacity *in vitro* [J]. Journal of Tea Science, 42(1): 51-62. [马冰淞，王佳菜，徐成成，等，2022. 不同仓储期普洱茶（生茶）中酚类成分差异及其对体外抗氧化能力的影响 [J]. 茶叶科学，42(1)：51-62.]

MA ZG, HUANG YZ, LIU DP, et al., 2010. Application analysis and study on Pu'er tea fermentation based on PLC [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 38(19): 10276-10278. [马振纲，黄云战，刘大鹏，等，2010. 基于 PLC 在普洱茶发酵车间的应用分析与研究 [J]. 安徽农业科学，38(19)：10276-10278.]

PANG QQ, ZHU QQ, ZHANG XJ, et al., 2019. Analysis on the formation mechanism of Pu'er cooked tea quality [J]. Modern Food(7): 43-44, 54. [庞欠欠，朱强强，张肖娟，等，2019. 普洱熟茶的品质形成机理分析 [J]. 现代食品(7)：43-44，54.]

SUN Y, LI Y, WANG LM, et al., 2024. Clinical trial on the effect of ripened Pu-erh tea on improving abnormal glucose and lipid metabolism [J]. Food Science, 45(12): 144-156. [孙颖，李艳，王黎明，等，2024. 普洱熟茶对糖脂代谢异常改善效的临床研究 [J]. 食品科学，45(12)：144-156.]

TIAN HX, SUN TT, LI S, et al., 2022. Study on the application of loose tea koji ferment in the canister of Pu-erh ripe tea [J]. Journal of Tea Communication, 49(4): 490-497. [田海霞，孙婷婷，李颂，等，2022. 散茶曲小罐发酵在普洱熟茶中的应用研究 [J]. 茶叶通讯，49(4)：490-497.]

WANG J, ZHANG XY, XIAO QM, et al., 2022. Analysis of volatile substances in different grades of Pu'er ripe tea [J]. Science and Technology of Food Industry, 43(20): 319-328. [王娟，张晓宇，肖巧梅，等，2022. 不同等级普洱熟茶挥发性物质分析 [J]. 食品工业科技，43(20)：319-328.]

WANG LH, WU XQ, 2014. The design of new fermentation workshop about Pu'er ripe tea [J]. Advance Journal of Food Science and Technology, 6(12): 1343-1347.

WANG T, BO N, GUAN Y, et al., 2025. An integrated flavoromics and chemometric analysis of the characteristic flavor, chemical basis and flavor wheel of ancient plant ripened Pu-erh tea [J]. Food Chemistry: X, 26: 102278.

WANG W, LE T, WANG W, et al., 2023. Effects of key components on the antioxidant activity of black tea [J]. Foods, 12(16): 3134.

WANG ZX, 2023. Study on the characteristic substances and key aroma components of Pu-erh tea (ripe tea) [D]. Kunming: Yunnan Agricultural University. [王志霞，2023. 普洱茶（熟茶）陈香特征物质及关键香气成分研究 [D]. 昆明：云南农业大学.]

XUE J, GUO G, LIU P, et al., 2022. Identification of aroma-active compounds responsible for the floral and sweet odors of Congou black teas using gas chromatography-mass spectrometry/olfactometry, odor activity value, and chemometrics [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 102(12): 5399-5410.

YANG R, DENG XC, ZHU X, et al., 2024. Research progress on the protective effect of ripened Pu-erh tea on gastric damage [J]. China Tea Processing(1): 68-77. [杨锐，邓晓翠，朱旭，等，2024. 普洱熟茶活性成分对胃的保护作用研究进展 [J]. 中国茶叶加工(1)：68-77.]

YANG R, ZHAO XP, HE MJ, et al., 2024. Study on the effects of puerins V-VII on four kinds of breast cancer cells [J]. Journal of Tea Science, 44(3): 501-514. [杨锐，赵兴平，何明婕，等，2024. 普洱茶素V～VII对 4 种乳腺癌细胞作用研究 [J]. 茶叶科学，44(3)：501-514.]

ZHANG BL, CHEN L, TANG LQ, et al., 2023. Study on the effect of different water temperature and tide on the quality of dark tea [J]. China Food Industry(21): 101-103. [张蓓林，陈玲，唐丽琴，等，2023. 不同水温潮水对黑茶品质的影响研究 [J]. 中国食品工业(21)：101-103.]

ZHANG ZZ, YANG YF, SUN H, et al., 2016. Volatile components and sensory characteristics of three fresh scent-flavor Tieguanyin teas [J]. Journal of Jimei University (Natural Science), 21(3): 175-183. [张珍珍，杨远帆，孙浩，等，2016. 3 种清香型铁观音挥发性成分及香味特征 [J]. 集美大学学报(自然科学版)，21(3)：175-183.]

ZHAO MM, HE LN, LI G, et al., 2020. Study on quality of mechanical production and numerical control fermentation of Pu’er tea [J]. Journal of Tea Science, 40(5): 676-688. [赵苗苗，何鲁南，李果，等，2020. 普洱茶机械化生产及数控发酵的品质研究 [J]. 茶叶科学，40(5)：676-688.]

ZHAO MM, YAN L, ZHANG WJ, et al., 2022. Effects of different pile-fermentation methods on the quality of Pu-erh tea [J]. Journal of Food Safety and Quality, 13(8): 2640-2648. [赵苗苗，严亮，张文杰，等，2022. 不同渥堆发酵方法对普洱茶品质的影响 [J]. 食品安全质量检测学报，13(8)：2640-2648.]

ZHAO Y, 2020. Gut microbiota-mediated Pu’er tea in preventing and improving obese mice [D]. Xiamen: Huaqiao University. [赵岩，2020. 基于肠道菌群探讨普洱茶预防和改善肥胖的相关机制 [D]. 厦门：华侨大学.]

ZHENG XT, ZENG XY, LIN XL, et al., 2024. Exploring aromatic components differences and composition regularity of 5 kinds of these 4 aroma types Phoenix Dancong tea based on GC-MS [J]. Scientific Reports, 14(1): 2727.

ZHOU XR, 2024. Study on the mechanism of mellow and thick taste in Pu-erh ripe tea based on polysaccharides and theabrowninstheabrownin [D]. Kunming: Yunnan Agricultural University. [周心如，2024. 基于多糖-茶褐素对普洱熟茶醇厚滋味呈味机制的研究 [D]. 昆明：云南农业大学.]

附录 1 茶样的香气成分及其相对含量

Appendix 1 Aroma components of tea samples and their relative contents

(%)

香型 Aromatype		香气描述 Aromadescription	茶样编号 Teasamplenumber										
			YL	ZK	BX	Z1	Z2	Z3	Z4	G1	G2	G3	G4
醛类 Aldehydes	庚醛 Heptanal	青草味 脂肪味 Green Fatty	0.20	-	0.16	0.32	-	-	0.27	0.12	-	0.60	0.20
	癸醛 Decanal	甜香 柑橘香 花香 Sweet Citrus Floral	0.20	-	1.80	0.94	0.80	0.63	1.48	0.69	0.94	0.79	1.23
	正辛醛 *n*-Octylaldehyde	柑橘香 脂肪味 Citrus Fatty	0.44	-	0.21	0.24	0.14	0.10	0.30	0.22	0.20	0.13	0.24
	苯乙醛 Phenylacetaldehyde	-	0.46	-	0.33	0.39	-	-	0.23	0.35	5.50	-	0.14
	壬醛 Nonanal	玫瑰香 柑橘香 油脂香 Rose Citrus Oil	0.89	1.65	1.97	1.73	0.89	0.77	2.90	1.30	0.96	1.22	3.16
	己醛 Hexanal	青草味 Green	0.92	-	0.43	0.16	0.10	0.12	0.72	0.10	0.12	0.11	0.33
	苯甲醛 Benzaldehyde	杏仁香 Almond	-	-	0.25	0.45	0.25	0.90	0.19	0.23	0.23	0.15	0.18
	2-丁烯醛 2-Butenal	-	0.17	-	0.27	-	-	-	-	-	-	-	-
	异戊醛 Isovaleraldehyde	巧克力味 脂肪味 Chocolate Fatty	0.17	-	0.50	-	-	-	0.40	-	-	-	-
	反式-2-己烯醛 *trans*-2-Hexenal	青草味 Green	0.12	-	-	-	-	-	0.10	-	-	-	0.14
	(*E*)-2-庚烯醛 (*E*)-2-Heptenal	-	1.81	-	-	-	-	-	-	0.26	0.80	-	-
	(*E*,*E*)-2,4-庚二烯醛 (*E*,*E*)-2,4-Heptadienal	脂肪味 Fatty	0.30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.10
	2-甲基丙烯醛 2-Methylacrolein	强风信子气味 Hyacinth foliage	0.30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-甲基戊醛 2-Methylpentanal	果蔬香味 Ethereal green vegetable fruity	0.70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

香型 Aromatype		香气描述 Aromadescription	茶样编号 Teasamplenumber										
			YL	ZK	BX	Z1	Z2	Z3	Z4	G1	G2	G3	G4
	2-十一烯醛 2-Undecylenal	-	0.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-甲基丁醛 2-Methylbutyraldehyde	霉味 可可味 咖啡味 Musty Cocoa phenolic Coffee	0.16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	反-2-辛烯醛 *trans*-2-Octenal	青草味 脂肪味 蜡质味 Green Fatty Waxy	0.29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	戊醛 Pentanal	麦芽香 巧克力香 Malt Chocolate	0.31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	反式-2-癸烯醛 *trans*-2-Decenal	脂肪味 蜡质味 泥土味 Fatty Waxy Earthy	0.37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-羧醛 2,6,6-Trimethyl-1-cyclohexene-1-carboxyaldehyde	-	0.41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	反,顺-2,6-壬二烯醛 *trans,cis*-2,6-Nonadienal	-	-	-	0.25	-	-	-	-	-	-	-	-
	反式-2-壬烯醛 *trans*-2-Nonenal	脂肪味 青草味 柑橘味 Fatty Green Citrus	-	-	0.49	-	-	-	-	-	-	-	-
合计 Footing	数量 Quantity	-	19	1	11	7	5	5	9	8	7	6	9
	含量（%） Content(%)	-	8.32	1.65	6.66	4.23	2.18	2.52	6.59	3.27	8.75	3.00	5.72
醇类 Alcohols	*α*-松油醇 *α*-terpineol	松木香 花香 Pine woody Floral	5.22	6.88	5.87	7.95	7.96	7.21	4.96	8.25	8.46	8.49	4.13
	反-*α*反-*α*,*α*-5-三甲基-5-乙烯基四氢化-2-呋喃甲醇 *trans*-*α*-*trans*-*α*,*α*-5-Trimethyl-5-vinyltetrahydro-2-furanmethanol	花香、干果香 Floral Dried fruit	13.56	31.22	22.24	-	21.56	22.90	2.93	11.51	23.73	23.37	17.26
	芳樟醇	木香 花香 甜香	29.66	3.59	2.78	24.96	14.68	5.43	1.63	21.22	11.52	5.96	1.96

香型 Aromatype	香气描述 Aromadescription	茶样编号 Teasamplenumber										
		YL	ZK	BX	Z1	Z2	Z3	Z4	G1	G2	G3	G4
Linalool	Woody Floral Sweet											
1-辛烯-3-醇 1-Octen-3-ol	蘑菇味 泥土味 青草味 Mushroom Earthy Green	4.84	-	0.21	-	-	-	-	0.24	0.23	-	0.19
苄醇 Benzyl alcohol	玫瑰花香 Rose floral	-	-	0.26	1.60	1.90	0.47	0.28	2.50	1.38	0.68	0.23
月桂烯醇 Lauryl alcohol	泥土味 肥皂味 蜡质味 Earthy Soapy Waxy	-	-	0.69	0.19	0.54	1.33	1.60	0.25	0.52	0.62	1.63
苯乙醇 Phenylethanol	玫瑰香 干玫瑰香 Rose Dried rose	-	4.94	1.55	4.48	4.50	5.88	1.44	4.86	-	7.22	1.50
橙花醇 Nerolidol	浅花香 青草香 Floral Green	-	-	1.30	0.77	0.49	1.64	1.12	1.90	3.20	0.40	1.11
2-庚醇 2-Heptanol	鲜柠檬味 草木味 花果香 Fresh lemon Grass herbal Floral fruity	-	-	-	-	0.29	-	-	-	0.27	0.80	-
香叶醇 Geraniol	甜玫瑰香 果香 Sweet floral fruity rose	2.84	-	-	3.40	2.66	-	-	3.81	-	-	-
3-己烯-1-醇 3-Hexen-1-ol	绿叶气味 Green leafy	-	-	-	0.48	0.33	-	-	0.24	-	-	-
1-乙烯基环己醇 1-Vinylcyclohexanol	-	-	-	-	0.45	-	0.66	-	-	0.51	-	-
1-辛醇 1-Octanol	蜡质味 青草味 柑橘味 Waxy Green Citrus	0.64	-	-	0.22	-	-	-	0.18	-	-	-
反式-橙花叔醇 *trans*-Nerolidol	木香 花香 Woody Floral	0.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1-戊烯-3-醇 1-penten-3-ol	绿萝味 水果味 Green radish Floral	0.13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4-萜烯醇 4-Terpineol	辛辣味 木质味 泥土味 Spicy Woody Earthy	1.70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
异戊醇 Isoamyl alcohol	杂醇味 威士忌味 香蕉味 Fusel Alcoholic Whiskey Banana	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.50	-

香型 Aromatype		香气描述 Aromadescription	茶样编号 Teasamplenumber										
			YL	ZK	BX	Z1	Z2	Z3	Z4	G1	G2	G3	G4
	叶醇 Terpineol	松香 丁香香 柑橘香 Pine Lilac Citrus	-	-	-	-	-	-	-	-	0.32	-	-
	叶绿醇 Phytol	花香 蜡质味 Floral Waxy	-	-	-	-	-	-	-	0.20	-	-	-
合计 Footing	数量 Quantity	-	9	8	7	10	10	8	7	12	10	9	8
	含量（%） Content(%)	-	58.69	46.63	34.90	44.50	54.91	45.52	13.96	55.16	50.14	48.04	28.01
酯类 Ester	棕榈酸甲酯 Methyl palmitate	油脂香 蜡质味 脂肪味 Oily Waxy Fatty	0.63	12.87	9.49	2.80	3.73	5.77	8.60	2.83	5.87	8.94	15.47
	水杨酸甲酯 Methyl salicylate	冬青油香 薄荷香 Wintergreen Minty	1.30	-	-	1.51	5.51	2.36	0.76	1.19	6.71	3.00	0.93
	癸酸乙酯 Ethyl decanoate	水果香 Fruity	11.30	9.31	9.64	13.41	1.50	5.69	6.94	15.69	6.90	7.88	5.71
	乙酸乙酯 Ethyl acetate	水果香 甜香 青草香 Fruity Sweet Wedy green	0.18	-	0.70	-	0.10	0.50	0.17	0.70	0.40	0.90	0.10
	亚油酸甲酯 Methyl linoleate	油脂味 脂肪味 木质味 Oily Fatty Woody	-	2.68	1.94	0.87	0.87	1.45	2.29	0.66	2.15	2.55	4.28
	9,12,15-十八烷三烯酸甲酯 9,12,15-Octadecadienoic acid methyl ester	-	-	3.51	2.33	1.34	1.11	1.94	2.94	1.14	2.63	3.10	4.57
	癸酸甲酯 Methyl decanoate	油脂香 果香 花香 Oily wine Fruity Floral	0.26	-	0.84	-	-	0.32	0.78	-	-	0.47	0.72
	二氢猕猴桃内酯 Dihydroactinidiolide	甜桃香 Sweet Peach	0.32	-	-	-	-	0.68	0.55	1.18	-	0.65	-
	十四酸甲酯 Methyl tetradecanoate	蜡质味 脂肪味 花瓣味 Waxy Fatty Petal	-	-	0.35	-	-	-	0.24	-	-	0.26	0.39
	己酸甲酯 Methyl hexanoate	菠萝香 杏香 草莓香 Pineapple Apricot Strawberry	0.10	-	-	-	-	-	0.14	-	-	0.60	0.10

香型 Aromatype		香气描述 Aromadescription	茶样编号 Teasamplenumber										
			YL	ZK	BX	Z1	Z2	Z3	Z4	G1	G2	G3	G4
	氢猕猴桃内酯 Hydrogen kiwifruit lactone	-	-	-	0.98	-	-	-	-	-	-	-	0.61
	壬酸甲酯 Methyl nonanoate	甜味 果味 梨味 蜡质味 Sweet Fruity Pear Waxy	-	-	0.44	-	-	-	-	-	-	-	0.28
	醋酸甲酯 Methyl acetate	甜味 果味 Sweet Fruity	0.30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	丁酸甲酯 Methyl butyrate	苹果香 香蕉香 菠萝香 Apple Banana Pineapple	0.70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯 2,2,4-Trimethyl-1,3-pentanediol diisobutyrate	-	0.80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	邻苯二甲酸二异丁酯 Diisobutyl phthalate	-	0.11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	对苯二甲酸二丁酯 Dibutyl terephthalate	-	0.14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	己酸烯丙酯 Allyl hexanoate	甜香 果香 菠萝香 Sweet Fruity Pineapple	-	-	-	-	-	1.92	-	-	-	-	-
	(*Z*)-十六烯酸甲酯 (*Z*)-Methyl hexadecenoate	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.20
	硬脂酸甲酯 Methyl stearate	油脂味 蜡质味 Oily Waxy	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.29
合计 Footing	数量 Quantity	-	13	4	9	5	6	9	10	7	6	10	13
	含量（%） Content(%)	-	16.59	28.37	26.71	19.93	12.82	20.63	23.41	23.39	24.66	28.35	33.66
酮类 Ketone	香叶基丙酮 Geranyl acetone	玫瑰香 玉兰香 醛味果香 Rose	0.26	-	1.20	0.94	0.56	0.64	0.32	1.16	0.62	0.77	0.25
	茉莉酮	茉莉花香	0.29	-	-	0.56	0.43	0.38	0.47	0.53	0.31	-	-

香型 Aromatype		香气描述 Aromadescription	茶样编号 Teasamplenumber										
			YL	ZK	BX	Z1	Z2	Z3	Z4	G1	G2	G3	G4
	Jasmine ketone	Rasmine flower											
	β-紫罗兰酮 *β*-Ionone	花香 木质香 甜香 freesia woody sweet	0.68	-	0.29	-	0.17	-	0.22	0.33	-	-	-
	甲基庚烯酮 Methylheptenone	水果味 霉味 Fruity Musty	0.84	-	0.27	0.19	-	0.10	0.22	0.15	0.10	-	0.17
	6,10,14-三甲基-2-十五烷酮 6,10,14-Trimethyl-2-pentadecanone	油性 草本 茉莉 Oily Herbal Jasmin	0.88	-	0.74	0.40	0.17	-	0.34	0.45	-	-	0.73
	5-甲基-2-(1-甲基亚乙基)环己酮 5-Methyl-2-(1-methylethylidene)cyclohexanone	-	-	-	0.30	-	0.15	0.19	0.34	-	0.20	0.18	0.82
	4-甲基-2(H)-呋喃酮 4-Methyl-2(H)-furanone	-	-	-	-	0.27	0.25	0.13	-	0.18	0.38	-	-
	2,3-丁二酮 2,3-Butanedione	黄油味 甜味 奶油味 Buttery sweet creamy	0.30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1-戊烯-3-酮 1-Penten-3-one	辛辣刺激性芥末味 Pungent peppery mustard	0.40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-丁酮 2-Butanone	水果味 樟脑味 Fruity camphoreous	0.60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	异亚丙基丙酮 Isopropylidene acetone	霉味 泥土味 化学味 Musty Earthy Chemical	0.12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1-辛烯-3-酮 1-Octen-3-one	草味 蘑菇味 泥土味 Herbal Mushroom Earthy	0.67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	α-紫罗酮 *α*-Ionone	紫罗兰花香 木香 Violet floral Woody	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.28
	甲基壬基甲酮 Methyl nonyl ketone	蜡质味 果味 Waxy Fruity	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.25

香型 Aromatype		香气描述 Aromadescription	茶样编号 Teasamplenumber										
			YL	ZK	BX	Z1	Z2	Z3	Z4	G1	G2	G3	G4
	2,2,6-三甲基环己酮 2,2,6-Trimethylcyclohexanone	辛辣刺激味 Pungent	0.91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	羟基丙酮 Hydroxyacetone	辛辣味 焦糖味 Pungent Caramellic	-	-	0.50	-	-	0.40	-	-	-	-	-
	1-(1,4-二甲基-3-环己烯-1-基)乙酮 1-(1,4-dimethyl-3-cyclohexen-1-yl)ethanone	-	-	-	0.17	-	-	-	-	-	-	0.12	-
	异佛尔酮 Isophorone	果味 木质甜香 Fruity Woody Sweet	-	-	0.23	-	-	-	-	-	-	-	-
	乙位紫罗兰酮 Ethyl ionone	木质甜香 紫罗兰香 Sweet Woody Floral Violet	-	-	-	0.31	-	-	-	-	-	-	-
	4-羟基-2-丁酮 4-Hydroxy-2-butanone	-	-	-	-	0.10	-	-	-	-	-	-	-
合计 Footing	数量 Quantity	-	11	-	8	7	6	6	6	6	5	3	6
	含量（%） Content(%)	-	5.95	-	3.70	2.77	1.73	1.84	1.91	2.80	1.61	1.07	2.50
碳氢类 Carbon-hydrogen	1,2-二苯氧基乙烷 1,2-Diphenoxyethane	-	0.26	-	-	0.38	0.29	0.61	-	0.19	-	-	-
	十二甲基环六硅氧烷 Dodecylmethylcyclohexasiloxane	-	0.30	-	-	-	-	-	-	0.30	0.30	-	-
	十四烷 Tetradecane	弱蜡质味 Mild waxy	-	-	0.41	0.62	0.36	-	0.34	0.71	-	-	0.37
	右旋萜二烯 *r*-terpene diene	-	1.79	-	-	0.39	-	-	-	0.42	-	-	-
	月桂烯 Laurene	酯香 Ester incense	0.38	-	-	0.22	-	-	-	0.21	-	-	-
	十一烷 Undecane	-	-	-	-	0.22	0.10	-	-	-	-	-	-

香型 Aromatype		香气描述 Aromadescription	茶样编号 Teasamplenumber										
			YL	ZK	BX	Z1	Z2	Z3	Z4	G1	G2	G3	G4
	4-甲氧基苯乙烯 4-Methoxystyrene	甜味 Sweet	-	-	-	-	-	-	0.52	-	0.25	-	-
	二十一烷 Heneicosane	蜡质味 Waxy	0.90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1-氯己烷 1-Chlorohexane	-	0.70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	十二烷 Dodecane	-	-	-	-	0.71	-	-	-	-	-	-	-
	正十三烷 *n*-Triadecane	-	-	-	-	-	-	-	-	0.40	-	-	-
	十七烷 Heptadecane	-	-	-	-	-	-	-	-	0.20	-	-	-
	十六烷 Hexadecane	-	0.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	十八烷 Octadecane	-	-	-	-	0.24	-	-	-	-	-	-	0.19
	茶香螺烷 Tea spirane	-	0.39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	氯代十八烷 Chlorooctadecane	-	0.14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1-氯戊烷 1-Chloropentane	-	0.18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	八甲基环四硅氧烷 Octamethylcyclotetrasiloxane	-	0.22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	六甲基环三硅氧烷 Hexamethylcyclotrisiloxane	-	0.25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	正丙基环戊烷 Propylcyclopentane	-	-	-	0.14	-	-	-	-	-	-	-	-
	2-乙基-1-己烯 2-Ethyl-1-hexene	-	-	-	-	0.11	-	-	-	-	-	-	-
	(*Z*)-3,7-二甲基-1,3,6-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.19	-	-	-

香型 Aromatype		香气描述 Aromadescription	茶样编号 Teasamplenumber										
			YL	ZK	BX	Z1	Z2	Z3	Z4	G1	G2	G3	G4
	十八烷三烯 (*Z*)-3,7-Dimethyl-1,3,6-octadecanetriene												
	萜品油烯 Terpinolene	鲜木香 甜橘香 Fresh woody Sweet pine citrus	-	-	-	-	-	-	-	0.19	-	-	-
	α-石竹烯 *α*-Caryophyllene	-	-	-	-	-	-	-	0.78	-	-	-	-
合计 Footing	数量 Quantity	-	12	-	2	8	3	1	3	9	2	-	2
	含量（%） Content(%)	-	5.69	-	0.55	2.89	0.75	0.61	1.64	2.85	0.63	-	0.56
醚类 Ethers	邻苯二甲醚 Phthalic dimethyl ether	-	-	3.41	4.59	0.60	2.80	3.65	5.33	0.28	1.12	1.51	2.56
	异丁香酚甲醚 Isoeugenol methyl ether	刺激性丁香香 花香 Spicy clove Floral	-	-	-	-	0.35	0.62	0.78	-	-	-	-
合计	数量 Quantity	-	**-**	**1**	**1**	**1**	**2**	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**
	含量（%） Content(%)	-	**-**	**3.41**	**4.59**	**0.60**	**3.15**	**4.27**	**6.11**	**0.28**	**1.12**	**1.51**	**2.56**
甲基氧笨类 Methoxybenzene	1,2,3-三甲氧基苯 1,2,3-Trimethoxybenzene	-	-		7.86	0.45	2.10	3.34	6.11	0.40	1.11	1.72	2.67
	1,2,4-三甲氧基苯 1,2,4-Trimethoxybenzene	-	-	4.89	3.70	0.38	2.23	5.74	6.64	-	3.23	4.98	5.96
合计 Footing	数量 Quantity	-	-	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2
	含量（%） Content(%)	-	-	4.89	11.56	0.83	4.33	9.08	12.75	0.40	4.34	6.70	8.63
其他 Miscellaneous	咖啡因 Caffeine	-	-	2.44	3.84	1.26	5.94	6.13	1.74	8.31	3.69	2.90	3.14

香型 Aromatype		香气描述 Aromadescription	茶样编号 Teasamplenumber									
			YL	ZK	BX	Z1	Z2	Z3	Z4	G1	G2	G3	G4
合计 Footing	二氧化碳 Carbon dioxide	-	-	-	0.60	0.40	0.30	0.30	0.40	0.60	-	0.20	0.50
	数量 Quantity	-	-	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2
	含量（%） Content(%)	-	-	2.44	4.44	1.66	6.24	6.43	2.14	8.91	3.69	3.10	3.64