DOI:10.12441/spyswjs.20240613001 [文章编号] 1673-1689(2025)11-0159-14

金萱红茶茶膏加工工艺优化及挥发性成分分析

王云仙 赵云雄 罗莲凤* 刘宝贵 杨晶晶

(广西南亚热带农业科学研究所,广西 崇左 532200)

摘要:【目的】优化金萱红茶茶膏制备工艺,提升茶多酚含量,并比较不同加工方式对茶膏挥发性成分的影响。**【方法】**以金萱红茶干茶作为原料,利用响应面试验考察茶水比、酶添加量、超声功率和超声时间对红茶茶膏茶多酚质量分数的影响;并采用顶空固相微萃取(headspace solid-phase microextraction,HS-SPME)结合气相色谱-质谱联用(gas chromatography-mass spectrometry,GC-MS)技术对真空冷冻浓缩(NP)、酶+真空冷冻浓缩(WB)和旋转蒸发浓缩+真空冷冻浓缩(B)3种不同加工方式下红茶茶膏中的挥发性成分进行检测分析。**【结果】**红茶茶膏的最佳工艺条件为茶水比1 g∶20 mL、酶添加量30 mg/g、超声功率514 W、超声时间21 min,此时金萱红茶茶膏中茶多酚质量分数为269.34 mg/g。从NP、WB和B中分别鉴定出103、107、84种挥发性成分,并在NP、WB和B中均检测到芳樟醇、苯甲醇、3-甲基丁醛、苯甲醛、苯乙醛、月桂烯和吡咯等呈花香、果香的挥发性成分;酶解后,WB比NP挥发性成分质量分数增加4 014.39 μg/kg,在B中未检测到3,7-二甲基-1,5,7-辛三烯-3-醇、柠檬烯、吡嗪类等呈花香、果香挥发性成分。**【结论】**酶解结合真空冷冻干燥能够提高红茶茶膏的挥发性成分质量分数。

关键词:金萱红茶;茶膏;工艺优化;顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱法;香气成分

Optimization of Processing Technology and Analysis of Volatile Components in Jinxuan Black Tea Cream

WANG Yunxian ZHAO Yunxiong LUO Lianfeng LIU Baogui YANG Jingjing*

(Guangxi South Subtropical Agricultural Sciences Research Institute, Chongzuo 532200, China)

Abstract: [**Objective**] This study is intended to optimize the preparation process of Jinxuan black tea cream, enhance the content of tea polyphenols, and compare the effects of different processing methods on the volatile components of the tea cream. [**Method**] With dried Jinxuan black tea as the raw material, response surface methodology was adopted to examine the impacts of tea-to-water ratio, enzyme dosage, ultrasonic power, and ultrasonic duration on the mass fraction of tea polyphenols in the black tea cream. Furthermore, headspace solid-phase microextraction (HS-SPME) coupled with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) was employed to detect and analyze the volatile components in the black tea cream samples processed *via* three distinct methods: vacuum freeze concentration (NP), enzyme-assisted vacuum freeze concentration (WB), and rotary evaporation concentration combined with vacuum freeze concentration (B). [**Result**] The optimal process conditions for the black tea cream were determined as follows: a tea-to-water ratio of 1 g∶20 mL, an enzyme dosage of 30 mg/g, ultrasonic power of 514 W, and ultrasonic duration of 21 min. Under these optimal conditions, the mass fraction of tea polyphenols in the Jinxuan black tea cream attained 269.34 mg/g. A total of 103, 107, and

基金项目:广西农科院基本业务科研专项(桂农科2023YM127,桂农科2024YP119,桂农科2021YT160);广西科技计划项目(桂科AB24010254);重点研发广西科技基地和人才专项(桂科AD23026328);广西农业科技创新联盟(桂农科盟202406-1)。

通信作者:罗莲凤(1980—),女,硕士,正高级农艺师,主要从事茶叶精深加工、茶叶技术推广应用。E-mail:260564134@qq.com

收稿日期:2024-06-13 **修回日期:**2025-10-20

84 volatile components were identified from NP, WB, and B samples, respectively. Among them, volatile components with floral and fruity aromas, including linalool, benzyl alcohol, 3-methylbutanal, benzaldehyde, phenylacetaldehyde, myrcene, and pyrrole, were detected in all the three samples (NP, WB, and B). After enzymatic hydrolysis, the mass fraction of volatile components in the WB sample was 4 014.39 μg/kg higher than that in the NP sample. The volatile components with floral and fruity aromas, such as 3, 7-dimethyl-1, 5, 7-octatriene-3-ol, limonene, and pyrazines, were not detected in sample B. [**Conclusion**] Enzymatic hydrolysis combined with vacuum freeze-drying can effectively increase the mass fraction of volatile components in black tea cream.

Keywords: Jinxuan black tea; tea cream; process optimization; headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry; aroma component

金萱（台茶 12 号）是 20 世纪 80 年代初培育的茶树良种，生长势强，具有抗旱、抗寒、抗病虫性强、适应性强、产量高等优点，制作的红茶具有花香、蜜香[1-2]等优良品质，是制作花香型红茶的优质原料。广西境内金萱种植面积广，资源丰富。红茶茶膏和红茶茶汤的成分基本一致，但在成分含量的构成中有差异。早在清朝时期就有茶膏的记载，但大部分以熬煮为主，在熬煮干燥过程中，营养物质减少，甚至出现不愉悦的气味。目前，茶膏的干燥方式主要有喷雾干燥、热风干燥、加热熬煮干燥、真空冷冻干燥和超声微波协同干燥等，真空冷冻干燥在保持营养成分和色泽上优于其他干燥方法[3-6]。除干燥方式对茶膏加工过程有影响外，加酶处理也能促进茶叶中有效成分溶出，增强茶膏的风味。在茶膏原料（红茶）加工阶段使用远红外辐射、微波、光波可以增加萜烯醇、萜烯醛、芳香醇和芳香酸含量，同时降低脂族醇、酸和芳香族酯含量，从而改善红茶的香气[7]。潘斐等[8]利用风味蛋白酶和植物水解酶对普洱茶茶汤进行处理，制成的普洱茶茶膏口感甜醇有回甘，香气较好。缪凤等[9]利用外源纤维素酶处理红茶茶汤后，红茶中水浸出物总量、游离氨基酸、茶黄素和茶红素等物质含量增加，EGCG、咖啡碱等苦涩物质含量降低，红茶口感得到良好改善。Kazemi 等[10]采用黑曲霉纤维素酶处理绿茶废弃物，酶处理后多酚、总儿茶素和还原糖含量增加。

杨霁虹等[11]采用 HS-SPME-GC-MS 和 OAV 分析了黄山地区 9 种茶树品种红茶香气，检测出该地区茶树具有区别于其他茶类独特的花香、甜香。Yu 等[12]采用 GC-MS 分析了春季红茶香气，发现春季红茶中香叶醇、水杨酸甲酯、芳樟醇、苯乙醇和反式芳樟醇氧化物（呋喃）为主要的香气成分。Huang 等[13]采用气相色谱-质谱法对祁门红茶经自然萎凋、日光萎凋和热风萎凋后的香气成分进行分析，发现使用日光萎凋后的祁门红茶中芳樟醇和香叶醇含量升高，并呈明显花香和果香。在以往红茶挥发性成分检测中发现苯甲醇、芳樟醇、香叶醇、苯乙醛、己醛、辛醛和壬醛等对红茶香气的贡献占比较大，与红茶中呈现的甜味、麦芽味、花香和青草味直接相关[14-17]。除上述含量较高的挥发性成分外，β-紫罗酮和 1-辛烯-3-酮是金萱红茶中常见的香气活性物质[18]。上述研究多针对红茶香气、加工方式等，而有关红茶茶膏挥发性成分和香气的研究较少。

目前，关于黑茶茶膏工艺和挥发性成分的研究较多，有关不同加工方式下红茶茶膏挥发性成分的研究较少，且缺少红茶茶膏关键香气成分的理论分析。研究拟基于茶叶深加工和风味组学技术，优化红茶茶膏加工工艺，采用 HS-SPME 与 GC-MS 联用技术探究不同加工方式对茶膏挥发性成分的影响规律，为红茶茶膏香气品质的评价提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

金萱红茶：产于 2022 年夏秋季，广西南亚热带农业科学研究所；无水碳酸钠、福林酚、没食子酸、纤维素酶（500 000 U/g）、果胶酶（100 000 U/g）：北京索莱宝科技有限公司。

1.2 仪器与设备

紫外-可见分光光度计：Blue Star B 型，北京莱伯泰科仪器有限公司；冷冻干燥机：ALPHA 1-2LDplus 型，博励行仪器有限公司；超声清洗仪：

SB25-12D型，宁波新芝生物科技股份有限公司；摇摆式高速万能粉碎机：DFY-400D 400型，温岭市林大机械有限公司；超低温冰箱：DW-86L388J型，青岛海尔特种电器有限公司；分析天平：FA-1004型，上海舜宇恒平科学仪器有限公司；旋转蒸发仪：RE-52AA型，上海亚荣生化仪器厂；单冲压片机：YP-1.5L型，上海精其仪器有限公司；气相色谱-质谱联用（GC-MS）仪：7890B-5977B型，美国安捷伦公司。

1.3　方法

1.3.1　原料预处理

干燥的金萱红茶经高速粉碎机粉碎，过30目标准筛，于低温干燥通风处保存备用。

1.3.2　茶多酚质量分数测定

按GB/T 8313—2018测定茶多酚质量分数；以没食子酸浓度为横坐标、吸光度为纵坐标绘制标准曲线方程y=0.011 2x+0.001 68，R^2 = 0.997 5。

1.3.3　单因素试验

分别考察茶水比（1 g∶10 mL、1 g∶15 mL、1 g∶20 mL、1 g∶25 mL、1 g∶30 mL）[19]、酶添加量（10、20、30、40、50 mg/g）、超声功率（180、270、360、450、540、720 W）和超声时间（10、15、20、25、30、35 min）对红茶茶膏茶多酚质量分数的影响。固定茶水比1 g∶20 mL，酶添加量（$m_{纤维素}$∶$m_{果胶酶}$=2∶1[20]）20 mg/g、超声功率540 W、超声时间20 min，取20 g金萱红茶粉末，冲泡饮用水温60 ℃，超声结束后，沸腾灭酶10 min，得到未浓缩红茶茶膏液，低温旋转蒸发后定容到原体积的1/4，真空冷冻干燥3~4 d，放入压片机中压制成型，制成红茶茶膏（B），检测红茶茶膏中茶多酚。

同时制备未经浓缩进行真空冷冻干燥成型的红茶茶膏：未加酶酶解红茶茶膏（NP）和加酶酶解红茶茶膏（WB），检测B、NP、WB中的挥发性成分。

1.3.4　金萱红茶茶膏挥发性成分分析

1）HS-SPME条件：萃取头为50/30 μm DVB/CARonPDMS，温度为50 ℃，振荡15 min，萃取30 min，振荡转速250 r/min，解析时间5 min，GC循环时间50 min。

2）GC-MS条件：色谱柱为DB-wax（30 m×0.25 mm×0.25 μm）。进样温度260 ℃，载气为氦气（99.999%），流量1 mL/min。柱温40 ℃保持5 min；以5 ℃/min升至220 ℃，20 ℃/min升至250 ℃，保持2.5 min。接口温度260 ℃，离子源温度230 ℃；四极杆温度150 ℃，电离方式EI^+（70 eV），采用全扫描模式，质量范围20~400 m/z。

3）挥发性成分定性定量分析：运用NIST 2017标准谱库对GC-MS质谱数据进行检索对比，采用内标法定量。

1.4　数据处理

采用Origin 2021软件进行试验数据统计和分析，采用SPSS 27软件进行方差分析。采用Design-Expert 8.0统计分析软件进行响应面试验设计与分析，结果以平均值±标准差表示，每个梯度平行3次。

2　结果与讨论

2.1　单因素试验

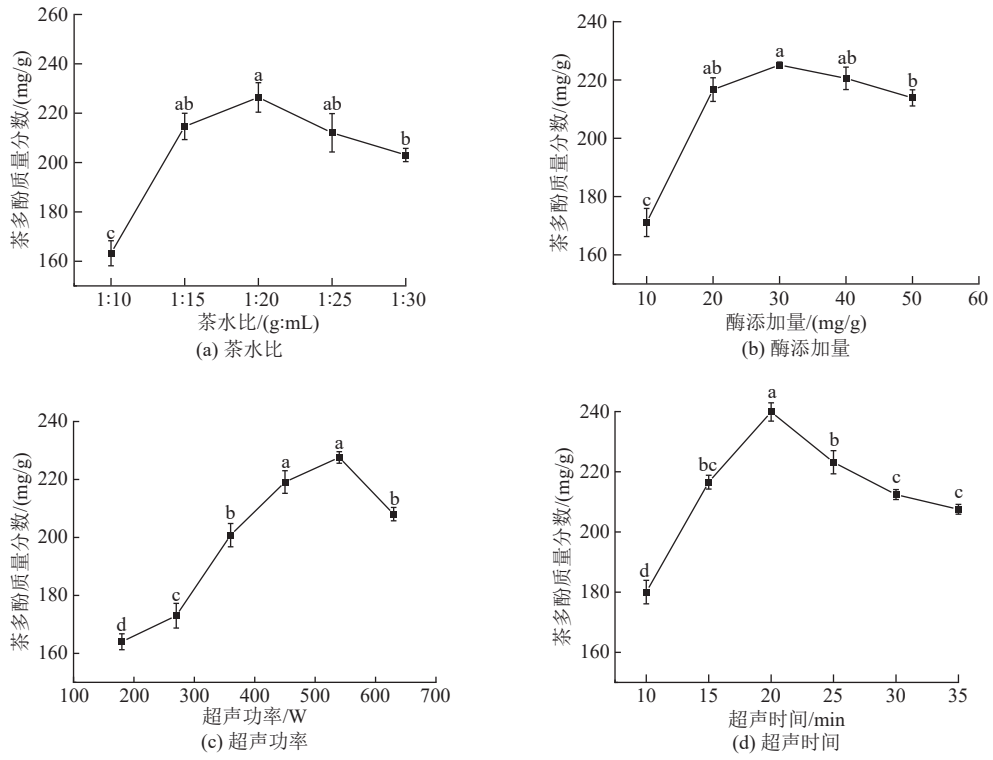
由图1（a）可知，茶水比对红茶茶膏中茶多酚质量分数影响显著。当茶水比为1 g∶10 mL~1 g∶20 mL时，茶膏中茶多酚质量分数随着茶水比减小而升高，在茶水比为1 g∶20 mL时达到峰值226.37 mg/g；当茶水比<1 g∶20 mL时，茶多酚质量分数降低。这可能是溶剂达到一定量时，茶叶粉末与溶剂中茶多酚达到一个动态平衡，在此平衡状态下，茶多酚从茶叶细胞析出到溶剂的速率与茶多酚从溶剂回到茶叶细胞的速率相等；此外，茶水比增加会导致其他杂质溶出竞争茶多酚溶出空间[21]。故选择茶水比为1 g∶20 mL。

由图1（b）可知，当酶添加量为10~30 mg/g时，茶多酚质量分数随着酶添加量的增加而增加，在30 mg/g时达到峰值225.14 mg/g；当酶添加量>30 mg/g时，继续增加酶用量，茶多酚质量分数轻微下降。其原因可能是酶添加量达到一定值时，酶与反应底物达到饱和状态，继续增加酶用量会抑制酶解反应[22]；此外，过量的果胶酶和纤维素酶很可能导致其他组分降解或转化，影响茶多酚质量分数[23]。故选择酶添加量为30 mg/g。

由图1（c）可知，当超声功率为180~540 W时，茶多酚质量分数随着超声功率的增加而增加，在540 W时达到峰值227.61 mg/g；当超声功

率>540 W 时，继续增加超声功率，茶多酚质量分数降低，可能是随着茶多酚质量分数的增加，溶液中的溶质流速加大，使物料在超声场中停留时间较短，受超声波破壁作用随之减弱，茶多酚溶出速率减小，茶多酚质量分数降低[24]。故选择超声功率为 540 W。

由图 1（d）可知，当提取时间为 10~20 min 时，茶多酚质量分数随着超声时间的延长而增加，在 20 min 时达到最高值 239.89 mg/g；当超声时间>20 min 时，继续延长超声时间，茶多酚质量分数降低，可能是超声时间过长，茶多酚会被缓慢氧化[25]。故选择超声时间为 20 min。



不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

图 1　各因素对红茶茶膏茶多酚质量分数的影响

Fig. 1　Influences of different factors on the mass fraction of tea polyphenols in black tea cream

2.2　响应面试验

2.2.1　试验设计及结果

根据单因素试验结果，以超声功率（A）、超声时间（B）、酶添加量（C）和茶水比（D）为影响因素，采用 Design-Expert 8.0 软件进行四因素三水平响应面试验，优化金萱红茶茶膏加工工艺，试验设计及结果见表 1。

2.2.2　方差分析及模型显著性检验

由表 2 可知，回归模型 P<0.000 1，极显著；失拟项 P=0.93>0.05，不显著，表示此模型具有可行性。模型相关系数 R^2=0.951 3，表明该模型的线性拟合程度高。R^2_{Adj}=0.902 7，可以解释 90.27% 的响应值的变化。得到二次多项式回归方程为：Y=261.8−5.81A+7.34B−2.93C+6.36D−1.5AB+7.49AC−5.85AD+4.03BC+8.53BD−4.74CD−15.74A^2−22.03B^2−25.91C^2−15.27D^2。

此模型中一次项 B、D 和二次项 A^2、B^2、C^2、D^2 的 P 值均<0.01，对响应值影响极显著；根据 F 值可知，各因素对响应值影响排序为 B>D>A>C。通过模型显著性分析得到金萱红茶茶膏的最佳加工工艺为超声功率 514 W、超声时间 21 min、茶水比 1 g∶22 mL、酶添加量 30 mg/g。考虑到实际生产，将茶水比修正为 1 g∶20 mL，在此条件下进行 3 次重复验证实验，测得红茶茶膏中茶多酚质量分数为 268.54 mg/g，与理论值误差率为 0.3%，说明该工艺优化具有可行性。

由图 2 和表 3 可知，超声功率与酶添加量、超声时间与茶水比的交互作用对茶多酚质量分数影响显著。

表1　响应面试验设计及结果

Table 1　Response surface design and experimental results

序号	超声功率/W	超声时间/min	酶添加量/(mg/g)	茶水比/(g∶mL)	茶多酚质量分数/(mg/g)
1	540	20	30	1∶20	265.96±6.79
2	450	20	40	1∶20	216.42±1.94
3	450	20	20	1∶20	236.96±5.85
4	540	25	30	1∶25	249.25±2.91
5	540	20	40	1∶25	222.14±2.91
6	540	25	30	1∶15	213.40±1.94
7	540	15	40	1∶20	200.48±3.88
8	540	20	30	1∶20	261.85±0.97
9	630	20	30	1∶25	221.69±3.88
10	630	15	30	1∶20	210.31±0.97
11	450	20	30	1∶25	242.87±0.97
12	540	20	20	1∶25	235.88±4.85
13	540	20	30	1∶20	269.34±1.91
14	450	15	30	1∶20	219.15±0.97
15	630	20	30	1∶15	225.49±8.85
16	450	25	30	1∶20	246.05±4.85
17	630	25	30	1∶20	231.21±4.85
18	540	20	30	1∶20	257.28±4.85
19	630	20	40	1∶20	217.88±3.88
20	450	20	30	1∶15	223.28±2.91
21	540	20	30	1∶20	254.56±3.88
22	540	15	20	1∶20	216.29±3.88
23	540	20	20	1∶15	214.90±5.85
24	540	20	40	1∶15	220.14±0.97
25	540	15	30	1∶25	218.12±6.79
26	630	20	20	1∶20	208.46±2.91
27	540	25	20	1∶20	214.29±2.91
28	540	25	40	1∶20	214.59±3.88
29	540	15	30	1∶15	216.37±0.97

表2　回归模型方差分析及模型显著性检验

Table 2　Analysis of variance and significance test of regression model

方差来源	平方和	自由度	均方差	*F*值	*P*值	显著性
模型	9 539.81	14	681.41	19.55	<0.000 1	**
A	404.86	1	404.86	11.62	0.004 2	
B	646.55	1	646.55	18.55	0.000 7	**
C	102.96	1	102.96	2.95	0.107 7	
D	486.07	1	486.07	13.95	0.002 2	**
AB	8.99	1	8.99	0.26	0.619 5	
AC	224.36	1	224.36	6.44	0.023 7	*
AD	136.82	1	136.82	3.93	0.067 5	
BC	64.88	1	64.88	1.86	0.194 0	
BD	290.75	1	290.75	8.34	0.011 9	*
CD	90.03	1	90.03	2.58	0.130 3	
A^2	1 607.68	1	1 607.68	46.13	<0.000 1	**
B^2	3 147.27	1	3 147.27	90.31	<0.000 1	**
C^2	4 355.73	1	4 355.73	124.99	<0.000 1	**
D^2	1 513.42	1	1 513.42	43.43	<0.000 1	**
残差	487.49	14	34.85			
失拟项	340.74	10	34.07	0.93	0.583 3	不显著
纯误差	147.15	4	36.79			

注：“*”表示显著（*P*<0.05）；“**”表示极显著（*P*<0.01）

2.3　挥发性成分分析

由表3可知，红茶茶膏在不同加工方式中共鉴定出150种物质，包括酮类、醇类、醛类、酯类、烷烃类、吡嗪类、酸类、呋喃吡咯类和其他类，与Zhang等[26]的研究结果相近，但各挥发性成分种类和质量分数有差异。在NP、WB和B中分别检测到103、107、84种挥发性成分。NP、WB、B中挥发性成分质量分数分别为27 010.80、31 025.19、8 806.87 μg/kg，酶解后挥发性成分质量分数增加了4 014.39 μg/kg，加热旋蒸处理后减少了22 218.32 μg/kg。NP和WB中有大量吡嗪类物质检出，而B中未检出，说明物质在热化、光化作用下降解释放生成了新的物质[27]，其中以2-甲基吡嗪、2，5-二甲基吡嗪、2-乙基-3，6-二甲基吡嗪、2-乙基-3-甲基吡嗪为主，吡嗪类物质在红茶中主要呈现出类似花生、坚果、咖啡、可可的烘焙味[28]。酮类中的2-庚酮和异丙叉丙酮分别具有类似梨的香味和蜂蜜香味，甲基环戊烯醇酮具有枫槭糖浆、焦甜、烘烤栗子香气。

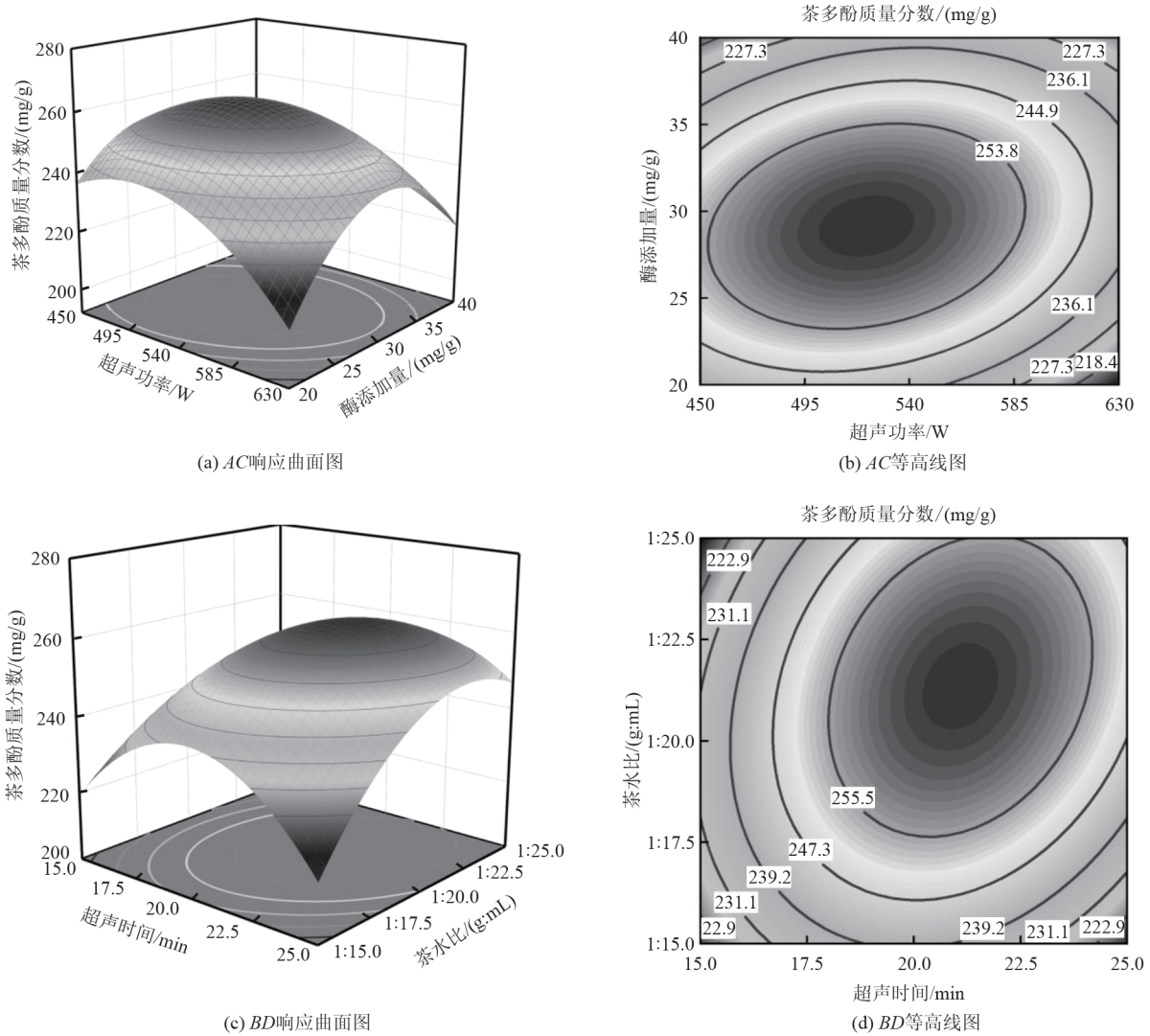


图 2　各因素交互作用的响应曲面及等高线图

Fig. 2　Response surface and contour maps of interactions between various factors

表 3　红茶茶膏加工过程中挥发性成分质量分数

Table 3　Mass fractions of volatile compounds in black tea cream during processing

种类	名称	保留时间/min	质量分数/(μg/kg)		
			NP	WB	B
酮类	丙酮	2.63	24.44±4.29	16.52±0.40	—
	丁酮	3.46	120.40±39.92	29.68±4.64	30.33±4.48
	2,3-丁二酮	4.97	75.19±2.27	52.83±3.83	54.41±5.19
	2-庚酮	11.33	42.53±15.04	41.60±24.94	52.47±19.47
	异蒿酮	16.37	85.37±6.35	—	—
	4-羟基查耳酮	8.76	—	45.27±14.51	24.48±5.02
	异丙叉丙酮	9.68	84.73±1.69	152.53±3.26	23.20±0.96
	甲基庚烯酮	16.08	—	153.65±76.36	51.67±16.62
	2,2,6-三甲基环己酮	15.37	26.89±9.84	44.02±14.80	30.05±0.78
	2,4,6-三(1,1-二甲基乙基)-4-甲基环己-2,5-二烯-1-酮	29.90	49.73±8.97	—	—
	2,3-戊二酮	7.40	28.61±1.05	26.50±2.36	30.25±1.89
	2-甲基-1-戊烯-3-酮	7.55	31.48±27.27	25.71±1.30	21.42±0.18

续表

种类	名称	保留时间/min	质量分数/(μg/kg)		
			NP	WB	B
酮类	2(5*H*)-呋喃酮	26.33	—	—	15.11±3.84
	甲基环戊烯醇酮	28.09	119.01±10.01	137.32±1.63	47.00±1.66
	二甲基羟基呋喃酮4-羟基-2,5-二甲基-3(2*H*)呋喃酮	32.30	123.55±12.92	119.05±1.93	37.00±10.85
	2-吡咯烷酮	32.37	123.55±12.92	157.52±53.39	29.39±6.83
	2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4*H*-吡喃-4-酮	36.62	24.80±3.17	24.68±11.58	23.69±6.08
	2,3-庚二酮	10.32	—	—	20.79±0.65
	2,2,3-三甲基环丁酮	13.68	—	—	62.88±5.30
	乙酸基丙酮	19.51	208.50±1.23	—	—
	2-羟基-3-戊酮	16.64	66.44±56.57	—	—
醇类	戊烷乙醇	1.77	377.18±116.83	—	—
	2-丙基-1-庚醇	14.00	6.10±1.25	645.64±607.30	16.53±15.60
	2-乙基-1-己醇	20.34	619.07±245.70	1 506.33±1 309.68	132.34±43.60
	3-甲基-2-丁醇	9.41	—	—	43.21±2.78
	1-辛烯-3-醇	19.31	27.76±3.87	107.42±6.32	—
	1-己醇	16.69	86.68±3.43	274.87±102.29	59.96±14.83
	芳樟醇	120.77	965.60±331.97	906.49±1.57	171.37±78.30
	正戊醇	13.69	—	179.30±16.66	—
	1-辛醇	22.05	27.61±9.61	60.05±17.08	13.52±2.15
	3,7-二甲基-1,5,7-辛三烯-3-醇	23.25	133.41±13.98	250.80±4.53	—
	3-壬烯-1-醇	11.64	—	—	40.02±0.09
	3-己烯-1-醇	17.50	—	—	79.78±5.71
	4-氨基-1-丁醇	24.15	—	—	395.24±209.17
	3-呋喃甲醇	24.36	101.02±8.46	126.85±49.55	53.72±27.02
	香叶醇	28.61	743.14±47.13	978.06±358.05	82.10±6.90
	苯乙醇	29.85	923.50±23.10	888.87±125.76	247.01±47.35
	反式-2-己烯-1-醇	18.12	—	—	25.70±0.99
	反式-3-己烯-1-醇	17.50	—	676.52±27.75	—
	顺-2-戊烯醇	15.72	—	42.63±3.02	—
	(2*S*)-(-)-1,2,4-丁三醇	16.56	69.73±5.30	136.27±40.44	—
	α-松油醇	25.30	98.78±12.20	143.77±10.10	—
	3,3-二甲基-2-丁醇	1.80	—	516.24±18.46	—
	氧化芳樟醇	19.08	1 709.91±33.73	—	—
	反式-2-己烯醇	18.11	66.02±0.76	156.29±3.11	50.02±7.34
醛类	异丁醛	2.57	84.86±4.25	73.18±4.86	110.15±4.76
	2-甲基丁醛	3.65	353.02±7.90	281.57±50.43	434.08±21.79
	3-甲基丁醛	3.72	342.47±11.45	260.59±59.13	508.52±33.88
	戊醛	4.99	75.19±2.27	52.83±3.83	56.18±6.33
	乙醛	2.06	482.72±8.10	522.54±47.46	—
	正己醛	8.03	157.79±8.62	157.10±10.56	125.80±25.78
	壬醛	17.66	537.95±16.97	457.90±106.29	77.16±18.55
	苯甲醛	20.93	475.13±18.10	1 267.43±44.47	544.17±67.03
	苯乙醛	23.82	580.72±34.59	472.79±243.14	177.01±20.60
	2-吡咯甲醛	32.04	172.07±4.90	197.95±75.02	78.25±13.09
	N-甲基-2-吡咯甲醛	33.55	120.73±4.04	141.93±56.12	50.38±9.06
	2-己烯醛	12.39	55.99±4.71	84.38±22.07	60.87±2.19
	正庚醛	11.39	—	67.48±5.03	42.86±2.54
	糠醛	19.41	50.04±5.05	187.63±57.90	61.71±4.22
	5-甲基-2-糠醛	22.20	230.44±18.78	518.97±423.23	—

续表

种类	名称	保留时间/min	质量分数/(μg/kg)		
			NP	WB	B
醛类	1-乙基-1*H*-吡咯-2-甲醛	23.10	1 869.31±180.10	1 988.19±11.45	169.34±12.48
	3-甲基己醛	11.37	37.20±18.40	—	164.33±3.46
	2-苯基-2-丁烯醛	30.20	22.90±0.47	44.55±30.75	—
酯类	己酸甲酯	11.51	91.18±17.23	620.76±241.38	64.71±8.34
	磷酸三丁酯	30.11	138.56±18.64	213.52±120.98	24.29±3.34
	丁内酯	23.45	—	171.01±159.00	64.34±7.96
	水杨酸甲酯	26.90	667.59±128.65	553.64±20.06	110.81±29.75
	泛醇内酯	32.16	44.23±3.63	—	30.57±3.97
	4-甲基戊酸甲酯	10.08	—	112.67±27.29	—
	2-己烯酸甲酯	14.68	—	202.59±21.58	80.84±8.67
	乙酸苄酯	25.91	79.69±1.39	182.84±61.05	15.01±0.69
	乙酸苯乙酯	27.83	—	208.02±23.73	—
	2,4-二丁基苯基5-羟基戊酸酯	37.46	—	108.46±17.62	—
	戊酸甲酯	8.23	—	84.39±17.09	—
	乙酸正戊酯	11.09	—	41.71±41.76	—
	(*Z*)-戊-2-烯-1-基乙酸酯	12.70	—	58.78±55.08	—
	甲基(3*Z*)-3-己烯酸酯	13.77	—	488.27±7.73	59.12±0.96
	乙酸正己酯	14.22	—	37.32±1.16	—
	乙酸叶醇酯	15.52	8.05±2.93	46.45±10.16	—
	乙酸反-2-己烯酯	16.01	—	250.16±20.36	—
	3-糠酸甲酯	22.34	104.67±3.38	—	—
	2-异丁酸苯乙酯	27.83	89.19±0.91	176.76±3.48	65.18±1.69
	N-羟基苯甲亚氨酸甲酯	26.78	680.76±38.63	763.83±223.51	224.34±48.38
	2-(5-甲基-5-乙烯基四氢呋喃-2-基)丙-2-基碳酸乙酯	19.81	1 379.75±42.21	1 222.92±27.54	79.68±0.97
	丁基丙酯	1.85	274.46±4.86	—	—
烷烃类	4,7-二甲基十一烷	6.81	63.02±3.75	—	66.25±19.99
	3-乙基己烷	2.99	—	65.40±2.20	69.31±41.20
	5,7-二甲基十一烷	8.19	51.91±1.32	—	—
	3,5-二甲基辛烷	8.19	—	—	63.58±2.90
	正十六烷	15.07	65.15±3.62	—	69.04±6.70
	正十三烷	15.06	—	95.53±12.65	—
	丙-2-基环丁烷	19.45	45.42±5.34	—	63.77±1.71
	2,3,4-三甲基正己烷	2.99	31.15±1.95	—	—
	3-乙基-3-甲基癸烷	13.46	56.34±62.15	—	—
	丁烯	12.10	53.37±4.01	—	—
	月桂烯	10.66	78.77±25.78	135.59±24.80	149.92±30.21
	柠檬烯	11.67	45.92±7.94	140.73±30.14	—
	双烯	21.12	76.88±2.17	174.16±7.02	—
	三甲基亚甲基双环十一碳烯	22.89	114.19±16.99	—	—
吡嗪类	2-甲基吡嗪	13.93	395.38±37.76	772.41±452.11	—
	2,5-二甲基吡嗪	15.64	574.58±38.70	403.57±2.30	—
	2,6-二甲基吡嗪	15.83	243.33±12.61	179.47±25.76	—
	2- 乙基吡嗪	15.96	263.68±7.70	360.16±28.45	—
	2,3-二甲基吡嗪	16.32	163.03±32.72	192.17±94.21	—
	2-乙基-6-甲基吡嗪	17.46	392.89±16.89	334.03±15.33	—
	2-乙基-3,6-二甲基吡嗪	19.11	1 713.35±37.19	1 976.84±273.38	—
	2-异丁基-3,5-二甲基吡嗪	21.22	—	193.59±69.60	—
	3,5-二甲基-2-(3-甲基丁基)吡嗪	24.43	65.63±7.08	82.61±32.10	—

续表

种类	名称	保留时间/min	质量分数/(μg/kg)		
			NP	WB	B
吡嗪类	2-乙基-3-甲基吡嗪	17.97	392.26±21.82	—	—
	2,3,5-三甲基吡嗪	17.99	386.94±19.75	—	—
	2-异丁基-3,6-二甲基吡嗪	21.30	135.32±1.37	173.76±3.48	—
	5-甲基-6,7-二氢-5*H*-环戊并吡嗪	23.49	69.16±0.94	44.52±0.74	—
	2-乙酰基吡嗪	23.50	—	55.70±2.23	—
	2-甲基-6-(3-甲基丁基)吡嗪	23.57	32.29±2.40	51.24±31.56	—
酸类	3-氨基水杨酸	15.97	—	—	13.83±1.13
	乙酸	19.15	271.33±4.26	394.03±12.74	444.02±72.45
	高香草酸	23.87	—	—	165.22±2.14
	3-氨基-3-氧代丙酸	2.04	—	—	462.97±43.60
	3-脱氧-*D*-甘油-*D*-乳-2-吡喃壬酮糖酸	10.90	—	—	17.06±1.42
	己二酸	16.36	—	305.26±2.80	47.39±11.45
	甲氧基乙酸	22.45	—	13.83±0.97	15.89±1.82
	己酸	28.67	112.30±99.09	—	—
	N-*β*-*D*-葡糖苷酸水合物	24.04	209.52±9.01	374.77±4.91	57.06±8.42
	4-甲氧基水杨酸	24.20	384.03±7.83	—	—
	正戊酸	28.70	—	221.42±13.78	—
	甲羟戊酸	20.78	42.31±36.86	—	—
呋喃吡咯类	2-甲氧基呋喃	9.66	—	—	46.66±8.45
	2-甲基呋喃	3.09	58.07±5.60	75.65±7.36	78.88±1.18
	2-乙酰基呋喃	20.50	332.64±9.06	422.30±26.56	93.02±8.48
	呋喃	13.24	—	154.24±2.37	—
	1-乙基吡咯	11.19	276.90±3.97	230.12±39.16	304.81±21.74
	2-乙酰基吡咯(甲基-2-吡咯基酮)	31.02	605.42±17.22	729.28±314.97	203.24±31.57
	吡咯	20.79	—	59.93±4.69	—
	正十四烷基胺(肉豆蔻胺)	13.27	—	—	51.33±0.99
其他类	*N*-乙基乙酰胺	23.91	580.72±34.59	830.44±392.33	31.12±4.43
	N-乙基琥珀酰亚胺	29.16	75.90±7.10	80.38±14.93	94.75±23.18
	N-甲酰乙胺	24.15	338.80±79.37	330.97±9.55	—
	氨基甲酸铵	1.75	159.08±15.70	—	412.44±7.97
	三乙基苯基铵	20.40	535.48±358.06	555.42±43.71	—
	(*E*)-3-(对甲苯磺酰基)丙烯腈	6.65	42.75±4.51	42.22±9.34	—
	4-叔丁基苯酚	25.67	53.93±5.12	62.20±26.40	—
	4-(甲硫基)苯酚	14.14	—	—	32.52±1.54
	对乙酰氨基酚	35.09	62.06±2.15	63.01±1.73	—
	4-氨基-2,5-二甲基苯酚	26.45	562.41±29.31	491.01±18.28	—
	二甲基亚砜	22.34	—	—	46.42±14.02
	2-氨基-4-羟基-6-甲酰基蝶啶	1.93	—	—	159.33±4.29
	1-(4-溴-2,5-二甲氧基苄基)哌嗪	6.67	—	—	24.45±1.59
	反式芳樟醇氧化物	26.78	659.12±38.80	627.05±32.04	—
	间二甲苯	9.74	82.87±1.59	151.48±2.81	50.29±2.25
	邻-异丙基苯	13.97	—	604.39±2.03	—

注："—"表示未检出。

醇类中的1-辛烯-3-醇、1-辛醇、3,7-二甲基-1,5,7-辛三烯-3-醇、香叶醇、苯乙醇和α-松油醇构成了红茶茶膏的花香、果香及甜香[10,29]。该检测中未检出乌龙茶品种(金萱)中含量较高的α-紫罗兰酮[30-31],可能是原料产地及茶树品种差异造成的。醛类中的3-甲基丁醛、苯甲醛、苯乙醛、正庚醛、糠醛、2-苯基-2-丁烯醛构成了红茶茶膏的花香、果香,其中呈香物质以苯甲醛、苯乙醛为主,这与魏昊等[32]的研究结果一致。酯类化合物主要包含水杨酸甲酯(冬青香)[33-34]、乙酸正戊酯(水果香)、乙酸叶醇酯(水果香)等,是红茶茶膏中果香的主要贡献物质,经过加热浓缩后的红茶茶膏B中酯类物质减少。烯烃中的月桂烯、柠檬烯(柠檬果香)[35]和双烯在酶解后升高。呋喃吡咯类中的2-乙酰基呋喃和吡咯呈现甜香、果香。

由图3可知,红茶茶膏挥发性成分的质量分数和种类排序均为WB>NP>B,经过酶解后,挥发性成分种类和质量分数均增加,说明酶解能够溶解释放出红茶茶膏中更多的挥发性成分,但不同挥发性成分种类有区别,酶解后WB中的醇类、酯类、呋喃吡咯类分别增加了2、8、1种,酮类、烷烃类分别减少了2、6种;B中的酮类、烷烃类和酸类分别增加了2、1、3种,醇类、醛类、酯类、吡嗪类、呋喃吡咯类和其他类分别减少了3、2、8、13、1、2种。推测可能在60 ℃的真空浓缩作用下,吡嗪类物质在热作用下转化为其他挥发性成分。与酶解前的NP相比,酶解后WB中醇类、酯类、酸类、呋喃吡咯类和其他类占比增加,酮类、烷烃类、吡嗪类和其他(胺类、酚等)类挥发性成分占比减少;与WB相比,B中酮类、醛类、烷烃类、酸类、呋喃吡咯类占比增加,醇类、酯类、吡嗪类占比减少,在B中醛类占比最高,达到30.2%。综上,不同的加工方式会影响挥发性成分的种类、质量分数及占比。

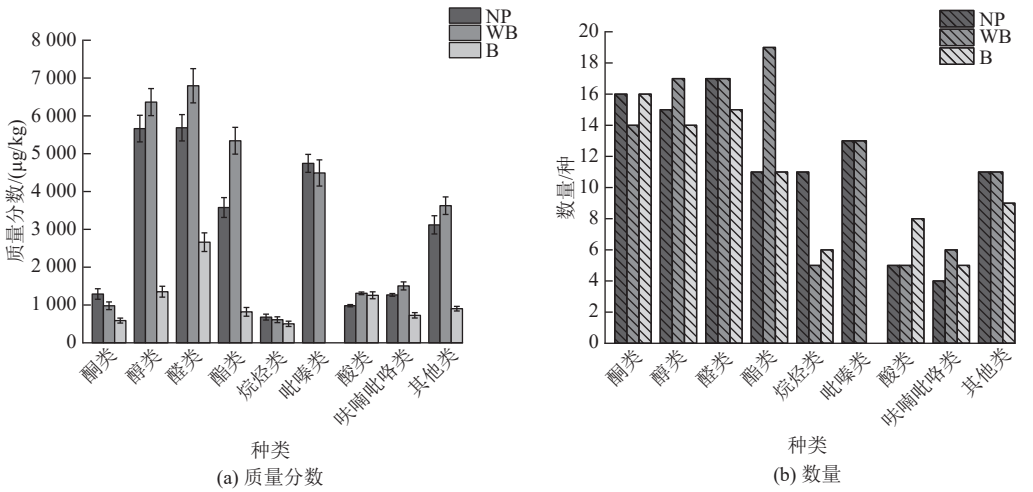
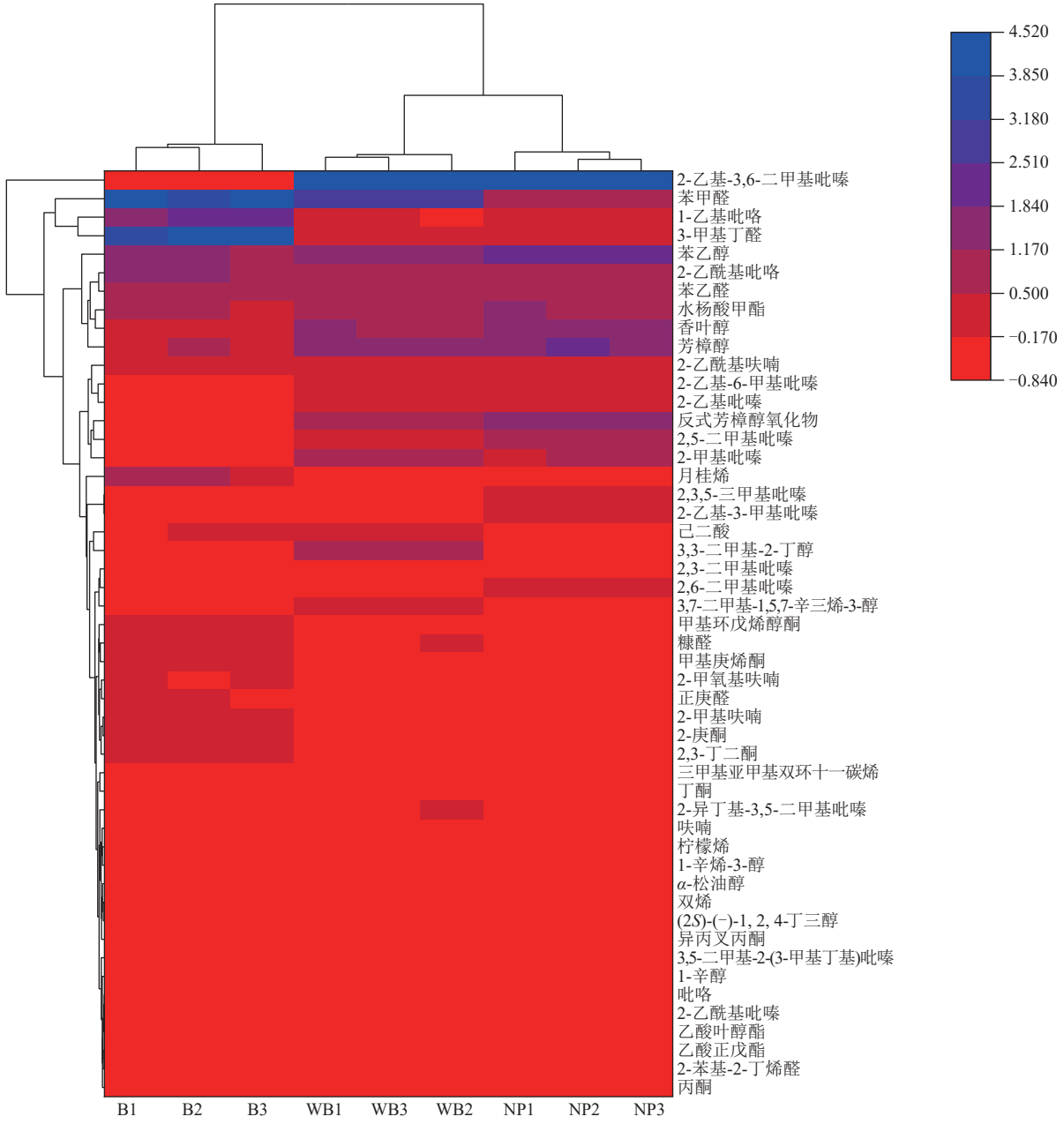


图3 挥发性成分质量分数和种类分析

Fig. 3 Mass fractions and number of volatile components

根据检测的挥发性成分,筛选VIP>1且具有差异的50种关键挥发性成分的相对含量进行分层聚类并绘制热图。由图4可知,WB中2-乙基-3,6-二甲基吡嗪、苯甲醛、苯乙醇、芳樟醇、反式芳香氧化物、3,3-二甲基-2-丁醇等的相对含量普遍较高,这些物质大多具有较好的香型,对成品茶香气的贡献较大。NP中2-乙基-3,6-二甲基吡嗪、苯甲醛、香叶醇、苯乙醇、芳樟醇、反式芳香氧化物、2,5-二甲基吡嗪、2-甲基吡嗪、2,6-二甲基吡嗪的相对含量高,WB和NP中的关键香气成分物质构成相似;烷烃类、酸类挥发性成分对香气贡献较小,与周佳等[36]的研究结果类似。B中3-甲基丁醛、1-乙基吡咯、月桂烯、甲基环戊烯醇酮、甲基庚烯酮、糠醛、2-甲氧基呋喃、正庚醛、2-庚酮、2,3-丁二酮、2-甲基呋喃等的相对含量普遍较高,表明经过旋蒸浓缩后,挥发性香气物质含量发生了变化。综上,WB中挥发性成分总含量最高,且其挥发性含量普遍较高的物质具有较多芳香气息,种类丰富且相对含量较高。



颜色由浅到深，代表相对含量由低到高。

图 4　不同加工方式下红茶茶膏中关键特征香气成分热图

Fig. 4　Heat map of key volatile components in black tea cream processed with different processing methods

3　结论

超声辅助酶解提取金萱红茶茶膏的最佳工艺条件为茶水比 1 g∶20 mL、酶添加量 30 mg/g，超声功率 514 W、超声时间 21 min，此时茶多酚质量分数为 269.34 mg/g。在红茶茶膏加工过程中加入果胶酶和纤维素酶，可以增加茶膏中挥发性成分的种类和质量分数。WB 和 NP 中的呈香物质以芳樟醇、香叶醇、苯乙醇、苯甲醛、吡嗪等为主，呈现花香、果香。B 中的吡嗪类挥发性成分散失，主要以花香为主，最优的加工方式为酶+真空冷冻浓缩。除不同加工方式对红茶茶膏的挥发性成分含量有影响外，不同季节、地域、初制工艺对红茶茶膏的挥发性成分含量也有影响，春、秋季加工的红茶品质优于夏季[37-38]。高海拔区域内原料加工的红茶受日照、温湿度的影响，红茶中的茶多酚、咖啡碱等成分含量高，导致挥发性成分也存在差异。

在红茶初制加工过程中加入乌龙茶的“摇青”工艺，可以提高挥发性成分，增加红茶香气[39]。后续将对不同季节加工的红茶茶膏进行挥发性成分分析，深入研究其加工过程中复杂的香气变化，明确香气在加工过程中的前体物质与活性香气间的转化关系。

参 考 文 献

[1] 亓俊然，张龙雪，陈新颖，等. 鲜叶萎凋前期低温处理对金萱白茶品质的影响[J]. 食品工业科技，2022，43（18）：63-71.
QI J R，ZHANG L X，CHEN X Y，et al. Effect of low temperature treatment on the quality of Jinxuan white tea in the early stage of fresh leaves withering[J]. Science and Technology of Food Industry，2022，43（18）：63-71.（in Chinese）

[2] 李赛君，雷雨，段继华，等. 茶树品种金萱杂交亲和性和配合力研究[J]. 茶叶通讯，2022，49（1）：18-24.
LI S J，LEI Y，DUAN J H，et al. Study on cross compatibility and combining ability of *Camellia sinensis* cultivar Jinxuan [J]. Journal of Tea Communication，2022，49（1）：18-24.（in Chinese）

[3] KRISETYADI B C，HERMANSYAH H. Effect of outlet temperature and total soluble solid in 2-stage spray dryer on black tea powder extract production[J]. IOP Conference Series：Earth and Environmental Science，2021，782（3）：032087.

[4] 谭超，刘华戎，龚加顺，等. 不同加工工艺对红茶茶膏品质的影响[J]. 茶叶科学，2013，33（4）：351-357.
TAN C，LIU H R，GONG J S，et al. Effect of different processing technology on the quality of black tea paste[J]. Journal of Tea Science，2013，33（4）：351-357.（in Chinese）

[5] 李官丽，吴秋月，陈锡霞，等. 干燥方式对油茶粉品质及挥发性风味物质的影响[J]. 食品与机械，2024，40（3）：210-216.
LI G L，WU Q Y，CHEN X X，et al. Effects of drying methods on the quality and volatile flavor compounds of oil tea powder[J]. Food & Machinery，2024，40（3）：210-216.（in Chinese）

[6] 陈佳星，赵姚姚，余丽娟，等. 铁观音茶膏制备工艺及其抗氧化研究[J]. 食品科技，2021，46（7）：112-115.
CHEN J X，ZHAO Y Y，YU L J，et al. Preparation technology and antioxidant activity of Tieguanyin tea cream [J]. Food Science and Technology，2021，46（7）：112-115.（in Chinese）

[7] QU F F，ZHU X J，AI Z Y，et al. Effect of different drying methods on the sensory quality and chemical components of black tea [J]. LWT-Food Science and Technology，2019，99：112-118.

[8] 潘斐，刘通讯. 酶在普洱茶膏加工工艺中的应用[J]. 食品工业科技，2017，38（19）：79-83，95.
PAN F，LIU T X. Application of enzymic treatment on the process of Pu-erh tea cream [J]. Science and Technology of Food Industry，2017，38（19）：79-83，95.（in Chinese）

[9] 缪凤，王俊懿，朱海燕. 外源纤维素酶对江华苦茶红茶品质的影响[J]. 食品工业科技，2021，42（17）：38-46.
MIAO F，WANG J Y，ZHU H Y. Effects of exogenous cellulase on the quality of black tea of JiangHua-KuCha[J]. Science and Technology of Food Industry，2021，42（17）：38-46.（in Chinese）

[10] KAZEMI F，MASOUMI S Z，SHAYAN A，et al. Effect of green tea ointment on perineal pain and wound healing after episiotomy：a randomized double-blind clinical trial[J]. European Journal of Integrative Medicine，2021，41：101258.

[11] 杨霁虹，周汉琛，刘亚芹，等. 基于HS-SPME-GC-MS和OAV分析黄山地区不同茶树品种红茶香气的差异[J]. 食品科学，2022，43（16）：235-241.
YANG J H，ZHOU H C，LIU Y Q，et al. Differences in aroma components of black tea processed from different tea cultivars in Huangshan by using headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry and odor activity value [J]. Food Science，2022，43（16）：235-241.（in Chinese）

[12] YU P H，HUANG Y J，LI Z Y，et al. Difference in aroma components of black teas processed on different dates in the spring season[J]. Foods，2023，12（23）：4368.

[13] HUANG W J，FANG S M，WANG J，et al. Sensomics analysis of the effect of the withering method on the aroma components of Keemun black tea [J]. Food Chemistry，2022，395：133549.

[14] HUANG J F，YAN T Y，YANG J F，et al. Aroma components analysis and origin differentiation of black tea based on ATD-GC-MS and E-nose [J]. Horticulturae，2023，9（8）：885.

[15] WU Q Y，ZHOU Z W，ZHANG Y N，et al.

Identification of key components responsible for the aromatic quality of Jinmudan black tea by means of molecular sensory science[J]. Foods, 2023, 12(9): 1794.

[16] NIU Y W, MA Y W, XIAO Z B, 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.

[17] LIU C, WANG C, ZHENG T T, et al. Characterization of key odor-active compounds in Sun-dried black tea by sensory and instrumental-directed flavor analysis[J]. Foods, 2022, 11(12): 1740.

[18] LIU P P, ZHENG P C, GONG Z M, et al. Comparing characteristic aroma components of bead-shaped green teas from different regions using headspace solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry/olfactometry combined with chemometrics[J]. European Food Research and Technology, 2020, 246(9): 1703-1714.

[19] 王海斌，陈晓婷，孔祥海，等. 速溶红茶茶多酚提取工艺优化及因子效应分析[J]. 食品研究与开发，2017，38(13)：40-43.
WANG H B, CHEN X T, KONG X H, et al. Extraction technology optimum of polyphenols in instant black tea and factor effect analysis[J]. Food Research and Development, 2017, 38(13): 40-43.(in Chinese)

[20] 谢李玲，薛婉茹，李丹阳，等. 外源酶对陈年武夷岩茶香气品质的改善作用[J]. 食品研究与开发，2023，44(5)：155-164.
XIE L L, XUE W R, LI D Y, et al. Exogenous enzymes improve the aroma quality of Wuyi rock tea[J]. Food Research and Development, 2023, 44(5): 155-164.(in Chinese)

[21] 马小雨，罗彩萍，刘悦. 响应面优化微波辅助绿茶茶多酚提取工艺[J]. 药学实践与服务，2023，41(2)：119-124，134.
MA X Y, LUO C P, LIU Y. Optimization of microwave-assisted extraction of green tea polyphenols by response surface methodology[J]. Journal of Pharmaceutical Practice and Service, 2023, 41(2): 119-124, 134.(in Chinese)

[22] 罗兰心，姜青，李翔，等. 生物酶法提取铁观音茶梗中茶多酚工艺技术研究[J]. 食品研究与开发，2020，41(24)：79-85.
LUO L X, JIANG Q, LI X, et al. Study on technique of compound enzyme extraction of tea polyphenols from Tieguanyin tea stalks[J]. Food Research and Development, 2020, 41(24): 79-85.(in Chinese)

[23] 端木传宇，孙洋，张瑜，等. 黑莓多糖酶法提取工艺优化及体外降血糖活性研究[J]. 食品工业科技，2024，45(22)：200-207.
DUANMU C Y, SUN Y, ZHANG Y, et al. Optimization of enzymatic extraction process and *in vitro* hypoglycemic activity of blackberry polysaccharides[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(22): 200-207.(in Chinese)

[24] 李培睿，王丽娜. 超声波辅助提取绿茶中茶多酚的工艺研究[J]. 许昌学院学报，2021，40(5)：71-74.
LI P R, WANG L N. Extraction process of TP from green tea assisted by ultrasonic wave[J]. Journal of Xuchang University, 2021, 40(5): 71-74.(in Chinese)

[25] 徐如飞，金哲晨，许良，等. 超声波提取安吉白茶茶多酚工艺的优化[J]. 贵州农业科学，2020，48(6)：115-119.
XU R F, JIN Z C, XU L, et al. Optimization of ultrasonic extraction technology for extracting polyphenols from Anji white tea[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2020, 48(6): 115-119.(in Chinese)

[26] ZHANG S W, SUN L L, WEN S, et al. Analysis of aroma quality changes of large-leaf black tea in different storage years based on HS-SPME and GC-MS[J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 100991.

[27] 杨沅思，坤吉瑞，代洪苇，等. 晒青绿茶加工过程香气物质及其部分前体变化分析[J]. 食品科学，2024，45(1)：133-142.
YANG Y S, KUN J R, DAI H W, et al. Changes in aroma compounds and selected precursors of Sun-dried green tea during processing[J]. Food Science, 2024, 45(1): 133-142.(in Chinese)

[28] ALASALVAR C, TOPAL B, SERPEN A, et al. Flavor characteristics of seven grades of black tea produced in Turkey[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(25): 6323-6332.

[29] 牛淼，李雄宇，杨洪焱，等. 传统滇红工夫红茶与野生滇红工夫红茶香气特征分析[J]. 食品工业科技，2024，45(23)：229-239.
NIU M, LI X Y, YANG H Y, et al. Analysis of aroma

characteristics of traditional and wild Dianhong Congou black tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(23): 229-239.(in Chinese)

[30] WANG B Y, CHEN H M, QU F F, et al. Identification of aroma-active components in black teas produced by six Chinese tea cultivars in high-latitude region by GC-MS and GC-O analysis[J]. European Food Research and Technology, 2022, 248(3): 647-657.

[31] 梁轶琳,张灵枝,戴浩民,等. HS-SPME-GC-MS分析武夷岩茶呈香挥发性物质[J]. 食品与生物技术学报,2024,43(5):110-121.
LIANG Y L, ZHANG L Z, DAI H M, et al. Analysis of aroma volatile compounds in Wuyi rock tea based on HS-SPME-GC-MS [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2024, 43(5): 110-121.(in Chinese)

[32] 魏昊, 蓝天梦, 缪伊雯, 等. 基于感官组学分析不同足火方式对金牡丹工夫红茶香气的影响[J]. 茶叶科学, 2023, 43(1): 109-123.
WEI H, LAN T M, MIAO Y W, et al. Analysis of the effect of different full firing methods on the aroma of Jinmudan Congou black tea based on sensomics characterization[J]. Journal of Tea Science, 2023, 43(1): 109-123.(in Chinese)

[33] MAO S H, LU C Q, LI M F, et al. Identification of key aromatic compounds in Congou black tea by partial least-square regression with variable importance of projection scores and gas chromatography-mass spectrometry/gas chromatography-olfactometry[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(14): 5278-5286.

[34] 艾安涛, 陈曦, 李燕丽, 等. 不同品种“遵义红”红茶香气成分分析[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(4): 103-111.
AI A T, CHEN X, LI Y L, et al. Analysis of aroma components in different varieties of “Zunyi red” black tea [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(4): 103-111.(in Chinese)

[35] WANG J T, ZHU Y, SHI J, et al. Discrimination and identification of aroma profiles and characterized odorants in citrus blend black tea with different citrus species[J]. Molecules, 2020, 25(18): 4208.

[36] 周佳, 苏丹, 王志霞, 等. 基于HS-SPME-GC-MS和多元统计分析三种红茶特征挥发性成分[J]. 食品工业科技, 2023, 44(17): 342-350.
ZHOU J, SU D, WANG Z X, et al. Analysis of characteristic volatile components of three kinds of black tea based on HS-SPME-GC-MS and multivariate statistics[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(17): 342-350.(in Chinese)

[37] YE F, GUO X B, LI B, et al. Characterization of effects of different tea harvesting seasons on quality components, color and sensory quality of “Yinghong 9” and “Huangyu” large-leaf-variety black tea[J]. Molecules, 2022, 27(24): 8720.

[38] LIU H C, XU Y J, WU J J, et al. GC-IMS and olfactometry analysis on the tea aroma of Yingde black teas harvested in different seasons[J]. Food Research International, 2021, 150: 110784.

[39] WANG J J, QU L C, YU Z M, et al. Targeted quantitative metabolomic and flavor objective quantification technique reveal the impact mechanism of shaking on black tea quality and non-volatile metabolites[J]. Food Chemistry, 2024, 458: 140226.