DOI:10.12441/spyswjs.20240807001 [文章编号] 1673-1689(2025)08-0148-14

外源酶处理对夏季绿茶品质及主要成分的影响

陈善敏 罗红玉 王 奕 常 睿 袁林颖 杨 娟*

(重庆市农业科学院茶叶研究所,重庆 402160)

摘要:【目的】研究外源酶处理对夏季绿茶品质的影响并优化酶处理条件。**【方法】**采用感官审评对经6种外源酶处理的茶样进行评价与筛选,结合电子舌和化学计量学方法研究纤维素酶和单宁酶及其处理条件对夏季绿茶感官品质、苦涩滋味属性及主要成分的影响,并通过系统聚类分析、相关性分析和主成分分析(principal component analysis,PCA)确定2种酶的最优处理条件。**【结果】**感官审评结果显示,纤维素酶和单宁酶对茶样风味品质改善效果最为显著。电子舌检测和生化成分分析结果表明,2种酶处理均能显著降低茶样中苦味、涩味预测质量浓度及茶多酚与酯型儿茶素(ester-type catechins,ETC)质量分数,同时提高可溶性糖、非酯型儿茶素(non-ester-type catechins,NEC)、没食子酸(gallic acid,GA)水平,且单宁酶效果优于纤维素酶。系统聚类分析和PCA结果表明,外源酶处理组茶样品质与对照组差异较大,其中影响茶样品质的核心因素为涩味预测质量浓度和感官得分;2种外源酶的最优处理条件为:酶浓度30 U/mL、料液比1 kg∶20 mL、处理时间40 min。**【结论】**该研究可为利用外源酶改善夏季绿茶滋味品质、提升夏季茶鲜叶资源利用率提供理论依据。

关键词:外源酶;夏季绿茶;品质成分;电子舌

Effects of Exogenous Enzyme Treatment on Quality and Main Components of Summer Green Tea

*CHEN Shanmin LUO Hongyu WANG Yi CHANG Rui YUAN Linying YANG Juan**

(Tea Research Institute, Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 402160, China)

Abstract: [**Objective**] This study aims to investigate the effect of exogenous enzyme treatment on the quality of summer green tea and optimize the enzyme treatment conditions. [**Method**] Sensory evaluation was employed to evaluate and screen the tea samples treated with six exogenous enzymes. The effects of cellulase, tannase, and treatment conditions on the sensory quality, bitter/astringent taste attributes, and main biochemical components of summer green tea were studied by electronic tongue and chemometrics methods. The optimal treatment conditions of cellulase and tannase were comprehensively evaluated by hierarchical cluster analysis, correlation analysis, and principal component analysis (PCA). [**Result**] Sensory evaluation revealed that cellulase and tannase significantly improved the flavor quality of tea samples. Electronic tongue and biochemical component analysis indicated that both enzyme treatments significantly reduced the predicted mass concentrations of bitterness/astringency as well as the mass fractions of tea polyphenols and ester-type catechins (ETC) while increasing the levels of soluble sugars, non-ester-type catechins (NEC), and gallic acid (GA). Moreover, tannase demonstrated a superior effect compared with cellulase. Hierarchical cluster analysis and PCA showed significant difference between exogenous enzyme-treated tea samples and control tea samples. Predicted mass concentrations of astringency and sensory score were identified as key factors affecting the overall quality of tea samples. The optimal treatment conditions of

基金项目:重庆市农业科学院绩效激励引导专项项目(cqaas2022jxjl004)。

通信作者:杨娟(1986—),女,硕士,副研究员,主要从事茶叶加工及多元化利用研究。E-mail:409346324@qq.com

收稿日期:2024-08-07 **修回日期:**2024-10-11

cellulase and tannase were enzyme concentration of 30 U/mL, solid-to-liquid ratio of 1 kg:20 mL, and treatment time of 40 min. [**Conclusion**] The results of this study can provide theoretical support for improving the taste quality of summer green tea with exogenous enzymes and the utilization of fresh summer tea leaves.

Keywords: exogenous enzyme; summer green tea; quality component; electronic tongue

绿茶是我国产销量最高的茶类，具有清香持久、滋味醇厚鲜爽且回甘的风味特征[1]。然而，夏季绿茶滋味品质较差[2]，这导致每年约30%的夏季茶鲜叶难以被有效利用[3]，严重阻碍了茶产业的健康发展。而改善夏季绿茶滋味品质是提升夏季茶鲜叶利用效率的关键。有研究表明，夏季绿茶的滋味以苦涩味为主，其中ETC和咖啡碱（CAF）等物质是构成苦涩味的关键呈味物质[4]。因此，调控呈苦、呈涩物质水平对改善夏季绿茶口感具有重要意义。

外源酶具有改善食品感官品质和风味品质的作用[5]，其中糖苷酶、纤维素酶、单宁酶等在茶叶加工领域应用较为广泛。纤维素酶在改善红茶品质方面具有积极作用[6]。Chiang等[7]发现纤维素酶可显著降低夏秋红茶中儿茶素（catechin，C）含量，增加茶色素含量，提升爽口性与抗氧化活性。单宁酶因能催化ETC或单宁的水解，在降低绿茶茶汤苦涩味方面展现出较大的应用潜力[8]。Cao等[9]利用单宁酶改善了秋季绿茶的口感，显著降低了苦涩味，使其回味甘甜。上述研究均表明，外源酶对改善茶叶口感具有积极作用，但当前研究也存在一定的局限性：第一，纤维素酶多用于红茶加工，应用于绿茶加工的相关报道较为少见；第二，多数研究聚焦单一酶对茶叶品质的影响，针对外源酶的筛选及酶处理条件优化的研究鲜有报道。

作者针对夏季绿茶苦涩味重、滋味品质差导致鲜叶资源利用率低的产业难题，首先筛选出可用于改善夏季绿茶滋味品质的外源酶；再利用电子舌技术与化学计量学方法，分析不同外源酶处理对夏季绿茶感官品质、苦涩味和主要成分的影响；最终结合系统聚类分析、相关性分析和PCA，确定纤维素酶和单宁酶的最优处理条件，以期为通过外源酶提升夏季绿茶滋味品质、促进夏季茶鲜叶资源高效利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

茶鲜叶：2022年6月中旬采摘自茶园基地（北纬29°75′，东经105°71′，海拔440 m），品种为‘福鼎大白茶’，采摘标准为1芽2~3叶。

CAF、GA、C、表儿茶素（epicatechin，EC）、没食子儿茶素（gallocatechin，GC）、表没食子儿茶素（epigallocatechin，EGC）、表儿茶素没食子酸酯（epicatechin gallate，ECG）、没食子儿茶素没食子酸酯（gallocatechin gallate，GCG）、表没食子儿茶素没食子酸酯（epigallocatechin gallate，EGCG）标准品：美国Sigma公司；福林酚、水合茚三酮、蒽酮等：分析纯，重庆铂锶钛科技有限公司；单宁酶（200 U/g）、漆酶（120 U/g）、β-葡萄糖苷酶（100 U/g）、脂肪氧合酶（50 000 U/g）、蛋白酶（10 000 U/g）：上海源叶生物科技有限公司；纤维素酶（10 000 U/g）：上海麦克林生化科技有限公司。

1.2 仪器与设备

电子舌：Smartongue型，上海瑞玢智能科技有限公司；高效液相色谱仪：Agilent-1200型，美国安捷伦科技有限公司；酶标仪：IVD型，美国Thermo Fisher Scientific公司。

1.3 方法

1.3.1 夏季绿茶加工工艺

茶鲜叶采摘后置于萎凋槽中摊放4~6 h（厚度5~10 cm），采用滚筒杀青机进行杀青（温度280~300 ℃，时间40~45 s，投叶量20~30 kg/h），摊凉后按“轻—重—轻”原则揉捻20~28 min，随后进行解块。取解块叶500 g，加入外源酶进行酶处理，期间翻动2~3次；酶处理后进行干燥处理（毛火100~110 ℃，10~15 min；足火90 ℃，25~30 min），得到成品绿茶。

1.3.2 外源酶种类筛选

将单宁酶、漆酶、β-葡萄糖苷酶、脂肪氧合酶、蛋白酶和纤维素酶分别配制成酶浓度为30 U/mL的酶液。在料液比1 kg∶20 mL的条件下处理40 min，另设对照组。各组均按1.3.1节的方法进行加工，得到成品绿茶。取成品绿茶进行感官审评，以筛选后续试验所需的外源酶。

1.3.3 外源酶处理试验设计

选用效果较好的外源酶，研究其酶浓度、料液比和处理时间对夏季绿茶感官得分和主要成分的影响，以优化酶处理条件。设置对照组为CK组。

1）酶浓度优化：将外源酶分别配制成酶浓度为 10、20、30、40、50 U/mL 的酶液，料液比为 1 kg∶20 mL，用小型喷雾器将酶液均匀喷洒在揉捻叶上，充分混匀后，处理 40 min。其中单宁酶酶浓度为 10~50 U/mL 的样品编号为 TC1~TC5，纤维素酶酶浓度为 10~50 U/mL 的样品编号为 CC1~CC5。

2）料液比优化：设定酶浓度为 30 U/mL，料液比分别为 1 kg∶10 mL、1 kg∶20 mL、1 kg∶30 mL、1 kg∶40 mL、1 kg∶50 mL，酶液喷洒混匀后，处理 40 min。其中单宁酶料液比由高到低的样品编号为 TR1~TR5，纤维素酶由高到低的样品编号为 CR1~CR5。

3）处理时间优化：设定酶浓度为 30 U/mL，料液比为 1 kg∶20 mL，酶液喷洒混匀后，分别处理 20、40、60、80、120 min。其中单宁酶处理时间为 20~120 min 的样品编号为 TT1~TT5，纤维素酶处理时间为 20~120 min 的样品编号为 CT1~CT5。

1.3.4 感官审评

参照 GB/T 23776—2018《茶叶感官审评方法》，由 5 名审评员对茶样进行感官审评，各感官指标评分占比为：干茶外观 5%、汤色 10%、香气 35%、滋味 45%、叶底 5%。

1.3.5 主要成分的测定

采用干燥法[10]测定水浸出物质量分数；采用蒽酮比色法[11]测定可溶性糖质量分数；采用茚三酮比色法[12]测定游离氨基酸总量；采用高效液相色谱法[13]测定茶多酚、C 质量分数。其中酯型儿茶素总和（total ester-type catechins，TE）为 EGCG、GCG、ECG 质量分数之和，非酯型儿茶素总和（total non-ester-type catechins，TNE）为 GC、EGC、C、EC 质量分数之和。酯型儿茶素降解率（degradation rate of ester-type catechins，DRE）、非酯型儿茶素生成率（production rate of non-ester catechins，PRN）和 GA 生成倍数计算方法分别见式（1）~（3）。

$$d=\frac{(w_{cte}-w_{ete})}{w_{cte}}\times 100\% \quad (1)$$

式中：

d——DRE，%；

w_{cte}——对照组中 TE，g/100 g；

w_{ete}——酶处理组中 TE，g/100 g。

$$p=\frac{(w_{etn}-w_{ctn})}{w_{ctn}}\times 100\% \quad (2)$$

式中：

p——PRN，%；

w_{ete}——酶处理组中 TE，g/100 g；

w_{cte}——对照组中 TE，g/100 g。

$$f=\frac{w_{eg}}{w_{cg}} \quad (3)$$

式中：

f——GA 生成倍数；

w_{eg}——处理组中 GA 质量分数，g/100 g；

w_{cg}——对照组中 GA 质量分数，g/100 g。

1.3.6 电子舌分析

取酶处理后的茶汤，参照常睿等[14]的方法检测样品的滋味，采用偏最小二乘法（partial least square，PLS）分析建模，并进行苦味、涩味质量浓度预测。

1.4 数据分析

电子舌检测重复 6 次，其他试验重复 3 次，取平均值。采用 R 语言（version 4.1.2）对数据进行相关性分析，使用 SPSS 26.0 进行显著性分析和 PCA。

2 结果与讨论

2.1 不同外源酶及其处理条件下茶样感官品质分析

2.1.1 外源酶种类对茶样感官品质的影响

由表 1 可知，与 CK 组相比，除单宁酶组外，其他外源酶处理组的干茶外观润度均有一定程度降低；单宁酶、β-葡萄糖苷酶和纤维素酶处理对汤色均有改善作用，使汤色呈浅绿或绿色；单宁酶、β-葡萄糖苷酶、脂肪氧合酶、蛋白酶和纤维素酶处理使香气由栗香转变为清香或花香；另外，单宁酶和纤维素酶对茶汤苦涩味的改善效果较为明显，能使茶汤滋味更加醇爽，但这 2 种外源酶处理会导致叶底黄度增加、亮度降低。感官总分由高到低为：纤维素酶组（90.2 分）>单宁酶组（90.0 分）>脂肪氧合酶组（88.1 分）>β-葡萄糖苷酶组（87.3 分）>CK 组（86.4 分）。综上，选择纤维素酶和单宁酶进行后续试验。

2.1.2 单宁酶处理对茶样感官品质的影响

由表 2 可知，经单宁酶处理后，干茶外观呈绿润或较绿润状态，汤色浅绿明亮，香气为清香、有花香或栗香、爽，滋味则由粗老味、苦涩向醇爽转变，但单宁酶酶浓度过高易导致茶汤滋味淡薄、叶底变暗。当单宁酶酶酶浓度为 20、30 U/mL 时，茶样感官总分分别为 88.9 分、90.0 分，明显高于 CK 组（83.9 分）。单宁酶料液比及处理时间均会影响茶样香气，可使香气由弱栗香转变为持久栗香。料液比在 1 kg∶10 mL、1 kg∶20 mL 时

表1　6种外源酶处理后茶样的感官审评结果

Table 1　Results of sensory evaluation of tea samples treated with six exogenous enzymes

组别	干茶外观		汤色		香气		滋味		叶底		总分/分
	评语	得分/分	评语	得分/分	评语	得分/分	评语	得分/分	评语	得分/分	
CK组	黄绿、较润	89.0	黄绿、明亮	88.0	栗香、弱	87.0	味苦涩、较醇	85.0	黄绿、明亮	89.0	86.4
单宁酶组	绿润	90.0	浅绿、明亮	91.0	清香、有花香	90.0	醇爽	90.0	黄绿、亮	87.0	90.0
漆酶组	黄绿	85.0	浅绿黄、明亮	84.0	甜香、弱	84.0	滋味淡	80.0	较黄绿、亮	84.0	82.3
β-葡萄糖苷酶组	较绿润	88.0	绿、明亮	89.0	清香、爽	88.0	较醇	86.0	黄绿、明亮	89.0	87.3
脂肪氧合酶组	黄绿、欠润	85.0	黄绿、亮	85.0	清香、淡蜜香、爽	90.0	较醇、爽	88.0	较黄绿、亮	85.0	88.1
蛋白酶组	较黄绿、尚润	84.0	黄绿、明亮	87.0	清香	86.0	较醇	85.0	黄绿、亮	86.0	85.6
纤维素酶组	黄绿、尚润	83.0	绿、明亮	90.0	花香	91.0	醇爽	91.0	黄绿、较亮	85.0	90.2

表2　单宁酶处理下茶样的感官审评结果

Table 2　Results of sensory evaluation of tea samples treated with tannase

组别	干茶外观		汤色		香气		滋味		叶底		总分/分
	评语	得分/分	评语	得分/分	评语	得分/分	评语	得分/分	评语	得分/分	
CK组	较绿润	90.0	黄绿、明亮	87.0	栗香、香低、纯正	84.0	粗老味、苦涩	82.0	黄绿、明亮	89.0	83.9
TC1组	较绿润	87.0	浅绿、明亮	90.0	清香、弱	86.0	醇爽	90.0	较黄绿、亮	84.0	88.2
TC2组	黄绿、较鲜活	87.0	浅绿、较明亮	89.0	栗香、爽	89.0	醇爽	89.0	黄绿、明亮	88.0	88.9
TC3组	绿润	90.0	浅绿、明亮	91.0	清香、有花香	90.0	醇爽	90.0	黄绿、亮	87.0	90.0
TC4组	较深绿、较鲜活	89.0	浅绿、明亮	88.0	栗香、爽	88.0	醇	87.0	黄绿、明亮	87.0	87.6
TC5组	较绿润	86.0	浅绿、亮	87.0	清香、有花香	89.0	醇淡	83.0	较黄绿、亮	85.0	85.8
TR1组	较绿润	88.0	浅绿、较亮	85.0	栗香、持久	89.0	醇和	84.0	黄绿、亮	86.0	86.2
TR2组	较绿润	87.0	浅绿、较亮	84.0	栗香、持久	89.0	醇和	84.0	黄绿、亮	86.0	86.0
TR3组	较绿润	87.0	浅绿	83.0	栗香、持久	89.0	醇和	84.0	黄绿、亮	86.0	85.9
TR4组	较绿润	87.0	浅绿	83.0	栗香、欠爽	87.0	醇淡	82.0	黄绿、亮	86.0	84.3
TR5组	较绿润	87.0	浅绿、偏黄	81.0	甜香、弱	84.0	醇淡	82.0	较黄绿、亮	84.0	83.0
TT1组	较绿润	87.0	浅绿、亮	86.0	栗香、弱	86.0	味苦涩	82.0	黄绿、亮	88.0	84.4
TT2组	较绿润	87.0	浅绿、较亮	85.0	栗香	88.0	醇和	84.0	黄绿、亮	86.0	85.8
TT3组	较绿润	87.0	浅绿、较亮	85.0	栗香	88.0	醇和	84.0	黄绿、亮	86.0	85.8
TT4组	较绿润	87.0	浅绿	84.0	栗香、较浓	89.0	醇和	84.0	黄绿、亮	86.0	86.0
TT5组	较绿润	87.0	浅绿	83.0	香气淡薄	82.0	醇淡	82.0	黄绿、亮	86.0	82.6

感官总分较高，分别为86.2分、86.0分。处理时间优化结果表明，单宁酶处理时间过长会导致香气淡薄，处理时间为80 min时茶样总分最高（86.0分），处理时间为40、60 min时的感官总分与80 min差异较小。综上，单宁酶处理可显著改善夏季绿茶的滋味和香气，降低茶样苦涩味，提升香气浓度，但对其他感官指标存在一定的负面影响。单宁酶的最优处理条件为：单宁酶酶浓度20 U/mL或30 U/mL、料液比1 kg∶10或1 kg∶20 mL、处理时间40~80 min。

2.1.3　纤维素酶处理对茶样感官品质的影响

由表3可知，经纤维素酶处理后，干茶外观和叶底的感官得分明显降低，茶样色泽变黄、亮度下降。当纤维素酶酶浓度为30 U/mL时，茶样汤色绿且明亮，呈花香，滋味醇爽，感官总分最高，为90.2分。纤维素酶料液比及处理时间对汤色、香气和滋味得分具有正面影响。随着纤维素酶料液比的增大，汤色由黄绿变为绿或较绿，香气转变为持久栗香，滋味醇度改善，当料液比为1 kg∶20 mL时，茶样综合品质最佳，总分为88.4分。随着纤维素酶处理时间的延长，汤色亮度逐渐提升，香气和滋味品质得到改善，使茶样呈持久栗香或清香，粗老味转变为醇、较爽或较醇，处理时间为40 min时，感官总分最高（88.6分）。综

上，纤维素酶处理对茶样的汤色、香气和滋味具有明显改善作用，纤维素酶的最优处理条件为：纤维素酶酶浓度 30 U/mL、料液比 1 kg∶20 mL、处理时间 40 min。

表 3　纤维素酶处理下茶样的感官审评结果

Table 3　Results of sensory evaluation of tea samples treated with celluase

组别	干茶外观		汤色		香气		滋味		叶底		总分/分
	评语	得分/分	评语	得分/分	评语	得分/分	评语	得分/分	评语	得分/分	
CK 组	黄绿、较润	88.0	黄绿、明亮	87.0	纯正	83.0	味苦涩	82.0	黄绿、明亮	89.0	83.5
CC1 组	较黄绿、尚润	82.0	浅绿、明亮	91.0	花香	90.0	醇爽	90.0	较黄绿、较亮	84.0	89.4
CC2 组	黄绿、较润	89.0	较绿、明亮	88.0	甜香	90.0	醇、较爽	89.0	较黄绿、较亮	84.0	89.0
CC3 组	黄绿、尚润	83.0	绿、明亮	90.0	花香	91.0	醇爽	91.0	黄绿、较亮	85.0	90.2
CC4 组	深绿、较润	84.0	黄绿、明亮	87.0	清栗香、爽	91.0	醇爽	91.0	较黄绿、较亮	84.0	89.9
CC5 组	较黄绿、较润	84.0	黄绿、亮	85.0	清香	87.0	醇	87.0	黄绿、较亮	87.0	86.7
CR1 组	黄绿、较润	89.0	绿、明亮	90.0	栗香、持久	89.0	醇	86.0	黄绿、明亮	88.0	87.7
CR2 组	黄绿、欠润	82.0	较绿、明亮	88.0	清栗香	90.0	醇、较爽	88.0	黄绿、较亮	88.0	88.4
CR3 组	黄绿、较润	86.0	较绿、明亮	87.0	栗香、较浓	88.0	醇	85.0	较黄绿、明亮	87.0	86.4
CR4 组	黄绿、欠润	81.0	较绿、亮	86.0	栗香、浅	86.0	较醇	84.0	较黄绿、亮	86.0	84.9
CR5 组	黄绿、欠润	81.0	较绿、明亮	87.0	栗香、纯正	86.0	味苦涩、尚醇	82.0	黄绿、明亮	89.0	84.2
CT1 组	绿、较润	89.0	较绿、明亮	86.0	清香、弱	85.0	粗老味	82.0	黄绿、明亮	89.0	84.2
CT2 组	黄绿、较润	88.0	绿、明亮	90.0	栗香、持久	89.0	醇、较爽	88.0	黄绿、明亮	88.0	88.6
CT3 组	黄绿、较润	88.0	黄绿、明亮	87.0	甜香、栗香	89.0	较醇	86.0	黄绿、明亮	88.0	87.4
CT4 组	黄绿、较润	86.0	较绿、明亮	87.0	清香、甜香、弱	87.0	较醇	85.0	较黄绿、明亮	87.0	86.1
CT5 组	较黄绿、较润	85.0	绿、明亮	89.0	清香	88.0	较醇、涩	83.0	较黄绿、亮	86.0	85.6

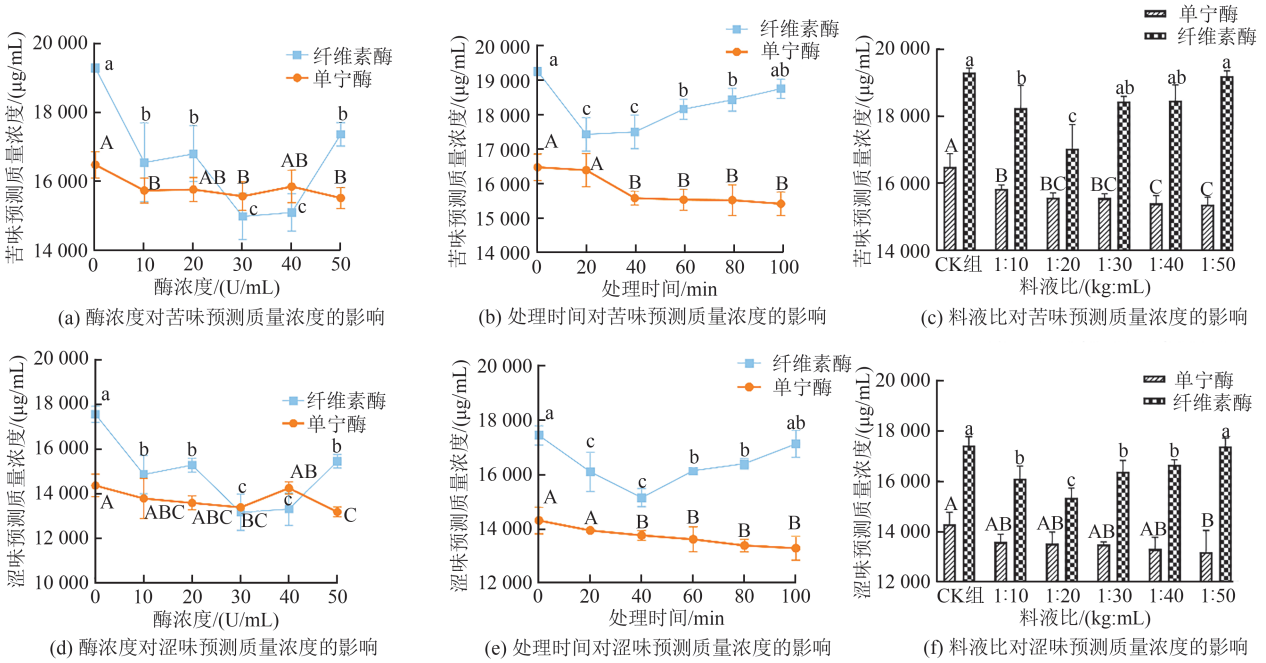
2.2　不同外源酶处理下茶汤苦涩滋味分析

电子舌可快速鉴别茶汤滋味属性，已广泛应用于茶叶品质评价[15]。不同外源酶处理下茶汤苦涩滋味结果见图 1。随着单宁酶酶浓度增大，茶汤的苦味、涩味预测质量浓度呈现先降低后升高再降低的趋势，且在单宁酶酶浓度为 30、50 U/mL 时与 CK 组均存在显著差异（P<0.05）。随着纤维素酶酶浓度增大，茶汤的苦味、涩味预测质量浓度整体呈现先降低后升高的趋势，且均显著低于 CK 组（P<0.05）；纤维素酶酶浓度为 30、40 U/mL 时，茶汤苦味、涩味预测质量浓度均最低。当单宁酶处理时间≥40 min 时，茶汤苦味、涩味预测质量浓度显著降低（P<0.05）。随着单宁酶料液比减小，茶汤苦味、涩味预测质量浓度持续降低，且在 1 kg∶50 mL 时均与 CK 组存在显著差异（P<0.05）。随着纤维素酶料液比的减小，茶汤苦味、涩味预测质量浓度先降低后升高，苦味预测质量浓度在 1 kg∶10 mL、1 kg∶20 mL 时显著低于 CK 组（P<0.05）。综上，当单宁酶酶酶浓度为 30 U/mL 或 50 U/mL、料液比为 1 kg∶50 mL、处理时间≥40 min 时茶汤苦味、涩味预测质量浓度较低；当纤维素酶酶浓度为 30 U/mL 或 40 U/mL、料液比为 1 kg∶10 mL 或 1 kg∶20 mL、处理时间≥40 min 时茶汤苦味、涩味预测质量浓度较低。

2.3　不同外源酶处理条件下茶样主要成分分析

2.3.1　外源酶处理对茶样主要成分的影响

茶汤中水浸出物、可溶性糖、游离氨基酸、茶多酚、CAF 等成分均会影响茶汤口感，其中水浸出物主要与物质感、醇厚感相关；可溶性糖主要与甜味、回甜味相关；游离氨基酸是茶汤鲜、爽、甜的重要滋味化合物；茶多酚主要贡献苦涩浓强滋味；而 CAF 则与苦味密切相关[16]。由表 4 可知，随着单宁酶酶酶浓度增加，茶汤中游离氨基酸总量逐渐降低，茶多酚质量分数呈先降低后升高的趋势。当单宁酶处理时间≥20 min 时，茶汤中水浸出物、可溶性糖质量分数明显高于 CK 组，游离氨基酸总量则显著低于 CK 组（P<0.05）。单宁酶料液比优化试验结果表明，与 CK 组对比，其他组的水浸出物质量分数增加，而游离氨基酸总量、茶多酚、CAF 质量分数降低；其中单宁酶料液比为 1 kg∶10 mL、1 kg∶30 mL 时，水浸出物和茶多酚质量分数与 CK 组有显著差异（P<0.05）。综上，单宁酶处理可使茶汤中水浸出



(a) 酶浓度对苦味预测质量浓度的影响　(b) 处理时间对苦味预测质量浓度的影响　(c) 料液比对苦味预测质量浓度的影响

(d) 酶浓度对涩味预测质量浓度的影响　(e) 处理时间对涩味预测质量浓度的影响　(f) 料液比对涩味预测质量浓度的影响

不同大写字母代表在单宁酶处理组中差异显著（P<0.05）；不同小写字母代表在纤维素酶处理组中差异显著（P <0.05）。

图 1　不同外源酶处理条件下茶样苦涩滋味结果

Fig. 1　Bitter and astringent taste properties of tea sample treated with different exogenous enzymes

表 4　单宁酶处理下茶样中主要成分结果

Table 4　Main biochemical components of tea samples treated with tannase　　单位：g/100 g

因素	组别	水浸出物质量分数	可溶性糖质量分数	游离氨基酸总量	茶多酚质量分数	CAF质量分数
酶浓度	CK组	37.57±1.85^{a}	2.14±0.07^{b}	2.94±0.07^{a}	20.25±0.08^{a}	3.77±0.08^{b}
	TC1组	37.25±1.73^{a}	2.43±0.10^{a}	2.13±0.20^{bc}	17.47±0.69^{b}	4.54±0.12^{a}
	TC2组	37.37±0.29^{a}	2.44±0.05^{a}	2.22±0.02^{b}	17.33±1.47^{b}	4.15±0.31^{ab}
	TC3组	39.10±1.98^{a}	2.46±0.04^{a}	1.94±0.18^{cd}	16.91±0.89^{b}	4.14±0.53^{ab}
	TC4组	39.05±1.08^{a}	2.45±0.04^{a}	1.85±0.02^{d}	17.52±0.30^{b}	4.15±0.44^{ab}
	TC5组	38.86±4.14^{a}	2.46±0.04^{a}	1.77±0.05^{d}	18.33±1.14^{ab}	4.05±0.12^{ab}
处理时间	CK组	37.57±1.85^{b}	2.14±0.07^{b}	2.94±0.07^{a}	20.25±0.08^{a}	3.77±0.08^{a}
	TT1组	42.08±1.54^{a}	2.76±0.18^{a}	1.94±0.02^{d}	19.13±0.58^{ab}	3.63±0.13^{a}
	TT2组	43.22±1.74^{a}	2.92±0.05^{a}	2.21±0.09^{c}	19.08±0.10^{ab}	3.78±0.11^{a}
	TT3组	44.27±1.76^{a}	2.94±0.02^{a}	2.37±0.04^{b}	19.26±0.35^{ab}	3.79±0.09^{a}
	TT4组	41.51±0.70^{ab}	2.96±0.03^{a}	2.21±0.07^{c}	19.40±0.24^{ab}	3.82±0.15^{a}
	TT5组	41.63±2.61^{ab}	2.82±0.08^{a}	1.94±0.11^{d}	18.09±1.21^{b}	3.72±0.11^{a}
料液比	CK组	37.57±1.85^{b}	2.14±0.07^{a}	2.94±0.07^{a}	20.25±0.08^{a}	3.77±0.08^{a}
	TR1组	43.81±4.49^{a}	2.01±0.06^{a}	1.89±0.16^{bc}	17.91±0.62^{c}	3.46±0.38^{a}
	TR2组	42.40±0.87^{ab}	2.15±0.15^{a}	1.85±0.09^{c}	19.53±0.26^{ab}	3.60±0.25^{a}
	TR3组	44.51±1.92^{a}	2.08±0.10^{a}	2.13±0.15^{b}	18.54±1.03^{bc}	3.54±0.30^{a}
	TR4组	43.67±0.99^{a}	2.23±0.10^{a}	1.93±0.05^{bc}	19.34±0.23^{ab}	3.45±0.17^{a}
	TR5组	41.41±1.45^{ab}	2.08±0.07^{a}	1.85±0.10^{c}	19.19±0.72^{abc}	3.37±0.03^{a}

注：不同小写字母代表在同一因素同一指标下差异显著（P<0.05）。

物和可溶性糖质量分数增加，游离氨基酸和茶多酚质量分数降低；适宜的单宁酶处理条件为：单宁酶酶浓度 10~40 U/mL、料液比 1 kg∶10 mL 或 1 kg∶30 mL、处理时间 20~80 min。

由表 5 可知，在纤维素酶酶浓度优化试验中，与 CK 组相比，其他组的可溶性糖质量分数显著升高（P<0.05），游离氨基酸总量和茶多酚质量分数明显降低。随着纤维素酶处理时间的延长，水

浸出物和可溶性糖质量分数明显升高，游离氨基酸总量呈先降低后升高的趋势，茶多酚和CAF质量分数持续降低。其中水浸出物和CAF质量分数在处理时间为40 min、其他成分在处理时间为20 min时，与CK组有显著差异（P<0.05）。在纤维素酶料液比优化试验中，与CK组相比，其他组的水浸出物和可溶性糖质量分数升高，CAF质量分数降低；当纤维素酶料液比为1 kg∶10 mL时，水浸出物、可溶性糖、茶多酚、CAF质量分数与CK组相比有显著差异（P<0.05），CAF质量分数在料液比为1 kg∶50 mL时达到最低值。综上，外源酶处理丰富了茶汤物质感，增加了可溶性糖质量分数，降低了苦涩味物质水平，推测这可能对茶汤滋味具有改善作用。

表5 纤维素酶处理下茶样中主要成分结果

Table 5 Main biochemical components of tea samples treated with celluase 单位：g/100 g

因素	组别	水浸出物质量分数	可溶性糖质量分数	游离氨基酸总量	茶多酚质量分数	CAF质量分数
酶浓度	CK组	37.57±1.85^{a}	2.14±0.07^{c}	2.94±0.07^{a}	19.06±0.42^{a}	3.73±0.26^{b}
	CC1组	43.23±1.37^{a}	3.21±0.16^{ab}	2.07±0.06^{bc}	16.72±1.14^{b}	4.12±0.18^{a}
	CC2组	42.04±6.00^{a}	3.21±0.09^{ab}	1.96±0.01^{c}	16.27±0.74^{b}	3.61±0.07^{bc}
	CC3组	40.01±6.53^{a}	3.35±0.14^{a}	1.92±0.20^{c}	15.44±0.58^{b}	3.86±0.05^{ab}
	CC4组	42.63±1.81^{a}	3.01±0.10^{b}	2.12±0.13^{bc}	16.32±0.51^{b}	3.36±0.09^{c}
	CC5组	44.14±0.26^{a}	3.03±0.11^{b}	2.21±0.03^{b}	18.79±0.30^{a}	3.86±0.20^{ab}
处理时间	CK组	37.57±3.39^{d}	2.14±0.07^{c}	2.94±0.07^{a}	19.06±0.42^{a}	3.73±0.26^{a}
	CT1组	43.12±2.40^{bc}	2.78±0.07^{b}	2.18±0.12^{b}	17.73±0.56^{b}	3.57±0.20^{a}
	CT2组	43.64±1.79^{bc}	2.92±0.12^{ab}	2.80±0.08^{a}	17.36±0.45^{b}	3.35±0.09^{ab}
	CT3组	46.22±4.13^{a}	2.99±0.02^{a}	2.91±0.07^{a}	17.06±0.42^{b}	3.35±0.35^{ab}
	CT4组	42.79±1.96^{c}	2.99±0.06^{a}	2.85±0.18^{a}	16.73±0.77^{b}	3.33±0.13^{ab}
	CT5组	44.77±2.97^{ab}	3.05±0.09^{a}	2.90±0.03^{a}	16.62±0.43^{b}	3.08±0.16^{b}
料液比	CK组	37.57±1.85^{b}	2.14±0.07^{b}	2.94±0.07^{a}	19.06±0.42^{a}	3.73±0.26^{a}
	CR1组	43.44±0.46^{a}	3.02±0.03^{a}	2.90±0.04^{a}	16.27±0.49^{b}	3.35±0.08^{b}
	CR2组	39.46±2.42^{ab}	2.93±0.09^{a}	2.80±0.19^{a}	18.44±0.62^{a}	3.42±0.10^{b}
	CR3组	41.78±2.26^{a}	2.97±0.04^{a}	2.77±0.02^{a}	18.19±0.97^{a}	3.31±0.03^{b}
	CR4组	42.99±0.64^{a}	3.06±0.04^{a}	2.74±0.03^{a}	19.48±0.55^{a}	3.25±0.05^{b}
	CR5组	42.96±1.59^{a}	3.05±0.02^{a}	2.74±0.06^{a}	19.14±0.17^{a}	3.21±0.24^{b}

注：不同小写字母代表在同一因素同一指标下差异显著（P<0.05）。

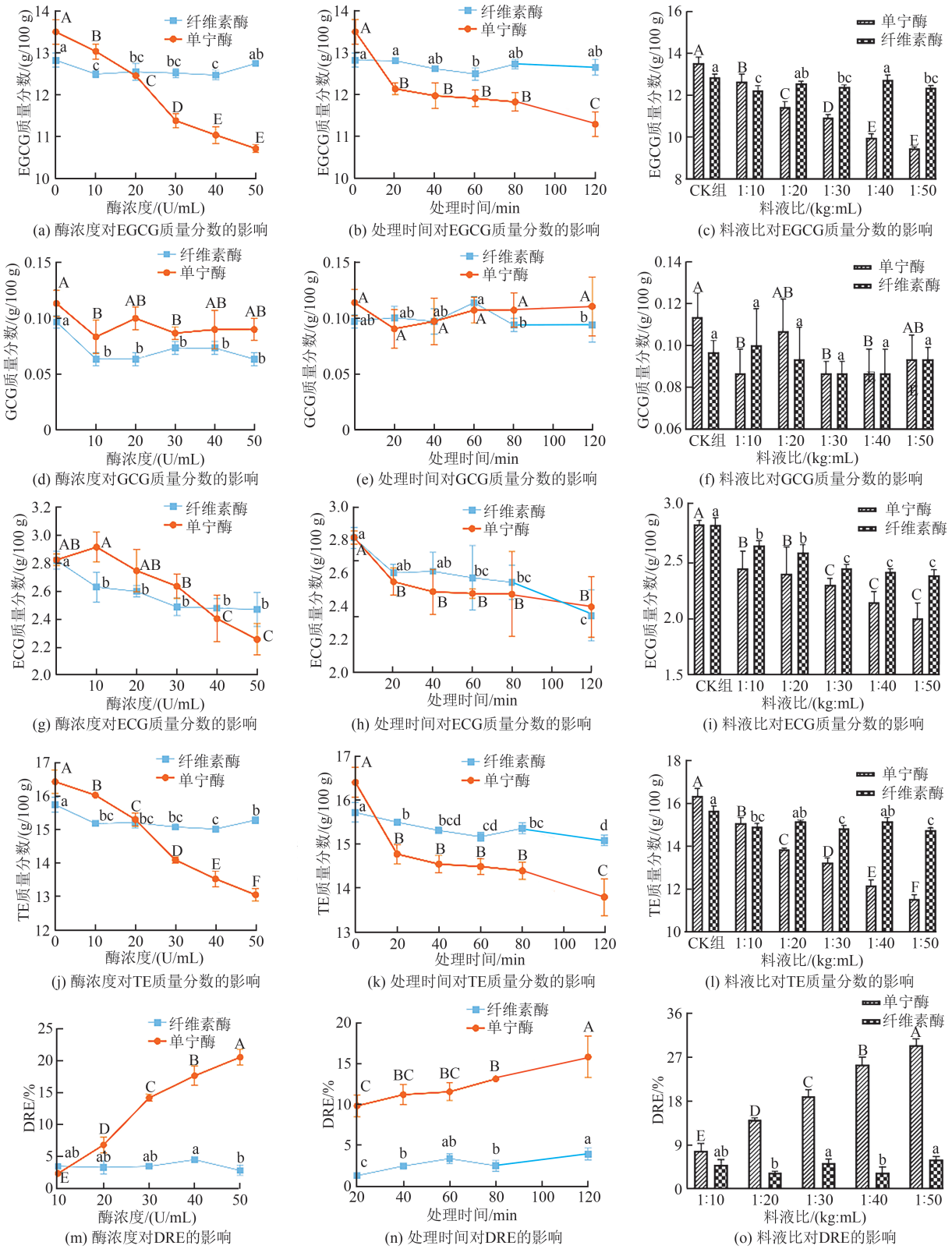
2.3.2 外源酶处理对茶样中ETC的影响

ETC中的EGCG、ECG和GCG等是绿茶茶汤中苦涩味的主要贡献者[17]，降低其质量分数对改善茶汤苦涩味具有重要作用。不同外源酶处理对茶样中ETC的影响见图2。随着单宁酶酶浓度的升高，茶样中EGCG、GCG和TE质量分数均明显降低；ECG质量分数呈先升高后降低的趋势，在单宁酶酶浓度≥40 U/mL时与CK组存在显著差异（P<0.05）。在不同单宁酶处理时间和单宁酶料液比条件下，茶样中EGCG、ECG和TE质量分数持续降低，且均与CK组存在显著差异（P<0.05）；而DRE则随单宁酶酶浓度和处理时间的增大、料液比的减小呈持续升高趋势。

纤维素酶对ETC的影响小于单宁酶，随着纤维素酶酶浓度的增大，茶样中各ETC和TE质量分数随之降低，且在纤维素酶酶浓度为10~40 U/mL时与CK组存在显著差异（P<0.05）。当纤维素酶处理时间分别为60、60、20 min时，茶样中对应的EGCG、ECG和TE质量分数显著低于CK组（P<0.05）。在纤维素酶料液比为1 kg∶10 mL时，茶样中各ETC和TE质量分数与CK组存在明显差异。另外，DRE在纤维素酶酶浓度为40 U/mL、处理时间为120 min、料液比为1 kg∶50 mL时分别达到最高值。综上，与CK组相比，2种外源酶处理均能在一定程度上降低ETC质量分数、提高DRE，且单宁酶效果优于纤维素酶。这一差异可能是由于单宁酶本身可催化ETC水解，生成NEC与GA所致。

2.3.3 外源酶处理对茶样中NEC的影响

ETC可通过湿热或生物酶作用转化为NEC，NEC滋味柔和且带有回甘[17]。不同外源酶处理对



(a) 酶浓度对EGCG质量分数的影响　(b) 处理时间对EGCG质量分数的影响　(c) 料液比对EGCG质量分数的影响

(d) 酶浓度对GCG质量分数的影响　(e) 处理时间对GCG质量分数的影响　(f) 料液比对GCG质量分数的影响

(g) 酶浓度对ECG质量分数的影响　(h) 处理时间对ECG质量分数的影响　(i) 料液比对ECG质量分数的影响

(j) 酶浓度对TE质量分数的影响　(k) 处理时间对TE质量分数的影响　(l) 料液比对TE质量分数的影响

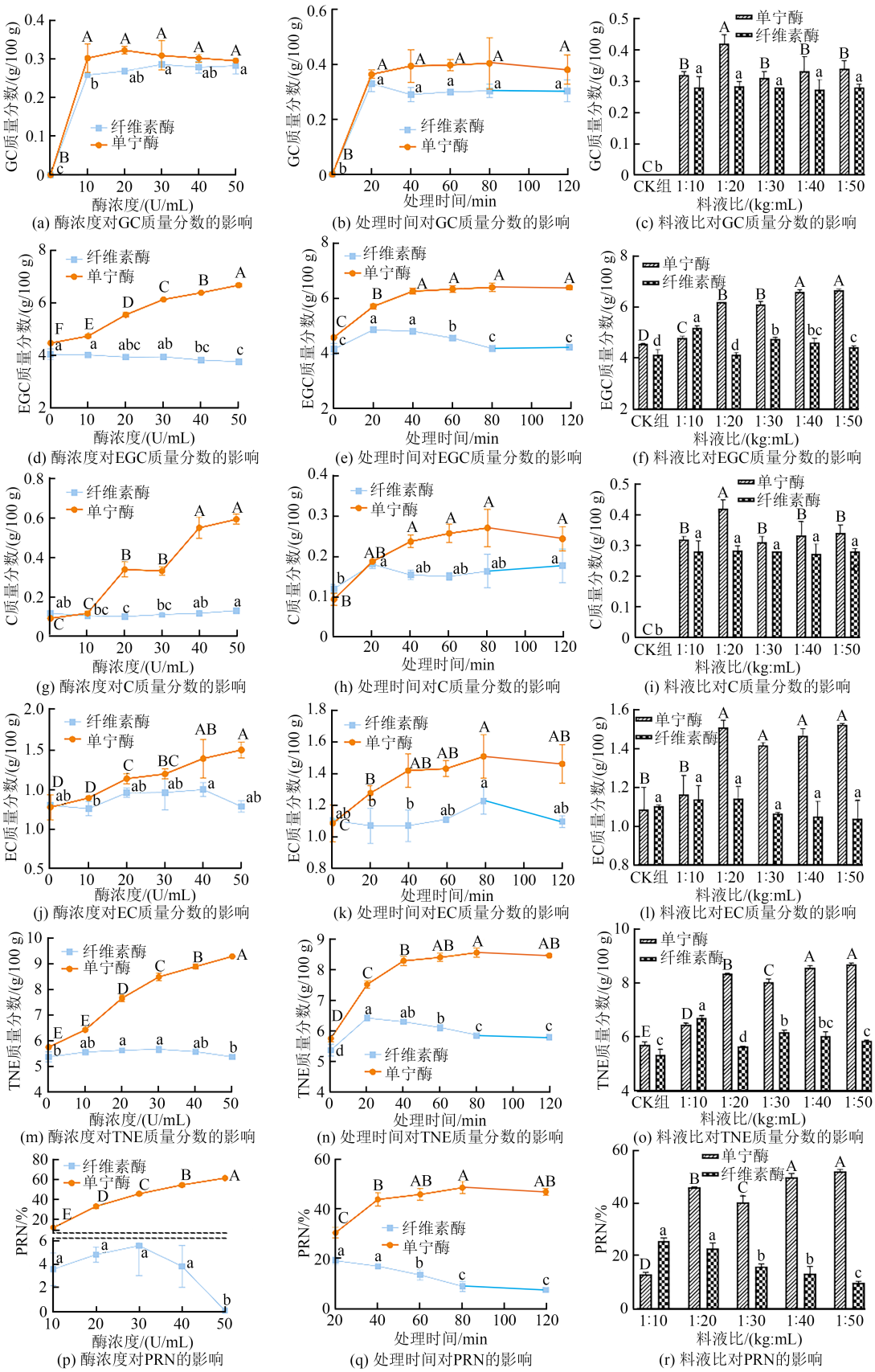
(m) 酶浓度对DRE的影响　(n) 处理时间对DRE的影响　(o) 料液比对DRE的影响

不同大写字母代表在单宁酶处理组中差异显著（$P<0.05$）；不同小写字母代表在纤维素酶处理组中差异显著（$P<0.05$）。

图 2　不同外源酶处理对茶样中 ETC 的影响

Fig. 2　Effects of different exogenous enzyme treatments on ETC in tea samples

茶样中 NEC 的影响见图 3。随着单宁酶酶浓度和处理时间的增加、单宁酶料液比的降低，各 NEC、TNE 质量分数和 PRN 均明显升高，且在单宁酶酶浓度为 50 U/mL、处理时间为 80 min、料液



(a) 酶浓度对GC质量分数的影响 (b) 处理时间对GC质量分数的影响 (c) 料液比对GC质量分数的影响

(d) 酶浓度对EGC质量分数的影响 (e) 处理时间对EGC质量分数的影响 (f) 料液比对EGC质量分数的影响

(g) 酶浓度对C质量分数的影响 (h) 处理时间对C质量分数的影响 (i) 料液比对C质量分数的影响

(j) 酶浓度对EC质量分数的影响 (k) 处理时间对EC质量分数的影响 (l) 料液比对EC质量分数的影响

(m) 酶浓度对TNE质量分数的影响 (n) 处理时间对TNE质量分数的影响 (o) 料液比对TNE质量分数的影响

(p) 酶浓度对PRN的影响 (q) 处理时间对PRN的影响 (r) 料液比对PRN的影响

不同大写字母代表在单宁酶处理组中差异显著（$P<0.05$）；不同小写字母代表在纤维素酶处理组中差异显著（$P<0.05$）。

图 3 不同外源酶处理对茶样中 NEC 的影响

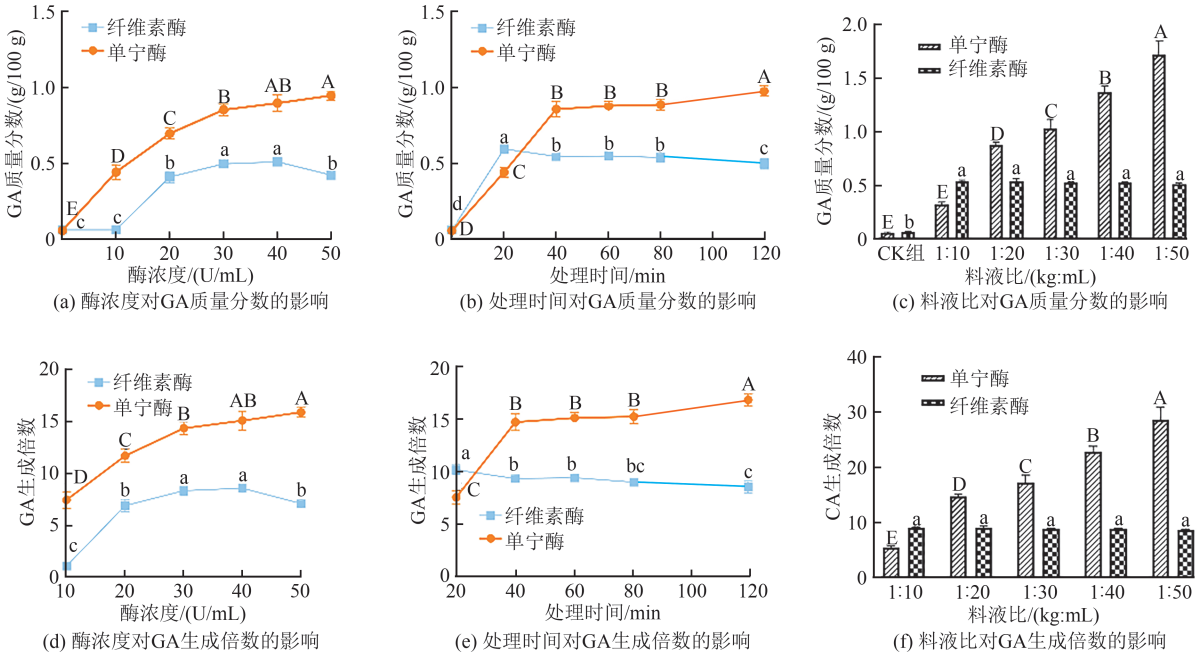
Fig. 3 Effects of different exogenous enzyme treatments on NEC in tea samples

比为1 kg∶50 mL时分别达到最大值。方洪枫[18]研究表明，在酶处理条件下，EC、EGC分别是ECG、EGCG的转化产物。经单宁酶处理后，茶样中EGCG和ECG质量分数降低，而EGC和EC质量分数升高，这一结果与方洪枫[18]的研究一致。

随着纤维素酶酶浓度的升高，茶样中GC质量分数明显升高，EGC质量分数持续降低，C质量分数先降低后升高；而TNE质量分数和PRN呈先升高后降低的趋势，且均在酶浓度为30 U/mL时达到最大值。随着纤维素酶处理时间的延长，GC和C质量分数明显升高，EGC和TNE质量分数呈先升高后降低的趋势，PRN持续降低，且均在酶处理时间为20 min时达到最大值。随着纤维素酶料液比的降低，EGC和TNE质量分数呈波动变化，PRN持续降低，且在料液比为1 kg∶10 mL时均达到最大值。Wang等[19]研究指出，GC水平升高可能源于C合成速率增强或EGCG和EGC异构化作用。因此，2种外源酶处理导致茶样中GC质量分数显著升高，可能与上述途径相关。综上，单宁酶处理可使NEC、TNE质量分数和PRN显著升高，ETC则呈相反的变化趋势；纤维素酶处理可使GC质量分数显著升高，EGC、TNE质量分数无明显规律，EC质量分数无显著变化。

2.3.4　外源酶处理对茶样中GA的影响

GA是ETC的降解产物之一，同时也是绿茶茶汤滋味回甘的关键物质[20]。不同外源酶处理对茶样中GA的影响见图4。与NEC的变化趋势一致，GA质量分数及GA生成倍数随单宁酶酶浓度、料液比和处理时间改变会发生显著变化，各指标较CK组提高了6.50~16.21倍。纤维素酶处理则使GA质量分数呈先升高后降低的趋势，当纤维素酶酶浓度≥20 U/mL、料液比≤1 kg∶10 mL、处理时间≥20 min时，GA质量分数与CK组相比存在显著差异（$P<0.05$），较CK组提高了1.05~10.15倍。综上，与纤维素酶相比，单宁酶更能促进GA的生成，这一结果与ETC显著降低的结果一致。



(a) 酶浓度对GA质量分数的影响　(b) 处理时间对GA质量分数的影响　(c) 料液比对GA质量分数的影响

(d) 酶浓度对GA生成倍数的影响　(e) 处理时间对GA生成倍数的影响　(f) 料液比对GA生成倍数的影响

不同大写字母代表在单宁酶处理组中差异显著（$P<0.05$）；不同小写字母代表在纤维素酶处理组中差异显著（$P<0.05$）。

图4　不同外源酶处理对茶样中GA的影响

Fig. 4　Effects of different exogenous enzyme treatments on GA in tea samples

2.4　系统聚类分析结果

32个茶样的系统聚类分析结果见图5。当欧氏距离为15.0时，16个茶样可被聚为2大类，CK单独聚为第I类，外源酶处理的茶样聚为第II类，这表明外源酶处理的茶样与CK组的品质存在较大差异。当欧氏距离为10.0时，第II类可分为2个亚类。对于纤维素酶处理组，II-a亚类为不同纤维素酶酶浓度处理组，II-b亚类为不同纤维素酶处理时间和料

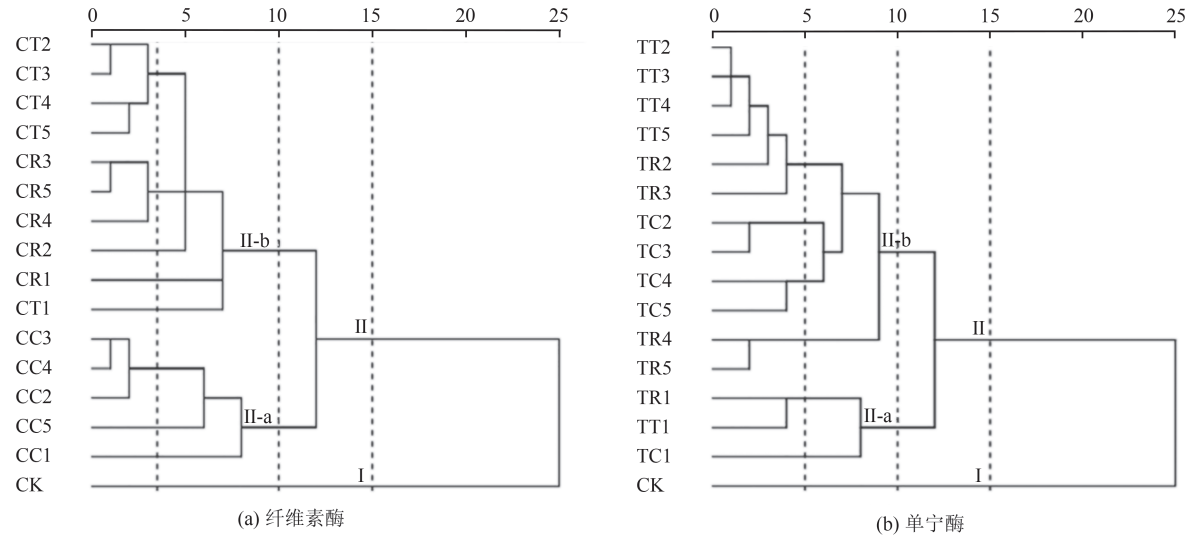


图 5　不同外源酶处理茶样的系统聚类分析结果

Fig. 5　Results of hierarchical cluster analysis of tea samples treated with different exogenous enzymes

液比处理组，表明纤维素酶酶浓度对茶样品质的影响程度与另外 2 个因素存在差异。当欧氏距离为 3.5 时，茶样聚类分析结果发生较大变化，可聚为 9 类，其中 CT2~CT5、CR3~CR5、CC2~CC4 的茶样分别聚为 1 小类，其他处理组茶样则单独聚类，说明纤维素酶在酶浓度为 10、20、50 U/mL，料液比为 1 kg∶10 mL、1 kg∶20 mL、1 kg∶30 mL，处理 20、40 min 时差异明显。对于单宁酶，II-a 亚类为各处理因素最低水平，II-b 亚类为各因素其他水平处理的茶样，表明茶样品质受单宁酶各处理因素水平的影响较大。当欧氏距离为 5.0 时，茶样可聚为 7 类，其中 TT2~TT5、TR2~TR3 聚为 1 小类，TC2~TC3、TC4~TC5 与 TR4~TR5 以及 TR1 与 TT1 分别聚为 1 小类，其他处理组茶样单独聚类，说明单宁酶酶浓度为 10、20、40 U/mL，单宁酶料液比为 1 kg∶10 mL、1 kg∶20 mL、1 kg∶40 mL，处理 20、40 min 时差异明显。

2.5　相关性分析结果

不同外源酶处理下茶样中各品质指标相关性分析结果见图 6。感官得分与可溶性糖呈极显著正相关，与 GCG、茶多酚呈极显著负相关（P<0.01），表明感官得分主要受可溶性糖、GCG 及茶多酚的影响。涩味预测质量浓度与 GA、NEC（GC、EGC、EC、TNE、PRN）、CAF 和 DRE 呈极显著负相关，与 EGCG、TE、游离氨基酸总量和苦味预测质量浓度呈极显著正相关（P<0.01）。此外，NEC 与 ETC 呈极显著负相关，与 DRE、PRN 和 GA 生成倍数呈极显著正相关（P<0.01），表明茶样中 GA、NEC 和 ETC 存在相互转化关系，且茶汤苦涩味与儿茶素组分高度相关。茶多酚与 GCG 呈极显著正相关（P<0.01），与 GC 呈显著负相关（P<0.05），与可溶性糖呈极显著负相关（P<0.01）；而可溶性糖与 GC、水浸出物呈极显著正相关（P<0.01），进一步说明茶样中各品质指标间会相互影响。

2.6　PCA 结果

利用 PCA 将酶处理茶样中的 21 个品质指标转化为 4 个主成分，结果见表 6。主成分 1 至主成分 4（PC1~PC4）的方差贡献率分别为 52.524%、16.119%、13.142%、5.257%，累积方差贡献率为 87.043%，表明 4 个主成分可代表 21 个指标的大部分信息。

21 个指标的因子载荷见表 7，因子载荷的高低可反映各变量在主成分中的重要程度。PC1 涵盖了指标的大部分信息，主要包括茶样儿茶素组分及相关指标（DRE、TN、PRN 等）、苦涩味和鲜味指标（苦味、涩味预测质量浓度和游离氨基酸总量）。结合相关性分析结果可知，涩味预测质量浓度与上述品质变量均存在相关性，因此将涩味预测质量浓度作为 PC1 的代表指标；PC2 主要反

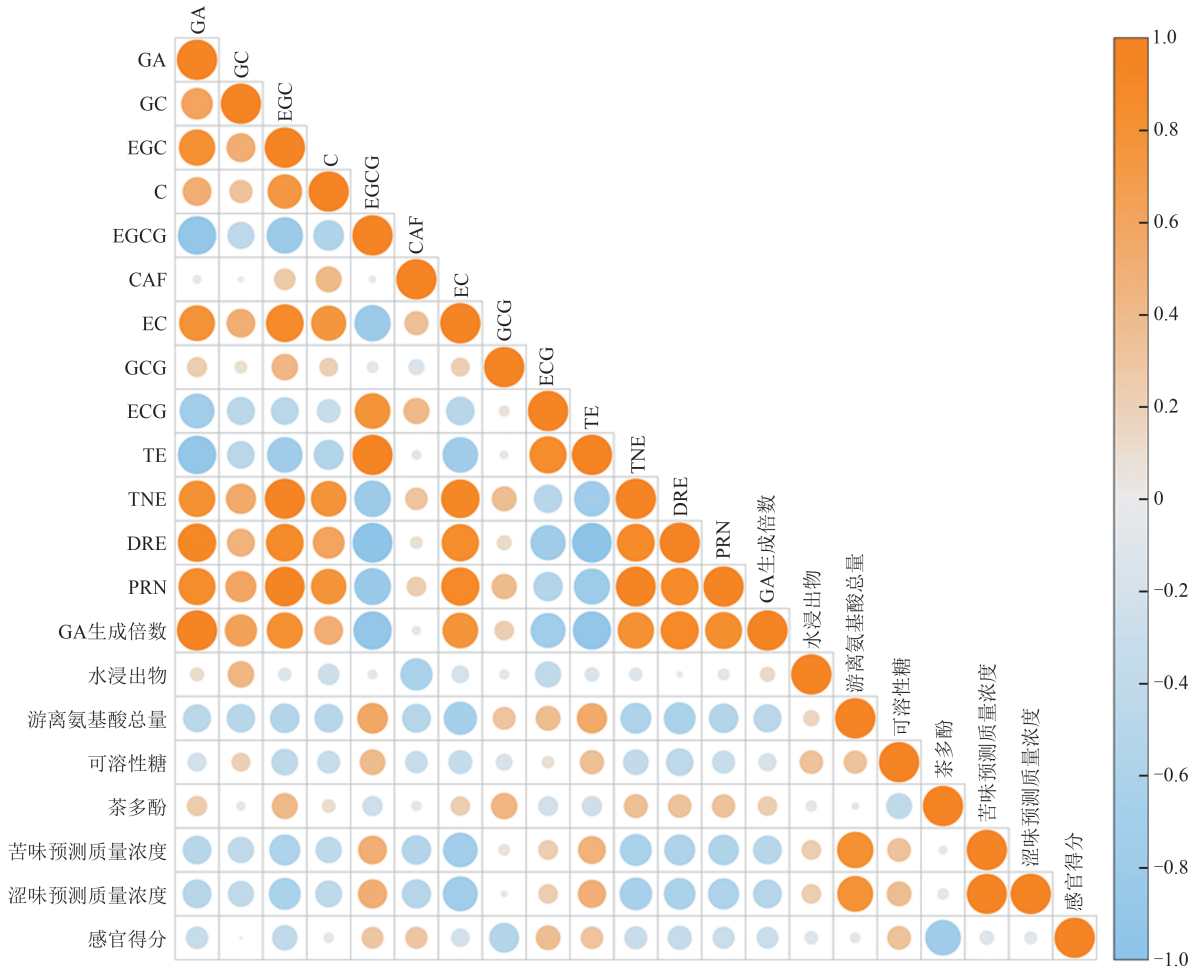


图 6　相关性分析结果

Fig. 6　Results of correlations among mainly parameters

表 6　主成分特征值、方差贡献率和累积方差贡献率

Table 6　Eigenvalues, variance contribution rates, and cumulative variance contribution rates of principal component

主成分	特征值	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
PC1	11.030	52.524	52.524
PC2	3.385	16.119	68.643
PC3	2.760	13.142	81.786
PC4	1.104	5.257	87.043

映苦味与浓度相关指标（CAF、水浸出物）及感官得分；PC3 主要反映苦涩味与甜味品质（茶多酚和可溶性糖）；PC4 主要包含 GCG 的相关信息。感官得分与可溶性糖、GCG 和茶多酚呈极显著相关（$P<0.01$），可溶性糖与水浸出物呈极显著正相关（$P<0.05$），涩味预测质量浓度与 CAF 呈极显著相关性（$P<0.01$）。基于这些指标间的强关联性，PC3 和 PC4 可以由 PC2 代表，因此将感官得分作为 PC2 的代表指标。

对外源酶处理的茶样开展感官审评、电子舌检测和理化指标分析发现，单一的检测分析方法无法确定 2 种外源酶的最佳处理条件，因此需对数据进行统计分析。首先，系统聚类分析显示，外源酶处理茶样的品质与 CK 组差异较大。当纤维素酶酶浓度为 10、20、50 U/mL，料液比为 1 kg∶10 mL、1 kg∶20 mL、1 kg∶30 mL，处理时间为 20、40 min 时，所得茶样品质差异明显；当单宁酶酶浓度为 10、20、40 U/mL，料液比为 1 kg∶10 mL、1 kg∶20 mL、1 kg∶40 mL，处理时间为 20、40 min 时，所得茶样品质差异明显。其次，相关性分析与 PCA 结果表明，涩味预测质量浓度和感官得分对茶样品质的影响较大，通过重点追踪这 2 个指标在外

表 7　茶样品质变量因子载荷

Table 7　Factor loading of quality variables of tea samples

品质指标	因子载荷			
	PC1	PC2	PC3	PC4
DRE	0.962	0.076	0.134	−0.184
PRN	0.946	0.134	0.053	0.243
TNE	0.944	0.226	−0.003	0.208
GA	0.928	−0.133	0.213	0.017
GA生成倍数	0.928	−0.170	0.202	0.026
EC	0.924	0.182	−0.135	0.082
EGCG	−0.923	0.023	−0.177	0.207
TE	−0.918	0.094	−0.222	0.230
EGC	0.910	0.317	0.051	0.189
游离氨基酸总量	−0.763	0.154	0.446	0.232
ECG	−0.751	0.352	−0.410	0.262
C	0.728	0.188	−0.177	0.303
GC	0.702	−-0.540	0.010	0.270
苦味预测质量浓度	−0.696	−0.070	0.529	0.106
涩味预测质量浓度	−0.695	−0.119	0.507	0.088
可溶性糖	−0.093	−0.774	0.058	0.423
茶多酚	0.027	0.750	0.403	−0.153
水浸出物	0.228	−0.690	0.452	0.051
GCG	−0.015	0.658	0.403	0.539
CAF	0.137	0.402	−0.813	0.077
感官得分	−0.052	−0.628	−0.650	0.143

源酶处理条件下的变化规律，确定这2种外源酶的处理条件均为酶浓度30 U/mL、料液比1 kg∶20 mL、处理时间40 min。

3　结论

夏季绿茶滋味品质较差，导致夏季茶鲜叶资源利用率较低，这一问题长期阻碍茶产业健康发展。在茶叶风味品质提升领域，糖苷酶、单宁酶、果胶酶等酶制剂应用广泛，但当前所用外源酶针对性差，且酶处理条件的优化有待进一步研究。作者探究了外源酶对夏季绿茶感官得分和主要成分的影响。结果表明，纤维素酶和单宁酶通过提高滋味醇度、降低苦味、涩味预测质量浓度，对改善茶汤滋味具有明显效果。化学计量学与多元统计分析结果显示，经外源酶处理后的夏季绿茶品质与CK组差异较大，茶样中水浸出物、可溶性糖、NEC和GA质量分数显著升高，游离氨基酸总量、茶多酚和ETC质量分数显著降低，且单宁酶效果优于纤维素酶。因此，采用单宁酶对夏季绿茶进行处理，更有利于提高茶汤滋味醇度、降低苦涩度，从而改善整体滋味。结合相关性分析，最终确定2种外源酶的处理条件均为酶浓度30 U/mL、料液比1 kg∶20 mL、处理时间40 min。该研究可为通过外源酶改善夏季绿茶滋味品质，为夏季茶鲜叶资源合理利用提供理论依据与应用基础。

参考文献

[1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会．茶叶感官审评方法：GB/T 23776—2018[S]．北京：中国标准出版社，2018．

[2] XU W P，SONG Q S，LI D X，et al．Discrimination of the production season of Chinese green tea by chemical analysis in combination with supervised pattern recognition [J]．Journal of Agricultural and Food Chemistry，2012，60(28)：7064-7070．

[3] 王奕，杨娟，杨海滨，等．基于实地与网络调查的夏秋茶产业发展现状及建议[J]．南方农业，2023，17(13)：194-199．
WANG Y，YANG J，YANG H B，et al．Current situation and suggestions of tea industry development in summer and autumn based on field and network investigation [J]．South China Agriculture，2023，17(13)：194-199．(in Chinese)

[4] XU Y Q，ZHANG Y N，CHEN J X，et al．Quantitative analyses of the bitterness and astringency of catechins from green tea[J]．Food Chemistry，2018，258：16-24．

[5] 宁豫昌，高俊杰，袁艺萌．复合酶处理对刺梨、苹果混合发酵果汁的影响[J]．食品与生物技术学报，2023，42(8)：87-94．
NING Y C，GAO J J，YUAN Y M．Effect of compound enzyme treatment on mixed fermented juice of *Rosa roxburghii* Tratt and *Malus pumila* Mill[J]．Journal of Food Science and Biotechnology，2023，42(8)：87-94．(in Chinese)

[6] SARIRI R，NAJAFI F，ARASTEH A．The effect of cellulase extracted from symbiotic tea fungies on the quality of Iranian tea [J]．Enzyme and Microbial Technology，2006，39(2)：308-310．

[7] CHIANG S H，YANG K M，WANG S Y，et al．Enzymatic treatment in black tea manufacturing processing：impact on bioactive compounds，quality，and bioactivities of black tea [J]．LWT-Food Science and Technology，2022，163：113560．

[8] 陈善敏，罗红玉，常睿，等. 基于广泛靶向代谢组学研究外源酶对夏绿茶茶汤苦涩味的影响[J]. 食品与发酵工业，2025，51(13)：196-203.
CHEN S M，LUO H Y，CHANG R，et al. Widely targeted metabolomics analysis uncovers the effects of enzyme treatment on the taste quality in summer green tea infusion [J]. Food and Fermentation Industries，2025，51(13)：196-203.(in Chinese)

[9] CAO Q Q，ZOU C，ZHANG Y H，et al. Improving the taste of autumn green tea with tannase [J]. Food Chemistry，2019，277：432-437.

[10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 茶 水浸出物测定：GB/T 8305—2013[S]. 北京：中国标准出版社，2014.

[11] WANG H，CUI X X，ZHAO X G，et al. Differences of biochemical constituents and contents of eight cultivars flowers of *Camellia sinensis*[J]. Journal of Essential Oil Bearing Plants，2015，18(2)：320-328.

[12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 茶 游离氨基酸总量的测定：GB/T 8314—2013[S]. 北京：中国标准出版社，2014.

[13] 中华人民共和国国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. 茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法：GB/T 8313—2018[S]. 北京：中国标准出版社，2018.

[14] 常睿，罗红玉，张丽，等. 不同萎凋温度和时间对夏季白茶品质的影响[J]. 南方农业学报，2023，54(7)：2060-2070.
CHANG R，LUO H Y，ZHANG L，et al. Effects of different withering temperatures and times on the quality of summer white tea[J]. Journal of Southern Agriculture，2023，54(7)：2060-2070.(in Chinese)

[15] 刘忠英，冉乾松，张拓，等. 基于电子舌与人工感官的茶叶滋味属性参考物呈味强度相关性分析[J]. 食品与机械，2022，38(11)：40-45.
LIU Z Y，RAN Q S，ZHANG T，et al. Correlation analysis of taste intensity of tea flavor attribute reference based on electronic tongue and artificial senses [J]. Food & Machinery，2022，38(11)：40-45.(in Chinese)

[16] 许皓，肖虹菲，林家威，等. 现代工艺六堡茶渥堆过程中茶汤色泽及主要滋味品质成分动态变化[J]. 食品与发酵工业，2024，50(11)：317-326.
XU H，XIAO H F，LIN J W，et al. Dynamic changes of tea soup color and main taste quality duringprocess of modern craft Liupao tea fermentation[J]. Food and Fermentation Industries，2024，50(11)：317-326.(in Chinese)

[17] ZHANG Y N，YIN J F，CHEN J X，et al. Improving the sweet aftertaste of green tea infusion with tannase[J]. Food Chemistry，2016，192：470-476.

[18] 方洪枫. 冠突曲霉和黑曲霉产胞外水解酶及酯型儿茶素水解研究[D]. 福州：福建师范大学，2017.

[19] WANG Y，ZHENG P C，LIU P P，et al. Novel insight into the role of withering process in characteristic flavor formation of teas using transcriptome analysis and metabolite profiling[J]. Food Chemistry，2019，272：313-322.

[20] 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.

（责任编辑：刘冬梅）