杨洪志远, 肖风怡, 武珊珊, 等. ‘黄金芽’及其白化子代茶树品种春秋季超微绿茶粉品质评价 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(5): 348−358. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040231

YANG Hongzhiyuan, XIAO Fengyi, WU Shanshan, et al. Quality Evaluation of Ultra-fine Green Tea Powder Made from 'Huangjinya' and Its Albino Offspring in Spring and Autumn[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(5): 348−358. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040231

· 分析检测 ·

‘黄金芽’及其白化子代茶树品种春秋季超微绿茶粉品质评价

杨洪志远[1], 肖风怡[1], 武珊珊[1], 董俊杰[2,*], 陆建良[1,*]

（1.浙江大学茶叶研究所, 浙江杭州 310058;
2.浙江骆驼九宇有机食品有限公司, 浙江杭州 310000）

摘　要: 本文以春季和秋季‘龙井 43’等常规叶色和‘黄金芽’及其白化子代茶树嫩梢加工的超微绿茶粉为研究对象，通过感官审评、粒径和色差分析、茶多酚和儿茶素类组分测定、生物碱及氨基酸组分检测，对‘黄金芽’及其白化子代超微绿茶粉的品质特征进行了综合评价。结果表明，‘黄金芽’及其白化子代超微绿茶粉外观色泽与常规叶色品种差异明显，且茶汤的鲜爽度优于常规叶色品种；‘黄金芽’及其白化子代超微绿茶粉粒径（D90，56.50~67.05 μm）与常规叶色品种（D90，57.47~62.69 μm）相当，说明白化与常规叶色茶树资源研磨特性基本一致；‘黄金芽’及其白化子代超微绿茶粉的亮度（L^*值，71.65~81.43）高于常规叶色品种（L^*值，65.50~72.65），绿度（a^*值，−5.31~−0.12）低于常规叶色品种（a^*值，−6.45~−2.85）。与常规叶色品种相比，‘黄金芽’及其白化子代超微绿茶粉的游离氨基酸总量（29.72~104.36 mg/g）及各味型氨基酸组分含量较高，而茶多酚（165.99~243.72 mg/g）、儿茶素类（79.74~172.09 mg/g）、酚氨比（1.59~7.94）及咖啡碱含量（18.34~32.27 mg/g）较低。‘黄金芽’及其白化子代秋季超微绿茶粉的色泽较春季的黄化程度高；香气均以清香为主，但秋季茶粉的滋味强度普遍高于春季；春季及秋季超微绿茶粉的粒径（D90）相当（60.58 vs 61.41，μm）；L^*值（77.21 vs 74.16）及 b^*值（27.31 vs 27.07）差异较小，但 a^*值（−2.14 vs −2.66）的季节性变异较大；春季超微绿茶粉的茶多酚（199.87 vs 211.17，mg/g）、儿茶素类（102.44 vs 149.66，mg/g）、酚氨比（3.79 vs 6.14）及咖啡碱（24.52 vs 26.04，mg/g）较秋季低；而游离氨基酸总量（60.74 vs 35.93，mg/g）及各味型氨基酸组分均表现为春季高于秋季。正交偏最小二乘判别分析（Orthogonal partial least squares-discriminant analysis，OPLS-DA）结果显示，色差值、氨基酸、生物碱等 17 种理化指标可用于区分常规叶色和‘黄金芽’等白化品种资源超微绿茶粉品质特征；而‘黄金芽’及其白化子代超微绿茶粉中氨基酸、生物碱、儿茶素组分等 22 种代谢物含量不同是导致其季节性品质差异的关键原因。本研究可为叶色特异茶树资源超微绿茶粉品质综合评价体系建立和品种选育鉴定指标开发提供理论依据。

关键词: 超微绿茶粉, 白化品种, ‘黄金芽’, 季节, 品质

中图分类号: S571.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)05−0348−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040231

本文网刊:

Quality Evaluation of Ultra-fine Green Tea Powder Made from 'Huangjinya' and Its Albino Offspring in Spring and Autumn

YANG Hongzhiyuan[1], XIAO Fengyi[1], WU Shanshan[1], DONG Junjie[2,*], LU Jianliang[1,*]

（1.Department of Tea Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
2.Zhejiang Camel Transworld (Organic Food) Co., Ltd., Hangzhou 310000, China）

Abstract: The tender shoots harvested from regular leaf color tea cultivars such as 'Longjing 43', as well as albino tea

收稿日期: 2025−04−18

基金项目: 浙江省“三农九方”科技协作计划项目（2025SNJF071）; 浙江省农业新品种选育重大科技专项课题 6-新茶饮茶树新品种选育（2021C02067-6）。

作者简介: 杨洪志远（1999−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 茶树生物技术与资源利用研究, E-mail: hongzyyang@163.com。

*** 通信作者:** 董俊杰（1983−）, 女, 博士, 高级工程师, 研究方向: 茶资源综合利用, E-mail: djj@organic-tea.com。

陆建良（1970−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 茶树生物技术与资源利用研究, E-mail: jllu@zju.edu.cn

germplasms including 'Huangjinya' and its offspring, were processed into ultra-fine green tea powders in later spring and autumn. The quality characteristics of 'Huangjinya' and its albino offspring ultra-fine green tea powders were comprehensively evaluated through sensory evaluation, analysis of particle size and color difference, determination of tea polyphenols and catechins, and detection of alkaloid and amino acid components. The results showed that the appearance and color of the ultra-fine green tea powders made from 'Huangjinya' and its albino offspring were significantly different from those of regular leaf color cultivars, and the umami and freshness of the tea infusions were better than those of regular leaf color cultivars. The particle sizes of ultra-fine green tea powders made from 'Huangjinya' and its albino offspring (D90, 56.50~67.05 μm) were similar to those of regular leaf color cultivars (D90, 57.47~62.69 μm), indicating that the grinding characteristics of albino and regular leaf color tea germplasms were basically same. The brightness of ultra-fine green tea powder made from 'Huangjinya' and its albino offspring (L^* value, 71.65~81.43) was higher than that of regular leaf color cultivars (L^* value, 65.50~72.65), and the greenness (a^* value, −5.31~−0.12) was lower than that of regular ones (a^* value, −6.45~−2.85). Compared with regular leaf color cultivars, the total free amino acid content (29.72~104.36 mg/g) and amino acid composition with various flavors in the powder from 'Huangjinya' and its albino offspring were higher, while contents of tea polyphenols (165.99~243.72 mg/g), catechins (79.74~172.09 mg/g), ratio of tea polyphenols to free amino acids (1.59~7.94), and caffeine content (18.34~32.27 mg/g) were lower. The results showed that the color of the ultra-fine green tea powder made from 'Huangjinya' and its albino offspring in autumn was more yellow than that in spring; the aroma was mainly light, but the taste intensity of autumn tea powder was generally higher than that of spring. The particle sizes of ultra-fine green tea powder in spring were similar to those in autumn (60.58 vs 61.41, μm). The L^* value (77.21 vs 74.16) and b^* value (27.31 vs 27.07) of ultra-fine green tea powder in spring was higher than that in autumn, but the seasonal variation of the a^* value (−2.14 vs −2.66) was large. The total free amino acid content (60.74 vs 35.93, mg/g) and amino acid composition in the powder from 'Huangjinya' and its albino offspring of spring were higher than that of autumn, while contents of tea polyphenols (199.87 vs 211.17, mg/g), catechins (102.44 vs 149.66, mg/g), caffeine content (24.52 vs 26.04, mg/g), and ratio of tea polyphenols to free amino acids (3.79 vs 6.14) were lower. The results of orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA) showed that 17 physical and chemical indicators, including color difference, amino acids, alkaloids, and so on, could be used to distinguish characteristics of green tea powders made from the regular leaf color and albino cultivars such as 'Huangjinya'. The different contents of 22 metabolites, including amino acids, alkaloids, and catechins, in the ultra-fine green tea powder were the key reasons for the seasonal quality differences of 'Huangjinya' and its albino offspring. This study can provide theoretical basis for establishing a comprehensive quality evaluation system of the ultra-fine green tea powders and developing the identification indicators of cultivar breeding for tea plant germplasms with specific leaf colors.

Key words: ultra-fine green tea powder; albino cultivar; 'Huangjinya'; season; quality

超微茶粉是以茶鲜叶为原料，利用现代超微粉碎技术制作的、粒度中值在 12~74 μm 之间的茶粉颗粒，是茶叶深加工与综合利用的重要产品类别[1]。超微茶粉可较大程度地保留茶叶的色、香、味品质及营养成分，通常作为添加剂广泛应用于食品加工，如烘焙食品、甜品、饮料制品等[2]。超微茶粉可依据原料及加工工艺的不同，分为超微绿茶粉、超微红茶粉、超微乌龙茶粉、超微黑茶粉等，其中又以前两种最为常见[3]。种质资源是茶叶生产和新品种选育的重要物质基础，长期的自然进化和人工选择形成了丰富的茶树种质资源[4]。叶色变异茶树品种是重要的茶树种质资源，而叶色变异是叶绿体发育途径相关基因变异、叶绿素等脂溶性和花青素等水溶性色素合成代谢途径差异以及多种环境因素共同作用的结果[5]。目前茶树叶色变异主要有白化和紫化两类，二者相比，白化叶色变异在生产中的应用更广泛。‘黄金芽’（*Camellia sinensis* cv. Huangjinya）是一种光照敏感型白化茶品种，于 2008 年通过浙江省林木品种审定委员会认定，是典型的黄色系白化变异，即春、夏、秋三季新梢均为黄色，且夏秋季更黄[6]。研究表明，与常规绿色茶树品种相比，叶色白化茶树品种芽叶中的氨基酸含量通常较高，而多酚类、咖啡碱的含量较低[5]。‘黄金芽’及其白化子代（‘黄金芽’与常规绿色品种杂交的白化后代）超微绿茶粉的开发，不仅可拓展超微绿茶粉品类，还可促进春茶以及夏秋季叶色特异茶树种质资源的开发利用。

超微茶粉的品质主要取决于原料的优劣，而品种及适制性、采摘季节等是影响原料的关键因素[7]。毛娟等[8]对春夏两季不同茶树品种的化学成分进行了系统比较，结果显示，季节对代谢产物的影响大于品种，咖啡碱等 16 种差异代谢产物可作为春季与夏季区别的标志物质。孔亚帅等[9]基于非靶向代谢组学检测、感官审评及多元统计分析技术对春秋季节信阳白茶的研究发现，春季样品的感官品质优于秋季，且春季样品的代谢物丰富度显著高于秋季，26 个春秋季节差异代谢物主要包括氨基酸及其衍生物、磷脂酰类、有机酸类、嘌呤碱类等。研究还显示，秋季‘福鼎大毫’超微绿茶粉的酚氨比低，感官审评总分高，综合品质优于‘桂绿 1 号’和‘浙农 117’[10]。抹茶是一类以覆盖遮阴茶园的茶树鲜叶为原料制作的超

微绿茶粉，其叶绿素和氨基酸含量高、茶多酚和咖啡碱含量低、酚氨比小，以上指标可作为抹茶适制品种筛选的条件[11]。毛雅琳等[12] 比较了‘龙井 43’‘朝日’‘奥绿’等 8 个茶树品种制作的碾茶（抹茶粉碎前半成品）品质，结果显示，‘龙井 43’碾茶的整体品质表现最佳，其色泽墨绿、有海苔香、滋味鲜爽，且游离氨基酸和茶氨酸含量高、酚氨比低、叶绿素含量高。生产实践显示，夏秋季鲜叶原料约占全年总量的 60%，尽管其综合品质较春茶差，但可通过工艺提升、产品创新以及功能拓展，将夏秋鲜叶原料应用于新茶饮和新茶食产品，实现夏秋茶资源高效化利用[13]。超微茶粉是重要的茶叶深加工代表产品，对春季乃至夏秋茶资源高效利用有重要推动作用，但目前主要原料来自常规绿色茶树品种鲜叶。随着新茶饮的快速发展，对茶粉产品的差异化及多元化提出了更高要求。

现有的超微绿茶粉的评价体系中，感官审评、色差和粒径等物理特征、儿茶素类和咖啡碱等化学特性是重要的考量指标。虽然我国现有的超微绿茶粉主要以常规绿色品种茶鲜叶为原料，但随着白化等叶色特异茶树品种的持续推广，叶色特异品种超微茶粉新品开发及其品质评价体系研究已较为紧迫。本研究主要对‘黄金芽’及其白化子代春季和秋季原料鲜叶加工的超微绿茶粉的色差、粒径和儿茶素类等理化指标进行系统研究，明确‘黄金芽’等叶色特异茶树种质资源超微茶粉的品质特征，为叶色特异茶树品种春季和秋季资源高值化利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

常规绿色茶树　品种‘龙井 43’（LJ43）、‘中茶 108’（ZC108）和‘潇湘 1 号’（XX1）以及白化茶树品种‘黄金芽’（HJY）及其白化子代‘HJY02’‘HJY04’‘HJY07’‘HJY08’‘HJY09’‘HJY10’‘HJY13’均种植于浙江大学茶学实验教学基地（东经 119°、北纬 30°），树龄均为 6 年，于 2023 年春季（4 月下旬）和秋季（9 月下旬）按一芽三、四叶标准采收各品种鲜叶原料；乙腈、甲醇、乙酸　色谱纯，德国 Meker 公司；没食子酸（GA）、没食子儿茶素（GC）、表没食子儿茶素（EGC）、儿茶素（C）、表儿茶素（EC）、表没食子儿茶素没食子酸酯（EGCG）、没食子儿茶素没食子酸酯（GCG）、表儿茶素没食子酸酯（ECG）、儿茶素没食子酸酯（CG）、咖啡碱（CAFF）、可可碱（TB）、茶碱（TC）、苦茶碱（TP）、丙氨酸（Ala）、缬氨酸（Val）、亮氨酸（Leu）、异亮氨酸（Ile）、丝氨酸（Ser）、苏氨酸（Thr）、天冬氨酸（Asp）、谷氨酰胺（Gln）、天冬酰胺（Asn）、谷氨酸（Glu）、精氨酸（Arg）、苯丙氨酸（Phe）、组氨酸（His）、蛋氨酸（Met）、酪氨酸（Tyr）、色氨酸（Try）、γ-氨基丁酸（GABA）、茶氨酸（Thea）、正缬氨酸（Nor）、邻苯二甲醛（OPA）　色谱纯，阿拉丁试剂公司；磷酸二氢钾、磷酸氢二钠、酒石酸钾钠、硫酸亚铁、氯化钠、硼酸、3-巯基丙酸、氢氧化钠分析纯，国药集团化学试剂有限公司。

LC-20 AD 高效液相色谱仪　日本岛津公司；BT-9300SE 激光粒度仪　丹东百特仪器有限公司；Hunter Lab Colorquest XE 色差仪　美国 Hunter Lab 公司；UV-2802S 紫外可见分光光度计　尤尼柯上海仪器有限公司；JXFSTPRP-24 研磨仪　上海净信实业发展有限公司；AB265-S 分析天平　瑞士 Mettler Toledo 公司；KQ5200DA 型数控超声波清洗器　昆山市超声仪器有限公司；Sorvall Legend Micro 17R 离心机　上海旦鼎国际贸易有限公司；HH-6 数显恒温水浴锅　金坛市杰瑞尔有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 超微绿茶粉制备　鲜叶经摊放（12 h）→微波杀青（800 W，2 min）→干燥（120 ℃，15 min→80 ℃，6 h）→冷冻球磨粉碎，制成超微绿茶粉。茶样密封于铝箔袋后置于−40 ℃ 冰箱中备用。

1.2.2 感官审评　参考 DB32/T 751-2012《超微绿茶粉》、DB33/T 2279-2020《抹茶审评技术规范》、GB/T 23776-2018《茶叶感官审评方法》，对茶粉外观、茶汤、香气及滋味分别进行审评及描述。具体为：招募 5 位浙江大学茶叶研究所具有评茶师技能（二级及以上，三男二女，年龄范围为 20~55 岁）的专业审评人员组成审评小组。用取样匙取代表性茶粉 3.0~5.0 g，置于茶盘中，审评色泽和颗粒细腻度；另取茶粉 1.0 g，置于茶碗中，注入 100 mL 沸水，用茶筅充分搅拌茶汤 10~15 s，至无可见颗粒，按汤色、香气、滋味的顺序逐项审评。评语由审评小组集体评价，符合 GB/T 14487-2017《茶叶感官审评术语》的相关规定。

1.2.3 粒径测定　利用激光粒度仪对茶粉进行粒径分析。具体为：取 0.5 g 茶粉缓慢置于激光粒度仪测定腔内，加 300 mL 纯水作为分散剂对粉体进行超声分散，超声波强度为 10 W/cm^2，遮蔽率控制在 10%~20%，仪器检测到粉体分散均匀后自动进行粒径分布测定，结果以 D10、D50、D60 和 D90 表示，其中 D10、D50、D60、D90 分别表示样品中累积颗粒数达到 10%、50%、60%、90% 时所对应的茶粉粒径。

1.2.4 色差分析　将绿茶粉置于比色皿中，以空比色皿为空白对照，利用色差仪的反射测定模式分析茶粉的色泽，L^*、a^*、b^*分别表示明度、红/绿色度（正值代表红色，负值代表绿色）、黄/蓝色度（正值代表黄色，负值代表蓝色）。

1.2.5 水分测定　参照 GB 5009.3-2016《食品中水分的测定》进行。

1.2.6 茶多酚、儿茶素类和生物碱测定　试液制备：称取超微绿茶粉 150.0 mg 置于 50 mL 离心管中，加入 50% 乙醇 25 mL，置于 70 ℃ 水浴内恒温浸提 20 min，每 5 min 摇动一次，浸提结束后冷却至室温，于 12000 r/min、4 ℃ 离心 10 min，取上清液作为待测液 1，用于茶多酚总量、儿茶素类和生物碱组分测定。

茶多酚总量测定：参照 GB/T 8313-2018《茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法》对待测液 1 茶多酚进行测定。

儿茶素类及生物碱含量测定：采用 HPLC 检测待测液 1 中的儿茶素类和生物碱组成[14]。色谱柱为安捷伦 TC-C18（5 μm，4.6 mm×250 mm），柱温 33 ℃，紫外检测波长 280 nm，流速 1 mL/min，进样量 10 μL；流动相 A 为乙腈/乙酸/水=30/5/965（v/v/v），流动相 B 为乙腈/乙酸/水=300/5/695（v/v/v）；洗脱条件为前 35 min 内流动相 B 由 20% 线性增加至 80%、35.01 min 后流动相 B 降至 20% 并保持 5 min。根据儿茶素类单体与生物碱单体标准品的保留时间进行定性，根据峰面积利用标准曲线进行目标成分定量。

1.2.7　游离氨基酸总量及其组分测定　试液制备：取超微绿茶粉 150.0 mg 置于 50 mL 离心管中，加入沸水 25 mL 后，置于 100 ℃ 水浴锅内恒温浸提 45 min，每 15 min 摇动一次，浸提结束后冷却至室温，于 12000 r/min、4 ℃ 离心 10 min，将上清液转移至 25 mL 容量瓶并定容，作为待测液 2。

游离氨基酸总量测定：参照 GB/T 8314-2013《茶游离氨基酸总量测定》对待测液 2 中氨基酸进行测定。

氨基酸组分测定：采用柱前衍生-HPLC 法分析待测液 2 的氨基酸组分。取 10 μL 待测液 2，加入 1 mL 0.4 mol/L 硼酸溶液（NaOH 调节 pH 至 10.2）、200 μL OPA 溶液（0.08 g OPA、1 mL 乙腈、7 mL 0.4 mol/L 硼酸溶液、125 μL 3-巯基丙酸）和 780 μL 超纯水混匀，并加入 10 μL 50 μg/mL 正缬氨酸（内标），在室温下衍生 1 min，经 0.22 μmm 滤膜过滤后进行氨基酸组分分析。分析条件如下：安捷伦 Zorbaxeclipse-AAA（3.5 μm，4.6 mm×150 mm）色谱柱，柱温 35 ℃，进样量 10 μL，荧光检测激发波长 340 nm、发射波长 450 nm；流动相 A 为 40 mmol/L Na_2HPO_4（H_3PO_4 调节 pH 至 7.8），流动相 B 为乙腈/甲醇/水=450/450/100（v/v/v），流速 1 mL/min；洗脱条件为前 35min 内流动相 B 从 5% 线性增加至 60%，之后 5 min 内线性增加至 100%，45 min 降至 5% 并保持 5 min。以各氨基酸组分的标准品的保留时间进行定性，采用正缬氨酸作为内标，通过计算校正因子对各氨基酸组分的色谱峰面积进行校正后，根据峰面积利用标准曲线对各氨基酸组分进行定量分析。

1.3　数据处理

每个实验设置三个生物学重复，以 $\bar{x}\pm s$ 表示。采用 SPSS 26 进行单因素方差分析（One-way ANOVA）及 Tukey 事后检验（Tukey's post hoc test）进行差异显著性分析，$P<0.05$ 认为差异有统计学意义；采用 Origin 2025 进行柱状图绘制，采用 SIMCA 14.1 进行正交偏最小二乘判别分析（Orthogonal partial least squares-discriminant analysis，OPLS-DA）。

2　结果与分析

2.1　‘黄金芽’及其白化子代超微绿茶粉感官品质

由于叶色特异茶树品种加工的超微绿茶粉的感官审评方法尚无对应的国家标准，故参照 DB32/T 751-2012《超微绿茶粉》、DB33/T 2279-2020《抹茶审评技术规范》、GB/T 23776-2018《茶叶感官审评方法》，对其外观、茶汤、香气及滋味分别进行感官审评及描述，结果如图 1 和表 1 所示。所有超微绿茶粉的颗粒均细腻均匀；从茶粉色泽来看，常规绿色品种茶粉色泽以绿为主，主要表现为黄绿、嫩绿、翠绿，而白化品种茶粉色泽差异明显，有淡绿、黄绿、绿黄、淡黄和黄色；同时，秋季茶粉色泽较春季样品的黄化

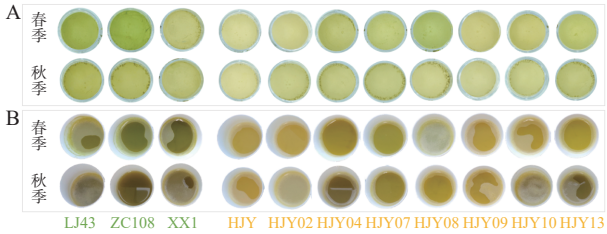


图 1　春季和秋季‘黄金芽’及其白化子代超微绿茶粉及茶汤

Fig.1　Appearance and infusion of ultra-fine green tea powder made from 'Huangjinya' and its albino offspring in spring and autumn

注：A. 茶粉；B. 茶汤。

表 1　春季和秋季‘黄金芽’及其白化子代超微绿茶粉审评结果

Table 1　Sensory evaluation results of ultra-fine green tea powder made from 'Huangjinya' and its albino offspring in spring and autumn

品种	外观	茶汤	香气	滋味
春季				
LJ43	嫩绿，润，颗粒细腻均匀	黄绿明亮	清香	醇和
ZC108	翠绿，鲜润，颗粒细腻均匀	鲜绿明亮	清香，鲜香	醇和尚鲜
XX1	黄绿，颗粒细腻均匀	黄绿	清香（稍熟）	略苦涩
HJY	淡黄，润，颗粒细腻均匀	黄明亮	清香，嫩香	鲜醇
HJY02	绿黄，颗粒细腻均匀	黄明亮	清香	醇和
HJY04	黄绿，颗粒细腻均匀	黄绿	清香	醇和
HJY07	黄绿，颗粒细腻均匀	黄绿明亮	清香	醇和
HJY08	浅绿，润，颗粒细腻均匀	黄明亮	清香，嫩香	鲜醇甘爽
HJY09	黄，润，颗粒细腻均匀	黄尚亮	清香	略苦涩
HJY10	绿黄，润，颗粒细腻均匀	黄绿尚亮	清香，鲜香	鲜醇甘爽
HJY13	黄绿，润，颗粒细腻均匀	黄绿	清香，鲜香	鲜醇甘爽
秋季				
LJ43	黄绿，润，颗粒细腻均匀	黄绿尚亮	清香，鲜香	鲜醇甘爽
ZC108	黄绿，润，颗粒细腻均匀	黄绿尚亮	清香，鲜香	醇和甘爽
XX1	黄绿，颗粒细腻均匀	黄绿尚亮	清香	尚醇
HJY	黄，润，颗粒细腻均匀	黄，鲜亮	清香，带嫩香	鲜醇甘爽
HJY02	嫩绿透黄，颗粒细腻均匀	黄尚亮	清香	浓、苦涩
HJY04	黄绿，颗粒细腻均匀	黄绿尚亮	清香	苦涩
HJY07	黄绿，颗粒细腻均匀	黄绿尚亮	清香	浓、苦涩
HJY08	绿黄，润，颗粒细腻均匀	黄尚亮	清香，带嫩香	鲜醇甘爽
HJY09	绿黄，颗粒细腻均匀	黄，明亮	清香	苦涩
HJY10	绿黄，颗粒细腻均匀	绿黄尚亮	清香，带鲜香	鲜醇甘爽
HJY13	黄绿，颗粒细腻均匀	黄绿尚亮	清香	苦涩

程度更高，而绿度更低（图 1A）；茶汤色泽与茶粉色泽对应性较强，白化品种茶汤色泽主要表现为黄绿、绿黄和黄色（图 1B）；春季与秋季的超微绿茶粉香气均以清香为主，少数品种还带有鲜香或嫩香；滋味方面，白化品种超微绿茶粉的鲜爽度总体较绿色对照品种更高，且秋季的滋味强度普遍高于春季（表 1）。综合图表中结果，HJY、HJY08 及 HJY10 超微绿茶粉感官品质优异。

2.2 ‘黄金芽’及其白化子代超微绿茶粉物理特性

2.2.1 超微绿茶粉粒径 茶叶经超微粉碎后，粒径可达到微米级别，粒径大小决定了精深加工层面应用的难易程度，粒径越小对茶粉中营养成分的生物利用越有利[2]。因此，在同一研磨条件下，粒径越小，说明该品种原料的研磨特性优良。粒径分析结果显示，3 个常规绿色对照品种的茶粉 D10 变幅为 2.56~3.39 μm，D50 为 15.24~20.61 μm，D60 为 20.61~28.71 μm，D90 为 56.47~62.69 μm；8 个‘黄金芽’及白化子代茶粉 D10、D50、D60 和 D90 变幅分别为 2.50~3.54、15.81~21.33、21.74~29.66 和 56.50~67.05 μm（表 2）。依据 DB32/T 751-2012《超微绿茶粉》粒径要求，D90 应小于 75 μm，说明本实验各品种加工的绿茶粉均符合超微绿茶粉的标准。以 D90 为例，春季‘黄金芽’及白化子代均值为 60.58 μm 略低于绿色对照品种（61.11 μm），而秋季‘黄金芽’及白化子代均值为 61.41 μm 稍高于绿色对照品种（58.96 μm）；春季白化品种超微茶粉中，HJY08 最高、HJY04 最低，但两者差异不显著；而秋季白化品种超微茶粉中，HJY07 最高、HJY10 最低。总体而言，绿色品种与‘黄金芽’及其白化子代加工的茶粉粒径相当，研磨特性基本一致。

2.2.2 超微绿茶粉色差 已有研究认为，L^*值可用作紫化和黄化茶树种质资源的鉴定指标，而 a^*值和 b^*值可用作紫化茶树种质资源筛选鉴定的参考依据[15]。同时，研究还表明，L^*值、b^*值与叶绿素含量相关性较强（r=−0.71），a^*值与花色苷含量的相关性较强（r=0.76）[16]。色差分析结果显示，与 3 个常规绿色对照品种亮度（L^*值为 65.50~72.65）相比，春季和秋季的‘黄金芽’及其白化子代超微绿茶粉的亮度（L^*值为 71.65~81.43）均较高；而 a^*值在品种间以及两个季节间均表现出较大变异，且绿色品种超微绿茶粉的绿度较明显大于大部分白化品种；b^*值均为正值，且在不同品种间的变幅相对较小，而且春季与秋季大部分品种的黄度差异也较小（图 2）。总体而言，‘黄金芽’及其白化子代茶粉亮度高于常规品种，而绿色低于常规品种。

2.3 黄金芽’及其白化子代超微绿茶粉化学成分

2.3.1 茶多酚总量及游离氨基酸总量 化学成分是茶叶品质形成的物质基础。研究表明，超微粉碎一般不会破坏绿茶原有成分，还可在一定程度上提高理化性能[17]。茶多酚是重要的次级代谢物，占茶叶干重的 18%~36%，也是茶汤苦涩味的重要贡献物质[18]。研究指出，涩味是抹茶口感的组成部分，也是决定整体抹茶品质的重要因素[19]。由表 3 可知，对照常规叶色茶树品种超微绿茶粉的茶多酚含量范围为 178.86~282.48 mg/g，而‘黄金芽’及其白化子代为 165.99~243.72 mg/g，可见，茶多酚含量在绿色及白化茶树品种间差异较明显；而且，绿色品种春季超微绿茶粉茶多酚含量均高于秋季，但大多数白化品种春季超微茶粉的茶多酚含量低于秋季。对不同季节的武夷名丛茶树种质资源的研究显示，10 个不同品种绿茶的茶多酚含量在不同季节的表现为春季高于秋季[20]，可见，对于常规叶色品种而言，春季样品中茶多酚高于秋季，而白化品种因叶绿体发育异常，两个季节样品中的茶多酚含量变化可能并不符合这一规律。此外，分析还显示，秋季的 HJY08 及 HJY10 的茶多酚含量显著低于绿色品种及其它白化品种（P<0.05）。

茶叶中的氨基酸，一般约占干重的 1%~4%，是茶叶鲜爽滋味的重要贡献物质[21]。常规叶色对照茶树品种超微绿茶粉的游离氨基酸总量范围为 27.51~

表 2 春季和秋季‘黄金芽’及其白化子代超微绿茶粉粒径

Table 2 Particle size of ultra-fine green tea powder made from 'Huangjinya' and its albino offspring in spring and autumn

品种	D10值（μm）		D50值（μm）		D60值（μm）		D90值（μm）	
	春季	秋季	春季	秋季	春季	秋季	春季	秋季
LJ43	3.10±0.27^{ab}	2.56±0.12^{e}	20.41±0.77^{ab}	15.24±0.43^{d}	28.32±0.81^{ab}	20.61±0.37^{d}	62.06±0.78^{a}	56.47±0.39^{c}
ZC108	3.26±0.07^{ab}	2.67±0.06^{de}	20.61±0.57^{ab}	16.01±0.26^{d}	28.71±0.83^{ab}	21.82±0.44^{d}	62.39±1.40^{a}	57.71±1.22^{bc}
XX1	3.39±0.17^{ab}	3.28±0.03^{a}	19.36±0.51^{ab}	19.55±0.12^{ab}	25.97±0.66^{ab}	26.61±0.31^{ab}	58.87±1.30^{a}	62.69±1.37^{ab}
HJY	3.13±0.18^{ab}	2.91±0.12^{bcd}	19.57±0.49^{ab}	19.35±0.25^{abc}	27.13±0.69^{b}	26.82±0.22^{a}	60.96±0.99^{a}	62.88±0.14^{ab}
HJY02	3.10±0.14^{ab}	2.94±0.08^{bcd}	20.11±1.16^{ab}	19.37±0.61^{abc}	27.52±1.51^{ab}	26.82±1.05^{a}	61.13±1.74^{a}	63.37±2.61^{ab}
HJY04	3.04±0.10^{ab}	3.06±0.13^{ab}	18.46±0.69^{ab}	18.15±0.56^{c}	25.07±0.90^{b}	24.29±0.63^{c}	58.57±0.87^{a}	57.93±0.25^{bc}
HJY07	3.16±0.24^{ab}	3.08±0.03^{ab}	19.92±1.11^{ab}	19.72±0.35^{a}	27.46±1.52^{b}	27.00±0.63^{a}	60.95±1.27^{a}	67.05±3.74^{a}
HJY08	3.54±0.02^{a}	2.50±0.03^{e}	21.33±0.69^{a}	15.81±0.19^{d}	29.66±1.18^{a}	22.10±0.34^{d}	63.75±1.97^{a}	60.10±0.59^{bc}
HJY09	3.18±0.12^{ab}	2.97±0.04^{bc}	20.47±1.26^{ab}	18.37±0.57^{bc}	28.03±1.77^{ab}	25.27±0.87^{abc}	60.65±2.09^{a}	61.34±1.08^{abc}
HJY10	3.10±0.11^{ab}	2.70±0.04^{cde}	17.96±0.43^{b}	16.09±0.05^{d}	24.74±0.74^{b}	21.74±0.19^{d}	59.52±0.84^{a}	56.50±1.31^{c}
HJY13	2.90±0.16^{b}	3.01±0.09^{ab}	17.94±0.90^{b}	18.05±0.15^{c}	25.19±1.50^{b}	24.68±0.08^{bc}	59.12±2.36^{a}	62.13±1.19^{abc}

注：同一列中不同字母表示差异性显著（P<0.05）；表3同。

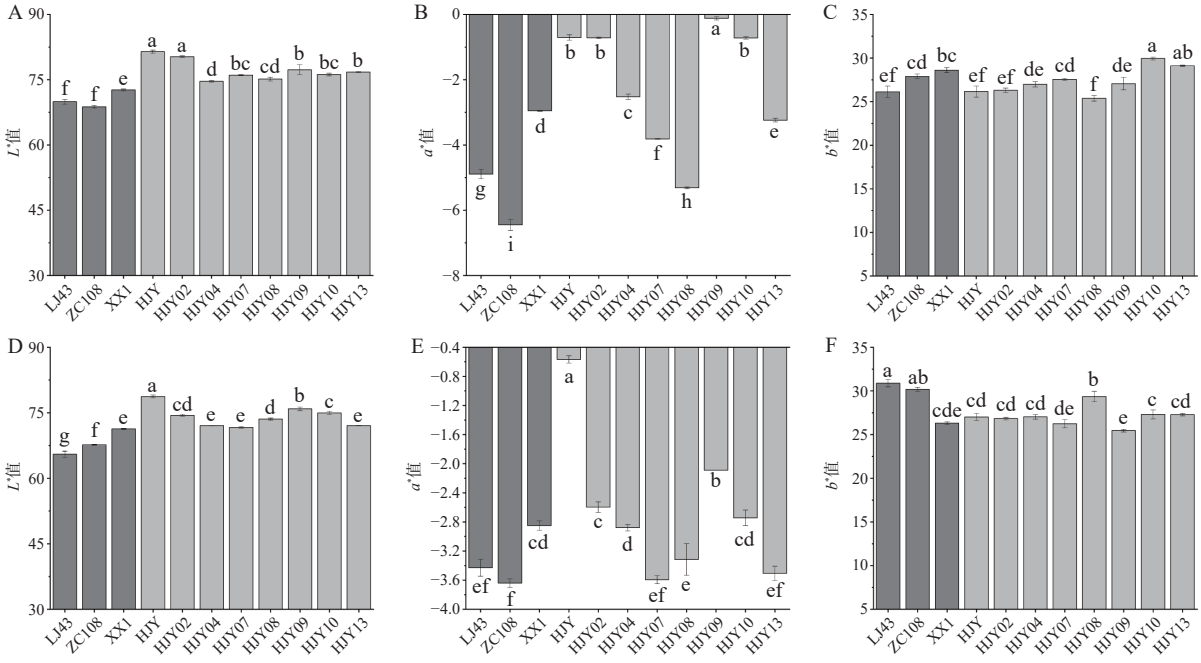


图 2　春季和秋季‘黄金芽’及其白化子代超微绿茶粉色差值

Fig.2　Color difference of ultra-fine green tea powder made from 'Huangjinya' and its albino offspring in spring and autumn

注：A. 春季样品 L^*值；B. 春季样品 a^*值；C. 春季样品 b^*值；D. 秋季样品 L^*值；E. 秋季样品 a^*值；F. 秋季样品 b^*值。不同字母表示差异性显著（P<0.05）。

表 3　春季与秋季‘黄金芽’及其白化子代超微绿茶粉茶多酚及游离氨基酸含量

Table 3　Content of tea polyphenols and free amino acids in ultra-fine green tea powder made from 'Huangjinya' and its albino offspring in spring and autumn

品种	茶多酚（mg/g）		游离氨基酸总量（mg/g）		酚氨比	
	春季	秋季	春季	秋季	春季	秋季
LJ43	195.86±1.77^{d}	178.86±2.69^{fg}	41.60±2.69^{ef}	29.48±0.70^{f}	4.73±0.36^{c}	6.07±0.06^{e}
ZC108	193.52±6.55^{d}	185.21±0.52^{f}	49.48±3.61^{d}	33.76±0.23^{c}	3.93±0.30^{cde}	5.49±0.07^{f}
XX1	282.48±0.78^{a}	261.68±0.75^{a}	27.51±1.31^{g}	30.26±0.36^{def}	10.29±0.62^{a}	8.65±0.10^{a}
HJY	211.09±4.91^{c}	201.15±0.93^{e}	58.78±0.98^{c}	48.12±0.36^{a}	3.59±0.07^{de}	4.18±0.04^{h}
HJY02	243.72±5.00^{b}	215.95±3.37^{d}	35.60±2.34^{f}	31.13±0.31^{def}	6.87±0.41^{b}	6.94±0.19^{cd}
HJY04	210.17±4.61^{c}	210.25±1.45^{d}	46.83±1.60^{de}	32.09±0.37^{cde}	4.49±0.13^{c}	6.55±0.12^{d}
HJY07	218.53±1.24^{c}	229.08±2.24^{bc}	51.39±2.27^{d}	29.90±0.35^{ef}	4.26±0.25^{cd}	7.66±0.16^{b}
HJY08	172.91±2.30^{e}	174.10±2.82^{g}	90.38±1.42^{b}	42.11±1.60^{b}	1.91±0.05^{f}	4.14±0.11^{h}
HJY09	209.76±4.52^{c}	235.75±2.57^{b}	49.24±0.53^{d}	29.72±0.43^{f}	4.26±0.06^{cd}	7.94±0.20^{b}
HJY10	166.81±1.50^{e}	197.65±3.34^{e}	49.33±0.56^{d}	42.15±0.15^{b}	3.38±0.08^{e}	4.69±0.12^{g}
HJY13	165.99±2.82^{e}	225.42±2.95^{c}	104.36±2.09^{a}	32.25±0.60^{cd}	1.59±0.07^{f}	6.99±0.24^{e}

49.48 mg/g，而‘黄金芽’及其白化子代品种的游离氨基酸总量范围为 29.72~104.36 mg/g，大部分白化品种的游离氨基酸总量高于常规绿色品种，且春季只有个别白化品种如 HJY02 的氨基酸总量显著低于 ZC108（P<0.05），而秋季大部分白化品种的氨基酸总量与绿色品种相当，这与王丽鸳等[6] 研究结果一致。此外，无论在白化品种还是常规绿色品种（XX1 除外），游离氨基酸总量均表现为春季高于秋季。

酚氨比是茶多酚与游离氨基酸的比值，是评判品种适制性的重要指标，一般认为，酚氨比小于 8 适制绿茶[22]。分析显示，春季和秋季的 XX1 超微绿茶粉的酚氨比均大于 8，不建议作为超微绿茶粉的适制品种；而‘黄金芽’及其白化子代的所有春季和秋季样品酚氨比均低于 8，均为超微绿茶粉的适制性品种。从季节差异变化来看，白化品种秋季超微绿茶粉的酚氨比较春季的高，但仍低于 8，这说明即使是秋季白化茶树品种鲜叶原料，也是制作超微绿茶粉的良好选择。

2.3.2　儿茶素及生物碱分析　儿茶素类是茶多酚的主体部分，占茶多酚总量的 70%~80%，主要包括 C、EC、GC、EGC、CG、ECG、GCG 及 EGCG，其中前四种为非酯型儿茶素，后四种为酯型儿茶素[23]。分析显示，常规叶色品种超微绿茶粉的儿茶素类总量、酯型儿茶素及非酯型儿茶素含量范围分别为 94.04~183.93、68.16~147.06 和 25.88~51.42 mg/g，而‘黄金芽’及其白化子代超微茶粉的儿茶素类总量、酯型

儿茶素及非酯型儿茶素含量分别为 79.74~172.09、55.22~124.99 和 15.75~49.16 mg/g(表 4)。总体而言,常规叶色品种在儿茶素类总量等指标上高于白化资源,但也有部分白化品种的儿茶素类含量高于或与绿色品种相当,这与本团队之前的研究结果一致[14]。儿茶素类是茶汤苦涩味的主要贡献者,而不同的儿茶素单体的苦涩味阈值也有差异。EGCG 是含量最高的儿茶素类组分,且其涩味阈值是 8 种儿茶素类组分中最低的(190 μmol/L)[24]。因此,对茶粉茶汤涩味影响最大的成分是 EGCG。另外,从两个季节来看,儿茶素类含量的变化趋势几乎与茶多酚一致,即‘黄金芽’及其白化子代超微绿茶粉的儿茶素类含量均表现为秋季高于春季。

生物碱是茶汤苦味的贡献成分,主要由咖啡碱、可可碱、茶碱等组成,其中,咖啡碱是最重要的生物碱[25]。常规叶色品种超微绿茶粉的生物碱总量及咖啡碱含量分别为 19.30~61.48 mg/g 和 18.46~58.58 mg/g,而‘黄金芽’等白化品种的生物碱总量及咖啡碱含量分别为 19.27~34.03 mg/g 和 18.34~32.27 mg/g(表 4)。其中,春季的 HJY04、HJY10 的

表 4 春季与秋季‘黄金芽’及其白化子代超微绿茶粉儿茶素及生物碱含量(mg/g)

Table 4 Content of catechins and alkaloids in ultra-fine green tea powder made from 'Huangjinya' and its albino offspring in spring and autumn (mg/g)

	LJ43	ZC108	XX1	HJY	HJY02	HJY04	HJY07	HJY08	HJY09	HJY10	HJY13
春季											
EGC	15.06±1.91^{b}	20.91±3.95^{ab}	15.09±0.87^{b}	10.60±0.14^{b}	13.23±0.38^{b}	15.21±7.09^{b}	13.63±1.65^{b}	10.42±1.58^{b}	31.13±4.84^{a}	13.60±0.91^{b}	13.87±0.00^{b}
EC	9.74±0.69^{bcd}	10.51±0.16^{abc}	8.90±0.39^{cde}	11.42±0.35^{ab}	11.56±0.58^{ab}	8.04±0.43^{def}	11.64±0.64^{a}	4.43±1.07^{g}	7.43±0.14^{ef}	10.00±0.26^{abc}	6.42±0.01^{f}
GC	–	3.79±4.00^{a}	2.38±0.19^{a}	–	–	0.62±0.87^{a}	–	–	0.77±1.09^{a}	–	–
C	1.09±0.17^{a}	1.66±0.74^{a}	0.85±0.08^{a}	1.33±0.23^{a}	1.01±0.05^{a}	0.92±0.36^{a}	0.75±0.05^{a}	0.90±0.21^{a}	0.92±0.30^{a}	0.92±0.33^{a}	0.78±0.00^{a}
EGCG	52.57±5.62^{de}	121.44±4.01^{a}	81.66±1.12^{b}	50.46±1.40^{ef}	84.26±3.12^{b}	61.31±2.86^{cd}	55.39±0.88^{de}	57.91±3.42^{cde}	65.55±0.85^{c}	41.93±1.05^{f}	48.74±0.18^{ef}
ECG	14.30±1.19^{b}	24.19±0.39^{a}	12.41±1.11^{b}	22.03±0.66^{a}	25.95±1.01^{a}	15.20±0.23^{b}	22.13±1.27^{a}	15.88±4.00^{b}	13.76±0.02^{b}	12.32±0.29^{b}	13.24±0.07^{b}
GCG	0.54±0.39^{b}	0.95±0.43^{ab}	0.75±0.07^{ab}	1.47±0.27^{ab}	1.06±0.02^{ab}	1.47±0.54^{ab}	1.30±0.09^{ab}	1.73±0.42^{a}	1.32±0.49^{ab}	0.56±0.22^{ab}	0.85±0.00^{ab}
CG	0.75±0.06^{a}	0.48±0.28^{ab}	–	0.25±0.04^{bc}	0.39±0.01^{abc}	0.32±0.11^{bc}	0.26±0.02^{bc}	0.41±0.10^{abc}	0.10±0.15^{bc}	0.41±0.16^{abc}	–
非酯型儿茶素	25.88±2.77^{bc}	36.87±3.32^{ab}	27.23±1.16^{bc}	23.36±0.34^{c}	25.79±0.72^{bc}	24.79±8.40^{c}	26.03±2.33^{bc}	15.75±1.38^{c}	40.26±3.82^{a}	24.52±1.24^{c}	21.07±0.01^{c}
酯型儿茶素	68.16±7.04^{de}	147.06±3.91^{a}	94.82±1.80^{c}	74.21±2.16^{de}	111.66±4.17^{b}	78.30±3.21^{d}	79.08±1.84^{d}	75.93±6.05^{d}	80.73±1.08^{d}	55.22±1.42^{f}	62.83±0.24^{ef}
总儿茶素	94.04±9.71^{def}	183.93±5.23^{a}	122.05±2.21^{bc}	97.57±2.45^{def}	137.45±4.78^{b}	103.10±10.58^{cde}	105.11±3.98^{cd}	91.68±5.94^{def}	120.98±4.09^{bc}	79.74±2.66^{f}	83.90±0.25^{ef}
TB	0.19±0.01^{d}	0.44±0.30^{bcd}	0.51±0.03^{bcd}	0.63±0.10^{abcd}	0.64±0.04^{abcd}	0.65±0.22^{abcd}	0.33±0.02^{cd}	1.10±0.28^{a}	0.78±0.23^{abc}	0.34±0.11^{cd}	1.00±0.00^{ab}
TP	–	0.32±0.37	–	–	–	–	–	–	–	–	–
TC	0.84±0.14^{b}	2.14±0.74^{a}	0.49±0.03^{b}	0.68±0.12^{b}	0.84±0.04^{b}	1.23±0.44^{ab}	0.61±0.05^{b}	0.89±0.23^{b}	0.72±0.23^{b}	0.59±0.22^{b}	0.76±0.00^{b}
CAFF	27.19±1.59^{c}	58.58±1.51^{a}	24.88±1.85^{cd}	31.97±0.58^{b}	22.53±1.26^{de}	18.84±0.44^{ef}	23.90±1.18^{cd}	22.65±0.96^{de}	25.68±0.12^{cd}	18.34±0.51^{f}	32.27±0.19^{b}
总生物碱	28.22±1.73^{c}	61.48±2.58^{a}	25.88±1.92^{c}	33.28±0.56^{b}	24.02±1.33^{cde}	20.73±0.79^{de}	24.84±1.25^{cd}	24.64±1.15^{cd}	27.18±0.47^{c}	19.27±0.62^{e}	34.03±0.20^{b}
秋季											
EGC	17.43±1.75^{a}	17.10±0.62^{a}	17.58±1.17^{a}	17.33±1.23^{a}	17.26±0.78^{a}	17.02±0.62^{a}	18.30±1.42^{a}	14.71±0.48^{a}	16.88±0.12^{a}	16.78±0.49^{a}	18.59±3.50^{a}
EC	13.92±0.46^{de}	11.01±0.36^{f}	20.98±0.65^{a}	18.84±0.28^{ab}	14.94±0.26^{cde}	13.62±0.23^{e}	19.97±0.42^{a}	16.90±0.46^{bc}	15.28±0.26^{cde}	16.41±0.08^{bcd}	21.20±2.03^{a}
GC	4.32±1.47^{c}	5.66±1.43^{bc}	10.08±1.31^{a}	4.86±1.30^{bc}	4.56±1.43^{c}	4.63±1.00^{c}	7.43±0.33^{abc}	6.03±0.98^{bc}	8.49±0.18^{ab}	6.82±0.20^{abc}	6.50±0.22^{abc}
C	1.79±0.50^{b}	1.88±0.57^{b}	2.78±0.37^{ab}	2.69±0.50^{ab}	2.14±0.46^{ab}	1.69±0.36^{b}	2.92±0.09^{ab}	2.50±0.53^{ab}	3.35±0.03^{a}	3.41±0.11^{a}	2.87±0.10^{ab}
EGCG	73.20±1.95^{e}	84.72±1.50^{d}	96.69±2.28^{a}	66.46±0.71^{ef}	99.20±2.11^{a}	88.98±0.70^{bcd}	87.18±2.30^{cd}	60.33±1.51^{f}	94.10±2.35^{abc}	69.45±0.61^{e}	94.83±3.79^{ab}
ECG	23.03±0.65^{bcd}	16.20±0.17^{g}	17.42±0.34^{fg}	21.23±0.25^{cde}	24.61±0.73^{abc}	20.49±0.42^{def}	27.07±0.63^{a}	19.63±0.25^{ef}	19.87±0.56^{def}	21.14±0.39^{de}	25.37±2.76^{ab}
GCG	0.60±0.17^{f}	0.96±0.04^{e}	1.31±0.04^{cd}	1.63±0.03^{bc}	0.48±0.02^{f}	0.59±0.02^{f}	1.93±0.05^{ab}	1.20±0.01^{de}	0.51±0.02^{f}	1.06±0.01^{de}	2.01±0.25^{a}
CG	–	–	0.22±0.00^{de}	0.33±0.02^{cd}	0.70±0.02^{a}	–	0.40±0.03^{c}	–	0.59±0.02^{b}	0.21±0.07^{e}	0.72±0.06^{a}
非酯型儿茶素	37.46±4.06^{d}	35.65±2.86^{d}	51.42±3.28^{a}	43.72±3.23^{abcd}	38.90±2.53^{cd}	36.96±2.19^{d}	48.61±1.74^{abc}	40.14±1.67^{bcd}	44.01±0.25^{abcd}	43.42±0.74^{abcd}	49.16±5.13^{ab}
酯型儿茶素	96.83±2.46^{ef}	101.89±1.59^{de}	115.64±2.64^{abc}	89.66±0.76^{fg}	124.99±2.83^{a}	110.06±1.11^{cd}	116.59±2.99^{abc}	81.16±1.63^{g}	115.07±2.95^{bc}	91.86±0.82^{f}	122.93±5.61^{ab}
总儿茶素	134.29±6.49^{cd}	137.54±2.83^{cd}	167.06±5.90^{a}	133.38±3.64^{cd}	163.89±3.39^{ab}	147.03±2.78^{bc}	165.19±3.87^{a}	121.30±3.30^{d}	159.08±3.19^{ab}	135.28±1.36^{cd}	172.09±10.73^{a}
TB	0.45±0.16^{e}	0.61±0.15^{de}	1.16±0.16^{bc}	1.41±0.17^{abc}	1.23±0.14^{bc}	1.08±0.11^{c}	1.39±0.04^{abc}	1.13±0.06^{bc}	1.69±0.04^{a}	1.01±0.02^{cd}	1.52±0.09^{ab}
TP	0.05±0.07^{a}	0.11±0.08^{a}	–	0.12±0.09^{a}	0.11±0.07^{a}	0.11±0.08^{a}	0.17±0.01^{a}	0.10±0.07^{a}	0.16±0.01^{a}	0.16±0.01^{a}	0.13±0.01^{a}
TC	0.34±0.10^{a}	0.59±0.12^{a}	1.38±0.21^{a}	0.91±0.18^{a}	1.04±0.17^{a}	1.17±0.15^{a}	1.11±0.04^{a}	0.36±0.12^{a}	1.32±0.01^{a}	0.67±0.02^{a}	1.06±0.21^{a}
CAFF	18.46±0.39^{f}	19.79±0.24^{ef}	27.17±0.20^{ab}	28.49±0.29^{ab}	25.80±0.66^{bc}	22.99±0.20^{cde}	30.47±0.53^{a}	23.57±0.28^{cd}	28.01±0.58^{ab}	21.18±0.02^{def}	27.83±2.84^{ab}
总生物碱	19.30±0.71^{f}	21.10±0.39^{ef}	29.71±0.52^{b}	30.94±0.44^{ab}	28.18±0.45^{bc}	25.35±0.29^{cd}	33.13±0.61^{a}	25.17±0.42^{cd}	31.18±0.63^{ab}	23.02±0.07^{de}	30.54±2.73^{ab}

注:-表示未检出,同一行中不同字母表示差异性显著(P<0.05);表5同。

咖啡碱含量显著低于常规绿色品种($P<0.05$)。同时，大多数‘黄金芽’及其白化子代超微绿茶粉中咖啡碱含量均表现为秋季高于春季。

2.3.3　氨基酸组分分析　氨基酸组分与采摘季节、芽叶嫩度及茶树品种遗传特性密切相关，并可直接影响茶叶品质[26]。本研究在超微绿茶粉中共检测了 16 种蛋白氨基酸及 GABA 和茶氨酸 2 种非蛋白氨基酸(表 5)。根据呈味特性不同，氨基酸组分可分为鲜味、甜味及苦味氨基酸[27]。由表 5 可知，鲜味氨基酸是氨基酸中含量最高的一类组分，其中茶氨酸的贡献权重较高。常规绿色对照品种超微绿茶粉中鲜味氨基酸、甜味氨基酸及苦味氨基酸的含量范围分别是 7.47~30.49、1.28~3.90、0.81~3.51 mg/g；而‘黄金芽’及其白化子代超微绿茶粉中三类氨基酸分别为

表 5　春季和秋季‘黄金芽’及其白化子代超微绿茶粉氨基酸组分含量(mg/g)

Table 5　Content of amino acid components in ultra-fine green tea powder made by 'Huangjinya' and its albino offspring in spring and autumn (mg/g)

氨基酸组分	LJ43	ZC108	XX1	HJY	HJY02	HJY04	HJY07	HJY08	HJY09	HJY10	HJY13
春季											
Asp	2.28±0.18^{ef}	2.91±0.06^{de}	–	5.02±0.10^{b}	2.09±0.19^{f}	2.61±0.10^{def}	4.02±0.19^{c}	5.91±0.41^{a}	3.03±0.19^{d}	2.92±0.10^{de}	4.35±0.14^{c}
Glu	3.52±0.51^{de}	4.76±0.07^{cd}	2.19±0.27^{e}	6.46±0.30^{b}	3.84±0.49^{d}	4.21±0.15^{d}	7.19±0.28^{ab}	8.61±1.02^{a}	6.10±0.36^{bc}	6.51±0.15^{b}	7.31±0.36^{ab}
Asn	0.68±0.11^{c}	0.74±0.02^{bc}	0.24±0.17^{d}	1.07±0.02^{ab}	0.26±0.02^{d}	0.52±0.02^{cd}	0.46±0.15^{cd}	1.19±0.20^{a}	0.74±0.04^{bc}	0.25±0.02^{d}	1.04±0.08^{ab}
Gln	1.17±0.21^{g}	1.97±0.03^{defg}	1.83±0.05^{efg}	2.38±0.07^{def}	1.51±0.16^{fg}	2.57±0.13^{cde}	3.44±0.09^{c}	7.31±0.73^{b}	2.76±0.27^{cd}	2.57±0.06^{cde}	9.09±0.18^{a}
Gaba	0.35±0.14^{a}	0.63±0.50^{a}	0.21±0.03^{a}	0.30±0.08^{a}	0.31±0.11^{a}	0.62±0.23^{a}	0.50±0.20^{a}	0.75±0.26^{a}	0.57±0.27^{a}	0.46±0.13^{a}	0.44±0.40^{a}
Thea	6.98±0.91^{d}	19.48±0.26^{c}	8.50±0.47^{d}	17.89±0.44^{c}	6.70±0.82^{d}	16.79±0.66^{c}	14.71±0.46^{c}	28.34±3.74^{b}	16.04±0.89^{c}	18.60±0.39^{c}	42.39±1.85^{a}
鲜味氨基酸	14.97±1.94^{d}	30.49±0.47^{c}	12.97±0.46^{d}	33.12±0.78^{c}	14.71±1.57^{d}	27.31±1.17^{c}	30.32±1.10^{c}	52.12±6.21^{b}	29.25±2.00^{c}	31.32±0.81^{c}	64.61±2.78^{a}
Ser	0.60±0.12^{e}	2.29±0.18^{bc}	1.21±0.03^{de}	2.37±0.12^{bc}	2.27±0.21^{bc}	2.19±0.15^{bc}	2.93±0.07^{ab}	3.75±0.72^{a}	1.90±0.21^{cd}	2.33±0.17^{bc}	2.97±0.27^{ab}
Thr	0.36±0.09^{a}	–	–	–	–	0.54±0.76^{a}	0.27±0.39^{a}	0.97±0.12^{a}	0.41±0.31^{a}	0.13±0.19^{a}	0.47±0.33^{a}
Ala	0.50±0.09^{ef}	0.67±0.22^{def}	0.39±0.07^{f}	0.74±0.04^{cdef}	0.93±0.13^{cd}	0.82±0.03^{cde}	1.05±0.03^{bc}	1.37±0.18^{ab}	0.92±0.05^{cd}	0.86±0.04^{cde}	1.44±0.02^{a}
Met	0.35±0.02^{b}	0.41±0.29^{b}	0.22±0.13^{b}	0.27±0.07^{b}	0.87±0.17^{ab}	0.83±0.01^{ab}	0.76±0.26^{ab}	0.68±0.29^{b}	1.21±0.05^{ab}	1.94±1.32^{ab}	2.59±0.94^{a}
Trp	0.09±0.06^{b}	0.53±0.27^{a}	0.14±0.03^{ab}	0.29±0.03^{ab}	0.24±0.01^{ab}	0.33±0.02^{ab}	0.42±0.21^{ab}	0.38±0.19^{ab}	–	–	–
甜味氨基酸	1.89±0.36^{d}	3.90±0.41^{bcd}	1.96±0.09^{cd}	3.67±0.18^{bcd}	4.31±0.49^{bc}	4.70±0.66^{b}	5.43±0.28^{ab}	7.14±0.90^{a}	4.45±0.11^{b}	5.26±1.29^{ab}	7.47±1.10^{a}
His	0.18±0.14^{ab}	0.27±0.01^{ab}	0.21±0.16^{ab}	0.35±0.05^{ab}	0.19±0.05^{ab}	0.38±0.03^{a}	0.44±0.08^{a}	0.17±0.18^{ab}	0.12±0.18^{ab}	0.42±0.01^{a}	–
Arg	1.42±0.25^{efg}	0.83±0.30^{fg}	0.35±0.10^{g}	3.84±0.07^{c}	1.54±0.19^{efg}	1.48±1.05^{efg}	2.85±0.16^{cde}	14.32±0.75^{a}	1.93±0.12^{def}	3.17±0.09^{cd}	8.07±0.39^{b}
Tyr	0.33±0.03^{abc}	0.30±0.02^{abc}	0.03±0.05^{c}	0.07±0.05^{bc}	0.29±0.04^{abc}	0.28±0.02^{abc}	0.45±0.08^{ab}	0.42±0.03^{abc}	0.57±0.01^{a}	0.10±0.00^{bc}	0.39±0.35^{abc}
Val	–	0.25±0.35^{a}	0.03±0.04^{a}	0.03±0.05^{a}	–	–	0.09±0.13^{a}	0.19±0.13^{a}	–	–	–
Phe	0.77±0.10^{abcd}	1.09±0.12^{a}	0.16±0.01^{e}	0.16±0.05^{e}	0.54±0.06^{bcde}	1.06±0.09^{ab}	0.51±0.34^{cde}	0.88±0.29^{abc}	0.38±0.06^{cde}	0.22±0.07^{e}	0.29±0.07^{de}
Ile	0.16±0.01^{cde}	0.39±0.12^{a}	0.03±0.04^{de}	0.09±0.01^{de}	0.38±0.05^{a}	–	0.29±0.01^{abc}	0.34±0.05^{ab}	0.18±0.01^{bcd}	0.07±0.00^{de}	0.11±0.02^{de}
Leu	0.27±0.03^{bc}	0.38±0.12^{bc}	0.13±0.00^{bc}	0.15±0.02^{bc}	0.37±0.03^{bc}	0.29±0.01^{bc}	0.41±0.13^{b}	0.72±0.19^{a}	0.29±0.02^{bc}	0.07±0.05^{c}	0.16±0.12^{bc}
苦味氨基酸	3.13±0.47^{cd}	3.51±0.38^{c}	0.95±0.18^{d}	4.70±0.10^{c}	3.32±0.32^{c}	3.49±1.15^{c}	5.03±0.60^{c}	17.03±1.49^{a}	3.48±0.18^{c}	4.05±0.22^{c}	9.03±0.14^{b}
秋季											
Asp	1.15±0.45^{bc}	1.17±0.10^{bc}	1.02±0.11^{c}	1.71±0.35^{abc}	1.95±0.73^{ab}	1.05±0.39^{bc}	1.34±0.14^{abc}	2.14±0.17^{a}	1.03±0.14^{c}	1.63±0.03^{abc}	1.00±0.06^{c}
Glu	1.49±0.22^{cd}	1.73±0.08^{cd}	1.21±0.19^{d}	4.31±0.35^{a}	2.36±0.22^{bc}	2.22±0.45^{bc}	2.32±0.23^{bc}	3.91±0.25^{a}	1.45±0.41^{cd}	2.70±0.39^{b}	1.66±0.42^{cd}
Asn	0.06±0.01^{b}	0.06±0.03^{b}	0.11±0.04^{ab}	0.12±0.03^{ab}	0.11±0.03^{ab}	0.07±0.00^{b}	0.09±0.01^{ab}	0.12±0.02^{ab}	0.09±0.01^{ab}	0.14±0.00^{a}	0.07±0.01^{ab}
Gln	2.93±0.16^{d}	3.08±0.16^{d}	3.35±0.70^{cd}	9.16±0.76^{a}	5.08±0.10^{bc}	4.14±0.65^{bcd}	5.49±0.81^{b}	4.32±0.23^{bcd}	2.66±0.97^{d}	4.37±0.71^{bcd}	3.53±0.88^{cd}
Gaba	0.01±0.00^{b}	0.02±0.00^{b}	0.09±0.01^{ab}	0.19±0.06^{a}	0.16±0.07^{a}	0.04±0.03^{b}	0.17±0.04^{a}	0.12±0.03^{ab}	0.10±0.01^{ab}	0.09±0.05^{ab}	0.12±0.04^{ab}
Thea	1.82±0.21^{h}	5.26±0.14^{cd}	4.91±0.73^{de}	12.78±0.39^{a}	3.64±0.09^{fg}	4.13±0.19^{ef}	2.75±0.18^{gh}	12.70±0.48^{a}	3.75±0.08^{fg}	11.39±0.29^{b}	5.95±0.44^{c}
鲜味氨基酸	7.47±1.02^{e}	11.32±0.27^{cd}	10.68±1.43^{cde}	28.26±1.63^{a}	13.30±1.20^{c}	11.65±1.46^{cd}	12.16±1.08^{cd}	23.33±0.86^{b}	9.08±1.50^{de}	20.32±1.27^{b}	12.33±1.74^{cd}
Ser	0.52±0.14^{a}	0.67±0.18^{a}	0.66±0.38^{a}	1.03±0.25^{a}	0.95±0.23^{a}	0.73±0.14^{a}	0.86±0.18^{a}	0.81±0.12^{a}	0.90±0.17^{a}	0.82±0.14^{a}	0.62±0.05^{a}
Thr	0.14±0.05^{d}	0.17±0.03^{d}	0.22±0.10^{cd}	0.24±0.06^{cd}	0.38±0.08^{abc}	0.23±0.06^{cd}	0.32±0.02^{bcd}	0.24±0.03^{cd}	0.49±0.05^{ab}	0.49±0.05^{ab}	0.57±0.11^{a}
Ala	0.44±0.15^{ab}	0.41±0.04^{ab}	0.36±0.02^{ab}	0.43±0.07^{ab}	0.45±0.16^{ab}	0.28±0.08^{b}	0.60±0.12^{a}	0.35±0.05^{ab}	0.32±0.07^{ab}	0.35±0.03^{ab}	0.36±0.15^{ab}
Met	0.13±0.07^{c}	0.14±0.02^{c}	0.26±0.23^{c}	0.15±0.05^{c}	0.32±0.10^{c}	0.20±0.08^{c}	0.97±0.08^{b}	0.25±0.15^{c}	1.10±0.06^{ab}	1.45±0.20^{a}	1.45±0.20^{a}
Trp	0.04±0.03^{b}	0.04±0.03^{b}	0.04±0.00^{b}	0.20±0.03^{a}	0.05±0.00^{b}	0.06±0.01^{b}	0.06±0.01^{b}	0.16±0.00^{a}	0.06±0.01^{b}	0.03±0.00^{b}	0.05±0.02^{b}
甜味氨基酸	1.28±0.43^{c}	1.44±0.29^{c}	1.54±0.61^{c}	2.05±0.42^{abc}	2.15±0.56^{abc}	1.49±0.35^{c}	2.82±0.30^{ab}	1.81±0.31^{bc}	2.87±0.34^{ab}	3.14±0.35^{a}	3.03±0.32^{a}
His	0.05±0.01^{c}	0.08±0.01^{c}	0.26±0.03^{a}	0.15±0.05^{abc}	0.24±0.02^{ab}	0.18±0.07^{abc}	0.17±0.07^{abc}	0.13±0.03^{bc}	0.08±0.02^{c}	0.14±0.08^{abc}	0.09±0.03^{c}
Arg	0.14±0.03^{d}	0.13±0.01^{d}	1.23±0.05^{a}	0.68±0.09^{bc}	0.43±0.06^{bcd}	0.34±0.15^{cd}	0.28±0.11^{d}	1.08±0.09^{a}	0.24±0.17^{d}	0.71±0.22^{b}	0.20±0.13^{d}
Tyr	0.20±0.09^{c}	0.28±0.06^{c}	0.33±0.18^{c}	4.51±0.63^{b}	0.50±0.15^{c}	0.45±0.09^{c}	0.32±0.05^{c}	5.22±0.05^{a}	0.40±0.23^{c}	0.43±0.19^{c}	0.21±0.00^{c}
Val	–	–	0.20±0.02^{abc}	0.01±0.00^{d}	0.11±0.01^{c}	0.21±0.02^{ab}	0.25±0.01^{a}	0.01±0.00^{d}	0.15±0.01^{bc}	0.23±0.08^{ab}	0.21±0.06^{ab}
Phe	0.07±0.05^{b}	0.08±0.05^{b}	0.06±0.04^{b}	0.36±0.05^{a}	0.09±0.00^{b}	0.10±0.02^{b}	0.10±0.01^{b}	0.29±0.00^{a}	0.10±0.01^{b}	0.06±0.01^{b}	0.08±0.04^{b}
Ile	0.13±0.02^{b}	0.14±0.02^{b}	0.06±0.03^{b}	0.20±0.02^{ab}	0.23±0.12^{ab}	0.26±0.11^{ab}	0.21±0.13^{ab}	0.22±0.02^{ab}	0.14±0.07^{ab}	0.85±0.76^{a}	0.22±0.07^{ab}
Leu	0.22±0.01^{b}	0.23±0.01^{b}	0.64±0.02^{a}	0.13±0.01^{b}	0.38±0.14^{ab}	0.24±0.14^{b}	0.37±0.12^{ab}	0.20±0.04^{b}	0.30±0.23^{b}	0.29±0.16^{b}	0.37±0.09^{ab}
苦味氨基酸	0.81±0.20^{c}	0.93±0.13^{c}	2.77±0.16^{b}	6.04±0.48^{a}	1.99±0.40^{bc}	1.77±0.41^{bc}	1.70±0.32^{bc}	7.15±0.06^{a}	1.43±0.57^{c}	2.70±0.88^{b}	1.39±0.31^{c}

9.08~64.61、1.49~7.47、1.39~17.03 mg/g。‘黄金芽’、HJY08、HJY10 及 HJY13 制作的超微绿茶粉茶氨酸含量较高，其中 HJY08 中的茶氨酸含量显著高于绿色对照品种（P<0.05）。从季节来看，鲜味及甜味氨基酸的总量均表现为春季高于秋季，而苦味氨基酸中有少数氨基酸表现出秋季积累量高于春季的现象。氨基酸组分种类较多，除单个组分直接影响滋味外，还可通过与其它呈味化合物交互作用，共同构成茶汤丰富的风味品质[24]。

2.4 不同叶色品种资源超微绿茶粉的关键理化差异指标

目前用于生产超微绿茶粉的品种主要局限于常规绿色品种，但不同品种制作的超微绿茶粉在感官品质、理化指标有较大差异[28]。为进一步揭示常规绿色、‘黄金芽’及其白化子代两类不同叶色超微绿茶粉之间的理化特性差异，对两类叶色超微绿茶粉的粒径、色差、茶多酚、儿茶素组分、氨基酸组分、生物碱组分等进行 OPLS-DA 分析。结果显示，3 个常规绿色品种能与 8 个‘黄金芽’及其白化子代品种有效区分，说明两类叶色超微绿茶粉的理化指标存在显著差异（图 3A）。OPLS-DA 模型的 R^2Y=0.848>0.5，Q^2=0.688>0.5，说明该模型对因变量变异贡献百分比及预测能力较强，模型拟合度较好[29]。进一步对模型进行 200 次的置换模拟检验（图 3B），发现右边的 R^2 及 Q^2 值均高于左边，Q^2 回归线截距（−0.703）为负值，R^2 截距（0.328）小于 0.4，说明构建的 OPLS-DA 模型较为合适，且不会出现过拟合。变量重要性投影（Variable Importance in Projection，VIP）可用于反映 OPLS-DA 模型中变量的重要性，VIP 值越大，说明该自变量对于差异判别的贡献越大。基于 VIP>1 的标准，共筛选到 17 种指标，分别为可可碱、Gln、L^*值、Met、甜味氨基酸总量、a^*值、Thr、C、咖啡碱、苦味氨基酸总量、生物碱总量、GCG、b^*值、鲜味氨基酸总量、EC、非酯型儿茶素及 Ala（图 3C）。说明常规叶色及白化品种资源超微绿茶粉在色差、氨基酸、生物碱、儿茶素组分含量方面存在显著代谢差异。

2.5 ‘黄金芽’及其白化子代超微绿茶粉季节相关的关键理化指标

研究表明，原料采摘时间对茶叶品质有重要影响，同一茶树品种制作的茶叶生化成分含量在不同季节间呈现出显著差异[30]。为探究‘黄金芽’及其白化子代超微绿茶粉理化指标的季节性差异，对春季与秋季的超微绿茶粉粒径、色差、茶多酚、儿茶素组分、氨基酸组分、生物碱组分等进行 OPLS-DA 分析。结果显示，两个季节的‘黄金芽’及其白化子代超微绿茶粉理化指标差异显著，这些指标可有效区分不同季节样品。OPLS-DA 模型（R^2Y=0.977>0.5，Q^2=0.955>0.5）拟合度较好（图 4A）；200 次的模型置换模拟检验发现，右边的 R^2 及 Q^2 值均高于左边，构建的 OPLS-DA 模型不会出现过拟合（R^2=0.28，Q^2=−0.59）（图 4B）；基于 VIP>1 的标准，共筛选到 22 种指标，分别为 GC、Ser、C、EC、Glu、茶碱、非酯型儿茶素、Ala、儿茶素总量、Asp、甜味氨基酸、Asn、Thea、鲜味氨基酸、TB、酚氨比、酯型儿茶素、游离氨基酸、EGCG、

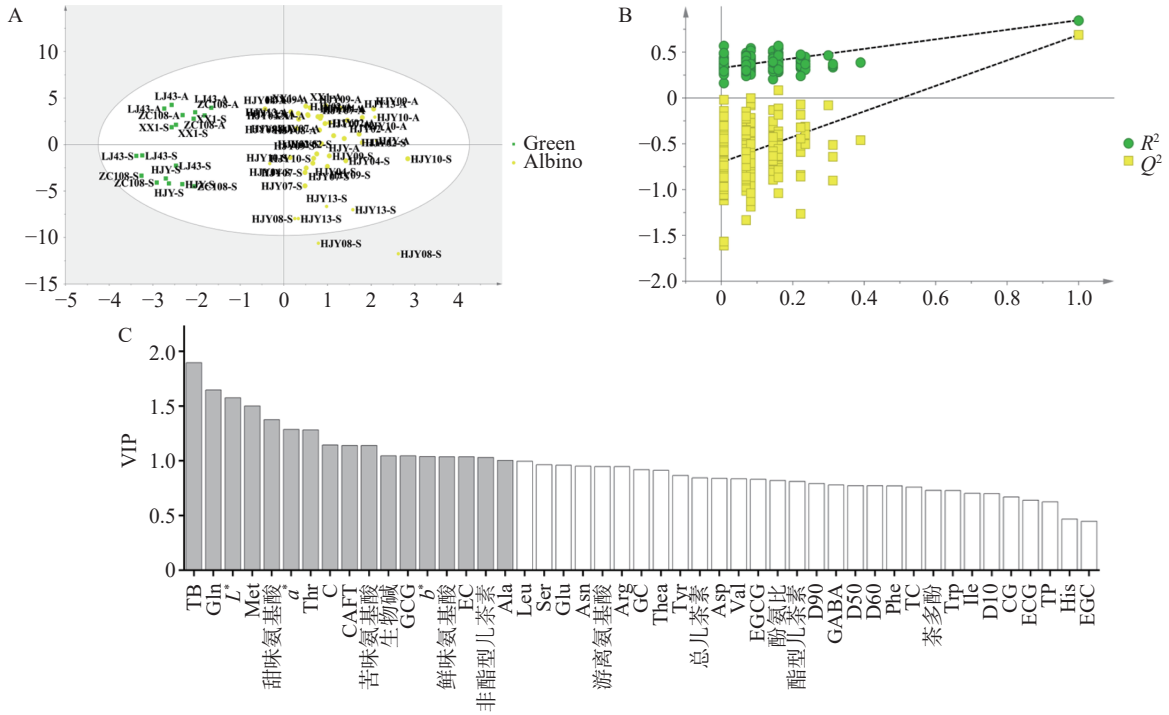


图 3 ‘黄金芽’及其白化子代品种与常规绿色品种的超微绿茶粉 OPLS-DA

Fig.3 OPLS-DA of ultra-fine green tea powder made from 'Huangjinya' and its albino offspring

注：A. 散点图；B. 模型交叉验证图；C. 变量权重图；图 4 同。

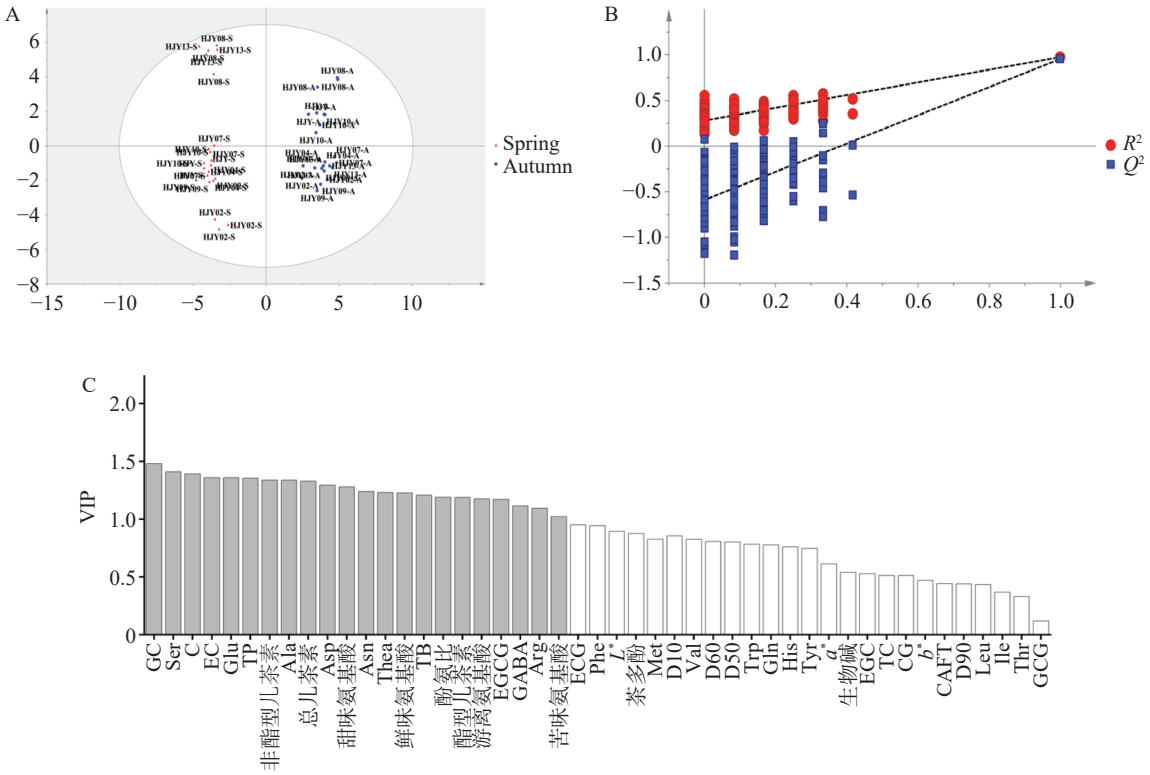


图 4　春季与秋季‘黄金芽’及其白化子代品种超微绿茶粉 OPLS-DA

Fig.4　OPLS-DA of ultra-fine green tea powder made from 'Huangjinya' and its albino offspring in spring and autumn

GABA、Arg、苦味氨基酸(图 4C)。说明春季与秋季的‘黄金芽’及其白化子代超微绿茶粉在氨基酸、生物碱、儿茶素组分含量方面存在显著差异。

3　结论

本研究以 3 个常规叶色品种为对照，对 8 个‘黄金芽’及其白化子代制作的春季及秋季超微绿茶粉的感官审评、粒径分布、色差分析、茶多酚及儿茶素组分、氨基酸及组分、生物碱及组分等进行了综合评价。结果显示，除色泽不一致外，‘黄金芽’及其白化子代超微绿茶粉在感官品质及理化指标优于常规绿色品种，具体表现为酚氨比较低、氨基酸含量高、鲜爽度较高，其中，‘黄金芽’及其子代 HJY08 和 HJY10 综合性状表现较好。OPLS-DA 分析，揭示了绿色品种与‘黄金芽’及其白化子代超微绿茶粉的 17 种关键差异理化指标，包括 TB、Gln、L^*值、Met、甜味氨基酸总量、a^*值、Thr、C、咖啡碱、苦味氨基酸总量、生物碱总量、GCG、b^*值、鲜味氨基酸总量、EC、非酯型儿茶素及 Ala。春季及秋季‘黄金芽’及其白化子代超微绿茶粉的品质差异明显，其中，春季的游离氨基酸总量及各味型氨基酸组分均表现为高于秋季，而春季超微绿茶粉的茶多酚、儿茶素类、酚氨比及咖啡碱较秋季低。OPLS-DA 分析，阐明了‘黄金芽’及其白化子代超微绿茶粉与季节相关的 22 种关键指标，包括 GC、Ser、C、EC、Glu、茶碱、非酯型儿茶素、Ala、儿茶素总量、Asp、甜味氨基酸、Asn、Thea、鲜味氨基酸、可可碱、酚氨比、酯型儿茶素、游离氨基酸、EGCG、GABA、Arg 和苦味氨基酸。本研究通过对‘黄金芽’及其白化子代超微绿茶粉品质的综合评价，为叶色特异品种茶粉的品种选育评价体系的建立及品种适制性的筛选奠定了基础，也为拓展叶色特异茶树品种的精深加工茶叶产品提供了新思路。今后可通过感官定量描述分析、GC-MS 分析等多维度评价叶色特异性品种超微绿茶粉，为相关茶树资源在茶食品或新茶饮方面的应用创造条件。

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

参考文献

[1] 刘学, 杨清, 刘文静, 等. 超微茶粉的开发及研究进展[J]. 东北农业科学, 2025, 50(1): 65−68. [LIU Xue, YANG Qing, LIU Wenjing, et al. Development and research progress of ultrafine tea powder[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2025, 50(1): 65−68.]

[2] ZHOU Fei, WANG Jinchao, JIANG Xuming, et al. Understanding process parameter-induced variability for physicochemical and sensory metrics of green tea powder[J]. LWT, 2025, 223: 117777.

[3] 张依依, 吴正敏, 王霄然, 等. 超微茶粉加工工艺研究概述[J]. 茶业通报, 2022, 44(2): 67−72. [ZHANG Yiyi, WU Zhengmin, WANG Xiaoran, et al. Overview of research on processing technology of ultrafine tea powder[J]. Journal of Tea Business, 2022, 44(2): 67−72.]

[4] FAN Yangen, ZHAO Tingting, XIANG Qinzeng, et al. Multi-omics research accelerates the clarification of the formation mechanism and the influence of leaf color variation in tea (*Camellia sinensis*) plants[J]. Plants, 2024, 13(3): 426.

[5] 沈周高, 谢应华, 范晓娟, 等. 叶色变异茶树生理生化特征及其变异机制的研究进展[J]. 安徽农业大学学报, 2023, 50(4):

582−594. ［SHEN Zhougao, XIE Yinghua, FAN Xiaojuan, et al. Research progress on the physiological and biochemical characteristics and mechanism of leaf color heteromorphosis in tea plants (*Camellia sinensis* L.)［J］. Journal of Anhui Agricultural University, 2023, 50(4): 582−594.］
［6］ 王丽鸳, 赵容波, 成浩, 等. 叶色特异茶树品种选育现状［J］. 中国茶叶, 2020, 42(1): 15−19. ［WANG Liyuan, ZHAO Rongbo, CHENG Hao, et al. Current situation on breeding of tea cultivars with special leaf colors［J］. China Tea, 2020, 42(1): 15−19.］
［7］ JAKUBCZYK K, SZYMCZYKOWSKA K, KIKA J, et al. Exploring the influence of origin, harvest time, and cultivation method on antioxidant capacity and bioactive compounds of matcha teas［J］. Foods, 2024, 13(8): 1270.
［8］ 毛娟, 王文海, 洛英, 等. 西藏墨脱县 6 个茶树品种春夏两季化学品质差异分析［J］. 食品科学, 2024, 45(10): 167−174. ［MAO Juan, WANG Wenhai, Lobsang, et al. Variations in chemical quality among spring and summer tea made from six cultivars grown in Motuo County, Tibet［J］. Food Science, 2024, 45(10): 167−174.］
［9］ 孔亚帅, 卫艺炜, 万亚欣, 等. 基于非靶向代谢组学技术的不同季节信阳白茶品质分析［J］. 食品科技, 2024, 49(5): 50−56. ［KONG Yashuai, WEI Yiwei, WAN Yaxin, et al. Quality analysis of Xinyang white tea in different production seasons based on non-targeted metabolomics technologies［J］. Food Science and Technology, 2024, 49(5): 50−56.］
［10］ 黄菡, 刘桂珍, 杨学思, 等. 不同茶树品种秋季鲜叶超微绿茶粉适制性研究［J］. 茶叶, 2022, 48(2): 78−80. ［HUANG Han, LIU Guizhen, YANG Xuesi, et al. Suitability of autumn fresh leaves from different tea cultivars for processing ultrafine green tea powder［J］. Journal of Tea, 2022, 48(2): 78−80.］
［11］ 郭倩文. 抹茶适制的茶叶品种及其品质提升技术研究［D］. 宁波: 宁波大学, 2020. ［GUO Qianwen. Study on tea varieties suitable for matcha and their quality improvement technology［D］. Ningbo: Ningbo University, 2020.］
［12］ 毛雅琳, 汪芳, 尹军峰, 等. 不同茶树品种碾茶的品质分析［J］. 茶叶科学, 2020, 40(6): 782−794. ［MAO Yalin, WANG Fang, YIN Junfeng, et al. Quality analysis of Tencha made from different tea cultivars［J］. Journal of Tea Science, 2020, 40(6): 782−794.］
［13］ 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(13): 194−199. ［WANG Yi, YANG Juan, YANG Haibin, et al. Development status and suggestions of summer and autumn tea industry based on offline and online surveys［J］. South China Agriculture, 2023(13): 194−199.］
［14］ 杨文婷. ‘黄金芽’子代茶树新梢理化特性及光合色素代谢相关基因表达研究［D］. 杭州: 浙江大学, 2022. ［YANG Wenting. Study on physio-chemical characteristics and expression pattern of genes associated with photosynthesis pigment metabolism of the tea plant shoots from the 'Huangjinya's offspring［D］. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.］
［15］ 吴颖, 胡剑光, 郑新强, 等. 紫化和黄化茶树品种叶色色差研究［J］. 茶叶, 2020, 46(1): 20−23. ［WU Ying, HU Jianguang, ZHENG Xinqiang, et al. Study on leaf color differences of tea cultivars with purple and yellow leaves［J］. Journal of Tea, 2020, 46(1): 20−23.］
［16］ 代祥, 梅菊芬, 杨亦扬, 等. 基于色差仪的茶树叶色量化研究［J］. 南京农业大学学报, 2024, 47(2): 232−241. ［DAI Xiang, MEI Jufen, YANG Yiyang, et al. A quantitative study of leaf colors of tea plants based on the colorimeter［J］. Journal of Nanjing Agricultural University, 2024, 47(2): 232−241.］
［17］ GAO Wenjie, CHEN Feng, WANG Xi, et al. Recent advances in processing food powders by using superfine grinding techniques: A review［J］. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(4): 2222−2255.
［18］ 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.
［19］ XUE Jinjin, LIU Panpan, XU Yongquan, et al. Effect of cultivar and process on the astringency of matcha based on flavonoids-targeted metabolomic analysis［J］. Food Research International, 2025, 204: 115954.
［20］ 邱有梅, 王飞权, 罗盛财, 等. 不同季节武夷名丛茶树种质资源生化成分分析［J］. 西北农业学报, 2012, 21(10): 117−122. ［QIU Youmei, WANG Feiquan, LUO Shengcai, et al. Analysis of biochemical components of Wuyi Mingcong tea germplasm resources in different seasons［J］. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2012, 21(10): 117−122.］
［21］ YU Penghui, HUANG Hao, ZHAO Xi, et al. Dynamic variation of amino acid content during black tea processing: A review［J］. Food Reviews International, 2023, 39(7): 3970−3983.
［22］ 陈岱卉, 叶乃兴, 邹长如. 茶树品种的适制性与茶叶品质［J］. 福建茶叶, 2008, 30(1): 2−5. ［CHEN Daihui, YE Naixing, ZOU Changru, et al. Manufacturing suitability of tea cultivars and tea quality［J］. Tea in Fujian, 2008, 30(1): 2−5.］
［23］ NARUKAWA M, KIMATA H, NOGA C, et al. Taste characterisation of green tea catechins［J］. International Journal of Food Science and Technology, 2010, 45(8): 1579−1585.
［24］ 张英娜, 嵇伟彬, 许勇泉, 等. 儿茶素呈味特性及其感官分析方法研究进展［J］. 茶叶科学, 2017, 37(1): 1−9. ［ZHANG Yingna, JI Weibin, XU Yongquan, et al. Review on taste characteristic of catechins and its sensory analysis method［J］. Journal of Tea Science, 2017, 37(1): 1−9.］
［25］ DAI Yuqiao, YANG Ting, LUO Jinglong, et al. Changes in alkaloids and their related metabolites during the processing of 'Qiancha 1' white tea based on transcriptomic and metabolomic analysis［J］. LWT, 2025, 218: 117435.
［26］ 张应根, 宋振硕, 陈林, 等. 乌龙茶鲜叶游离氨基酸组成轮廓的模式识别研究［J］. 热带亚热带植物学报, 2023, 31(6): 853−862. ［ZHANG Yinggen, SONG Zhenshuo, CHEN Lin, et al. Pattern recognition of free amino acids profile in fresh leaves of oolong tea cultivars［J］. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2023, 31(6): 853−862.］
［27］ 刘新, 刘政芳, 张彦, 等. 基于游离氨基酸和感官鲜度评价的复合鲜味产品的呈味特征分析［J］. 食品工业科技, 2023, 44(7): 287−293. ［LIU Xin, LIU Zhengfang, ZHANG Yan, et al. Taste characteristics analysis of compound umami products based on free amino acids and sensory evaluation of umami taste［J］. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(7): 287−293.］
［28］ 袁丽萍, 雷震东, 王欢欢, 等. 基于多元统计分析的抹茶适制品种综合评价［J］. 食品科学, 2023, 44(24): 229−234. ［YUAN Liping, LEI Zhendong, WANG Huanhuan, et al. Comprehensive evaluation of tea cultivars suitable for matcha production using multivariate statistical analysis［J］. Food Science, 2023, 44(24): 229−234.］
［29］ CHEN Jing, ZHOU Lina, ZHANG Xiaoyan, et al. Urinary hydrophilic and hydrophobic metabolic profiling based on liquid chromatography-mass spectrometry methods: Differential metabolite discovery specific to ovarian cancer［J］. Electrophoresis, 2012, 33(22): 3361−3369.
［30］ MI Shuishan, HAN Shanjie, WANG Mengxin, et al. Comprehensive analysis of the effect of etiolated tea cultivars and harvest seasons on volatile compounds and *in vitro* antioxidant capacity in steamed green teas［J］. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101279.