

基于代谢组学和叶片结构分析不同烟草品种的差异特征

刘嘉昊², 李秋剑¹, 龚治翔¹, 王 聪¹, 张 力¹, 席奇亮¹, 许自成²,
史久长^{1*}, 贾 玮^{2*}

1. 浙江中烟工业有限责任公司, 浙江杭州 310002; 2. 河南农业大学烟草学院, 河南郑州 450046

摘 要: 为了筛选出工农业性状兼优的烤烟新品种, 本研究以烤烟品种云烟 87 为对照, 对 4 个新引进烟草品种云烟 121、云烟 116、云烟 301、云烟 119 的农艺性状、超微结构、代谢物质、烤后烟质量评价 4 个方面进行比较分析, 结果表明: 云烟 121 品种大田长势相对较好, 叶绿体结构完整, 叶绿体被膜上的嗜锻颗粒体积较大, 数量较多。通过代谢通路富集分析发现, 云烟 121 含有琥珀酸、苯乙酸等有机酸类物质较多, 而降烟碱、新烟草碱等烟碱类物质较少, 有利于提高烟叶的香气质量和安全性。此外, 云烟 121 品种相较于其他新引进品种, 外观质量较好, 化学成分较协调, 感官质量打分更高且与云烟 87 风格较为接近。研究结果为品种的更新换代提供可靠的技术支撑, 有利于优质原料生产的持续、稳定发展。

关键词: 烟草; 农艺性状; 超微结构; 代谢组学; 质量评价

中图分类号: S572 **文献标志码:** A

Differential Characteristics of Different Tobacco Varieties Based on Metabolomics and Leaf Structure Analysis

LIU Jiahao², LI Qiujian¹, GONG Zhixiang¹, WANG Cong¹, ZHANG Li¹, XI Qiliang¹, XU Zicheng²,
SHI Jiuchang^{1*}, JIA Wei^{2*}

1. Zhejiang Tobacco Industry Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310002, China; 2. College of Tobacco, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450046, China

Abstract: In order to select a new tobacco variety with excellent industrial and agricultural characteristics was selected, the tobacco variety Y87 was used as the control to compare and analyze the agronomic traits, ultrastructure, metabolites and post baking tobacco quality evaluation of four newly introduced tobacco varieties Y121, Y116, Y301 and Y119. The results showed that Y121 had relatively good field growth, complete chloroplast structure, and a large volume and quantity of osmium loving particles on the chloroplast membrane. Through metabolic pathway enrichment analysis, it was found that Y121 contained more organic acids such as succinic acid and phenylacetic acid, as well as fewer nicotine such as nicotine reducing and new tobacco alkaloids, which are beneficial for improving the aroma quality and safety of tobacco leaves. In addition, compared to other newly introduced varieties, the Y121 had better appearance quality, more coordinated chemical composition, higher sensory quality score, and is closer to Y87. The results would provide reliable technical support for the upgrading of varieties, which is conducive to the sustained and stable development of high-quality raw material production.

Keywords: tobacco; agronomic traits; ultrastructure; metabolomics; quality evaluation

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.04.007

烟草作为我国重要的经济作物之一, 具有巨大的社会和经济价值。随着烤烟生产和卷烟工业

收稿日期 2024-11-26; 接受日期 2024-12-19

基金项目 浙江中烟工业有限责任公司科技项目 (No. ZJZY2021B004)。

作者简介 刘嘉昊 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 烟草品质生态。*通信作者 (Corresponding author): 贾 玮 (JIA Wei), E-mail: jiawei@henau.edu.cn; 史久长 (SHI Jiuchang), E-mail: shicj@zjtobacco.com。

的发展, 优良品种的选育越来越迫切。而良种的选育, 关键来自种质资源^[1]。有关烤烟品种资源^[2-4]和不同品种与烟叶品质关系^[5-6]的研究在我国已经有不少报道。云南省是我国重要的烟叶产区, 其中红河烟区光温条件充足, 植烟土壤质地疏松、养分协调、通透性好, 具有适合生产“清甜香”优质烟叶的良好生态条件, 是云南省黄金走廊特色优质烟叶重要的主产区之一。近年来, 云南省红河烟区出现了品种单一、品质退化等问题。为了应对该问题, 本研究开展了烤烟新品种的筛选工作, 以烤烟品种云烟 87 为对照, 对 4 个新引进烟草品种云烟 121、云烟 116、云烟 301、云烟 119 开展了农艺性状、超微结构、代谢特征、烤后烟质量评价 4 个方面的比较试验, 明确不同品种烟叶之间的差异性, 进而筛选出工业、农业性状兼优的烤烟新品种。

1 材料与方法

1.1 材料

以 5 个烤烟品种云烟 121 (Y121)、云烟 116 (Y116)、云烟 301 (Y301)、云烟 119 (Y119)、云烟 87 (Y87) 为试验材料, 烟草种子由云南省烟草农业科学研究院提供。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 大田试验于云南省红河市建水县官厅试验基地 (23°16'N, 102°37'E) 进行, 选择地势平坦, 灌排方便, 土质良好, 有代表性的烟田进行试验。试验田土壤质地为红土, 土壤 pH 6.28, 有机质含量为 32.45 g/kg, 碱解氮含量为 146.86 mg/kg, 速效磷含量为 38.92 mg/kg, 速效钾含量为 158.51 mg/kg。根据当地土壤肥力和常规施氮水平种植 5 个烤烟品种, 采用随机区组设计, 每个品种种植 1300 m², 按适合该品种的配套设施进行管理。

1.2.2 项目测定 (1) 农艺性状分析。依据品种挂牌标记, 每个品种选 6 株长势相近的烟株, 参照标准《烟草农艺性状调查测量方法》YC/T 142—2010 中所列方法测定其叶长、叶宽、叶夹角、叶面积、株高、茎围、节距。

(2) 超微结构观察。依据品种挂牌标记, 采取 5 个品种 (云烟 121、云烟 116、云烟 301、云烟 119、云烟 87) 同一叶位的鲜烟叶 (中脉右侧相同部位), 并剪成 1 cm×1 cm 的若干小块, 完全浸没于 2.5%戊二醛固定液中, 并置于 4℃冰箱中

过夜。之后用磷酸缓冲液洗涤后转移至 1%四氧化钨中固定。然后按照常规超薄切片法进行脱水、渗透、包埋、修块、切片和电子染色, 在 JEM-1011 型透射电镜下进行超微结构组织观察并拍照, 分析不同烤烟品种叶片超微结构的变化。

(3) 代谢组学检测。依据品种挂牌标记, 选取生长发育良好且长势一致的不同肥力烟株的 5 片中部烟叶 (10~12 叶位), 迅速置于液氮中冷冻, 于 -80℃超低温冰箱保存。后准确称取适量样品于 2 mL 离心管中, 加入 600 μL 甲醇 [含 2-氯-L-苯丙氨酸 (4 mg/L)], -20℃保存, 涡旋振荡 30 s; 再加入 100 mg 玻璃珠, 60 Hz 研磨 90 s 后室温超声 15 min, 12 000 r/min 离心 10 min, 使用 0.22 μm 膜过滤后, 转移到 LC 进样小瓶, 利用 Thermo Vanquish UHPLC 液相色谱仪和 Thermo QE 质谱平台分析不同烤烟品种烟叶代谢物质积累模式差异, 筛选不同品种之间的关键差异代谢物。

(4) 外观质量分析。烟叶外观质量指标包括叶片结构、身份、油分、色度、青杂和成熟度。依据国家标准 GB 2635—1992 对其进行定性描述。

(5) 化学成分分析。烟叶化学成分是烟叶内在品质的基础物质, 用于评价烟叶品质的常规化学成分有总糖、还原糖、烟碱、总氮、淀粉、钾、氯等。分别参照 YC/T 161—2002、YC/T 217—2007、YC/T 468—2013、YC/T 159—2002、YC/T 216—2014、YC/T 162—20011、YC/T 216—2013 标准进行测定。

(6) 感官质量评。感官评吸采用曾淑华等^[7]的方法进行测定。将回潮后的烟样进行切丝, 卷制成单料烟 (不加香加料), 在温度 (22±2)℃、相对湿度 (60±2)% 的恒温恒湿箱中平衡水分 48 h。依据 YC/T 138—1998 标准对单料烟进行感官质量评吸, 包括香气量、香气质、透发性、余味、杂气、刺激性、柔和度、细腻度、圆润感、干燥感 10 项指标。

1.3 数据处理

采用 Excel 2016 软件处理试验数据, 采用 SPSS 26 软件进行数据统计分析, 以最小显著性差异 (LSD) 检验表示在 5% 水平差异显著, 采用 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同品种烟株农艺性状分析

由表 1 可知, 在叶长、叶宽和叶面积方面, 云

烟 121、云烟 301、云烟 87 均显著高于云烟 116 和云烟 119；在叶夹角方面，不同品种之间不存在显著性差异；在株高方面，云烟 121、云烟 87 显著高于云烟 116、云烟 301、云烟 119；在茎围方面，不同品种烟株差异较大，其中云烟 87 径围显著高于其他品种；在节距方面，云烟 121、云烟 301、云烟 87 显著高于云烟 116 和云烟 119。云烟 121 花叶病发病率明显低于其他品种。通过分析发现，云烟 121 品种烟株烟叶叶片较大，株高较高、茎围粗、节距较大，长势较好且发病率较低。

表 1 不同品种烟叶农艺性状差异分析
Tab. 1 Analysis of differences in agronomic traits of leaves of different tobacco varieties

品种 Variety	叶长 Leaf length/cm	叶宽 Leaf width/cm	叶夹角 Blade angle/°	叶面积 Leaf area/cm ²	株高 Plant height/cm	茎围 Stem girth/cm	节距 Pitch/cm	花叶病发病率 Incidence of mosaic disease/%
Y121	94.6±3.34 ^a	31.8±4.21 ^a	32.0±4.83 ^a	1914.41±296.71 ^a	119.7±7.63 ^a	10.05±0.44 ^b	5.3±0.48 ^a	28
Y116	76.7±6.07 ^b	26.1±2.13 ^b	35.0±7.07 ^a	1267.61±115.43 ^b	96.7±2.26 ^d	8.90±0.21 ^d	4.1±0.87 ^b	50
Y301	93.1±5.74 ^a	32.0±3.86 ^a	31.5±4.74 ^a	1895.57±290.64 ^a	112.8±6.61 ^b	9.85±0.53 ^{bc}	5.6±0.49 ^a	56
Y119	68.6±4.76 ^c	27.0±2.05 ^b	32.0±4.83 ^a	1175.03±121.22 ^b	106.9±4.81 ^c	9.45±0.50 ^c	3.9±0.99 ^b	48
Y87	94.4±4.72 ^a	33.9±3.25 ^a	34.5±7.24 ^a	2033.69±243.87 ^a	121.4±6.96 ^a	10.60±0.77 ^a	5.2±0.79 ^a	52

注：同列不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$).

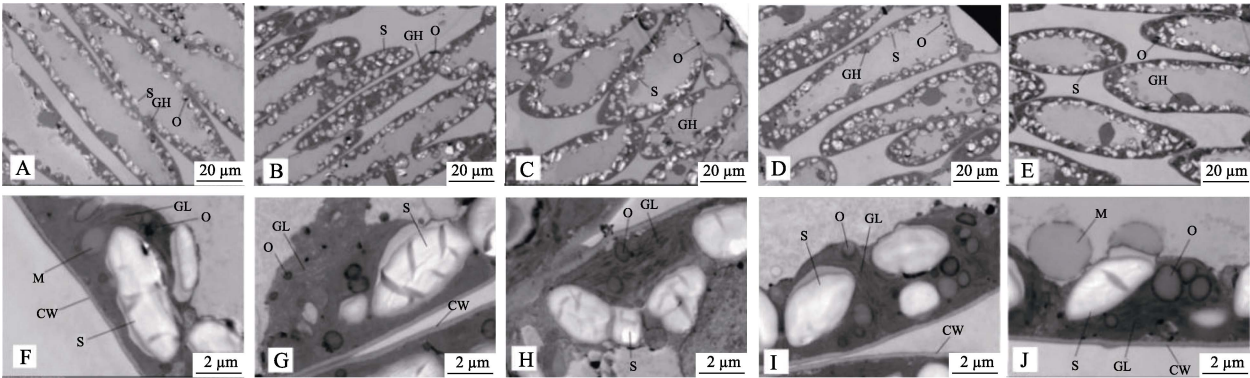
2.2 不同品种烟叶超微结构分析

电镜观察栅栏细胞超微结构（图 1）显示，云烟 121 和云烟 116 淀粉、脂质小球积累量较多，嗜钨颗粒体积较大，绝大部分呈不规则形位于贴壁的解体叶绿体中，云烟 119 和云烟 301 其次，云烟 87 淀粉、脂质小球体积最小，数量较少，存在少部分脱离细胞壁散乱排列在叶绿体中的情况。云烟 121 和云烟 116 相较云烟 87，类囊体片层数量增加，堆垛程度较高，叶绿体成熟度高，叶绿体结构更完整。云烟 121 和云烟 116 叶绿体被膜上的嗜钨颗粒体积较大，数量较多。整体而言，云烟 121 叶片细胞较为饱满，内含物质丰富，

叶绿体成熟度高，具有优质鲜烟叶的结构特征。

2.3 不同品种烟叶的代谢组学分析

2.3.1 质控样本分析 在基于质谱技术的代谢组学研究中，为了获得可靠且高质量的代谢组学数据，需进行质量控制（quality control, QC）。本研究在 LC-MS 检测时利用 QC 样本进行质控。理论上，QC 样本均相同，但是在样本提取、检测分析过程中会有系统误差，导致 QC 样本间会有差异，差异小说明方法稳定性越高数据质量越好，体现在 PCA 分析图上就是 QC 样本密集分布。5 个品种烟叶样品 QC 样本在正离子和负离子模式下 PCA 得分图如图 2 所示，处理样本被分为 5 组，



A、F：云烟 87；B、G：云烟 116；C、H：云烟 119；D、I：云烟 121；E、J：云烟 301；CH：叶绿体；
S：淀粉粒；O：嗜钨颗粒；GL：基粒片层；M：线粒体；CW：细胞壁。
A, F: Y87; B, G: Y116; C, H: Y119; D, I: Y121; E, J: Y301; CH: Chloroplasts; S: Starch granules; O: Osmium granules;
GL: Based granular layer; M: Mitochondria; CW: Cell wall.

图 1 不同品种烟叶超微结构
Fig. 1 Ultra microstructure of leaves of different tobacco varieties

每组 6 个样本, 与所检测样本分组情况一致。由 PCA 得分图可以看出, 各组样本较为集中, 说明仪器稳定, 数据可靠。各组内部样本点分布较集中, 说明组内样本重复性较好, 代谢物一致性好。各处理样本点分离明显, 表明各处理间存在显著性差异。

为了发现生物标记物, 潜在的特征峰在 QC 样本中的相对标准偏差 (relative standard deviation, RSD), 即变异系数不能超过 30%, 对不符合要求的特征峰应予以删除。所以, 在质量控制的基础上, 通常会进行质量保证 (quality assurance, QA) 来删除 QC 样本中重复性差的特征峰 (feature), 以便获得更高质量的数据集, 更有利于生物标记物的检测。如图 2 所示, 在正离子模式和负离子模式下 QC 样本中 RSD<30% 的特征峰比例均超过 80.0%, 说明所得数据完好。

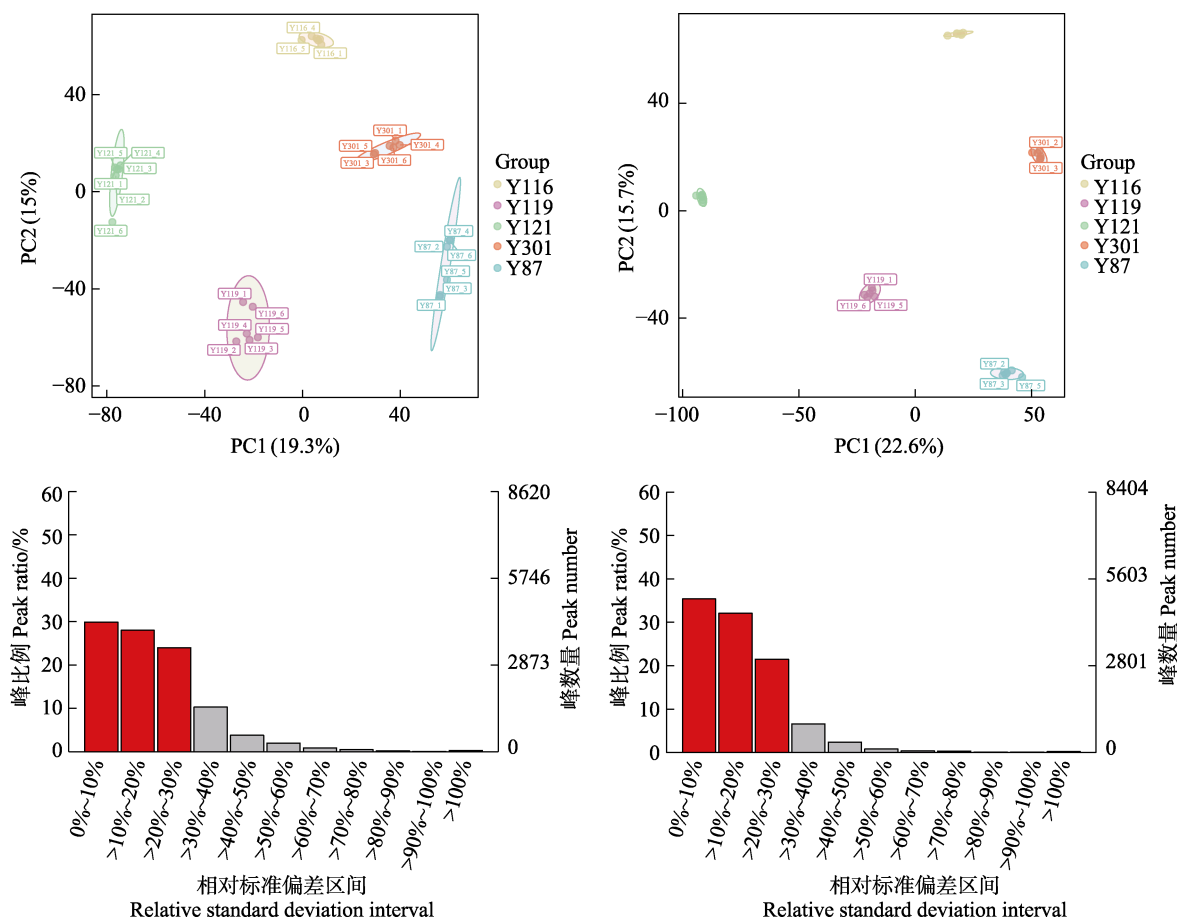


图 2 QC 样本在正离子 (左) 和负离子 (右) 模式下 PCA 得分图和 RSD 分布图

Fig. 2 PCA score and RSD distribution of QC samples in positive ion (left) and negative ion (right) modes

2.3.2 差异代谢物筛选 云烟 116 与云烟 87 样品共鉴定差异代谢物为 411 个, 其中上调表达代谢物为 127 个, 下调表达代谢物为 284 个; 云烟 119 与云烟 87 样品共鉴定差异代谢物为 344 个, 其中上调表达代谢物为 68 个, 下调表达代谢物为 276 个; 云烟 121 与云烟 87 样品共鉴定差异代谢物为 376 个, 其中上调表达代谢物为 88 个, 下调表达代谢物为 288 个; 云烟 301 与云烟 87 样品共鉴定差异代谢物为 367 个, 其中上调表达代谢物为 133 个, 下调表达代谢物为 234 个 (图 3)。

tion, RSD), 即变异系数不能超过 30%, 对不符合要求的特征峰应予以删除。所以, 在质量控制的基础上, 通常会进行质量保证 (quality assurance, QA) 来删除 QC 样本中重复性差的特征峰 (feature), 以便获得更高质量的数据集, 更有利于生物标记物的检测。如图 2 所示, 在正离子模式和负离子模式下 QC 样本中 RSD<30% 的特征峰比例均超过 80.0%, 说明所得数据完好。

2.3.3 代谢物差异分析 在有机酸类差异代谢物中, 云烟 121 的琥珀酸和苯乙酸含量较高, 缬草酸、磷酸和油酸含量较低, 柠檬酸含量居中 (图 4)。在氨基酸类差异代谢物中, 云烟 121 的酪胺、异亮氨酸、马来酸和甘油酸含量显著低于其他品种 (图 5)。在酚类差异代谢物中, 云烟 121 的百里香酚和甲基丁酚含量较低, 胡椒酚含量较高 (图 6)。在烟碱类差异代谢物中, 云烟 121 的降烟碱、新烟草碱、(R)-6-羟基尼古丁和假氧尼古丁含量较低 (图 7)。

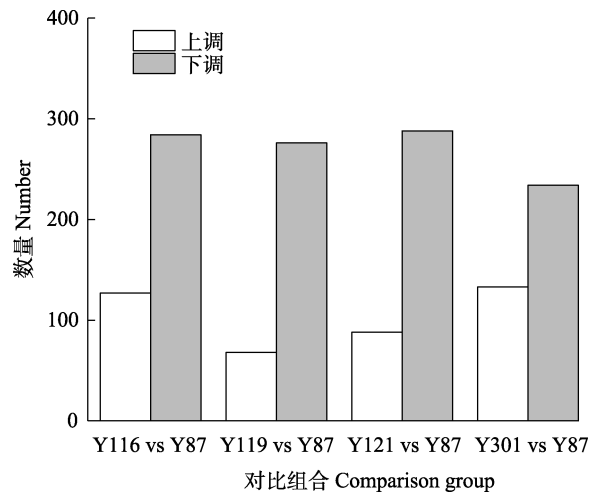


图 3 不同品种烟叶样品差异代谢物分析
Fig. 3 Analysis of differential metabolites in samples of different tobacco varieties

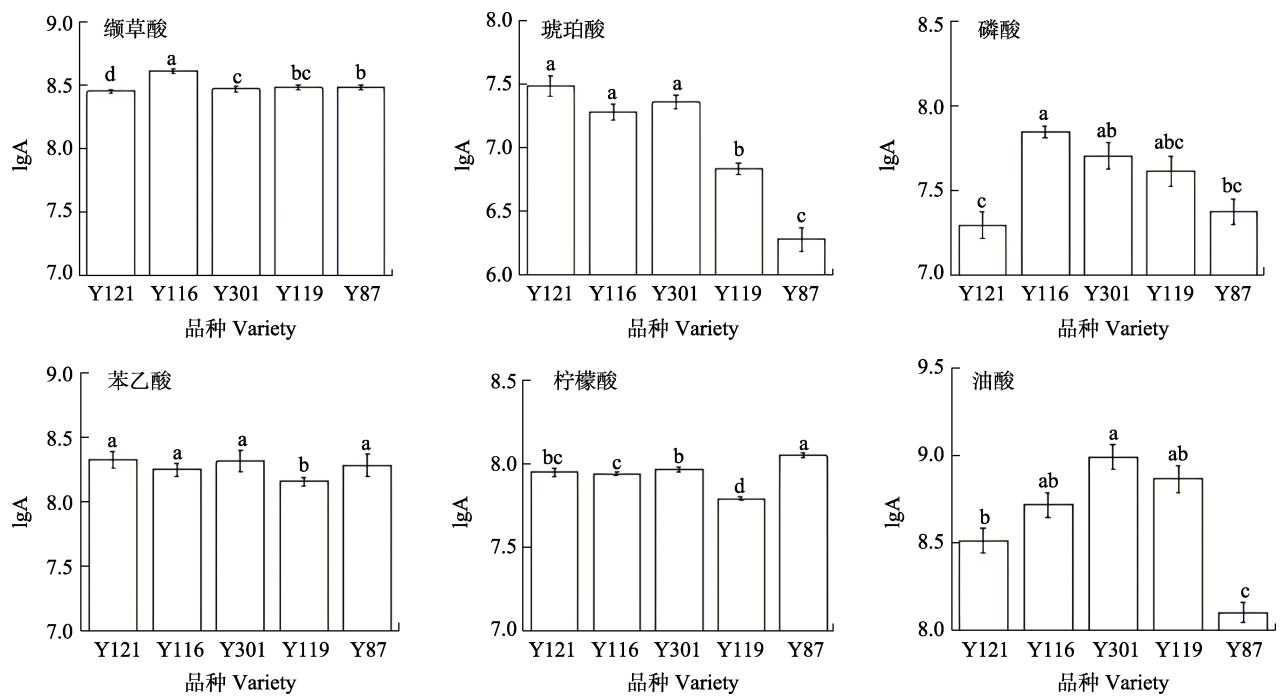
2.3.4 差异代谢物富集 KEGG 数据库提供的整合代谢途径，包括碳水化合物、核苷、氨基酸等的代谢及有机物的生物降解，不仅提供了所有可能的代谢途径，而且对催化各步反应的酶进行了全面的注解，包括图解的细胞生化过程如代谢、膜转运、信号传递、细胞周期，还包括同系保守的子通路等信息。以 $P<0.05$ ，VIP>1 为条件筛选出酪氨酸代谢 (ath00350)、丙氨酸、天冬氨酸和

谷氨酸代谢 (ath00250) 以及烟酸和烟酰胺代谢 (ath00760) 3 条代谢通路 (表 2)。

2.3.5 不同品种烟草代谢网络结构分析 参照 KEGG 通路绘制了烟草代谢网络结构，并以云烟 87 为对照，标记了差异代谢物含量变化，红色表示上调，蓝色表示下调 (图 8)。在该通路中，通过天冬氨酸代谢途径，L-天冬氨酸分裂成柠檬酸和 L-天冬酰胺，柠檬酸通过谷氨酸代谢途径最终形成氨基丁酸。在烟酸和烟酰胺代谢途径中，烟酸分裂成尼古丁、假氧尼古丁和马来酸，(R)-6-羟基尼古丁进入琥珀酸代谢途径中形成琥珀酸。在酪氨酸代谢途径中，L-酪氨酸分裂成酪胺和 4-羟基肉桂酸，最终形成马来酸。通过观察物质含量热图可知，云烟 121 烟酸和假氧尼古丁含量较低，酪氨酸和马来酸含量较低，琥珀酸和 L-天门冬酰胺含量较高。

2.4 不同品种烟株烤后烟质量分析

2.4.1 外观质量评价 由表 3 可知，5 个品种烤后烟外观质量无明显差异，外观质量表现均较好。相同品种烟叶不同部位之间结构和身份存在差异。上部烟叶烤后烟结构尚疏松，身份中等-稍后，油分有，色度强，成熟度为成熟。中部烟叶烤后烟结构疏松，身份中等，油分有，色度强，成熟



A 表示峰面积；不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。
A means peak area; Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$).

图 4 有机酸类代谢物差异分析
Fig. 4 Differential analysis of organic acid metabolites

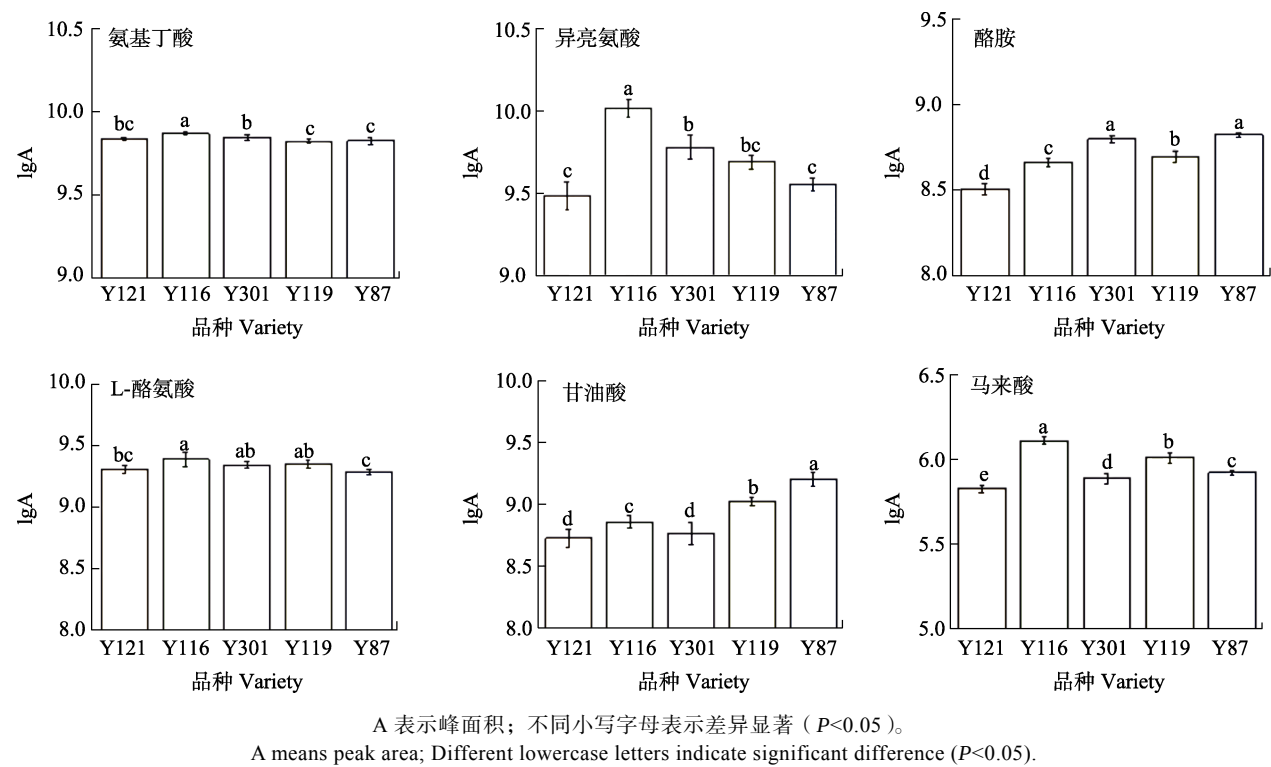


图 5 氨基酸类代谢物差异分析
Fig. 5 Differential analysis of amino acid metabolites

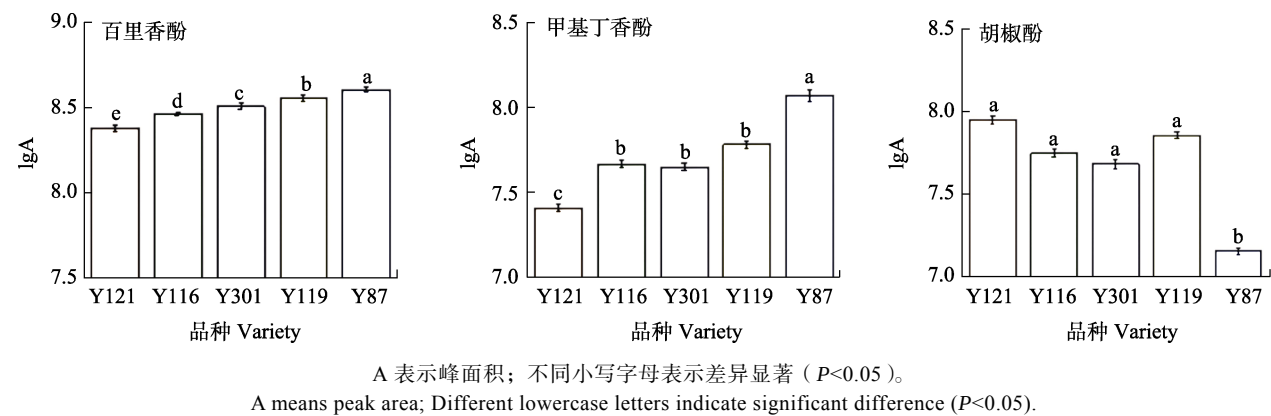


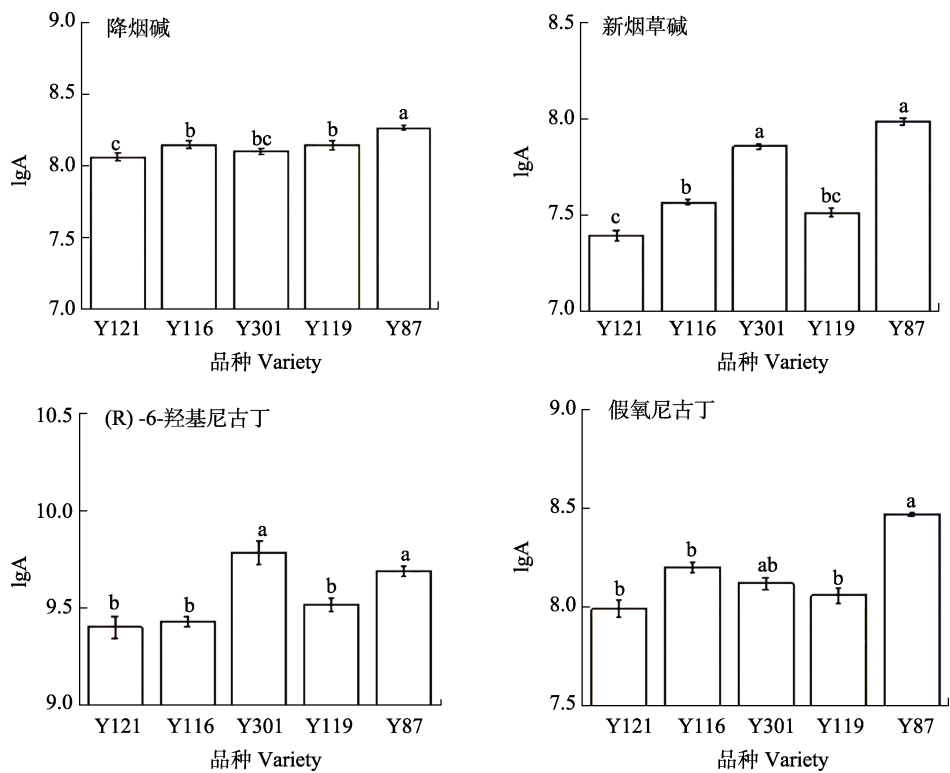
图 6 酚类代谢物差异分析
Fig. 6 Differential analysis of phenolic metabolites

度为成熟。整体而言，同一品种烤后烟中部叶外观质量略高于上部叶。

2.4.2 常规化学分析 由表 4 可见，各品种烟叶总糖、还原糖含量均处于较高水平，相较其他品种，云烟 121 烟碱含量较低。云烟 301 和云烟 119 氯含量较高，钾含量处于较低水平，钾氯比较低。总氮含量方面，云烟 121、云烟 87 含量较低，较为适宜。总体来看，云烟 121 的总糖、还原糖含量较高，总氮、总植物碱含量适中，化学成分相较于其他新引进品种较为协调。

2.4.3 感官质量分析 由表 5 可知，C2F 等级的

评分中，云烟 87>云烟 121=云烟 116>云烟 301>云烟 119，C3F 等级的评分中，云烟 87=云烟 121>云烟 116=云烟 301>云烟 119，B2F 等级的评分中，云烟 121>云烟 116>云烟 87>云烟 119>云烟 301。云烟 116 质感较为细腻，在烟香清晰度略显不足；云烟 301 主要存在喉部冲击力偏大，余味干净程度不足的问题；云烟 119 香气略浑浊，杂气量稍多，整体柔和细腻程度较好。云烟 121 和云烟 87 整体表现较好，二者在“香气量、烟气状态、杂气、刺激性、口感”方面表现接近，各等级感官质量打分均较高。



A 表示峰面积；不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。
A means peak area; Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$).

图 7 烟碱类代谢物差异分析

Fig. 7 Differential analysis of nicotine metabolites

表 2 不同品种烟叶差异代谢物代谢通路富集分析
Tab. 2 Enrichment analysis of metabolite metabolic pathways in leaves of different tobacco varieties

通路名称 Pathway name	P	代谢通路影响值 Metabolic pathway impact value	差异代谢物 KEGG 登记号 KEGG register No. of differential metabolites	代谢通路 KEGG 登记号 KEGG register No. of metabolic pathway
酪氨酸代谢	0.0092	0.2174	C00042; C00082; C00232; C00355; C00483; C00530; C00642; C00811; C01161; C01179; C01384; C05580; C05594	ath00350
丙氨酸、天冬氨酸和谷氨酸 代谢	0.0224	0.1384	C00042; C00064; C00152; C00158; C00232; C00334	ath00250
烟酸和烟酰胺代谢	0.0314	0.1130	C00042; C00232; C00253; C00334; C01384; C03043; C16151; C19569; C20361	ath00760

3 讨论

3.1 不同品种对烟株农艺性状的影响

田间品种对比试验是引种的重要环节，可以检验引入品种对引入地的适应性，在加以选择后，能筛选出适应当地的优良品种，对提高当地烤烟品质具有重要意义^[8]。云烟 121 和云烟 87 品种烟株烟叶叶片较大，株高较高、径围粗、节距较大，长势相对较好。从病害调查结果来看，该地区烟草普通花叶病发病率相对较高，这可能是当地前期日照时数较多、降雨较少，而在后期出现暴雨天气、雨水过多等因素，导致花叶病发生较为严

重，而云烟 121 的普通花叶病发病率较低，抗病性最强。从大田生长情况来看，云烟 121 更适合在该地区推广种植。

3.2 不同品种对烟叶超微结构的影响

叶绿体作为植物特有的细胞器，在植物生长发育过程中起到重要的作用。就烤烟而言，淀粉、蛋白质、脂肪等主要品质成分的形成与叶绿体都有直接或间接的联系^[9-10]，进而影响烤烟的品质。成熟的烤烟叶片中，淀粉颗粒和脂质小球占据着叶绿体的绝大部分体积，此时的叶绿体由于大量的光合作用产物堆积，叶绿体膨大，沿细胞壁排

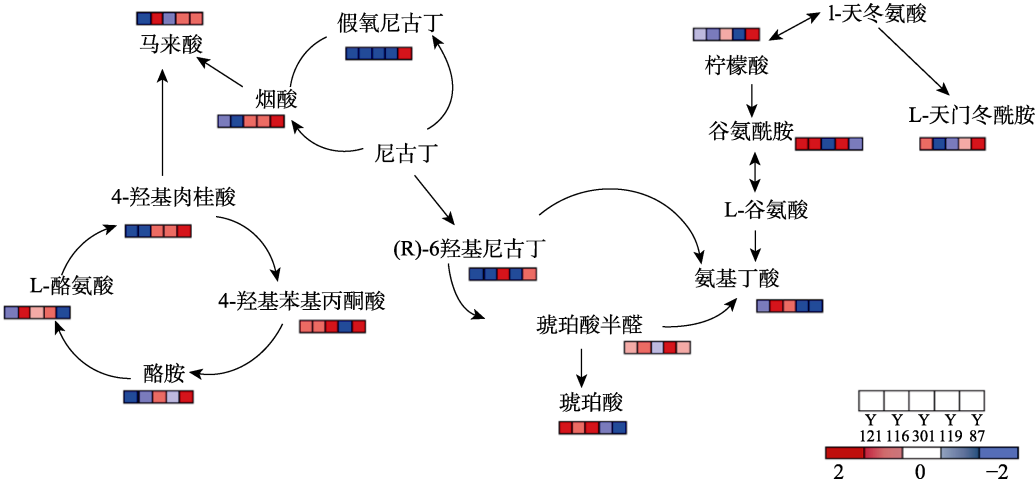


图 8 不同品种烟草代谢物网络结构图

Fig. 8 Metabolite network structure of different tobacco varieties

表 3 不同品种烟叶外观质量评价

Tab. 3 Evaluation of appearance quality of leaves of different tobacco varieties

品种 Variety	等级 Grade	结构 Structure	身份 Identity	油分 Oil component	色度 Color degree	成熟度 Mature degree
Y87	B2F	尚疏松	中等-稍厚	有	强	成熟
	C2F	疏松	中等	有	强	成熟
	C3F	疏松	中等	有	强	成熟
Y301	B2F	尚疏松	中等-稍厚	有	强	成熟
	C2F	疏松	中等	有	强	成熟
	C3F	疏松	中等	有	强	成熟
Y121	B2F	尚疏松	中等-稍厚	有	强	成熟
	C2F	疏松	中等	有	强	成熟
	C3F	疏松	中等	有	强	成熟
Y116	B2F	尚疏松	中等-稍厚	有	强	成熟
	C2F	疏松	中等	有	强	成熟
	C3F	疏松	中等	有	强	成熟
Y119	B2F	尚疏松	中等-稍厚	有	强	成熟
	C2F	疏松	中等	有	强	成熟
	C3F	疏松	中等	有	强	成熟

列。淀粉是新鲜烤烟光合作用的主要产物，是烟叶物质和能量的一种储藏形式^[11]，在后期的烘烤加工过程中决定着烟叶的内在品质和外观质量^[12]，影响着烤后烟叶的香气和吃味^[13]。UZELAC 等^[14]研究认为烟草叶片衰老叶绿体超微结构与细胞核染色质凝聚、叶绿素含量变化等有关。叶绿体类囊体膜的解体，尤其是基粒片层的垛叠状况影响着叶绿素含量的变化，从而影响叶片光能的利用^[15-16]。研究发现云烟 121 和云烟 116 的淀粉及脂质小球积累量最多、体积

最大，叶绿体成熟度较高且叶绿体被膜上的嗜饿颗粒体积较大，数量较多。说明云烟 121 和云烟 116 叶片健康程度较好，且烤后烟能够得到更好的香气质量和吃味。

3.3 不同品种对烟叶代谢的影响

在酪氨酸代谢中，琥珀酸、苯乙酸等有机酸类物质具有一定的香气，可赋予烟叶特殊的香气，对烟叶品质和风味有重要影响，并且在烟草对各类逆境胁迫的适应过程中发挥重要的调节作用^[17-18]，这些物质在云烟 121 中富集较多，表明该烟草品

表 4 不同品种烟叶烤后烟常规化学成分差异分析
Tab. 4 Analysis of differences in conventional chemical components of leaves of tobacco varieties after drying

品种 Variety	总糖 Total sugar/%	还原糖 Reducing sugar/%	烟碱 Nicotine/%	氯 Chlorine/%	钾 Potassium/%	总氮 Total nitro- gen/%	两糖比 Bisugar ratio	钾氯比 Potassium-chloride ratio
Y121	30.36±4.54 ^a	23.33±4.65 ^a	3.03±0.19 ^a	0.18±0.03 ^b	1.89±0.14 ^a	2.89±0.07 ^a	0.77±0.06 ^a	10.50±0.50 ^a
Y116	29.25±0.68 ^a	22.74±0.72 ^a	3.34±0.28 ^a	0.16±0.02 ^b	1.84±0.07 ^a	3.41±0.39 ^a	0.78±0.02 ^a	11.42±1.87 ^a
Y301	28.67±0.45 ^a	20.48±0.71 ^a	3.46±0.34 ^a	0.27±0.08 ^a	1.62±0.08 ^b	3.04±0.05 ^a	0.71±0.02 ^b	6.36±1.94 ^b
Y119	30.37±3.31 ^a	23.51±1.31 ^a	3.25±0.69 ^a	0.25±0.04 ^a	1.74±0.07 ^{ab}	3.29±0.43 ^a	0.78±0.06 ^{ab}	7.05±0.85 ^b
Y87	29.77±0.29 ^a	23.71±2.00 ^a	3.24±0.23 ^a	0.16±0.02 ^b	1.85±0.08 ^a	2.82±0.45 ^a	0.79±0.06 ^a	11.96±0.20 ^a

注：不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$).

表 5 不同品种烟叶烤后烟感官质量差异分析
Tab. 5 Analysis of sensory quality differences of leaves of tobacco varieties after drying

品种 Variety	等级 Grade	香气特性 Aroma characteristic				烟气特性 Smoke characteristic			口感特性 Taste characteristics			总分 Total score
		香气质 Quality of aroma	香气量 Volume of aroma	透发性 Permeabil- ity	杂气 Miscella- neous qi	细腻程度 Fineness	柔和程度 Softness	圆润感 Rounded feel	刺激性 Irritant	干燥感 Dry sen- sation	余味 Remain- ing taste	
Y119	C2F	12.5	12.0	5.5	5.5	6.0	5.5	5.5	5.5	5.5	5.0	68.5
	C3F	12.0	12.0	5.5	5.0	6.0	5.5	5.5	5.5	5.5	5.0	67.5
	B2F	12.0	12.0	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.0	5.5	67.5
Y121	C2F	13.0	12.5	5.5	5.5	6.0	6.0	5.5	5.5	5.5	5.5	70.5
	C3F	12.5	12.5	5.5	6.0	6.0	6.0	5.5	5.5	5.5	5.5	70.5
	B2F	12.5	12.5	5.5	5.5	6.0	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	69.5
Y116	C2F	12.5	12.5	5.5	5.5	5.5	6.0	5.5	6.0	6.0	5.5	70.5
	C3F	12.0	12.5	5.5	5.0	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	68.0
	B2F	11.5	12.0	5.5	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	64.0
Y301	C2F	12.5	12.0	5.5	5.5	5.5	6.0	5.5	5.5	5.5	5.5	69.0
	C3F	12.0	12.0	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	68.0
	B2F	11.5	12.0	5.5	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	64.0
Y87	C2F	13.0	12.5	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	73.5
	C3F	12.5	12.5	5.5	6.0	5.5	5.5	6.0	5.5	6.0	5.5	70.5
	B2F	12.0	12.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.0	68.0

种具有较好的抗逆性，烤后烟叶香气质、香气量较好。酪胺和 L-酪氨酸对烟草品质的影响与氨类似，能参与棕色化反应，抽吸时挥发进入烟气，提高烟气碱性，产生刺激性和辛辣味，且具有臭味^[19]，这些物质在云烟 121 中富集较少，表明云烟 121 烤烟品种烟叶抽吸质量较好。百里香酚和甲基丁酚等多酚类化合物在多酚氧化酶的催化下可发生氧化反应并生成醌类物质，也可通过多酚及其氧化物发生棕色化反应从而得到类黑素等物质，还可转化成酪氨酸，产生刺激性和辛辣味，对烟叶香气质和香气量产生影响。云烟 121 的百里香酚和甲基丁酚等多酚类代谢物积累量较少，则产生的刺激性会相对较小。在烟酸和烟酰胺代

谢通路中，云烟 121 的降烟碱、新烟草碱、(R)-6-羟基尼古丁含量较低，产生的尼古丁较少，表明该品种的烟叶安全性较好。

3.4 不同品种对烤后烟质量的影响

优质烟叶的外观特征通常表现为成熟度好、组织疏松、厚薄适中、无杂色、色度强、油分足^[20]。色度与油分影响烟叶质量，色度足、油分多的烟叶韧性强、弹性好，手摸柔润、滑腻，抽吸时香气量足、香气质好、杂气少、刺激性小、劲头适中。叶片结构疏松则代表细胞发育好，间隙大，填充性、弹性、燃烧性均好^[21]。研究发现云烟 121 的叶片成熟度较高，色度强，油分表现好，结构较疏松，抽吸时香气清晰，较绵实，烟气收敛成

团, 润细感较好, 更符合优质烟叶的标准。

烤后烟叶的化学成分影响着烟草的香吃味、刺激性、杂气等品质, 同时也是引进烤烟品种需重视的一项关键指标, 只有各项化学成分含量适当, 烟叶才具有优良的内在品质^[22]。一般认为优质烟叶合适的还原糖含量为 16.0%~18.0%、总糖含量为 18.0%~22.0%、烟碱含量为 1.5%~3.5%、氯含量为 0.2%~0.6%、总氮含量为 1.5%~3.5%、钾含量大于 2%^[23-28]。云烟 121 的总体常规化学成分较为适宜, 呈现出“两高两适中”的特点, 即总糖、还原糖含量较高, 总氮、总植物碱含量适中, 糖碱比较高, 钾氯比较低, 更符合优质烟叶化学成分含量标准。

4 结论

农艺性状方面, 5 个烤烟品种中云烟 121 的田间长势较好, 抗病性更强, 具有较为适宜的化学成分; 叶片结构方面, 云烟 121 的叶绿体结构完整, 嗜银颗粒积累量较多, 具有较好的鲜烟素质结构特征; 代谢特征方面, 云烟 121 叶片中富集了琥珀酸、苯乙酸等有机酸类物质, 同时含有较少的降烟碱、新烟草碱等烟碱类物质, 有利于提高烟叶的香气质量和安全性; 烤后烟质量方面, 云烟 121 的化学成分更为协调, 云烟 121 和云烟 87 的感官质量表现较好, 且二者在香气量、烟气状态、杂气、刺激性、口感等方面表现接近。因此云烟 121 具有较大的潜力替代云烟 87 进行推广种植。

参考文献

- [1] 许美玲. 烟草种质资源图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 2009. XU M L. Illustrated tobacco germplasm resources[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [2] 何川生, 许凌云, 葛颂, 李天飞, 许美玲, 许介眉. 烤烟品种资源的 RAPD 分析[J]. 植物学报, 2001, 43(6): 610-614. HE C S, XU L Y, GE S, LI T F, XU M L, XU J M. Analysis of germplasm of flue-cured tobacco by RAPD[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2001, 43(6): 610-614. (in Chinese)
- [3] 徐安传, 胡巍耀, 李佛琳, 邓国宾, 张晓龙, 唐丽, 胡小曼. 中国烤烟种植品种现状分析与展望[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2011, 26(增刊 2): 104-109. XU A C, HU W Y, LI F L, DENG G B, ZHANG X L, TANG L, HU X M. Analysis and prospect on status of flue-cured tobacco variety distribution in China[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2011, 26(Suppl. 2): 104-109. (in Chinese)
- [4] 杨志晓, 王轶, 刘红峰, 王仁刚, 王志红, 史跃伟, 任学良, 杨铁钊. 我国主栽烤烟品种亲缘关系及育种[J]. 中国烟草学报, 2013, 19(2): 34-41. YANG Z X, WANG Y, LIU H F, WANG R G, WANG Z H, SHI Y W, REN X L, YANG T Z. Genetic relationship in major flue-cured tobacco cultivars in China and its implication in variety breeding[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2013, 19(2): 34-41. (in Chinese)
- [5] 王宝华, 吴桐英, 刘宝法, 周健, 许家来, 王允白, 章启发, 侯建玲. 我国部分烟草品种资源的品质状况[J]. 中国烟草, 1991(4): 30-36. WANG B H, WU G Y, LIU B F, ZHOU J, XU J L, WANG Y B, ZHANG Q F, HOU J L. The quality status of some tobacco varieties in China[J]. Chinese Tobacco Science, 1991(4): 30-36. (in Chinese)
- [6] 罗成刚, 邵进翠. 全国认定和审定的烟草品种[J]. 中国烟草, 1996(3): 47. LUO C G, SHAO J C. Nationally recognized and approved tobacco varieties[J]. Chinese Tobacco Science, 1996(3): 47. (in Chinese)
- [7] 曾淑华, 任亚, 刘少军, 郭仕平, 刘雷, 信俊峰, 刘雅洁. 四川主产烟区烤烟主流烟气特征成分分析[J]. 烟草科技, 2019, 52(11): 69-77. ZENG S H, REN Y, LIU S J, GUO S P, LIU L, XIN J F, LIU Y J. Characteristic components in mainstream smoke of flue-cured tobacco from main planting areas in Sichuan province[J]. Tobacco Science & Technology, 2019, 52(11): 69-77. (in Chinese)
- [8] 西北农学院. 作物育种学[M]. 北京: 农业出版社, 1981. Northwest Agricultural University. Crop breeding[M]. Beijing: Agriculture Press, 1981. (in Chinese)
- [9] 刘百战, 徐亮, 詹建波, 邹薇, 严从享, 胡便霞. 云南烤烟中非挥发性有机酸及某些高级脂肪酸的分析[J]. 中国烟草科学, 1999, 20(2): 28-31. LIU B Z, XU L, ZHAN J B, ZOU W, YAN C H, HU B X. Analysis of non-volatile organic acids and some higher fatty acids in Yunnan flue-cured tobacco[J]. Chinese Tobacco Science, 1999, 20(2): 28-31. (in Chinese)
- [10] 柴家荣, 刘敬业, 杨宏光, 尚志强, 黄学跃, 字正东, 雷丽萍, 字萍, 管仕军, 戴福斌, 李堂. 白肋烟 TN90 成熟期叶绿体色素及糖类物质动态初探[J]. 中国烟草科学, 2003, 24(4): 40-42. CHAI J R, LIU J Y, YANG H G, SHANG Z Q, HUANG X Y, ZI Z D, LEI L P, ZI P, GUAN S J, DAI F B, LI T. Preliminary study on development of chlorophyll and sugar contents at the maturity of burley tobacco variety TN90[J]. Chinese Tobacco Science, 2003, 24(4): 40-42. (in Chinese)
- [11] 邓云龙, 崔国民, 孔光辉. 品种、部位和成熟度对烟叶淀粉含量及评吸质量的影响[J]. 中国烟草科学, 2006, 27(4): 18-23. DENG Y L, CUI G M, KONG G H. Effect of variety, leaf

- position, and degree of maturity on starch content, flavor and taste of tobacco leaf[J]. Chinese Tobacco Science, 2006, 27(4): 18-23. (in Chinese)
- [12] 贺帆, 王涛, 王梅, 史龙飞, 李伟, 王勇军, 宫长荣. 烤烟烟叶淀粉颗粒结构特征与基本特性[J]. 中国烟草学报, 2013, 19(3): 49-53.
HE F, WANG T, WANG M, SHI L F, LI W, WANG Y J, GONG Z R. Structural characteristics and properties of starch granules in flue-cured tobacco leaves[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2013, 19(3): 49-53. (in Chinese)
- [13] WEEKS W W. Chemistry of tobacco constituents influencing flavor and aroma[J]. Recent Advances in Tobacco Science, 1985(11): 175-200.
- [14] UZELAC B, JANOEVIC D, SIMONOVIC A, MOTYKA V, DOBREV P I, BUDIMIR S. Characterization of natural leaf senescence in tobacco (*Nicotiana tabacum*) plants grown in vitro[J]. Protoplasma, 2016, 253(2): 259-275.
- [15] 何涛, 吴学明, 张改娜, 王学仁, 贾敬芬. 不同海拔火绒草叶绿体超微结构的比较[J]. 云南植物研究, 2005, 27(6): 639-643.
HE T, WU X M, ZHANG G N, WANG X R, JIA J F. Comparative study on chloroplast ultrastructure of *Leontopodium leontopodioides* grown at different elevations[J]. Plant Diversity, 2005, 27(6): 639-643. (in Chinese)
- [16] 夏明月, 柴岩, 冯佰利, 高小丽, 慕芳, 苗芳. 绿豆开花后不同节位叶片衰老的超微结构研究[J]. 西北农业学报, 2009, 18(3): 131-135.
XIA M Y, CHAI Y, FENG B L, GAO X L, MU F, MIAO F. Ultrastructure changes of different leaf positions during different maturity grades in mung bean[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2009, 18(3): 131-135. (in Chinese)
- [17] DUNKLE M N, YOSHIMURA Y, KINDT R, ORTIZ A, MASUGI E, MITSUI K, DAVID F, SANDRA P, SANDRA K. Lipidomics of tobacco leaf and cigarette smoke[J]. Journal of Chromatography A, 2016, 1439: 54-64.
- [18] TANG G Y, WEI L Q, LIU Z J, BI Y P, SHAN L. Ectopic expression of peanut acyl carrier protein in tobacco alters fatty acid composition in the leaf and resistance to cold stress[J]. Plant Biology, 2012, 3: 493-501.
- [19] 王瑞新. 烟草化学品质分析法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
WANG R X. Chemical quality analysis method of tobacco[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2003. (in Chinese)
- [20] 梁洪波, 李念胜, 元建, 刘新民, 孙福山, 申国明, 王丽卿. 烤烟烟叶颜色与内在品质的关系[J]. 中国烟草科学, 2002(1): 9-11.
LIANG H B, LI N S, YUAN J, LIU X M, SUN F S, SHEN G M, WANG L Q. The relationship between the color of flue-cured tobacco leaves and their intrinsic quality[J]. Chinese Tobacco Science, 2002(1): 9-11. (in Chinese)
- [21] 张升华, 乐涛. 动物性食品卫生检验[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
ZHANG S H, LE T. Hygiene inspection of animal food[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [22] 刘燕, 阙劲松, 于良君, 高福宏, 陈晓燕, 王洪云, 易克, 李忠环, 黄韡, 周桂凤, 段四喜, 赵正雄. 烤烟致香物质含量的主要影响因素及其提高的可能途径[J]. 中国农学通报, 2013, 29(22): 83-89.
LIU Y, QUE J S, YU L J, GAO F H, CHEN X Y, WANG H Y, YI K, LI Z H, HUANG W, ZHOU G S, DUAN S X, ZHAO Z X. The main factors influencing the content of aromatic substance in flue-cured tobacco leaves and possible measures for improving its content[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(22): 83-89. (in Chinese)
- [23] 鲁黎明, 朱靛, 雷强, 叶利华, 杜卫民. 四川烤烟主产区烟叶感官质量及主要化学成分分析[J]. 草业学报, 2012, 21(4): 88-97.
LU L M, ZHU J, LEI Q, YE L H, DU W M. Comparison of leaf quality and normal chemical components of flue-cured tobacco from different areas in Sichuan[J]. Acta Prataculurae Sinica, 2012, 21(4): 88-97. (in Chinese)
- [24] 欧阳文, 陈雨, 李佛琳. 基于卷烟品牌的云南省烟叶基地烟叶常规化学成分隶属度评价[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(25): 79-82, 115.
OUYANG W, CHEN Y, LI F L. Evaluation of the membership degree on conventional chemical components of tobacco leaf in yunnan province based on cigarette brand[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(25): 79-82, 115. (in Chinese)
- [25] 包勤, 张艳玲, 王爱国. 2002—2013 年间我国烤烟主要化学成分变化趋势及原因分析[J]. 烟草科技, 2015, 48(7): 14-19.
BAO Q, ZHANG Y L, WANG A G. Variation of main chemical components in flue-cured tobacco leaves in china during 2002-2013 and causal analysis[J]. Tobacco Science & Technology, 2015, 48(7): 14-19. (in Chinese)
- [26] 刘国顺. 烟草栽培学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
LIU G S. Tobacco cultivation[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2003. (in Chinese)
- [27] 闫克玉, 赵铭钦. 烟草原料学[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
YAN K Y, ZHAO M Q. Tobacco raw material science[M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)
- [28] 刘国顺. 国内外烟叶质量差距分析和提高烟叶质量技术途径探讨[J]. 中国烟草学报, 2003, 9(B11): 5.
LIU G S. Analysis of tobacco leaf quality gap at home and abroad and discussion on technical ways to improve tobacco quality[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2003, 9(B11): 5. (in Chinese)