

马佳洁,张城蓓,雷云康,等.不同产地晾制后雪茄烟叶的代谢组差异分析[J].山西农业科学,2026,54(2):35-43.

MA J J, ZHANG C B, LEI Y K, et al. Analysis of metabolomic differences in air-cured cigar tobacco leaves from different production areas[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2026, 54(2):35-43.

doi:10.26942/j.cnki.issn.1002-2481.2026.02.05

不同产地晾制后雪茄烟叶的代谢组差异分析

马佳洁^{1,2},张城蓓³,雷云康³,张兴伟²,李雪山²,籍燕²,

李媛²,杜帅斌^{1,2},吴则东¹,李丽华⁴

(1.黑龙江大学 现代农业与生态环境学院,黑龙江 哈尔滨 150080;2.中国农业科学院烟草研究所/烟草遗传改良与生物技术重点开放实验室,山东 青岛 266101;3.四川省烟草公司 德阳市公司,四川 德阳 618000;4.河南省烟草公司 洛阳市公司,河南 洛阳 471000)

摘要:为阐明不同产区对雪茄烟叶代谢特征及农艺性状的影响,选择四川什邡、山东临朐2个种植产区,选取同一遗传背景下的5个雪茄烟品系QX102、QX105、QX107、QX200、QX205,采用非靶向衍生化GC-MS代谢组学技术结合正交偏最小二乘法判别分析(OPLS-DA)模型,系统分析两地烟叶代谢组差异及关键代谢通路。结果表明,烟叶中共鉴定出192种代谢物,其中,44种呈现显著产地特异性,四川产区尿嘧啶、酪胺及磷酸三甲基硅烷醇的积累量分别高于山东17.59倍、14.22倍和5.00倍;差异代谢物主要富集于氨基酸代谢和碳氮平衡通路。农艺性状分析结果表明,山东产区烟叶株高、茎围和叶片数分别为221.01、8.59 cm和22.01片,均显著优于四川,且群体表型稳定性更高,其代谢调控网络与氮代谢关键基因的上调表达密切相关。QX105品系在两地均表现代谢组特异性,四川种植的QX105中尿嘧啶异常积累,而山东种植的QX105中单萜合酶活性较高,驱动植醇等萜类物质合成,凸显基因型与环境互作对代谢网络的调控潜力。综上,阐明了不同生态环境下雪茄烟叶代谢物积累与农艺性状的协同响应机制,证实了山东产区更利于高产优质烟叶形成,验证了代谢组学辅助品种适应性评价的可行性,建议以山东临朐为中心示范区扩大雪茄烟种植规模,优先推广QX105等高适应性品系。

关键词:雪茄烟叶;非靶向衍生化GC-MS代谢组学;OPLS-DA模型;差异代谢物;尿嘧啶;农艺性状

中图分类号:S572 文献标识码:A 文章编号:1002-2481(2026)02-0035-09

Analysis of Metabolomic Differences in Air-Cured Cigar Tobacco Leaves from Different Production Areas

MA Jiajie^{1,2}, ZHANG Chengbei³, LEI Yunkang³, ZHANG Xingwei², LI Xueshan²,

JI Yan², LI Yuan², DU Shuaibin^{1,2}, WU Zedong¹, LI Lihua⁴

(1.College of Modern Agriculture and Ecology and Environment, Heilongjiang University, Harbin 150080, China; 2. Institute of Tobacco Research/Key Laboratory of Tobacco Genetic Improvement and Biotechnology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Qingdao 266101, China; 3.Deyang Branch of Sichuan Tobacco Company, Deyang 618000, China; 4.Luoyang Branch of Henan Tobacco Company, Luoyang 471000, China)

Abstract: To clarify the impact of different production areas on the metabolic characteristics and agronomic traits of cigar tobacco, in this study, the Shifang area in Sichuan and the Linqu area in Shandong were taken as the research objects, five cigar tobacco lines(QX102, QX105, QX107, QX200, and QX205) with the same genetic background were selected. The non-targeted derivatization GC-MS metabolomics technology combined with the orthogonal partial least squares discriminant

收稿日期:2025-04-20

基金项目:中国农业科学院科技创新工程(ASTIP-TRIC01);中国烟草总公司四川省公司青年科技托举人才项目(YCQTSC202402);中国烟草总公司四川省公司科技项目(SCYC202302, SCYC202421, SCYC202508);河南省烟草公司洛阳市公司科技项目(2024410300270128);山东省自然科学基金面上项目(ZR2022MC145)

作者简介:马佳洁,在读硕士,研究方向:作物遗传育种,E-mail:jiajie625425@163.com。马佳洁、张城蓓为同等贡献作者

通信作者:吴则东,研究员,博士,主要从事作物遗传及分子育种研究,E-mail:1997009@hju.edu.cn

李丽华,农艺师,硕士,主要从事烟草新品种选育及主栽品种改良研究,E-mail:lilihua11yan@163.com

analysis(OPLS-DA) model was used to systematically analyze the differences in the metabolome of tobacco leaves in the two places and the key metabolic pathways. The results showed that a total of 192 metabolites were identified from tobacco leaves, among which 44 showed significant regional specificity of the production areas. The accumulation amounts of uracil, tyramine, and trimethylsilyl phosphate in the Sichuan production area were 17.59 times, 14.22 times, and 5 times higher than those in Shandong, respectively. The differential metabolites were mainly enriched in the amino acid metabolism and carbon-nitrogen balance pathways. The analysis of agronomic traits showed that the plant height 221.01 cm, stem circumference 8.59 cm, and the number of leaves of tobacco in the Shandong production area were significantly better than those in Sichuan, and the population phenotypic stability was higher. Its metabolic regulation network was closely related to the upregulated expression of key genes in nitrogen metabolism. The QX105 line showed metabolomic specificity in both places: uracil accumulated abnormally in QX105 planted in Sichuan, while the monoterpene synthase activity was relatively high in QX105 planted in Shandong, driving the synthesis of terpenoids such as phytol, highlighting the regulatory potential of the interaction between genotype and environment on the metabolic network. In conclusion, the synergistic response mechanism of metabolite accumulation and agronomic traits of cigar tobacco under different ecological environments was clarified, it was confirmed that the Shandong production area was more conducive to the formation of high-yield and high-quality tobacco leaves, the feasibility of metabolomics-assisted variety adaptability evaluation was verified, and it was suggested that the planting scale of cigar tobacco should be expanded with Linqin in Shandong as the central demonstration area and promoting of high adaptability product lines such as QX105 should be prioritized.

Keywords: cigar tobacco; non-targeted derivatization GC-MS metabolomics; OPLS-DA model; differential metabolites; uracil; agronomic traits

雪茄是一种全部由烟叶卷制而成的烟草产品,具有独特的风味和风格^[1]。近些年,国内雪茄市场需求迅速增长,但优质雪茄烟主要依赖进口,国外雪茄特别是古巴雪茄,仍在国内雪茄市场上占据主导地位^[2]。在国家政策的大力支持下,国产雪茄品牌保持了健康快速的发展态势,产销规模不断扩大,品类不断丰富,市场影响力不断提升,国产雪茄烟成为烟草行业提质优化的重要部分^[3-4]。我国雪茄烟叶原料主产区在四川和海南,其他区域雪茄烟叶生产尚未形成规模。目前,国产雪茄烟叶原料与国外优质原料相比,我国雪茄烟叶的生产尚处于初级阶段^[5],在品质上存在较大差异,产业规模化和标准化程度较低,难以满足高端雪茄原料需求。因此,探寻国内雪茄烟生态适应区域,着力发展具有自主知识产权的雪茄烟品种,是解决这一问题的重要途径。四川什邡作为“中国雪茄之乡”,具有丰富的雪茄历史文化^[6],每年生产大量的雪茄烟叶原料和成品雪茄烟。山东临朐作为我国老牌烟草产区,具备良好的种植基础,其历史可追溯到明代末年,晒烟质地好、颜色优、味道美,受到广泛欢迎^[7]。

植物代谢组学是研究植物特定组织中整体代谢水平的学科^[8],能够直接反映生物体的生理状态,揭示生命活动机制。代谢组学通过系统分析生物体内小分子代谢物,可揭示环境—基因—代谢网络互作规律,已成为烟草研究的重要工具^[9]。早期研究多聚焦于烤烟代谢组特征,不同地区和

自然环境对烟叶代谢物的积累具有显著影响^[10]。例如,耿召良等^[11]研究发现,不同生态环境下烟叶代谢物组成存在显著差异,温度、光照和土壤条件共同调控了糖类、生物碱及酚类物质的积累模式。金云峰^[12]研究表明,生长温度通过调控烟碱合成关键酶活性影响烟碱含量,并改变质体色素的组成,低温环境更有利于质体色素的保留。孟霖^[13]研究发现,不同光质(如红光和蓝光)能够调节烤烟叶片中次生代谢产物的积累,进一步影响烟苗的株高、叶面积及生物量分配。周会娜等^[14]研究结果揭示了生态因子通过调控碳氮代谢平衡,调节八大香型风格烟叶的特征代谢物谱。这些研究表明,环境因素对烟叶代谢物的积累具有显著影响,而代谢物的差异又直接影响烟叶的品质和风格特征。然而,当前关于不同产地雪茄烟代谢物积累差异的研究相对较少。

本研究以四川什邡和山东临朐气候差异为切入点,5个相同品系的雪茄烟分别在两地种植,通过代谢组学和农艺性状调查,解析两地雪茄烟代谢物的差异,阐明环境因子对雪茄烟代谢的调控机制,旨在为国产雪茄烟产区规划及品种选育提供理论支撑。

1 材料和方法

1.1 试验材料

选取由中国农业科学院烟草研究所遗传育种研究中心雪茄烟育种课题组选育的不同品系雪茄

烟,各品系编号分别为 QX102、QX105、QX107、QX200 和 QX205。于 2022 年分别种植于四川什邡(B)、山东临朐(D)两地,选取各品系成熟度适中、长势一致的中部叶片进行采收,在晾房内自然晾晒。晾晒完成后,放入 -80°C 冰箱储存备用。

1.2 试验方法

1.2.1 样品制备 将雪茄烟叶片置于 40°C 烘箱中烘干脱水 3 h,采用冷冻研磨仪粉碎为均质粉末,每个品系选取 2~3 片生理状态一致的成熟中部叶片混为 1 个生物学重复,共 3 个独立生物学重复。取烟叶粉末 20 mg 于 2 mL 离心管中,离心 10~15 s;加入 1.5 mL 萃取溶剂,冰浴超声 1 h;室温下 14 000 r/min 离心 10 min;取 500 μL 上清液至 2 mL 锥形玻璃进样瓶中,真空浓缩干燥约 4 h;加入 100 μL 20 mg/mL 的甲氧胺吡啶溶液, 37°C 200 r/min 下孵育 90 min;加入 100 μL 硅烷化试剂 BSTFA; 60°C 200 r/min 摇床硅烷化 60 min。

1.2.2 样品检测 为保障数据可靠性,质控(QC)样本通过等量均匀称取各生物学重复样本混合制备而成。在 GC-MS 检测过程中,每间隔 6 个试验样本插入 1 个 QC 样本,通过分析 QC 样本中代谢物峰面积及保留时间的相对标准偏差($\text{RSD}\leq 15\%$)实时监控仪器稳定性,同时利用 QC 样本信号强度的全局归一化校正批次效应,有效降低环境波动与仪器漂移对定量结果的干扰,从而确保两地雪茄烟叶代谢组差异数据的准确性与可重复性。使用 Agilent7890/5975C 型气相色谱-质谱联用仪对样品进行测定,气相色谱条件参考文献[15],色谱柱为 DB-5MS 柱($0.25\ \mu\text{m}$, $0.25\ \text{mm}\times 30.00\ \text{m}$);载气为氦气,柱流速为 1.2 mL/min;进样口温度为 300°C 。

1.2.3 农艺性状调查 在中心花开放期,各品系挑选 5 株烟草进行农艺性状调查,排除边际效应。农艺性状包括叶长、叶宽、叶片数、叶片厚度、株高、茎围、节距、支脉粗细、主脉粗细、支脉数、主侧脉夹角和茎叶夹角。选取植株中部完全展开的叶片(腰叶),使用直尺测量叶尖至叶基的长度和最宽处宽度,即为叶长与叶宽。从中心花下数第 4 片叶开始,统计单株可采收的完整叶片数;使用数显千分尺测量腰叶中部(避开主脉的厚度),为叶片厚度。使用卷尺测量从茎基部至植株顶端生长点的高度为株高。用游标卡尺测量植株中部的茎周长为茎围;使用卷尺测量植株中部相邻两节间

的长度为节距。游标卡尺测量腰叶的中部支脉直径和主脉中部直径,即为支脉、主脉粗细。在叶片上仔细观察并计数支脉的数量。使用标准角度测量工具测量腰叶中部主脉与支脉之间、植株中部腰叶与茎的锐角夹角,即为主侧脉夹角和茎叶夹角。

1.3 数据处理

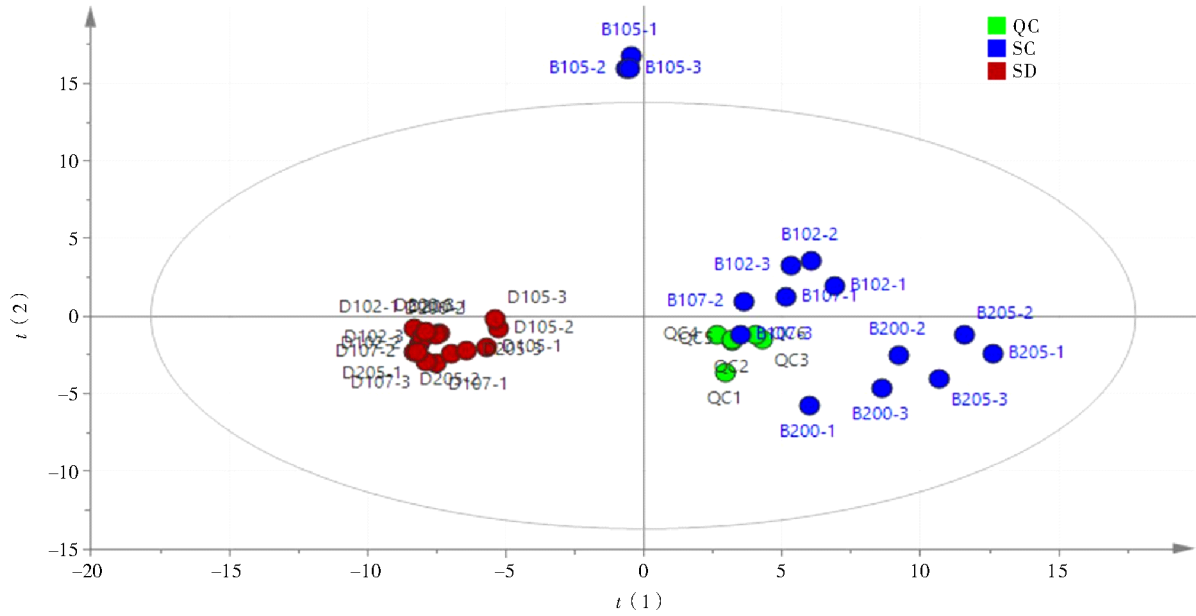
参考郑庆霞等^[16]的方法进行数据预处理,使用 Qualitative Analysis B.07.00 和 MATLAB R2018b 处理软件对质谱鉴定的原始数据进行峰对齐、峰提取等步骤处理,得到质荷比(m/z)、保留时间(RT)、物质峰面积等数据,并将数据采用面积归一化法对代谢物进行相对定量。依据代谢物的特征碎片使用 NIST 质谱数据库对代谢物进行定性分析,对 80% 样品中均存在的特征峰进行提取,并确定代谢物种类^[17]。

利用 SIMCA-P 14 软件对代谢组数据进行主成分分析(Principal component analysis, PCA),对数据进行模式识别,考查各组样品代谢组的分离情况。在 PCA 分析的基础上,采用正交偏最小二乘法判别分析(Orthogonal Partial Least Squares Discriminant Analysis, OPLS-DA)模型,再根据分组贡献值(Variable Importance in the Projection, VIP)和组间变化(Fold Change)筛选得到差异代谢物。采用 TBtools(v 1.082)进行热图(Heat Map)绘制,使用 GraphPad Prism 绘制相关统计图,采用 MetaboAnalyst 5.0 进行相关通路分析。

2 结果与分析

2.1 四川什邡和山东临朐雪茄烟差异代谢物分析

2.1.1 代谢组轮廓特征 对相同品系、不同种植区域的雪茄烟样品进行了非靶向衍生化 GC-MS 代谢组学测定,并对所有样本的代谢组数据进行 PCA 分析,结果显示(图 1),在相同品系的雪茄烟中共筛选出 192 种代谢物,其轮廓具有明显的分离趋势,大体上呈现各自聚为一类。其中,山东临朐种植的各品系雪茄烟在 PCA 图上呈现较好的聚集,而四川什邡种植的各品系雪茄烟在 PCA 图上相互之间分离趋势较为明显,其代谢组变异性更高,尤其是四川什邡 QX105 的 3 次重复(B105-1、B105-2、B105-3)。QX105 在山东产区的 3 次重复同样与其他品系存在一定的分离趋势。总体上看,两地雪茄代谢物呈明显差异。



QC. 质控样本; B. 四川; D. 山东
QC. Quality control sample; B. Sichuan; D. Shandong

图 1 四川什邡和山东临朐雪茄烟代谢组的 PCA 得分

Fig.1 PCA scores of cigar metabolome in Shifang, Sichuan province and Linqu, Shandong province

对四川什邡(SC)与山东临朐(SD)两地雪茄烟代谢物进行正交偏最小二乘法判别分析(OPLS-DA),结果显示(图2),两地样本在得分图中沿第1预测成分轴完全分离,无样本重叠,说明两地雪茄烟代谢物组间差异显著,模型可清晰

区分两地雪茄烟代谢组特征。置换检验结果进一步验证了模型的可靠性,原始模型的 R^2 与 Q^2 显著高于200次随机置换后的对应值,且 Q^2 截距为负,说明模型不存在过拟合,拟合效果与预测能力均良好。

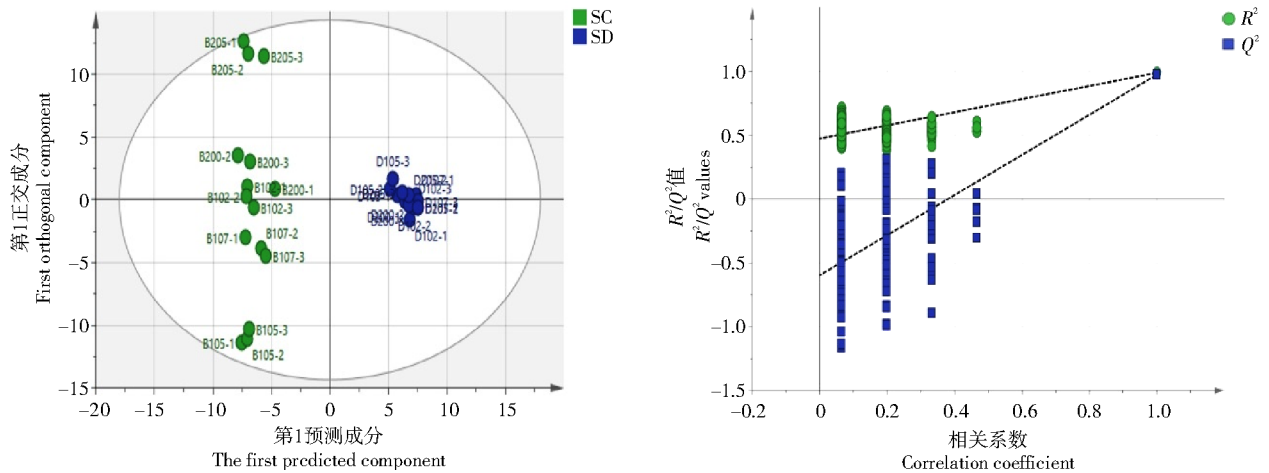


图 2 四川什邡和山东临朐雪茄烟 OPLS-DA 与 200 次置换检验

Fig.2 OPLS-DA diagram and 200-order displacement test diagram of cigar in Shifang, Sichuan province and Linqu, Shandong province

2.1.2 差异代谢物聚类分析 按照VIP值和变化倍数结合的方法,从192种代谢物中,筛选出44种差异代谢物,其中,包含10种有机酸、8种氨基酸、

6种糖类、6种醇类、2种酰胺类、2种酯类、1种醛类、1种酮类、1种碱类以及7种其他类型代谢物(表1)。

表1 四川什邡和山东临朐雪茄烟差异代谢物

Tab.1 Differential metabolites of cigar in Shifang, Sichuan province and Linqu, Shandong province

化合物名称 Compound name	VIP	变化倍数 Fold change	物质分类 Classification of metabolites
尿嘧啶 Uracil	1.61	17.59	其他
酪胺 Tyramine	1.61	14.22	其他
磷酸三甲基硅烷醇 Trimethylsilyl phosphite	1.52	7.43	醇类
乙酰胺 Acetamide	1.42	7.43	酰胺类
塔罗糖 Talose	1.05	4.41	糖类
4-羟基苯乙酸 4-Hydroxybenzeneacetic acid	1.46	4.01	有机酸
植物醇 Phytol	1.15	3.97	醇类
胆固醇 Cholesterol	1.60	3.48	醇类
甘氨酸谷氨酸 Glycylglutamic acid	1.12	3.46	氨基酸
乳糖 Lactose	1.31	3.18	糖类
L-亮氨酸 L-Leucine	1.54	3.18	氨基酸
D-葡萄糖酸 D-Gluconic acid	1.03	3.12	糖类
焦谷氨酸 Pyroglutamic acid	1.13	2.72	氨基酸
4-羟基苯甲酸 4-Hydroxybenzoic acid	1.17	2.70	有机酸
肉桂酸 Cinnamic acid	1.13	2.66	有机酸
咖啡酸 Caffeic acid	1.08	2.65	有机酸
L-天门冬氨酸 L-Aspartic acid	1.47	2.61	氨基酸
异岩藻甾醇 Isofucosterol	1.46	2.45	醇类
扁桃酸 Mandelic acid	1.09	2.29	有机酸
三乙醇胺 Triethanolamine	1.01	2.28	酰胺类
丙二醇 Propylene glycol	1.76	2.22	醇类
鼠李糖 Rhamnose	1.58	2.13	糖类
d-半乳糖 d-Galactose	1.01	2.08	糖类
棕榈酸 Palmitic acid	1.71	2.01	有机酸
松二糖 Turanose	1.47	0.49	糖类
10,12-二十二碳二炔二酸 10,12-Docosadiynoic acid	1.26	0.46	有机酸
千金藤苏诺林碱 Stephasunoline	1.22	0.46	碱类
头孢羟氨苄 Cefadroxil	1.58	0.46	其他
7-甲基鸟嘌呤 7-Methylguanine	1.37	0.42	其他
L-赖氨酸 L-Lysine	1.30	0.41	氨基酸
柠檬苦素 Limonin	1.03	0.41	其他
穿心莲内酯 Andrographolide	1.77	0.38	酯类
酒石酸 Tartaric acid	1.81	0.35	有机酸
赖氨酸酶 Lyxose	1.13	0.32	有机酸
6-甲氧基-8-硝基椰油酸乙酯 Ethyl 6-methoxy-8-nitrocinconinate	1.57	0.30	酯类
L-苏氨酸 L-Threonine	1.45	0.28	氨基酸
磷酸 Phosphoric acid	1.57	0.26	其他
尿素 Urea	1.67	0.25	其他
甘油 Glycerol	1.92	0.23	醇类
13维甲酸 13-Retinoic acid	1.68	0.22	有机酸
高丝氨酸 Homoserine	1.06	0.22	氨基酸
丝氨酸 Serine	1.52	0.20	氨基酸
11-羟基依替奥唑啉酮 11-Hydroxyetiocholanolone	1.90	0.19	酮类
2-呋喃甲醛 2-Furanacetaldehyde	1.52	0.10	醛类

对44种差异代谢物在四川什邡和山东临朐两地各品系雪茄烟的含量进行聚类分析,结果表明(图3),有24种代谢物在四川什邡雪茄烟中上调,

包括有机酸、糖类、醇类、氨基酸、酰胺类和其他物质。20种代谢物在山东临朐上调,包括氨基酸、有机酸、酯类、酮类、糖类、碱类、醇类以及其他物质。

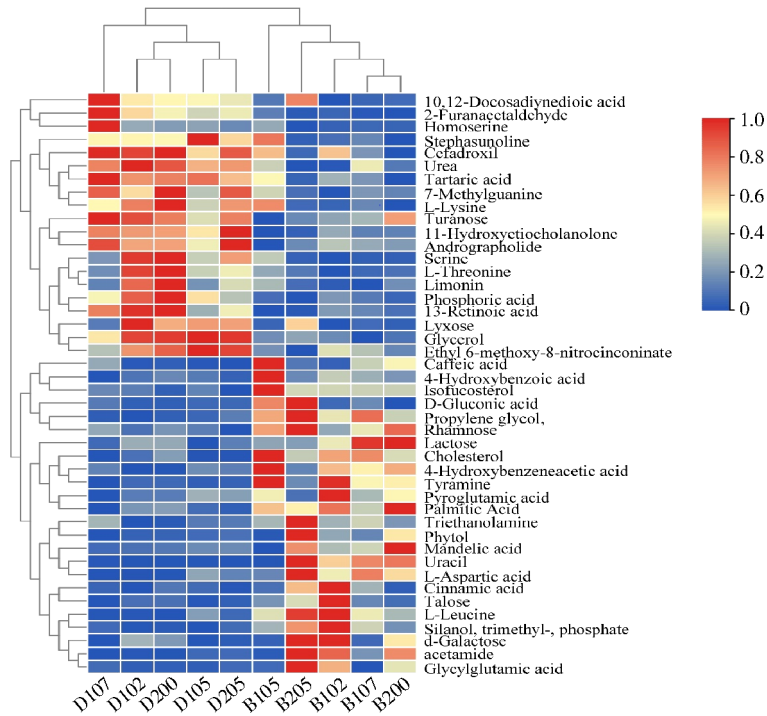


图3 四川什邡和山东临朐雪茄烟差异代谢物聚类分析

Fig.3 Cluster heatmap of differential metabolites of cigar in Shifang, Sichuan province and Linqu, Shandong province

2.1.3 主要差异代谢物含量分析 在44种差异代谢物中,尿嘧啶、酪胺、磷酸三甲硅烷醇、乙酰胺、塔罗糖5种代谢物在两地差异最大,在积累水平上,四川什邡雪茄烟要高于山东临朐雪茄烟(图4)。

相对定量结果显示,四川什邡的尿嘧啶和酪胺2种代谢物定量结果变化倍数是山东临朐的17.59倍和14.22倍。磷酸三甲硅烷醇和乙酰胺在四川什邡和山东临朐变化倍数均大于5。

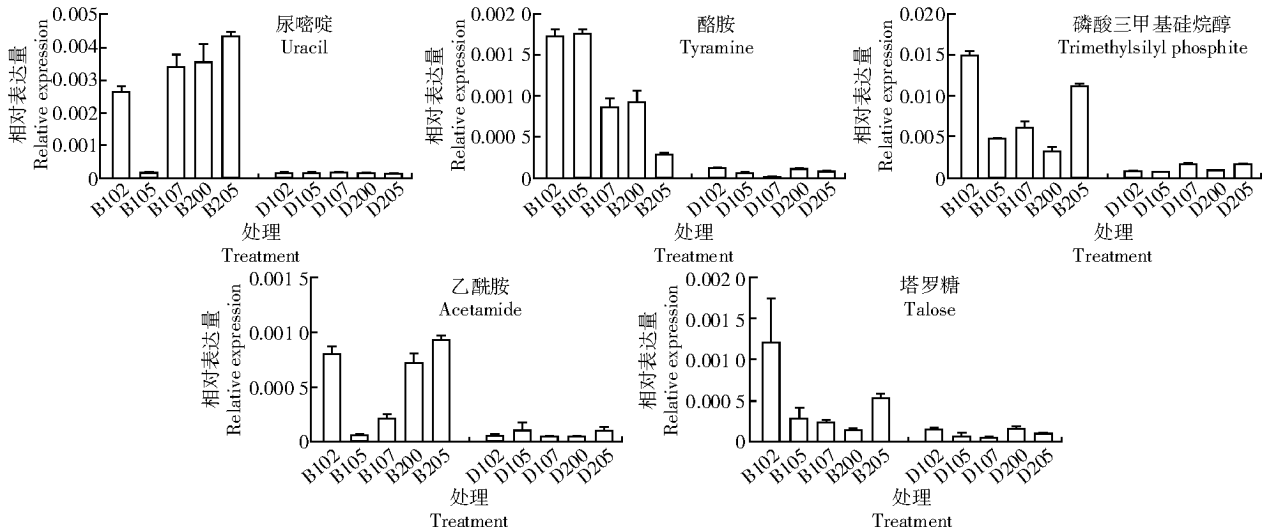


图4 四川什邡和山东临朐雪茄烟主要差异代谢物相对表达量

Fig.4 Relative expression levels of the main differential metabolites of cigar in Shifang, Sichuan province and Linqu, Shandong province

2.2 基于KEGG数据库的关键代谢通路分析

为进一步探索四川什邡和山东临朐两地雪茄品种差异代谢物的主要生物学功能,利用京都基

因和基因组数据库(Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes,KEGG)对统计筛选出的显著差异代谢物进行了功能注释。主要的Top 25代谢通路如

图5所示,差异代谢物显著富集于氨基酸代谢(如甘氨酸—丝氨酸—苏氨酸代谢)、碳固定(Calvin循

环)及苯丙烷生物合成通路。其中,山东临朐雪茄烟叶的谷氨酰胺与天冬氨酸含量较什邡高37.2%。

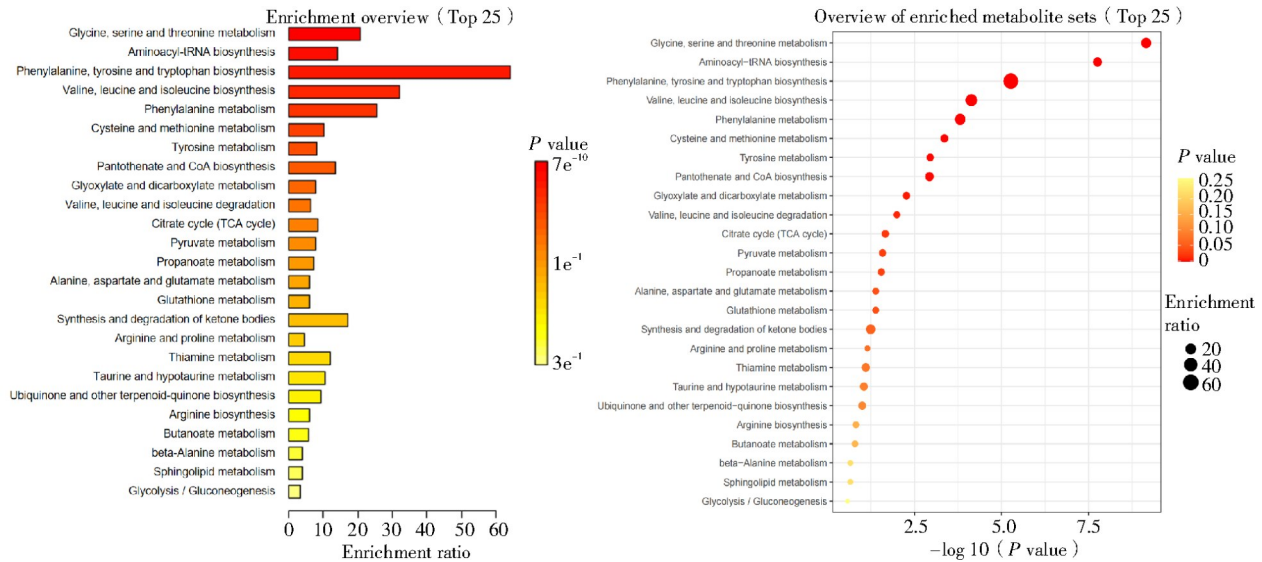


图5 差异丰度得分及差异代谢物 KEGG 富集分析

Fig.5 Differential abundance score and KEGG enrichment map of differential metabolites

2.3 四川什邡和山东临朐雪茄烟农艺性状分析

为了更直观地展示2个产地的雪茄烟在农艺性状上的差异,将四川什邡和山东临朐的5个雪茄烟品系的农艺性状数据进行了综合比较(表2、3)。结果显示,山东临朐的雪茄烟在株高、茎围、可采叶片数、叶长、叶宽等与产量相关的性状表现均优于四川什邡。山东临朐的雪茄烟平均株高比四川什邡高30.10%,茎围比四川什邡高粗31.95%,可采叶片数比四川什邡多17.64%,叶长

和叶宽分别增加了16.60%和26.90%。对品系进行比较发现,四川地区B200株高较高、茎围较粗及叶片数较多,B105茎围较细、叶片数较少,叶长、叶宽均较小,支脉较细,但数量接近最高。山东地区D200株高较高,D205茎围较粗、叶长、叶宽较大,D105茎围较细,叶长、叶宽次之,支脉数与粗细均接近最高水平。综合两地表现,QX105(B105/D105)烟草品系展现出稳定优良的农艺性状优势。

表2 四川什邡雪茄烟农艺性状调查结果

Tab.2 Survey results of agronomic traits of cigars in Shifang, Sichuan province

性状 Trait	株高/cm Plant height	茎围/cm Stem circumference	叶片数 Number of leaves	叶长/cm Leaf length	叶宽/cm Leaf width	叶片厚度/mm Leaf thickness	支脉粗细/mm Branch thickness	支脉数/条 Number of branches	节距/cm Pitch
B102	175.80± 9.41b	7.00± 0.76b	22.67± 3.34a	47.80± 4.86ab	27.25± 3.20a	0.25± 0.04d	1.63± 0.19b	8.40± 0.25b	4.51± 1.16d
B105	167.27± 9.41c	5.57± 0.76e	15.07± 3.34d	36.99± 4.86c	20.15± 3.20c	0.32± 0.04b	1.28± 0.19c	8.67± 0.25ab	4.51± 1.16d
B107	160.00± 9.41d	6.63± 0.76c	18.60± 3.34c	46.68± 4.86b	27.47± 3.20a	0.31± 0.04bc	1.63± 0.19b	9.00± 0.25a	5.53± 1.16c
B200	183.00± 9.41a	7.43± 0.76a	21.40± 3.34b	49.05± 4.86a	27.83± 3.20a	0.29± 0.04c	1.81± 0.19a	8.80± 0.25ab	7.25± 1.16a
B205	163.33± 9.41cd	5.91± 0.76d	15.80± 3.34d	47.20± 4.86ab	25.53± 3.20b	0.36± 0.04a	1.57± 0.19b	9.00± 0.25a	6.48± 1.16b
SD	9.41	0.76	3.34	4.86	3.20	0.04	0.19	0.25	1.16
Mean	169.88	6.51	18.71	45.55	25.65	0.31	1.58	8.77	5.71
CV/%	6.00	12.00	18.00	11.00	12.00	13.00	12.00	3.00	20.00

注:每列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下表同。

Note: Different lowercase letters in each column indicated statistically significant differences between the treatments(P<0.05). The same as below.

表 3 山东临朐雪茄烟农艺性状调查结果

Tab.3 Survey results of agronomic traits of cigar tobacco in Linq, Shandong province

性状 Trait	株高/cm Plant height	茎围/cm Stem circumference	叶片数 Number of leaves	叶长/cm Leaf length	叶宽/cm Leaf width	叶片厚度/mm Leaf thickness	支脉粗细/mm Branch thickness	支脉数/条 Number of branches	节距/cm Pitch
D102	223.13± 7.79b	8.70± 0.41b	24.13± 1.40a	50.60± 3.26c	30.75± 2.66d	0.31± 0.02a	1.30± 0.09a	9.80± 0.67b	7.11± 1.15c
D105	214.67± 7.79c	8.15± 0.41c	21.2± 1.40cd	49.14± 3.26c	29.53± 2.66d	0.29± 0.02b	1.14± 0.09b	9.60± 0.67b	8.30± 1.15b
D107	222.20± 7.79b	8.51± 0.41bc	22.27± 1.40b	54.37± 3.26b	32.25± 2.66c	0.30± 0.02ab	1.30± 0.09a	9.33± 0.67b	8.05± 1.15b
D200	232.33± 7.79a	8.36± 0.41bc	20.40± 1.40d	57.34± 3.26a	36.28± 2.66a	0.27± 0.02c	1.33± 0.09a	11.07± 0.67a	9.96± 1.15a
D205	212.73± 7.79c	9.23± 0.41a	22.07± 1.40bc	54.09± 3.26b	33.93± 2.66b	0.31± 0.02a	1.40± 0.09a	9.73± 0.67b	7.20± 1.15c
SD	7.79	0.41	1.40	3.26	2.66	0.02	0.09	0.67	1.15
Mean	221.01	8.59	22.01	53.11	32.55	0.30	1.29	9.91	8.12
CV/%	4.00	5.00	6.00	6.00	8.00	5.00	7.00	7.00	14.00

3 结论与讨论

四川什邡和山东临朐的气候条件存在显著差异,形成典型的气候梯度对比,这种差异对雪茄烟的代谢物积累和表型性状产生了重要影响。四川什邡地处四川盆地北部,属于中亚热带湿润气候,年均温度 15.8 °C,年降水量 1 230 mm,气候温和湿润^[18],适合雪茄烟生长;而山东临朐属于暖温带季风型半湿润大陆性气候,年均温度 12.5 °C,年降水量 710 mm,四季分明,夏季炎热多雨^[19-20]。尽管两地夏季的自然环境具有一定的相似性,但整体气候条件的差异导致了雪茄烟代谢物积累的显著不同。

在本研究中,四川什邡和山东临朐的雪茄烟在农艺性状上表现出显著差异,尤其是在株高、茎围、可采叶片数等与产量相关的性状上。山东临朐的雪茄烟在这些性状上表现较为优越,这可能与当地特定的气候条件密切相关。四川什邡的高降水在一定程度上可以促进可溶性糖的积累,但抑制氮同化效率,导致支链氨基酸(如亮氨酸)含量降低;而临朐的强光照则通过激活烟碱合成关键基因通路提高烟碱的合成,同时增强新植二烯(香气前体)的基因型与环境互作效应。

值得注意的是,QX105 品系在两地均表现出显著的代谢组与表型性状分异,其独特性不仅体现在代谢物积累的极值差异上,更反映在代谢-表型耦合的协同调控模式中。在四川什邡的湿润气候下,QX105 的尿嘧啶积累量较其他品系高出 17.59 倍,这一现象可能与其嘧啶代谢通路的特异

性激活相关。尿嘧啶作为 RNA 合成前体,其过量积累可能通过反馈抑制胞苷酸合成酶活性,间接影响氮素再分配效率,进而导致该品系在四川的茎围发育受限。然而,在山东临朐的强光照条件下,QX105 展现出显著的代谢适应性,其单萜合酶活性较其他品系提升了 32.6%,驱动植醇、柠檬苦素等萜类物质的特异性积累。这些代谢物不仅是香气成分(如新植二烯)的前体,还可通过调控细胞膜通透性增强抗旱能力,这与临朐 QX105 株高(214.67 cm)的显著优势形成协同效应。基于两地差异代谢物的 KEGG 富集分析显示,甘氨酸-丝氨酸-苏氨酸代谢通路显著富集,该通路通过提供一碳单位参与嘌呤合成。结合 QX105 在四川什邡尿嘧啶异常积累的代谢表型,可推测该品系可能存在嘧啶代谢与一碳代谢的协同调控机制,这与其在两地表现出的代谢可塑性密切相关。表型数据进一步印证了上述代谢调控的生物学意义。QX105 在临朐的茎围与谷氨酰胺含量呈显著正相关($r=0.71, P<0.01$),而谷氨酰胺作为氮转运的核心载体,其积累可能激活 TOR(Target of Rapamycin)信号通路,促进细胞伸长。这种代谢-表型耦合机制在其余 4 个品系中没有显著表达,凸显 QX105 基因型与环境互作的特异性。综上,两地气候差异对雪茄烟代谢通路的影响以氨基酸代谢响应最为敏感,QX105 通过其独特的代谢适应性在不同生态条件下实现了生长与抗逆的协同平衡。

因此,建议在后期种植过程中,可以将关注重点置于经济种植和高产栽培相配套方面,山东产

区可以以临胸作为核心示范区,结合精准水氮管理优化栽培模式,逐步扩大雪茄烟试种面积,同步推进 QX105 等抗逆品系的大田应用,以实现产量与品质的协同提升。

参考文献:

- [1] 朱贝贝,何声宝,安泓沟,等. 国内外几种知名品牌雪茄化学及风格特征比较[J]. 中国烟草学报,2023,29(3):115-124.
ZHU B B, HE S B, AN H G, et al. Comparison of chemical characteristics and flavor characteristics of several well-known domestic and imported brands of cigars[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2023, 29(3): 115-124.
- [2] 韦祖松. 析释“中式雪茄”的特点和发展现状[J]. 广东经济, 2020(11):82-89.
WEI Z S. Analysis on the characteristics and development status of "Chinese cigar"[J]. Guangdong Economy, 2020(11):82-89.
- [3] 张卫东,尹健康,宋红文,等. 基于百度指数的长城雪茄销售探索[J]. 市场周刊,2020,33(7):93-95.
ZHANG W D, YIN J K, SONG H W, et al. Exploration of Great Wall cigar sales based on Baidu index[J]. Market Weekly, 2020, 33(7): 93-95.
- [4] 周婷,范静苑,邢蕾,等. 国产雪茄烟叶原料应用研究的探索和思考[J]. 现代工业经济和信息化,2021,11(7):140-142.
ZHOU T, FAN J Y, XING L, et al. Exploration and reflections on the application of the great wall cigar to domestic cigar tobacco[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2021, 11(7): 140-142.
- [5] 王琰琰,刘国祥,向小华,等. 国内外雪茄烟主产区及品种资源概况[J]. 中国烟草科学,2020,41(3):93-98.
WANG Y Y, LIU G X, XIANG X H, et al. Overview of main cigar production areas and variety resources at domestic and overseas[J]. Chinese Tobacco Science, 2020, 41(3): 93-98.
- [6] 魏仁军. 什邡打造“中国雪茄第一城”的探索与思考[J]. 农家参谋,2020(8):230.
WEI R J. Exploration and thinking of Shifang building "the first cigar city in China"[J]. The Farmers Consultant, 2020(8): 230.
- [7] 王海梅. 近代山东烟草业研究[D]. 合肥:安徽大学,2014.
WANG H M. Study on tobacco industry in modern Shandong Province[D]. Hefei: Anhui University, 2014.
- [8] 宋诗娟,雷振宏,郭旭,等. 不同产地蒙古黄芪的非靶向代谢组学分析[J]. 山西农业科学,2024,52(1):43-54.
SONG S J, LEI Z H, GUO X, et al. Non-targeted metabolomics analysis of *Astragalus membranaceus* var. *Mongholicus* from different origins[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2024, 52(1): 43-54.
- [9] 王小莉,付博,赵铭钦,等. 代谢组学技术在烟草研究中的应用进展[J]. 中国烟草科学,2016,37(1):89-96.
WANG X L, FU B, ZHAO M Q, et al. Research of metabolomics in tobacco[J]. Chinese Tobacco Science, 2016, 37(1): 89-96.
- [10] LI Y, PANG T, LI Y L, et al. Gas chromatography-mass spectrometric method for metabolic profiling of tobacco leaves [J]. Journal of Separation Science, 2011, 34(12): 1447-1454.
- [11] 耿召良,李继新,冯勇刚,等. 生态条件和种质因素对初烤烟叶次生代谢产物含量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(12):80-85.
GENG Z L, LI J X, FENG Y G, et al. Variation of secondary metabolites contents in flue-cured tobacco leaves from different varieties and regions[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2013, 41(12): 80-85.
- [12] 金云峰. 不同生长温度对烟草烟碱及质体色素代谢的影响[D]. 昆明:云南师范大学,2015.
JIN Y F. Effects of different growth temperatures on nicotine and plastid pigment metabolism in tobacco[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2015.
- [13] 孟霖. 光质对烤烟叶片代谢物质积累及烟苗发育的影响[D]. 北京:中国农业科学院,2015.
MENG L. The effects of light quality on development of tobacco seedlings and accumulation of metabolites in flue-cured tobacco leaves[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.
- [14] 周会娜,刘萍萍,张玉霞,等. 八大香型风格新鲜烟叶代谢特征的生态成因分析[J]. 烟草科技,2022,55(6):19-26.
ZHOU H N, LIU P P, ZHANG Y X, et al. Ecological causal analysis based on metabolic characteristics of fresh tobacco leaves of eight typical flavor types[J]. Tobacco Science & Technology, 2022, 55(6): 19-26.
- [15] ZHAO Y N, ZHAO C X, LU X, et al. Investigation of the relationship between the metabolic profile of tobacco leaves in different planting regions and climate factors using a pseudotargeted method based on gas chromatography/mass spectrometry [J]. Journal of Proteome Research, 2013, 12(11): 5072-5083.
- [16] 郑庆霞,刘萍萍,陈霞,等. 基于气质和液质联用技术的烟草鲜烟叶代谢组学分析流程[J]. 烟草科技,2019,52(6):59-71.
ZHENG Q X, LIU P P, CHEN X, et al. Metabolomic workflow and analysis of fresh tobacco leaves based on GC-MS and LCMS[J]. Tobacco Science & Technology, 2019, 52(6): 59-71.
- [17] 贾中林,郑庆霞,戴华鑫,等. 烤烟上部叶成熟过程中代谢组的差异分析[J]. 烟草科技,2023,56(1):1-10.
JIA Z L, ZHENG Q X, DAI X H, et al. Differential analysis of metabolome of upper flue-cured tobacco leaf during ripening process[J]. Tobacco Science & Technology, 2023, 56(1): 1-10.
- [18] 曹琨. 四川地区气候及水资源变化分析与预测[J]. 东北水利水电,2018,36(4):28-30.
CAO K. Analysis and forecasting of the changing of climate and water resources in Sichuan region[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2018, 36(4): 28-30.
- [19] 董旭光,李胜利,石振彬,等. 近50年山东省农业气候资源变化特征[J]. 应用生态学报,2015,26(1):269-277.
DONG X G, LI S L, SHI Z B, et al. Change characteristics of agricultural climate resources in recent 50 years in Shandong province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(1): 269-277.
- [20] 杨付津. 潍坊市农业气候资源开发利用的研究[D]. 北京:中国农业科学院,2009.
YANG F J. Study on exploitation and utilization of agroclimatic resources in Weifang[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009.