

烟叶醇化过程潜香物降解规律研究进展

李雪峰¹, 康超¹, 宾俊^{2*} (1. 贵州大学化学与化工学院, 贵州贵阳 550025; 2. 贵州大学烟草学院, 贵州贵阳 550025)

摘要 烟草潜香物质是影响香气品质的重要指标, 烟叶关键的潜香物质主要来源美拉德反应物、类胡萝卜素、赖百当类、西柏烷类和糖苷类。在烟叶及卷烟生产过程中, 醇化是烟叶产生香气的最关键步骤, 综述了上述几种潜香物质的醇化降解规律, 对未来烟草醇化过程研究做出展望。

关键词 潜香物; 降解; 分析方法; 醇化

中图分类号 TS41⁺1 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2022)13-0021-06

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.13.007



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Research Progress on the Degradation Law of Latent Flavor in Tobacco Leaf Alcoholization

LI Xue-feng¹, KANG Chao¹, BIN Jun² (1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025; 2. College of Tobacco Science, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025)

Abstract Tobacco latent aroma substances are important indicators that affect aroma quality. The main sources of key latent aroma substances in tobacco leaves are Maillard reaction, carotenoids, labradans, cembranes and glycosides. In the production process of tobacco and cigarettes, aging is the most critical step for tobacco to produce aroma. This article reviews the aging and degradation laws of the above-mentioned latent aroma substances, and makes a prospect for the future tobacco aging process.

Key words Latent fragrance; Degradation; Analysis method; Alcoholization

烟草是消费最广泛的商品之一, 烟草中的香气成分是评价其质量和商业价值的一个非常重要的因素。香气是影响烟草品质的重要因素, 在烟草的感官评价中, 香气这一项占总分的 35%^[1]。烟草是一种极其复杂的化学物质混合物, 含有 6 600 种化学成分, 其中 3 800 种成分来自烟叶, 另外 2 800 种成分来自主流烟雾气^[2]。在大多数的化学成分中, 烟草中香气的来源主要是次级代谢产物。次生代谢产物本身不具有芳香性, 只有在代谢物经燃烧降解或裂解时才会产生香气^[3]。因烟草中致香物含量低、易挥发, 对分析方法提出了很高的要求。在烟叶的降解过程中, 烟叶的醇化过程是形成香气的重要阶段。该研究对烟叶醇化过程潜香物质的降解规律进行了综述, 聚焦烟叶醇化过程的变化规律, 以期烟叶醇化降解规律研究提供理论依据。

1 香气的来源

烟草中的化学成分较为复杂, 可以在烟草中检测到的化学物质有上千种, 与香气有关的物质就有几百种, 例如羟基、氨基、羧基等特殊的致香官能团, 都是影响大多数物质香气的官能团, 这些特殊的官能团能够带来不同的香味刺激^[4]。在烟叶的整个生产过程中, 主要的工艺流程包括烟叶烘烤、复烤(打叶)、入库醇化、制丝卷包, 烟叶醇化是其中最关键的过程之一, 这一过程需要 18~24 个月, 在该阶段发生重要的变化是潜香物转化为致香物质的过程。烟草中的潜香物质复杂多样, 根据潜香物裂解前期可以将烟草致香物质分为美拉德反应物、萜烯类化合物、糖苷类 3 类。萜烯类化合物又存在 3 种不同的物质, 即赖百当类、类胡萝卜素类、西柏烷

类。化学性质大多数有相同之处, 主要可分为酸性、中性和碱性 3 种物质。

2 潜香物的前处理与分析手段

2.1 前处理 烟草中的潜香物质大多复杂, 对物质的处理手段也是多样的。溶剂萃取法、水蒸气蒸馏法、顶空分离法、超临界二氧化碳萃取法等是烟草潜香物处理中的常见手段^[5]。溶剂萃取法主要是基于香气成分在溶剂相和烟草之间或溶剂相和蒸馏液之间的分配系数不同, 它的主要缺点是萃取效率低、溶剂需要量大、萃取时间长。水蒸气蒸馏法是利用水蒸气通入有机物中, 使有机物在低于 100 ℃ 温度下, 随着水蒸气一起蒸馏出来, 它的使用需要一定条件, 有机物要不溶或难溶于水但有一定蒸气压, 面临的问题是大量有机溶剂萃取, 处理量大。顶空分离法直接将烟末或萃取液加热, 抽取样品上口的空气进行分析的一种非浓集型的气体分析方法, 该方法适用于萃取沸点低于 200 ℃ 的挥发性有机物。超临界二氧化碳萃取法利用压力和温度调控超临界二氧化碳的极性, 从而选择性地依次萃取出极性大小、分子量大小不同的组分, 在常见实验室费用过高。

2.2 分析方法 在烟草潜香物的分析过程中, 最常见的分析方法是采用气相色谱质谱仪、液相色谱质谱仪进行定性和定量分析, 首先在色谱中香气组分极性不同进行分离, 进入质谱后进行分析。张婕等^[6]建立了同时测定烟草中 16 种游离氨基酸和 6 种 APs 的 HPLC-MS/MS 分析方法。王红瑞等^[7]建立了高效液相色谱-串联三重四极杆质谱联用技术同时测定烟草中 5 种 Amadori 前香物质含量的分析方法。李勇等^[8]建立了一种基于气相色谱质谱的烟草根部代谢组学研究方法, 方法优化了根部代谢组学分析的各项参数并首次建立了烟草根部代谢物专用定性信息库, 该信息库的建立将大大简化分析难度。在烟草的分析过程中, GC-MS 和 LC-MS 成为最常见最普遍的分析方法, 利用不同的前处理手段, 可

基金项目 贵州省科技计划项目(黔科合基础[2019]1070 号); 贵州大学引进人才科研项目(贵大人基合字[2017]69 号)。

作者简介 李雪峰(1997—), 男, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 研究方向: 烟草品质化学。* 通信作者, 讲师, 博士, 从事烟草品质化学研究。

收稿日期 2021-09-22

以有效地分离出烟叶中的关键化学物质。

3 关键致香物降解

3.1 美拉德反应 美拉德反应又叫羰氨反应,是指在反应中是由含有氨基的化合物和羰基化合物聚合、缩合反应下生成的复杂反应^[9]。这个反应是化学家美拉德在 1912 年研究甘氨酸与葡萄糖共热反应时发现的,所以叫美拉德反应^[10]。美拉德反应一共有 3 个反应阶段:初级阶段、高级阶段、最终阶段。

美拉德的初级反应阶段主要是 Amadori 化合物的产生阶段(图 1),还原糖的羰基与氨基之间反应,反应物脱水缩合转变为希夫碱,因为希夫碱不稳定,容易发生不可逆重排^[11],它环化形成相应的 N-取代的醛,经 Amadori 重排转成 1-氨基-1-脱氧-2-酮糖^[12]。初级反应阶段产生的 Amadori

重排产物并不会产生香气,但是初级反应阶段是关键的起始阶段。高级阶段主要分为 3 个途径,前 2 个途径是因为酸碱性的因素影响了不同部位的烯醇化反应。第一条是在酸性条件下 1-氨基-1-脱氧-2-酮糖进行的 1,2-烯醇化反应。经过脱水、脱氨反应生成了羟甲基糠醛。因为羟甲基糠醛产生的不断积累,导致了褐变反应^[13]。第二条是在碱性条件下 1-氨基-1-脱氧-2-酮糖进行的 2,3-烯醇化反应,经过脱氨生成了还原酮类和二羰基化合物。第三条途径是氨基酸与二羰基化合物发生脱羧、脱氨反应,氨基转移到二羰基化合物上,这一反应为斯特勒克降解反应。这一反应生成的羰氨类化合物经过缩合,生成吡嗪类物质。最后阶段反应是醇醛缩合:两分子醛自相缩合,进一步脱水生成更高级不饱和醛^[14]。

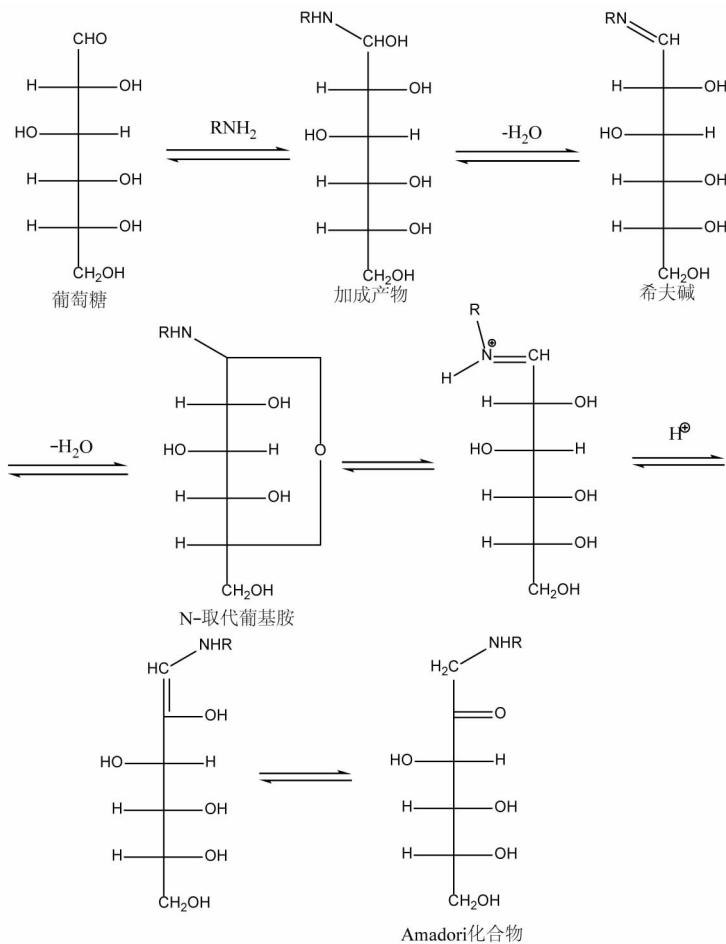


图 1 Amadori 化合物形成阶段

Fig. 1 Amadori compound formation stage

美拉德反应过程多样复杂,探究降解的变化对降解有着重要的作用。在烟叶的醇化过程中,烟叶的物理特性变化规律在某种程度上可以反映烟叶的发育成熟度。卫盼盼等^[15]选用了安徽、福建和四川 3 个地区的 C2F 等级的样品,对不同地区品种的烟叶醇化过程中的物理变化进行探究,发现烟叶的厚度、叶质重总体上呈现下降的趋势;拉力和延伸率的变化差异较大,福建 C2F 拉力呈现先降低后升高的趋势,安徽和四川 C2F 拉力呈现上升的趋势。福建和

安徽 C2F 拉伸率总体呈现上升的趋势,四川的 C2F 拉伸率较为舒缓。于建军等^[16]探究了河南和四川同一种基因型烤烟在不同的烟区致香物质的降解变化,利用 GC-MS 内标法测定分析认为美拉德降解产物中的主要 5 种产物存在不同程度的增减,其中 5-甲基糠醛含量在 2 个地区达到了极显著水平,表明同一基因型烤烟受生态因子等因素的影响其降解产物的含量也不同,造成了香气风格特征的差异。冉霞等^[17]利用 HPLC、GC-MS 对毕节烟草 5 种典型烤烟的

中性致香成分和潜香物质进行分析,发现烟草中的多酚含量都在 30 mg/g 以上,多酚含量和美拉德降解产物存在一定的关系,试验发现绿原酸与乙酰呋喃呈正相关,莰萜亭与乙酰呋喃呈负相关,多酚总量则与糠醇、乙酰呋喃呈正相关。多酚与乙酰呋喃呈现明显正相关,美拉德降解产物和多酚的含量存在紧密关系。

美拉德反应降解过程中产生多种降解物质,不同的降解物质会导致烟叶的评吸感受不同,在试验过程潜香物质的最优产量和优化条件对以后烟草普遍降解规律有着重要贡献。

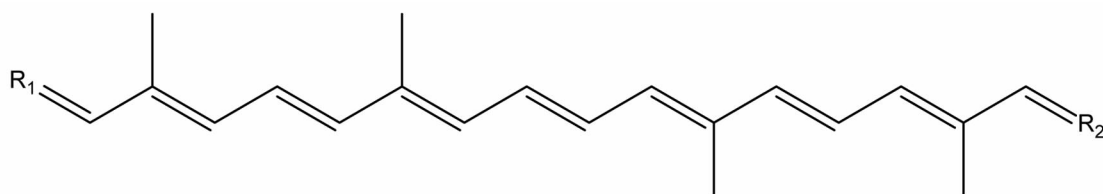


图 2 类胡萝卜素通式

Fig. 2 General formula of carotenoids

烟叶中类胡萝卜素是重要的致香前体物,类胡萝卜素在植物中的合成已经研究得比较明确,是由二甲烯丙基焦磷酸(DMAPP)在香叶基香叶基焦磷酸合酶(GGPS)催化作用下生成香叶基香叶基焦磷酸(GGPP),八氢番茄红素合酶(PSY)催化 GGPP 下生成八氢番茄红素(phytoene)^[19]。继续在八氢番茄红素脱氢酶、 ζ -胡萝卜素脱氢酶(ZDS)、类胡萝卜素异构酶(CRTISO)3 种酶的催化下生成番茄红素^[20]。类胡萝卜素的降解速度较缓慢,降解种类和过程较为复杂,其降解产物的种类、含量直接影响烟叶的品质^[21]。

类胡萝卜素降解产物是烤后烟叶中一类重要中性致香物。类胡萝卜素在烟叶醇化过程中会大量降解^[22]。在类胡萝卜素降解过程中,脂氧合酶起关键的作用,在这种酶的催化下,类胡萝卜素发生氧化降解。类胡萝卜素在降解的过程中,主要是因为不同位置双键的断裂,导致产生的降解产物不同。类胡萝卜素的降解反应本质是因为在氧分子的攻击下可生成 3 种氧化物的中间体,进一步发生分子重排后分解生成氧化产物。

王卫峰等^[23]探究了自然醇化下不同烟叶的变化影响,以云烟 85 的 B2F、C3F 和 X2F 3 种初级烤烟为原料,利用蒸馏萃取-气相色谱质谱检测到的主要降解物质有芳樟醇、异佛尔酮、 β -大马酮、香叶基丙酮、 β -紫罗兰酮、二氢猕猴桃内酯、巨豆三烯酮 a、巨豆三烯酮 b、巨豆三烯酮 c、巨豆三烯酮 d、螺岩兰草酮等类胡萝卜素降解产物。这些物质的总含量在自然醇化后均增加,并在醇化 2~3 个月后达到最大值,醇化 4 个月后含量降低。

詹军等^[24]对胡萝卜素降解香气物质与评吸质量进行分析发现,浓香型烤烟的类胡萝卜素降解香气物质与评吸质量关系密切,相关性较高,且多呈正相关,而与中间香型和清香型烤烟多呈负相关,且相关性强弱不同。阴耕云等^[25]对 B4F 烤烟烟叶类胡萝卜素降解物探索发现,类胡萝卜素降解产物

3.2 萜烯类化合物

3.2.1 类胡萝卜素。类胡萝卜素是由所有光合生物和一些非光合细菌及真菌合成的亲脂异戊二烯化合物。典型的类胡萝卜素含有 40 个碳原子(图 2),由 8 个 C_5 异戊二烯类单元的构成,虽然 C_{40} 类胡萝卜素是自然界中最丰富的,但一些类胡萝卜素较短(C_{30})或更长(C_{45} 或 C_{50})。 C_{30} 类胡萝卜素只包含 6 个 C_5 异戊二烯单元,而 C_{45} 和 C_{50} 类胡萝卜素分别包含 9 个或 10 个异戊二烯单元^[18]。类胡萝卜素可以被裂解,在分子的一端或两端失去片段,从而产生多类胡萝卜素。类胡萝卜素是一类脂溶性色素,大多难溶于水。

二氢猕猴桃内酯、巨豆三烯酮发生显著性变化。而 β -大马酮、 β -二氢大马酮、 β -紫罗兰酮、异佛尔酮、氧化异佛尔酮未发生显著性变化。

王玉华等^[26]发现类胡萝卜素降解产物含量在自然醇化过程中总体趋势是增加的,但在 12~18 个月上部和中部叶均有一定程度的下降,随后继续呈现上升趋势,这可能和季节影响有一定关系。类胡萝卜素的降解过程是烟叶中影响香气的重要组成部分,不同多种的降解产物对烟草香气有着重要的影响。席元肖等^[27]利用 HPLC 和 GC/MS 探究不同地区不同外观的烤烟胡萝卜素降解规律,发现烤烟叶黄素、 β -胡萝卜素及类胡萝卜素含量随颜色加深逐渐升高,随成熟度的提高逐渐降低,随油分增多而降低,随色度增强而基本表现出降低趋势。高远等^[28]运用相关、回归和聚类分析等方法对比不同香型典型地区烤烟中类胡萝卜素和类胡萝卜素降解产物,发现两个清香型产区烤烟的类胡萝卜素含量、叶黄素所占比例和降解产物总量显著或极显著高于豫中浓香型产区,降解产物中 β -大马酮在两类香型产区之间差异较大。

马彩娟等^[29]以 5 个烤烟品种为材料,按 Griffing 半双列杂交配制正交组合 10 个加上 5 个亲本,对烤烟的类胡萝卜素降解产物总量和 3 种物质的配合力表现及其遗传参数进行了分析,发现烤烟类胡萝卜素降解产物含量的遗传决定度均高于 80%,环境因素影响较小,通过性状选择优良。

3.2.2 赖百当类。赖百当类又称岩蔷薇树脂,属于二萜类物质。这种物质不存在于烤烟和白肋烟当中,是香料烟所特有的。冷杉醇和赖百当烯二醇是赖百当中的关键物质^[30]。在烟草的调制和纯化过程中,赖百当类物质的降解会产生一些带有香气的物质,如龙涎香调的柏木香味,这对烟草的香味有着重要的作用。赖百当类降解产物有许多有实用价值的物质,例如降龙涎香醚、龙涎香内酯、脱氢龙涎香内酯和 γ -双环同法尼醛等。

如图3所示,首先是GGPP在NiCPS2基因编码的柯巴基焦磷酸合酶的催化下发生环化反应,形成8-羟基-柯巴基焦磷酸, NiABS基因编码的顺-冷杉醇环化酶以8-OH-CPP为底物合成顺-冷杉醇,而8-OH-CPP在赖百当二萜环化酶的催化下生成赖百当烯二醇。

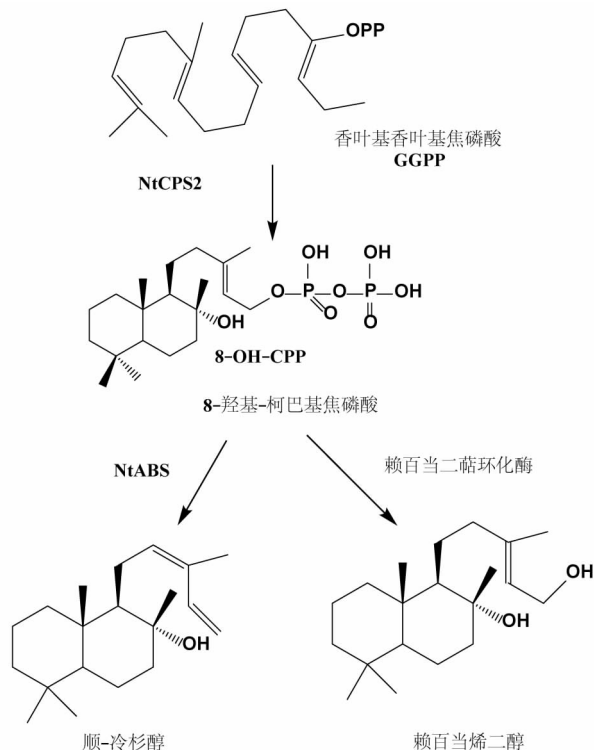


图3 赖百当烯二醇的合成路径

Fig. 3 Synthetic route of Liberdene diol

王蕾等^[31]采用同时蒸馏萃取法提取主要成分,对不同的赖百当类进行测定,发现国内岩蔷薇浸膏共鉴定出33种致香成分,其中烯烃类11种、酮类8种、酯类7种、醇类5种、酸类2种。国外岩蔷薇浸膏共鉴定出29种致香成分,其中烯烃类9种、醛酮类4种、酯类10种、醇类5种、酸类1种。感官评价表明国产浸膏香气特征丰富、香气强度大、纯正度稍差;进口浸膏香气特征明显、纯正度较高、强度适中,与烟草的协调性好。

符云鹏等^[32]选择了国内不同地区的香料烟和土耳其、泰国的香料烟,利用GC-MS对其主要成分含量比较,发现不同产区、不同部位的香料烟组成成分相同,但是含量差异较大。在同一产区不同部位的赖百当含量差别很大,云南、浙江和新疆的香料烟的赖百当物质均随部位的升高而增加。

巩效伟等^[33]对烟叶的醇化和主要化学成分规律进行分析,利用近红外光谱技术测得9种不同醇化时间和等级的云南K326烤烟的成分,结果表明,随着醇化时间的延长,总氮、烟碱和挥发碱含量呈明显的下降趋势,蛋白质、还原糖和纤维素的含量没有明显变化。

3.2.3 西柏烷类。西柏烷类与类胡萝卜素和赖百当类同属于二萜类物质^[1]。它通常以蜡状物分布在鲜烟草的植物表面,主要是西柏三烯醇和西柏三烯二醇。西柏烷类的合成途

径与其他二萜物质有着相似之处,由植物重要的中间产物香叶基香叶基焦磷酸(GGPP)在西柏三烯醇合酶(CBTS)^[34]和细胞色素P450加氧酶(CYP450)^[35]的催化作用下合成,烟草中西柏烷类和赖百当类合成途径如图4所示^[34-38]。

西柏烷类的降解产物有茄酮、茄醇、茄尼呋喃和降茄二酮等具有香味特征的物质。西柏烷类的主要降解产物是茄酮,它的化学名称是8-甲基-5-异丙-6,8-壬二烯-2-酮^[39]。茄酮可以产生多种产物的降解:①在氧化作用下,茄酮发生分子重排反应,生成茄尼呋喃。②在酸性条件下,茄酮与水反应生成醇,继续与过氧酸反应,会形成不稳定的环氧化合物,然后在酸的催化下这种环氧化合物自身官能团会发生反应,进一步氧化形成一种具有特殊香味的杂氧双环化合物。③在过氧酸氧化后,再进行碱性还原可得到一种C₁₁的醇,继续氧化反应可形成含羟基的C₁₀不饱和酮,这种酮在酸性条件下可环化成为四氢吡喃的羰基衍生物,进一步氧化,可得到重要的香味物质α-异丙基丁内酯^[36]。

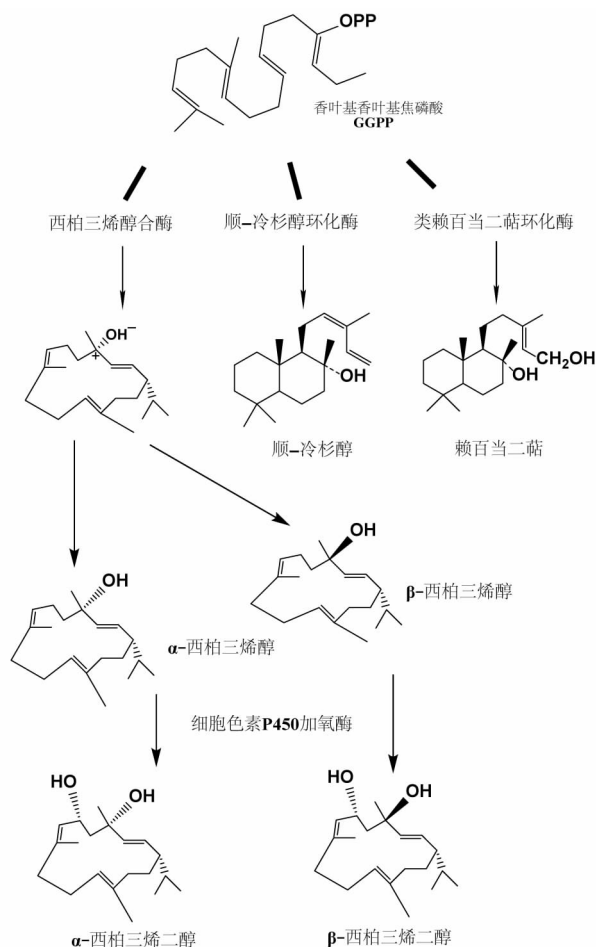


图4 烟草中西柏烷类和赖百当类合成途径

Fig. 4 Synthetic pathways of cembranes and labdane in tobacco

席元肖等^[40]选用了河南和福建的初烤烟叶探究不同颜色与成熟度烤烟香气前体物含量及降解差异,利用HPLC及GC/MS测定了西柏烷类的含量差异,结果表明,西柏烷类两种同分异构体及顺冷杉醇的含量随颜色加深有逐渐升高的趋势,随成熟度的变化没有统一的规律。

刘鹏等^[41]探究人工醇化条件下烟叶重要中性致香物质和感官质量间的关系,利用诸城等地烟叶进行研究,发现醇化过程中重要的致香物质都发生了极显著的变化,类胡萝卜素降解产物、美拉德反应产物、芳香族氨基酸降解产物和其他类中性致香物质含量分别提升了 82.67%、63.16%、276.74%和 73.77%,叶绿素降解产物下降 32.33%,类西柏烷类降解产物含量无显著变化。美拉德反应产物、类西柏烷类降解产物、芳香族氨基酸降解产物对烟叶的香气有着显著有利的影响,类胡萝卜素降解产物、叶绿素降解产物对烟叶的香气有着不利影响。

王卫峰等^[23]探究了自然醇化条件下不同烟叶的变化,以云烟 85 的 B2F、C3F 和 X2F 3 种初级烤烟为原料,利用蒸馏萃取-气相色谱质谱对潜香物质进行检测,发现自然醇化后,烟叶中的新植二烯、茄酮、苯甲醇均呈先增后减的趋势,在醇化 2~3 个月达到最大值。

刘琳琳^[42]以重庆主产烟区 40 份烤烟样品为材料,采用相关性和灰色相关度分析法探究烟叶中氯的含量与主要潜香物质降解关系,重庆烤烟氯含量较适宜,平均为 0.33%,但是变异系数较大,离散型较大。烟叶氯含量与苯丙氨酸类降解产物、新植二烯之间的相关性达到极显著水平,与类西柏烷类降解产物之间的相关性达到显著水平,合理控制氯的含量对潜香物质的降解有着重要作用。

3.2.4 糖苷类。糖苷类单糖的半缩醛羟基和另一分子中的羟基、氨基等反应,失水而产生的化合物,是糖或糖的衍生物与配基通过苷键连接形成的化合物^[43]。烟草中糖苷类潜香物质的配基大多具有香气,主要有萜烯类、二烯类、苯及苯的衍生物、羟基、酯类等。糖基一般为单糖或双糖,糖苷类化合物前体一般为对应的具有芳香性的醇类化合物^[44]。在燃烧、酶解过程中,随糖苷键的断裂释放香味成分。根据糖苷的不同,可以分为 O、C、N、S 糖苷^[45]。根据配基的不同可以分为双萜糖苷、三萜糖苷等。糖苷类释放香气的方式主要有热裂解和酶水解,在热裂解过程中,因为高温引起糖苷键断裂,从而释放出酮类、醇类、酚类等物质,不同的裂解高温对反应的影响也是不同的,可以产生不同的香气影响^[46]。

孙平等^[47]探究了烟梗在人工醇化过程中主要成分的变化,选用河南、福建、四川 3 个产地上、中、下部位的 9 种烤烟烟梗样品进行分析,发现烟梗中的总糖和还原糖含量随着人工醇化时间的延长呈不断降低的趋势,人工醇化 1~4 个月时有明显的降低,醇化 12 个月时,还原糖和总糖的含量均至少降低 20%。

刘红光等^[48]对初烤烟叶自然醇化过程中的成分进行分析测定,以红大、云烟 87、K326 初烤烟叶 B3F、B3F、C4F 进行了醇化试验,3 种不同品种的烤烟总体变化趋势相同,总糖和还原糖呈现先增高后降低的变化趋势。

胡亚杰等^[49]对云南 3 种不同烟区醇化过程中的主成分变化进行分析,发现总糖呈现逐渐下降的趋势,还原糖呈现先上升后下降的趋势,糖类整体趋势变化的不同可能是因为内在的化学活性不同。

还原糖和总糖的整体变化与它本身的内在因素有关,也可能和醇化的不同条件的影响因素有关,多方面的影响因素最终决定了糖分的总体趋势变化。

4 展望

烟草潜香物对烟草香气影响至关重要,醇化过程是对烟草品质影响最为重要的一步,醇化过程可以消除香气中的杂气,烟叶的品质也会有明显的改善。目前对烟草主要潜香物质的降解方式尚有很多不清楚,文献报道较少,例如在醇化过程中,对于赖百当类物质、西柏烷类、糖苷类物质的研究较少。近年来很多学者尝试用人工醇化来提高烟叶的香气品质,都取得了良好的进展。与自然醇化相比人工醇化不但可以缩短醇化的时间,而且可以更好地醇化烟叶品质。研究综述了烟草的潜香物质整体的变化规律,探讨了各个重要的潜香物质在醇化过程中的多重变化,查阅不同的地方烟叶的醇化变化规律,对现在的重要物质进行基础的总结,以期更好地研究烟草潜香物质的降解过程,提高烟草提取、醇化、制备的工艺流程效率。下阶段需要探究烟草在醇化过程中各种潜香物质的变化,探讨不同种类潜香物质释放香气量的差异性与相互作用,这对提高烤烟香气品质有重要的作用。

参考文献

- [1] 叶荣飞,赵瑞峰.烟草香气物质来源[J].广东农业科学,2011,38(5):51-53.
- [2] WU L J,LIU W,CAO J L,et al. Analysis of the aroma components in tobacco using combined GC-MS and AMDIS[J]. Analytical methods,2013,5(5):1259-1263.
- [3] 尧珍玉,曾池,施鸣,等.烟草中关键致香物质积累、降解及其对品质影响的研究进展[J].贵州农业科学,2017,45(5):28-31.
- [4] 刘宇,颜合洪.烟草致香物质的研究进展[J].作物研究,2006,20(5):470-474.
- [5] 黄曼艳,陈森林,陶红,等.烟叶中致香成分前处理与检测方法研究进展[J].食品安全质量检测学报,2018,9(9):2072-2079.
- [6] 张婕,葛永辉,杨慧,等. LC-MS/MS 法同时测定烟草中的 16 种游离氨基酸和 6 种 Amadori 化合物[J].烟草科技,2017,50(11):58-65.
- [7] 王红瑞,谢媛媛,梁琼麟,等.高效液相色谱-串联质谱法同时测定烟草中 5 种 Amadori 化合物[J].色谱,2013,31(12):1189-1193.
- [8] 李勇,林茜,逢涛,等.基于气相色谱-质谱的烟草根部代谢组学方法建立及应用[J].分析试验室,2017,36(8):910-914.
- [9] 郑文华,许旭.美拉德反应的研究进展[J].化学进展,2005,17(1):122-129.
- [10] 宋莹蕾,罗成,曾海龙,等. Amadori 化合物检测方法的研究进展[J].食品工业科技,2017,38(23):301-305.
- [11] 王玉华,褚建忠,徐丙升,等.烤烟自然醇化过程美拉德反应产物变化及与感官质量的关系[J].中国烟草科学,2015,36(4):85-90.
- [12] 崔韬,毛多斌,许志杰. Amadori 化合物研究进展[J].广西轻工业,2010,26(12):29-30,33.
- [13] 李亚丽,刘晓徐,郑培华,等.美拉德反应研究进展[J].食品科技,2012,37(9):82-87.
- [14] 付莉,李铁刚.简述美拉德反应[J].食品科技,2006,31(12):9-11.
- [15] 卫盼盼,张扬,周家新,等.初烤烟自然醇化过程中物理特性变化规律[J].安徽农业科学,2017,45(20):101-103.
- [16] 于建军,董高峰,马海燕,等.同一烤烟在 2 个烟区中性致香物质含量的差异性分析[J].浙江农业科学,2009,50(4):834-838.
- [17] 冉霞,牟兰,刘仁祥,等.毕节烟叶中性致香成分和潜香物质分析[J].贵州大学学报(自然科学版),2012,29(6):18-23.
- [18] RODRIGUEZ-CONCEPCION M, AVALOS J, BONET M L, et al. A global perspective on carotenoids: Metabolism, biotechnology, and benefits for nutrition and health[J]. Progress in lipid research, 2018, 70:62-93.
- [19] 文利超,吴凤燕,李伟,等.烟叶衰老过程中类胡萝卜素代谢及相关基因表达分析[J].中国烟草科学,2019,40(4):62-68.
- [20] 朱长甫,陈星,王英典.植物类胡萝卜素生物合成及其相关基因在基因工程中的应用[J].植物生理与分子生物学报,2004,30(6):609-

618.

- [21] 张长波, 孙红霞, 巩中军, 等. 植物萜类化合物的天然合成途径及其相关酶[J]. 植物生理学通讯, 2007, 43(4): 779-786.
- [22] 李爱军, 代惠娟, 娄本, 等. 烟草类胡萝卜素研究进展[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(6): 2364-2366.
- [23] 王卫峰, 章友爱, 陈子枫, 等. 自然醇化对烟叶化学组分及致香物质的影响[J]. 广西农学报, 2016, 31(2): 8-13.
- [24] 詹军, 刘冲, 贺帆, 等. 不同香型烤烟类胡萝卜素降解香气物质与评吸质量分析[J]. 西南农业学报, 2011, 24(6): 2137-2142.
- [25] 阴耕云, 徐世涛, 阮昕, 等. 复烤过程中 B4F 烤烟烟叶类胡萝卜素和西柏烷类降解产物的变化[J]. 烟草科技, 2012, 45(10): 61-64.
- [26] 王玉华, 王德权, 高政绪, 等. 烤烟自然醇化过程中类胡萝卜素降解产物含量变化及其与感官质量的关系[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(2): 340-344, 394.
- [27] 席元肖, 刘阳, 李锋, 等. 不同外观烤烟类胡萝卜素及其降解产物含量的差异分析[J]. 烟草科技, 2012, 45(3): 67-74.
- [28] 高远, 张艳玲, 张仕祥, 等. 不同香型烤烟类胡萝卜素及其降解产物含量与感官质量的关系[J]. 烟草科技, 2014, 47(2): 38-43.
- [29] 马彩娟, 何冰, 孙计平, 等. 烤烟类胡萝卜素降解产物的配合力分析[J]. 河南农业大学学报, 2017, 51(4): 465-470.
- [30] 黎光, 郑瑶青, 孙亦梁, 等. 赖百当挥发性香气成分的研究[J]. 分析测试通报, 1991, 10(2): 12-18.
- [31] 王蕾, 于瑞国, 石铝怀, 等. 不同岩蔷薇浸膏挥发性致香成分的 SED-CC-MS 分析研究[J]. 分析测试学报, 2004, 23(S1): 83-86.
- [32] 符云鹏, 王德华, 李志伟, 等. 不同产区香料烟香味成分含量比较[J]. 中国烟草学报, 2012, 18(1): 12-18.
- [33] 巩效伟, 段焰青, 黄静文, 等. 烤烟主要化学成分与烟叶等级和醇化时间的相关性研究[J]. 江西农业大学学报, 2010, 32(1): 31-34, 50.
- [34] WANG E M, WAGNER G J. Elucidation of the functions of genes central to diterpene metabolism in tobacco trichomes using posttranscriptional gene silencing[J]. Planta, 2003, 216(4): 686-691.
- [35] WANG E, WANG R, DEPARASIS J, et al. Suppression of a P450 hydroxylase gene in plant trichome glands enhances natural-product-based aphid resistance[J]. Nature biotechnology, 2001, 19(4): 371-374.
- [36] 王冬, 张小全, 杨铁钊, 等. 类西柏烷二萜代谢机理及调控研究进展[J]. 中国烟草学报, 2014, 20(3): 113-118.
- [37] ENNAJDAOUI H, VACHON G, GIACALONE C, et al. Trichome specific expression of the tobacco (*Nicotiana sylvestris*) cembratrien-ol synthase genes is controlled by both activating and repressing cis-regions[J]. Plant molecular biology, 2010, 73(6): 673-685.
- [38] EL SAYED K A, LAPHOOKHIEO S, YOUSAF M, et al. Semisynthetic and biotransformation studies of (1S, 2E, 4S, 6R, 7E, 11E)-2, 7, 11-cembratriene-4, 6-diol[J]. Journal of natural products, 2008, 71(1): 117-122.
- [39] 向章敏, 唐远驹, 郑少清, 等. 不同晾晒烟品种西柏烷二萜醇的研究[J]. 中国烟草科学, 2015, 36(5): 53-58.
- [40] 席元肖, 宋纪真, 杨军, 等. 不同颜色及成熟度烤烟香气前体物及降解产物含量的差异分析[J]. 中国烟草学报, 2011, 17(4): 23-30.
- [41] 刘鹏, 褚建忠, 信培林, 等. 人工醇化上部烟叶重要中性致香物质与感官质量关系研究[J]. 山东农业科学, 2014, 46(12): 43-46.
- [42] 刘琳琳. 重庆烟区烤烟氯含量与中性致香物质的关系[J]. 山西农业科学, 2014, 42(6): 554-556.
- [43] 吴新华, 朱瑞芝, 倪朝敏, 等. 烟草中糖苷类香味前体物质研究进展[J]. 云南化工, 2009, 36(1): 62-65.
- [44] 岳肖一, 耿召良, 梁贵林, 等. 烟草中糖苷类潜香物质的研究进展[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2015, 28(4): 627-632.
- [45] 李英波, 宛晓春, 张正竹. 烟草糖苷类香气前体研究进展[J]. 烟草科技, 2006, 39(3): 41-43.
- [46] 史尧, 陈彦宇, 常路, 等. 糖酯类潜香物质的合成与应用[J]. 应用技术学报, 2017, 17(2): 120-123.
- [47] 孙平, 汤朝起, 王军, 等. 烟梗人工醇化过程中主要化学成分的变化[J]. 烟草科技, 2014, 47(4): 50-54.
- [48] 刘红光, 胡玲, 颜克亮, 等. 初烤烟叶自然醇化过程中内在化学成分变化研究[J]. 江西农业学报, 2015, 27(8): 71-75.
- [49] 胡亚杰, 韦建玉, 宗钊辉, 等. 云南不同烟区片烟醇化过程色度及主要化学成分变化特征研究[J]. 中国农学通报, 2020, 36(22): 143-153.

(上接第 17 页)

- [45] 王文蒙. α -淀粉酶抑制剂的提取、分离及性质研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2010.
- [46] 胡晓. 雅安藏茶不影响睡眠与咖啡碱含量的关系研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(22): 131-136.
- [47] ERDEMIR U S. Contribution of tea (*Camellia sinensis* L.) to recommended daily intake of Mg, Mn, and Fe: An *in vitro* bioaccessibility assessment[J]. Journal of food composition and analysis, 2018, 69: 71-77.
- [48] 巩发永, 齐桂年, 张忠, 等. 四川边茶加工过程中主要组分和微量元素含量变化的研究[J]. 中国农村小康科技, 2006(10): 35-36, 46.
- [49] 黄亚亚. 茶叶中维生素的研究进展[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(12): 2737-2740.
- [50] 齐兰兰. 康砖茶渥堆中酶活性变化及其对品质成分影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2011.
- [51] 郑云华. 四川康砖茶渥堆过程中菌群与氟含量分析及优势微生物鉴定[D]. 雅安: 四川农业大学, 2012.
- [52] 朱燕. 四川藏茶渥堆发酵中优势细菌的分离及分子鉴定[J]. 贵州茶叶, 2019, 47(3): 12-17.
- [53] 胥伟. 四川康砖茶渥堆过程中真菌种群的鉴定[D]. 雅安: 四川农业大学, 2010.
- [54] 郑云华. 四川康砖茶渥堆过程中优势真菌的分离鉴定[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(3): 1261-1264.
- [55] 付润华, 齐桂年. 四川康砖茶的微生物研究[J]. 江苏农业科学, 2008, 36(5): 231-234.
- [56] 熊元元. 四川黑茶渥堆微生物多样性及空气微生物研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2017.
- [57] 吕晓华, 徐家玉, 孙冉, 等. 藏茶保健作用的人体试饮研究[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(4): 168-171.
- [58] 朱佳妮, 张天泉, 李诗竹, 等. 藏茶降脂减肥作用的动物实验研究[J]. 食品科技, 2015, 40(4): 151-154.
- [59] 袁野, 章斌, 陆小琴, 等. 雅安藏茶对脂质代谢紊乱大鼠减肥降脂作用研究[J]. 中药药理与临床, 2016, 32(2): 161-164.
- [60] 郭金龙, 王春梅, 杜晓. 雅安藏茶对氧自由基清除能力评价[J]. 四川农业大学学报, 2009, 27(2): 189-192.
- [61] 郭金龙. 雅安藏茶活性级分筛选和评价研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2010.
- [62] ZHENG Q R, LI W F, ZHANG H, et al. Optimizing synchronous extraction and antioxidant activity evaluation of polyphenols and polysaccharides from Ya'an Tibetan tea (*Camellia sinensis*) [J]. Food science & nutrition, 2019, 8(1): 489-499.
- [63] 艾小钰, 高玮, 黄霞, 等. 不同茶饮产品的抗氧化能力分析及感官评价[J]. 食品工业科技, 2015, 36(20): 164-167, 179.
- [64] 袁野, 章斌, 姚永秀, 等. 雅安藏茶调脂保肝及抗氧化作用研究[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2017, 38(1): 40-44.
- [65] 李解, 林莉岚, 谭晓琴, 等. 雅安藏茶对⁶⁰Co γ 辐射损伤小鼠的防护作用[J]. 营养学报, 2017, 39(4): 395-399.
- [66] 李解. 雅安藏茶及其茶褐素、茶多糖提取物对⁶⁰Co γ 辐射损伤小鼠防护作用的研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2017.
- [67] 许靖逸, 李祥龙, 李解, 等. 雅安藏茶茶褐素对⁶⁰Co γ 辐射损伤的防护作用[J]. 核技术, 2017, 40(4): 11-18.
- [68] 边金霖, 郭金龙, 李品武, 等. 雅安藏茶对胃蛋白酶的促进作用[J]. 四川农业大学学报, 2015, 33(3): 279-284.
- [69] 李解, 陈雪皎, 郭承义, 等. 雅安藏茶和低聚木糖复配物润肠通便作用[J]. 食品科学, 2015, 36(1): 220-224.