

烟熏液制备工艺及其调控挥发性风味物质形成研究进展

吴文正, 娄爱华, 刘焱, 全威*, 沈清武*

(湖南农业大学食品科学技术学院, 湖南长沙 4140128)

摘要: 熏制食品因其独特的风味与口感深受消费者的喜爱, 随着液熏技术的普及与应用, 食品级烟熏液成为了决定熏制食品风味品质的关键因素。然而目前国内食品级烟熏液存在产品单一、特征风味物质缺乏, 造成其生产的熏制食品风味品质不佳、同质化问题严重, 这极大的限制了熏制食品产业的现代化发展。深入理解烟熏液生产制备过程中挥发性风味物质的形成过程与调控途径, 对于烟熏液的品质升级具有重要意义。因此, 该文从烟熏液的制备工艺中的各个环节出发, 综述了原料类型、原料水分含量、原料粒径、氧气含量、加工温度、精炼方式等因素对烟熏液中主要挥发性风味成分形成的影响及机制, 以期为定向调控生产品质优良的食品级烟熏液产品提供理论依据与技术支持

关键词: 食品级烟熏液; 挥发性风味物质; 加工工艺; 形成机制; 影响因素

文章编号: 1673-9078(2025)09-382-399

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.9.0823

Research Progress on the Preparation of Liquid Smoke and Its Targeted Control for the Formation of Volatile Flavor Compounds

WU Wenzheng, LOU Aihua, LIU Yan, QUAN Wei*, SHEN Qingwu*

(College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: Smoked food is popular among consumers because of its unique flavor and taste. Food-grade liquid smoke has become a key ingredient in determining the flavor quality of smoked food, as liquid smoking has been widely applied in smoked-food processing. However, the lack of research on the basic theory and techniques for processing food-grade liquid smoke has led to limited diversity and flavor of liquid-smoke in the Chinese market. The flavor of smoked food produced using liquid smoke is often inferior with little differentiation, which hinders the modern development of the smoked-food industry. Deep understanding of the mechanisms and pathways regulating the formation of volatile flavor compounds during the preparation of liquid smoke is crucial for quality enhancement. This article covers each step in the preparation of liquid smoke. The factors affecting the formation of volatile flavor compounds in liquid smoke are discussed, including the type,

引文格式:

吴文正, 娄爱华, 刘焱, 等. 烟熏液制备工艺及其调控挥发性风味物质形成研究进展[J]. 现代食品科技, 2025, 41(9): 382-399.

WU Wenzheng, LOU Aihua, LIU Yan, et al. Research progress on the preparation of liquid smoke and its targeted control for the formation of volatile flavor compounds [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(9): 382-399.

收稿日期: 2024-06-11; 修回日期: 2024-07-26; 接受日期: 2024-07-28

基金项目: 湖南省高新技术产业科技创新引领计划项目(2020GK2010); 湖南省重点研发计划项目(2024JK2146)

作者简介: 吴文正(2003-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工原理与技术, E-mail: ww1661038972@163.com

通讯作者: 沈清武(1973-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 肉品科学, E-mail: yaoyao3153@aliyun.com; 共同通讯作者: 全威(1994-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品安全与品质控制, E-mail: reus_quan@hunau.edu.cn

moisture content, and particle size of the raw materials, as well as the oxygen content, processing temperature, and refining method. The influencing mechanisms are also examined. The aim of this research is to provide new ideas for the targeted control and production of high-quality, food-grade, liquid-smoke products.

Key words: food-grade liquid smoke; volatile flavor compounds; processing; formation mechanisms; influencing factors

烟熏加工是一种传统的食品加工方法，它通过使用燃料不完全燃烧产生的烟气对食物进行熏制，赋予食品独特的烟熏风味、色泽与口感，深受消费者欢迎。然而，传统熏烟中含有多种有害物质，如多环芳烃，在加工过程中容易富集在食品表面，存在潜在的健康风险^[1]。为了解决这一问题，国内外普遍将烟熏液作为烟熏调味料代替传统熏烟应用于食品加工中^[2]。烟熏液是木质纤维素生产的副产品，也被称为木醋液、焦木酸等，是一种由木材或其他生物质材料在隔绝或少量氧气的条件下，经过发烟、冷凝和后续精炼过程，并适当陈化后形成的水溶性红色或深褐色液体。相比传统熏烟，烟熏液具有易于制造、使用方便、产品均匀性强、去除了烟灰和焦油、减少了多环芳烃等致癌物质的优点^[3]。因此，它现在更多地被称为烟雾调味料、烟雾香料和天然浓缩烟雾。烟熏液在加工过程中能够促进食品独特的烟熏色泽和风味的形成，同时降低有害物质的积累^[4]。在发达国家中已被广泛应用于农业、林业、医疗保健^[5]。烟熏液中富含酚类和羰基等化合物，抑制微生物迁移、黏附、代谢、蛋白质合成，具有高效的抗氧化性和广谱抑菌活性，可作为新型抗生素和防腐剂进行使用^[6,7]。也可作为土壤改良剂改善土壤，调节微生物生长，从而提高土壤肥力，促进种子萌发和作物生长^[8]。国外烟熏液产业起步较早，拥有完善的生产法规，例如欧盟早在 2003 年 11 月就颁布了 (EC) No 2065/2003 法规，针对用于食品烟熏香味料的生产，以保障产品的安全性。相比之下，由于国情和熏材来源的限制，国内烟熏液产业的发展相对较晚。目前，只有符合 GB 1886.127-2016 的山楂核烟熏液被允许自主生产，并得到了广泛应用。但与传统烟熏工艺相比，烟熏液在产品风味、种类多样性以及市场接受度等方面仍有较大的提升空间^[2]。

研究表明，熏制食品的风味与加工过程中使用的烟熏液密切相关。尽管已经有研究分析了烟熏液中风味化合物的组成情况^[9]，但烟熏液中的成分会受到生产过程中众多因素影响^[10]，包括原料、热解温度、冷凝方式等。即使是相同种类的木材原料，

在不同的热解条件下生产的烟熏液也可能存在较大差异^[11]。因此，通过基于烟熏液生产工艺来调控其主要组分的种类与含量，有望实现对烟熏液风味的定向调控与改造。尽管目前对于烟熏液的特征风味已经有了广泛的研究报道，但烟熏液生产制备中各个环节和工艺参数对于挥发性风味化合物形成的影响及其作用机制暂未开展深入研究，相关系统综述还未见报道，这严重限制了良好风味的烟熏液产品的研发与创新。因此，本文重点围绕烟熏液的制备工艺中的各个环节，探讨了原料类型、原料水分含量、原料粒径、氧气含量、加工温度、精炼方式等因素对烟熏液中主要挥发性风味成分形成的影响及机制。以期对烟熏液风味的调控提供理论基础，指导定向制备绿色健康、风味良好的食品级烟熏液，为传统熏制食品绿色化产业升级与提质增效提供解决路径。

1 烟熏液中的风味物质

迄今为止，研究者在烟熏液中已鉴定出 500 余种挥发性化合物。但不同挥发性风味物质对特征烟熏风味的贡献不同，仍尚未完全确定与烟熏特征风味相关的特定化合物^[12]。本文根据烟熏液中挥发性风味物质是否具有气味特征进行了筛选 (www.thegoodscentscompany.com)，总结了文献报道的烟熏液中以酚类、醛类、酮类、酸类、醇类、酯类、醚类、含氧杂环类化合物、含氮杂环类化合物^[13-30]为主的 262 种挥发性风味化合物。如图 1 可看出，烟熏液中挥发性风味化合物与气味及滋味的关联，右侧节点的长度代表各风味化合物的种类数量，左侧节点分别代表不同的气味与风味，节点大小越大，表示响应的连接化合物数量越多。烟熏液中绝大多数酚类物质被描述为酚、香料和烟熏味；醛类化合物则会带来绿色、香草味；酮类化合物数量最多，有助于烟熏液中花香味的形成；酯类是烟熏液中水果味的主要来源；具有风味特征的呋喃等含氧杂环类化合物、吡嗪和吡咯等含氮杂环类化合物，大多属于美拉德反应的特征产物，显著影响产品的感官属性；而酸，可能会引起酸味刺激性。总

来说，烟熏液的风味是多种化合物共同作用的结果，相互补充共同组成了整个烟熏液风味的轮廓，在烟熏液中均扮演着不可缺少的角色。

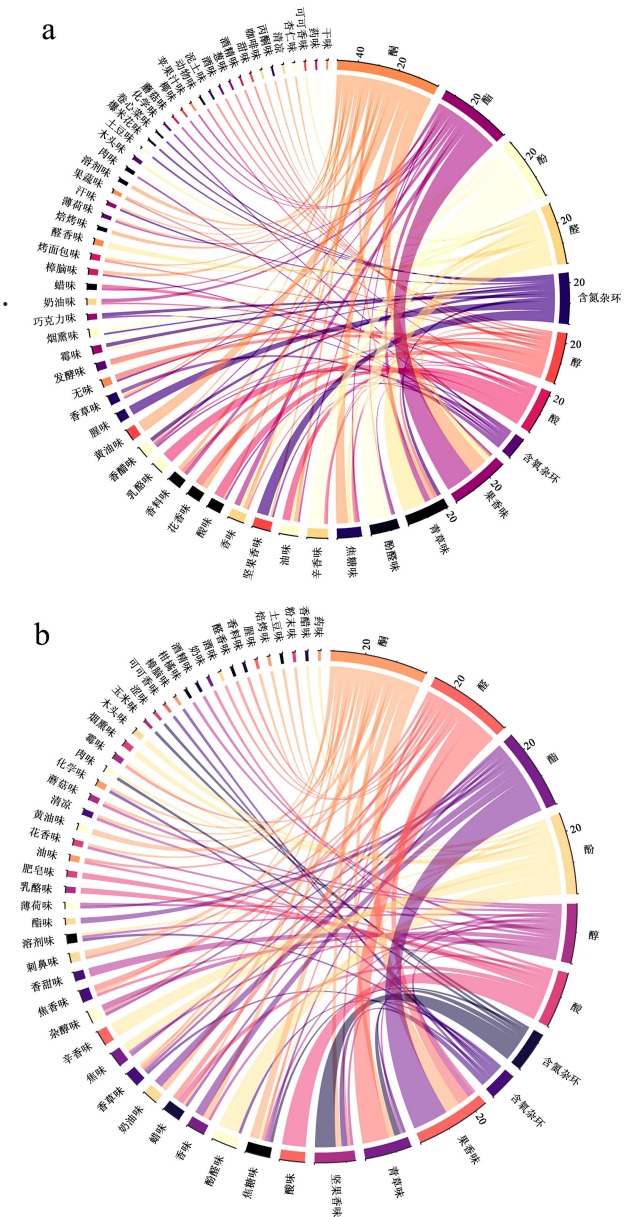


图 1 烟熏液中挥发性化合物气味 (a) 及风味 (b) 弦图
Fig.1 The odor (a) and flavor (b) chord diagram of volatile
flavor compounds in liquid smoke

1.1 酚类化合物

酚类化合物是烟熏液中最主要的风味物质，也是烟熏食品中烟熏味的主要贡献者^[5,9,31,32]，在熏制过程中易吸附到食品表面^[33,34]。研究发现烟熏液中的酚类化合物主要由木质素热降解产生，通过纤维素和半纤维素的热降解得到^[35]。此外，酚类也可能是由支链淀粉热降解产生，而支链淀粉本身属于半纤维素的一种^[36]。表 1 中总结了 37 种具有气味特

征的酚类化合物，其中苯酚、愈创木酚、2,6-二甲氧基苯酚、邻甲酚、间甲酚、对甲酚被认为是烟熏液中典型的风味化合物^[14]。近年来，有研究首次报道 3-乙基苯酚和 4-甲基丁香酚是烟熏液中的关键性风味化合物^[30]。但值得注意的是，在高浓度下，并不是所有酚类化合物都具有良好的风味，例如甲酚、愈创木酚、甲基和乙基愈创木酚被认为具有令人不悦的苦味^[8]。因此，酚类化合物的组成与含量对于烟熏液的整体风味具有重要的影响。

1.2 羰基化合物

羰基化合物是木材中纤维素和半纤维素受热分解和重排产生的一类具有焦甜香气的化合物^[37]，是烟熏液风味的重要组成部分，研究发现其可减轻酚类化合物所带来的浓烈刺激性烟熏风味^[38]，使烟熏液产生典型的烟熏香气。醛类化合物是烟熏液中羰基化合物的典型代表，例如苯甲醛等具有很强的挥发性脂肪香味，且具有较高的气味活度值^[39]，被认为是多种商业烟熏液中的主要挥发性成分。一般认为，短链醛具有强烈的刺激性气味，长链醛则赋予烟熏液清新的油脂香气和柑橘风味^[40]，能够柔和酚类带来的刺激性烟熏风味。酮类化合物则是烟熏液中另一类典型的羰基化合物，如表 1 所示，烟熏液中常见的酮类化合物有羟基丙酮、2,3-二甲基-2-环戊烯酮、甲基环戊烯醇酮、1-羟基-2-丁酮、2-环戊烯酮。其中 1-羟基-2-丁酮由半纤维素在低温热解过程中形成，呈现甜味、类似咖啡和谷物的气味，而 2-环戊烯酮则呈现难闻苦味和草味，对烟熏液风味有不良影响^[14]；因此，羰基化合物对烟熏液的风味具有较大的影响，应更全面了解其对烟熏液风味的重要性。

1.3 杂环类化合物

杂环类化合物也是木材纤维素和半纤维素经热降解和重排形成的一类重要芳香活性化合物，分为含氧杂环类化合物和含氮杂环类化合物。烟熏液中具有风味特征的含氧杂环类化合物包括呋喃和呋喃衍生物，含氮杂环类化合物包括吡嗪、吡咯、吡啶和噻唑等^[41]，这些化合物通常被认为与烟熏液呈现烘烤、坚果或焦糖风味有关。例如麦芽酚，也称 3-羟基-2-甲基-γ-吡喃酮，具有熟糖味、甜味，是烟熏液中主要的含氧杂环化合物，与烟熏液的整体气味和香气密切相关^[42]。但由于烟熏液中含氮杂环类化合物的含量较低，现有研究对于此类化合物的关注较少。

表 1 烟熏液中挥发性风味物质总结
Table 1 Summary of volatile flavor compounds in liquid smoke

	化合物	CAS 号 a	气味 b	风味 b	阈值 c/(mg/kg)	参考文献
酚类	2-异丙基苯酚	88-69-7	酚醛味	溶剂味	1	[13]
	愈创木酚	90-05-1	酚醛味	木头味	0.001 6	[13,14-30]
	邻甲酚	95-48-7	酚醛味		1.4	[13,14,19-23,25-30]
	2,5-二甲基苯酚	95-87-4	酚醛味	霉味	0.4	[22,23,27-30]
	对甲酚	106-44-5	酚醛味	酚醛味	0.01	[19,20,22,25-27,29,30]
	间甲酚	108-39-4	酚醛味		0.031	[13,14,16,17,19-24,26-30]
	苯酚	108-95-2	酚醛味		5	[13,14,19-26,28,29]
	2,3-二甲基苯酚	526-75-0	酚醛味	酚醛味	0.5	[13,14-17,20,26,27]
	2,4,6-三甲基苯酚	527-60-6	酚醛味	酚醛味	0.5	[13,27-29]
	4-甲氧基苯酚	150-76-5	酚醛味		—	[20]
	2,6-二甲氧基-4-甲基苯酚	6638/5/7	酚醛味	酚醛味	—	[13,23-30]
	4-丙基-2,6-二甲氧基苯酚	6766-82-1	酚醛味		—	[23,25,27-29]
	4-甲基愈创木酚	93-51-6	辛香味	辛香味	—	[13,14,15,18-30]
	丁香酚	97-53-0	辛香味	辛香味	0.002 5	[13,14-17,20-23,26-29]
	异丁香酚	97-54-1	辛香味	辛香味	—	[14,21]
	二氢丁香酚	2785-87-7	辛香味	辛香味	—	[13,14-16,20,22,25-29]
	4-乙基愈创木酚	2785-89-9	辛香味	木头味	0.089 25	[13,14-30]
	(Z)-2-甲氧基-4-(1-丙烯基苯酚)	5912-86-7	辛香味		—	[13,23,25,27-29]
	(E)-2-甲氧基-4-(1-丙烯基苯酚)	5932-68-3	辛香味		0.006	[27-29,29]
	4-乙烯基愈创木酚	7786-61-0	辛香味	辛香味	0.012 02	[13,15-17,22,24,26-29]
	紫丁香酚	91-10-1	烟熏味	药味	1.85	[13,14-17,19-30]
	2,4-二甲基苯酚	105-67-9	烟熏味	焦味	0.4	[13,14,21-23,26-29,30]
	4-乙基苯酚	123-07-9	烟熏味	烟熏味	0.021	[13,26,27,30]
	百里香酚	89-83-8	香料味	酚醛味	1.7	[29]
	2-乙基苯酚	90-00-6		酚醛味	0.3	[13,14,19,20,23,26-30]
	3-乙基苯酚	620-17-7	霉味	酚醛味	0.001 7	[14,19,20,22,23,26,28-30]
	3,4-二甲基苯酚	95-65-8	干味	烟熏味	1.2	[13,14,16,20,26,27,30]
	2,6-二甲基苯酚	576-26-1	药味	焦味	0.4	[13,14,18,20,22,23,25-30]
	2,3,5-三甲基苯酚	697-82-5	木头味	焦味	2.3	[26,29]
	乙基麦芽酚	4940-11-8	焦糖味	焦糖味	—	[20]
	4-烯丙基-2,6-二甲氧基苯酚	6627-88-9	肉味	肉味	—	[13,14,20,23,25,28,29]
	3,5-二甲基苯酚	108-68-9		香醋味	5	[21,22,26]
	间苯二酚	108-46-3	坚果香味	香草味	6	[20]
醛类	正己醛	66-25-1	青草味	青草味	0.23	[13,18,20]
	2-乙基丁醛	97-96-1	青草味	青草味	0.041	[23,27-29]
	庚醛	111-71-7	青草味	青草味	0.002 8	[13,18]
	辛醛	124-13-0	青草味		0.000 587	[13,18]
	壬醛	124-19-6	青草味	青草味	0.001 1	[13,14,18]
	(E,E)-2,4-己二烯醛	142-83-6	青草味	青草味	n.m. ^d	[13,20,26]
	顺-2-甲基-2-丁醛	497-03-0	青草味		0.458 9	[20,22]
	丁醛	1115-11-3	青草味	果香味	0.5	[14,20]
	(E)-2-戊烯醛	1576-87-0	青草味	青草味	0.98	[18,21]
	(E)-2-己烯醛	6728-26-3	青草味	青草味	0.398 1	[18,26]
	(E)-2-庚烯醛	18829-55-5	青草味	青草味	0.04	[18]
	(E,E)-2,4-己二烯醛	30361-28-5	青草味	青草味	0.01	[26]
	异丁醛	78-84-2	醛香味	醛香味	0.001 5	[22]

续表 1						
	化合物	CAS 号 a	气味 b	风味 b	阈值 c/(mg/kg)	参考文献
醛类	癸醛	112-31-2	醛香味	蜡味	0.003	[13]
	异戊醛	590-86-3	醛香味	果香味	0.001 1	[18,23,27-29]
	苯甲醛	100-52-7	果香味	果香味	0.750 89	[13,14,18,21-23,28]
	3-甲基苯甲醛	620-23-5	果香味	果香味	—	[13]
	2-十一烯醛	2463-77-6	果香味	蜡味	—	[14,20]
	乙醛	75-07-0	香味	刺鼻味	0.025 1	[22,23,29]
	丙醛	123-38-6	香味	霉味	0.015 1	[26]
	丙酮醛	78-98-8	焦糖味	焦糖味	—	[16,22]
	5-甲基呋喃醛	620-02-0	焦糖味	焦香味	1.11	[13,14-23,26-29]
	5-羟甲基糠醛	67-47-0	油味	香料味	—	[14,20,27,29]
	反-2-辛烯醛	2548-87-0	油味	油味	0.003	[18]
	糠醛	98-01-1	烤面包味	焦香味	9.562	[13,14-24,26-30]
	2- 甲基丁醛	96-17-3	可可香味	杂醇味	0.001	[18,23,27,28]
	戊醛	110-62-3	发酵味	酒味	0.85	[18,26-29]
	香草醛	121-33-5	香草味	香草味	0.21	[14,20,23,24,26-29]
	丁香醛	134-96-3	木头味	坚果香味	1.9	[14,20,23,24,26-29]
	2- 吡咯甲醛	1003-29-8	霉味		65	[14,19,20]
	正己醛	66-25-1	青草味	青草味	0.23	[13,18,20]
	2- 乙基丁醛	97-96-1	青草味	青草味	0.041	[23,27-29]
	庚醛	111-71-7	青草味	青草味	0.002 8	[13,18]
	辛醛	124-13-0	青草味		0.000 587	[13,18]
	壬醛	124-19-6	青草味	青草味	0.001 1	[13,14,18]
	(E,E)-2,4- 己二烯醛	142-83-6	青草味	青草味	n.m. ^d	[13,20,26]
	顺-2- 甲基-2- 丁醛	497-03-0	青草味		0.458 9	[20,22]
	丁醛	1115-11-3	青草味	果香味	0.5	[14,20]
	(E)-2- 戊烯醛	1576-87-0	青草味	青草味	0.98	[18,21]
	(E)-2- 己烯醛	6728-26-3	青草味	青草味	0.398 1	[18,26]
	(E)-2- 庚烯醛	18829-55-5	青草味	青草味	0.04	[18]
	(E,E)-2,4- 己二烯醛	30361-28-5	青草味	青草味	0.01	[26]
	异丁醛	78-84-2	醛香味	醛香味	0.001 5	[22]
	癸醛	112-31-2	醛香味	蜡味	0.003	[13]
	异戊醛	590-86-3	醛香味	果香味	0.001 1	[18,23,27-29]
	苯甲醛	100-52-7	果香味	果香味	0.750 89	[13,14,18,21-23,28]
	3-甲基苯甲醛	620-23-5	果香味	果香味	—	[13]
	2-十一烯醛	2463-77-6	果香味	蜡味	—	[14,20]
	乙醛	75-07-0	香味	刺鼻味	0.025 1	[22,23,29]
	丙醛	123-38-6	香味	霉味	0.015 1	[26]
	丙酮醛	78-98-8	焦糖味	焦糖味	—	[16,22]
	5- 甲基呋喃醛	620-02-0	焦糖味	焦香味	1.11	[13,14-23,26-29]
	5-羟甲基糠醛	67-47-0	油味	香料味	—	[14,20,27,29]
	反-2-辛烯醛	2548-87-0	油味	油味	0.003	[18]
	糠醛	98-01-1	烤面包味	焦香味	9.562	[13,14-24,26-30]
	2-甲基丁醛	96-17-3	可可香味	杂醇味	0.001	[18,23,27,28]
	戊醛	110-62-3	发酵味	酒味	0.85	[18,26-29]
	香草醛	121-33-5	香草味	香草味	0.21	[14,20,23,24,26-29]
	丁香醛	134-96-3	木头味	坚果香味	1.9	[14,20,23,24,26-29]
	2-吡咯甲醛	1003-29-8	霉味		65	[14,19,20]

续表 1						
	化合物	CAS 号 a	气味 b	风味 b	阈值 c/(mg/kg)	参考文献
酸类	丁酸	107-92-6	乳酪味	酸味	2.4	[14,19,20,22,23,26-30]
	戊酸	109-52-4	乳酪味	酸味	17	[13,14,20,26,29]
	庚酸	111-14-8	乳酪味	蜡味	0.64	[14,26,27]
	异戊酸	503-74-2	乳酪味	乳酪味	0.015 9	[14,19,20]
	4-戊烯酸	591-80-0	乳酪味	奶味	—	[20]
	4-甲基戊酸	646-07-1	乳酪味		0.81	[14,19,25]
	甲酸	64-18-6	酸味	酸味	1 240	[14,20,22]
	乙酸	64-19-7	酸味	酸味	99	[13,14,15,19-22,25-28]
	丙酸	1979/9/4	酸味	酸味	2.19	[13,19,20,23,26-28]
	异丁酸	79-31-2	酸味	酸味	6.550 5	[13,20,22,26]
	2-甲基丁酸	116-53-0	酸味	果香味	5.8	[14,19]
	辛酸	124-07-2	油味	肥皂味	3	[14,26]
	己酸	142-62-1	油味	乳酪味	0.89	[13,14,26,29]
	月桂酸	143-07-7	油味		—	[13]
	正癸酸	334-48-5	油味	肥皂味	10	[14,26]
	棕榈酸	1957/10/3	蜡味	蜡味	—	[14,20]
	壬酸	112-05-0	蜡味	油味	9	[14,27]
	3-甲基戊酸	105-43-1	动物味	酸味	0.28	[14]
	乙酰丙酸	123-76-2	焦糖味	酸味	—	[14,20,22]
	惕格酸	80-59-1	辛香味	焦香味	—	[14,20,27]
	苯甲酸	65-85-0	香醋味		—	[14,20]
	巴豆酸	107-93-7	奶油味		—	[14,27]
酯类	丙酸乙酯	105-37-3	果香味	果香味	0.01	[18,21]
	丁酸乙酯	105-54-4	果香味	果香味	0.000 9	[23,27-29]
	丁二酸二甲酯	106-65-0	果香味	果香味	—	[20]
	己酸甲酯	106-70-7	果香味	果香味	0.07	[29]
	癸酸甲酯	106-73-0	果香味	果香味	0.004	[29]
	甲酸甲酯	107-31-3	果香味	果香味	190	[21,22]
	乙酸丙酯	109-60-4	果香味	酯味	2	[21,24,26]
	正己酸乙酯	123-66-0	果香味	果香味	0.005	[18]
	戊酸乙酯	539-82-2	果香味	果香味	0.005 8	[14,29]
	丙酸甲酯	554-12-1	果香味	果香味	4.6	[21,27,29]
	异戊酸甲酯	55 6-24-1	果香味	果香味	—	[14]
	乙酸糠酯	623-17-6	果香味	酯味	—	[21,22]
	丁酸甲酯	623-42-7	果香味	杂醇味	0.059	[18,21,22]
	戊酸甲酯	624-24-8	果香味	果香味	0.02	[13,14,20,22]
	2-甲基丁酸甲酯	868-57-5	果香味	果香味	0.000 25	[14,22]
	乙二醇二乙酸酯	111-55-7	青草味		—	[20,27]
	巴豆酸甲酯	623-43-8	青草味		—	[20,22]
	4-戊烯酸甲酯	818-57-5	青草味		—	[22]
	乙酸甲酯	79-20-9	香味	香味	1.5	[21,22,26]
	乙酸丁酯	123-86-4	香味	香味	0.058	[14,23,28,29]
	乙酸乙酯	141-78-6	香味	香味	0.005	[18,21,29]
	苯酸甲酯	93-58-3	香料味		0.073	[14,27]
	γ-戊内酯	108-29-2	香料味	香草味	—	[14,19,29]
	γ-丁内酯	96-48-0	奶油味	奶油味	20	[14,19,26,27]

续表 1						
	化合物	CAS 号 a	气味 b	风味 b	阈值 c/(mg/kg)	参考文献
酯类	亚麻酸甲酯	301-00-8	奶油味		—	[14]
	当归内酯	591-12-8	椰味	奶油味	—	[14,19,27]
	香草酸乙酯	617-05-0	酚醛味	奶油味	—	[28]
	磷酸三乙酯	78-40-0	苹果汁味		—	[14]
	(Z)-油酸甲酯	112-62-9	油味		—	[14]
	冬青油	119-36-8	薄荷味	薄荷味	0.04	[22]
	2-糠酸甲酯	611-13-2	蘑菇味	焦糖味	—	[14,20-22,25-28]
	2-糠酸乙酯	614-99-3	香醋味	焦味	—	[26,29]
	乙酰丙酸甲酯	624-45-3	焦糖味		—	[19,20,22,27]
	棕榈酸乙酯	628-97-7	蜡味	蜡味	2	[21]
	香草酸甲酯	3943-74-6	香草味		0.79	[14,23,28,29]
酮类	2-戊酮	107-87-9	果香味	果香味	1.38	[18,21-23,27,28]
	2-十一酮	112-12-9	果香味	蜡味	0.005 5	[14]
	3-己酮	589-38-8	果香味	果香味	0.041	[23,26-29]
	甲基丁基甲酮	591-78-6	果香味		0.56	[14,18,20,23,26,28,29]
	丙酮基乙酸	592-20-1	果香味		—	[13,14,15,17,19, 0,22-24,28-30]
	3-戊烯-2-酮	625-33-2	果香味	腥味	1.2	[13,14,20,22,26]
	3-甲基-2-环戊烯-1-酮	2758-18-1	果香味		—	[13,14,19,20,22,23,25,28,29]
	1-(2-呋喃基)-1-丙酮	3194-15-8	果香味		—	[13,27]
	3-乙酰氧基-2-丁酮	4906-24-5	果香味	果香味	—	[13,14,19]
	双乙酰	431-03-8	黄油味	黄油味	0.000 059	[13,21,22,26,27,30]
	2(5H)-呋喃酮	497-23-4	黄油味		—	[13,14,19,20,22-24,27-29]
	3-羟基-2-丁酮	513-86-0	黄油味	奶油味	0.014	[14,18-20,26]
	2,3-戊二酮	600-14-6	黄油味	焙烤味	0.029	[13,14,19-22,27,30]
	乙酰基丁酰	3848-24-6	黄油味	奶油味	—	[13,14,20,22]
	3,4-己二酮	4437-51-8	黄油味	黄油味	—	[14,19,22]
	2-羟基-3-甲基环戊烯醇酮	80-71-7	焦糖味	焦糖味	0.3	[13,21,25,27,28]
	4,6-二甲基-2H-吡喃-2-酮	675-09-2	焦糖味		—	[13]
	枫内酯	765-70-8	焦糖味	焦糖味	0.3	[20,22-24,26,29]
	2-羟基-2-环戊烯-1-酮	10493-98-8	焦糖味		—	[19,20,24]
	3,5-二甲基环戊烯醇酮	13494-07-0	焦糖味	焦糖味	1	[13,29]
	乙基环戊烯醇酮	21835-01-8	焦糖味		—	[14,19,21,24,25,28]
	苯丙酮	93-55-0	花香味	果香味	—	[13]
	苯乙酮	98-86-2	花香味	粉末味	0.065	[13,14,21,23,26-28]
	香叶基丙酮	689-67-8	花香味	花香味	—	[13]
	2-丁酮	78-93-3	香味	化学味	35.400 2	[13,18,22,26]
	3-戊酮	96-22-0	香味		0.04	[18]
	3-辛酮	106-68-3	香料味	蘑菇味	0.021 4	[18]
	邻羟基苯乙酮	118-93-4	香料味		—	[13]
	3-甲基-2-丁酮	563-80-4	樟脑味		0.81	[13,23,26,28,29]
	3-甲基环己酮	591-24-2	樟脑味		0.46	[27]
	5-甲基-5-己烯-2-酮	3240/9/3	油味	香味	—	[22]
	橙花醇丙酮	3879-26-3	油味		—	[13]
	丙酮	67-64-1	溶剂味	刺鼻味	0.832	[18,21,22,26,27]
	2-环己烯酮	930-68-7	溶剂味		n.m.d	[12,13,17-21,25,27,28]
	甲基异丁基酮	108-10-1	青草味	青草味	0.24	[23,28,29]

续表 1						
	化合物	CAS 号 a	气味 b	风味 b	阈值 c/(mg/kg)	参考文献
酮类	1-(5-甲基-2-呋喃)-1-丙酮	10599-69-6	青草味		—	[13]
	2-甲基四氢呋喃-3-酮	3188-00-9	烤面包味	坚果香味	—	[14,19,20]
	3-甲基-2-环己烯-1-酮	1193-18-6	坚果香味	坚果香味	—	[14,20]
	3-甲基-2(5H)-呋喃酮	22122-36-7	焙烤味		—	[13,14,19,20,23,24,27-30]
	1-(2-呋喃)-1-丁酮	4208-57-5	香醋味	果香味	—	[13]
	苯基丙酮	103-79-7	杏仁味		—	[14,23]
	环己酮	108-94-1		清凉	0.28	[13,14,18-20,26-29]
	2-庚酮	110-43-0		青草味	0.14	[13,18,26,27,29]
	丙酮醇	116-09-6		刺鼻味	10	[13,14,19,20,22,26,30]
	环戊酮	120-92-3	清凉		47	[13,14-16,19-23,26-29]
	异丙烯基丙酮	141-79-7	果蔬味	土豆味	—	[22]
	香草乙酮	498-02-2	香草味	香草味	0.78	[14,20,23,27-30]
	3-甲基-戊烯-2-酮	565-62-8	汗味		—	[20]
	乙基异丙基甲酮	565-69-5	薄荷味		0.04	[20,27-29]
	二异丙基甲酮	565-80-0	丙酮味		0.08	[20,22]
	1-羟基-2-丁酮	5077-67-8	咖啡味	焦香味	—	[13,14,20,21,25]
	4-己烯-3-酮	2497-21-4	酸味	香味	—	[22]
醇类	苯乙醇	1960/12/8	花香味	花香味	0.564 23	[14]
	芳樟醇	78-70-6	花香味	柑橘味	0.000 22	[28]
	苯甲醇	100-51-6	花香味	果香味	2.546 21	[14,27,28]
	对羟基苯乙醇	501-94-0	花香味		—	[20]
	甘油	56-81-5	无味	香甜味	20 000	[14]
	丙二醇	57-55-6	无味	香甜味	340	[20]
	二甘醇	111-46-6	无味	香甜味	240	[14]
	正丁醇	71-36-3	发酵味	果香味	0.459 2	[14,18-20,26]
	正戊醇	71-41-0	发酵味	杂醇味	—	[18,19,25]
	异戊醇	123-51-3	发酵味	杂醇味	0.004	[18-20,23,27,28]
	正己醇	111-27-3	香料味	青草味	0.005 6	[18,20]
	桉叶油醇	470-82-6	香料味	薄荷味	0.001 1	22
	丙醇	71-23-8	酒精味	酒精味	8.505 6	[14,18-20,26]
	己醇	626-93-7	酒味		1.508 2	[29]
	乙醇	64-17-5	甜味		950	[14,29]
	异丁醇	78-83-1	香味	香味	6.505 2	[19]
	3-甲基-3-丁烯-1-醇	763-32-6	果香味		0.547 125	[23,28]
	四氢糠醇	97-99-4	果蔬味	坚果香味	—	[25,26]
	糠醇	98-00-0	烤面包味	焦味	4.500 5	[14,16,17,19-24,26-28]
	烯丙醇	107-18-6	葱味		—	[14,19,26]
	庚醇	111-70-6	青草味	溶剂味	0.005 4	[29]
	麦芽醇	118-71-8	焦糖味	焦糖味	1.24	[14,18-20,23,25,27-30]
	4-萜烯醇	562-74-3	辛香味	清凉	1.2	[23]
	1-辛烯-3-醇	3391-86-4	泥土味	蘑菇味	0.001 5	[18]
	仲戊醇	6032-29-7	青草味		1	[26,27]

续表 1

	化合物	CAS 号 a	气味 b	风味 b	阈值 c/(mg/kg)	参考文献
醚类	邻苯二甲醚	91-16-7	香草味		—	[22,26,27,29]
	茴香醚	100-66-3	酚醛味	芳香味	0.21	[22]
	间甲基苯甲醚	100-84-5	水仙味	醋栗味	0.6	[22]
	对苯二甲醚	150-78-7	青草味	青草味	—	[22,27-29]
	二甲基二硫醚	624-92-0	硫味	硫味	0.001 1	[20,29]
含氧杂环类化合物	苯酐	87-41-2	香草味	香草味	—	[20]
	香豆素	91-64-5	香草味		0.025	[20]
	2-乙酰基呋喃	1192-62-7		坚果香味		[12,13,18-22,24-29]
	5-甲基-2-乙酰基呋喃	1193-79-9	坚果香味	坚果香味	—	[14,19,21]
	2-甲基呋喃	534-22-5	巧克力味	可可香味	0.2	[26]
	2,5-二甲基呋喃	625-86-5	肉味	化学味	—	[22]
	2-乙基呋喃	3208-16-0	化学味	溶剂味	—	[23,26,27]
	乙酐	108-24-7	酸味		—	[23,27,28]
	樟脑	76-22-2	樟脑味	樟脑味	4.6	[23,28]
	2-正戊基呋喃	3777-69-3	果香味	青草味	0.005 8	[18]
	2-甲基苯并呋喃	4265-25-2	酚醛味	酚醛味	—	[22]
含氮杂环类化合物	2,6-二甲基吡啶	108-48-5	坚果香味	坚果香味	—	[19]
	2-甲基吡嗪	109-08-0	坚果香味	坚果香味	30	[14,19,21,26]
	吡咯	109-97-7	坚果香味		20	[19]
	吡嗪	290-37-9	坚果香味		300	[14,19,20,26]
	2,3-二甲基吡嗪	5910-89-4	坚果香味	坚果香味	0.8	[19]
	2-乙基吡嗪	13925-00-3	坚果香味	坚果香味	4	[14,19,20]
	吡啶	110-86-1	腥味		2	[14,19-21]
	三乙胺	121-44-8	腥味		2.21	[26]
	噻唑	288-47-1	腥味		0.038	[19]
	2-乙基吡啶	100-71-0	青草味		—	[14, 19, 21]
	2-丙基吡啶	622-39-9	青草味		—	[19]
	2,6-二甲基吡嗪	108-50-9	巧克力味	肉味	0.718	[19]
	2,5-二甲基吡嗪	123-32-0	巧克力味		1.75	[19]
	2-乙酰基吡咯	1072-83-9	霉味	坚果香味	58.585 25	[14,19,26]
	2,3,5-三甲基吡嗪	14667-55-1	霉味	坚果香味	0.350 12	[19]
	异喹啉	119-65-3	香醋味		—	[20]
	2,4-二甲基吡啶	108-47-4	烟熏味	青草味	—	[21]
	3-甲基吡啶	108-99-6		青草味	—	[19]
	2-甲基吡啶	109-06-8	汗味	涩味	—	[14,19-21]
	乙酰胺	60-35-5	无味		140	[20]
	3-乙基吡啶	536-78-7	卷心菜味	焦糖味	—	[14,19]
	2-乙酰基吡啶	1122-62-9	爆米花味	玉米味	0.019	[19]
	2-乙基-6-甲基吡嗪	13925-03-6	土豆味	坚果香味	0.04	[14,19]

注：a. CAS：化学物质的唯一识别号（Chemical Abstracts Service Registry Number），是由美国化学文摘社（Chemical Abstracts Service, CAS）为每一种已知的化学物质分配的唯一数字标识符。b. 风味和气味特征描述来自 www.thegoodscentscompany.com 和相应参考文献。c. 风味物质阈值来自 Odour thresholds Compilations of odour threshold values in air water and other media 和相应参考文献。

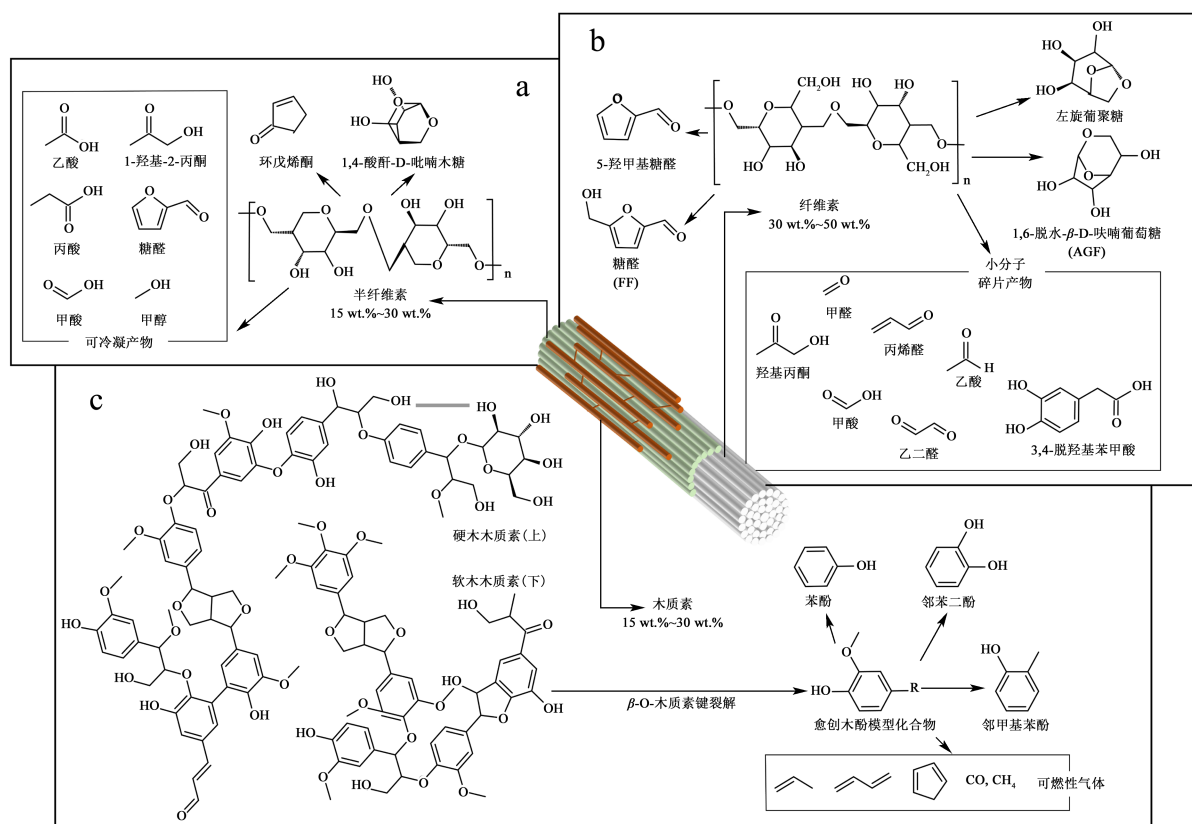


图2 半纤维素 (a)、纤维素 (b) 和木质素 (c) 的热解产物

Fig.2 The pyrolysis products of hemicellulose (a), cellulose (b) and lignin (c)

1.4 酸类、酯类和醇类化合物

酸类化合物是木质纤维素和半纤维素部分热解的产物,但其风味特征差且单一,例如乙酸和丙酸是烟熏液中相对含量较高的酸类成分,其主要赋予烟熏液刺激性的尖酸气味,对烟熏液的风味造成不良影响。因此,研究普遍关注酸类化合物对烟熏液抑菌和保藏特性的影响^[5]。但值得注意的是,酸类可以为酯类化合物提供反应底物^[43],对风味产生潜在影响。醇类化合物通常被认为是烟熏液中重要的风味调和物,一般而言短链醇类化合物呈现水果味和酒味,长链醇类化合物则呈现芳香和脂肪香味,二者对烟熏液的整体气味具有明显的协同效果^[14]。此外,醇类化合物还可作为酯类物质的挥发性载体和合成底物,进一步影响烟熏液的风味形成。由酸和醇类化合物通过酯化反应产生的酯类化合物,以及由热降解纤维素和半纤维素产生的内酯化合物如丁内酯和2-丁烯内酯等,则主要赋予烟熏液果香、甜香等特征风味^[37]。

2 烟熏液中挥发性风味物质的主要形成途径

木材主要由纤维素(30%~50%)、半纤维素(15%~30%)和木质素(15%~30%)组成,其它还含有少量的树脂、树油等^[44]。已有研究表明,纤维素、半纤维素及木质素的热解是烟熏液挥发性成分及关键性风味物质形成的主要途径,热解产物如图2所示。一般来说,缓慢热解生产烟熏液分为三个阶段:第一阶段(从室温到200℃),水和一些挥发性成分从木材原料中被去除,水的蒸发导致键的裂解和氢过氧化物、-COOH和-CO基的形成。第二阶段(200~500℃)涉及挥发性成分快速脱除和分解。最后阶段(500℃以上)涉及具有较强化学键的有机物的降解^[45]。

在热解过程中,纤维素首先解聚成低聚糖,与此同时糖苷键被裂解,产生D-吡喃葡萄糖。此外,它经过分子内重排,形成左旋葡萄糖。左旋葡萄糖可以通过各种途径形成炭、生物油和气体,如脱水、

脱羧、芳香化和分子内缩合^[45]。少部分呋喃糖衍生物 1,6-脱水- β -D-呋喃葡萄糖随左旋葡聚糖产生。同时,通过脱水反应还会产生各种呋喃和吡喃化合物,主要包括糠醛和 5-羟甲基糠醛等^[46]。

半纤维素热解的机制与纤维素相似,首先解聚形成低聚糖,然后裂解糖苷键并重排,产生 1,4-酸酐-D-吡喃木糖。进一步进行脱水、脱羧、芳香化和分子内缩合^[45]形成甲醇、1-羟基-2-丙酮、乙酸、甲酸、丙酸、糠醛以及少量的环戊烯酮类物质等,其中乙酸和糠醛被认为是半纤维素热解的典型产物^[47,48]。

木质素结构复杂,其热解机理目前还尚未充分解析,有研究认为其热解主要由 β -O-木质素键裂解产生的自由基,进一步捕获其他具有弱 C-H 或 O-H 键的物质的质子,两个自由基碰撞形成稳定的风味化合物^[45],如邻苯二酚类化合物、苯酚类化合物、邻羟基苯甲醛类化合物和少量稳定愈创木酚类化合物等^[49]。

3 烟熏液的典型制备工艺研究

典型烟熏液生产工艺如图 3 所示^[5,50],各种硬木(如山核桃木、枫木和橡木)在木材厂和家具厂经过加工后,产生废弃锯末作为烟源。粉碎和干燥通常是必要的处理过程,粉碎能减小原料粒径,提高原料颗粒在烟雾产生过程中的热转化效率,而干燥能减低原料水分含量,降低加热过程中因水分蒸发造成的热量损失。预处理后的原料在低氧、无氧或控制空气流通的烟雾发生器中,特定温度下受热转化发烟,同时伴随着炭和不冷凝热解气等副产物的产生。

烟雾离开发生器后立即被冷凝器冷凝,可分为管套式和喷淋式冷凝器,烟雾在冷凝器中与冷却介质间接或直接进行热交换。烟雾冷凝产物经过相分离后形成水相和油相。水萃是从热解液体中分离烟熏液的常用方法,它能从油相中回收更多的烟熏液,目前生产通常直接通过饮用水进行冷凝,然后经过多级过滤去除不需要的物质,如灰分、焦油和多环芳烃。

刚生产的烟熏液可作为粗烟熏液使用。但此时烟熏液风味并不理想,需要进一步提纯精炼,以调节烟熏液中风味和颜色的强度^[51],提高感官性质。不同的精炼方法会导致产品性质的差异,同时不同的原料配比或工艺也会导致烟熏液的成分差异,从而使风味侧重点有所不同^[25]。烟熏液已被美国食品

药品监督管理局(FDA)确认为天然香料,并被纳入食品添加剂目录。欧盟也通过 EU 2065/2003 号法规和 EU 1321/2013 号实施条例,对烟熏液的安全性、毒性评估以及使用限量和范围进行了规定。根据 GB 2760-2014 食品添加剂使用标准,目前我国批准使用的烟熏液包括四种:山楂核烟熏香味料 I 号、II 号,硬木烟熏香味料 SEF 7525,以及硬木烟熏香味料 SmokEz C-10。然而,该标准尚未明确这些烟熏液的使用限量。GB 1886.127-2016 则针对山楂核烟熏香味料 I 号和 II 号提出了具体的技术要求。

从挥发性成分的性质和含量来看,商业烟熏液的成分差别很大,例如有文献报道某种商业烟熏液中羰基衍生物的比例高于苯酚、愈创木酚、二甲氧基苯酚及其衍生物,这类烟熏液的成分与烟雾的成分非常相似。但也有烟熏液,基本由苯酚、愈创木酚、二甲氧基苯酚及其衍生物组成,带有随机比例的酸、酯、羰基衍生物;这类烟熏液的成分与烟雾的成分有很大的不同^[23,27,29,52-59]。烟熏液的化学组成高度依赖于热解条件和原料,工艺上的不同导致了烟熏液间风味物质的差异。

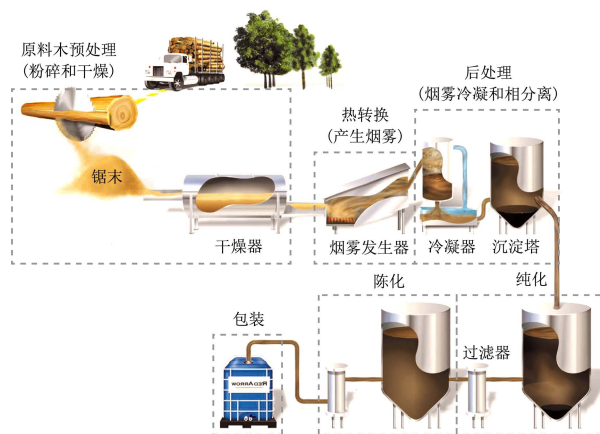


图 3 经典烟熏液生产工艺示意图

Fig.3 Flow diagram of typical liquid smoke production

4 影响烟熏液中风味物质形成的主要因素

4.1 烟熏材料

熏材是影响烟熏液挥发性成分最主要的因素之一,其中纤维素、半纤维素和木质素含量直接影响烟熏液中主要挥发性成分的含量,其余成分也会发生热解或者直接转移到烟熏液中,改变烟熏液的风味。国外对于烟熏液研究较早,产品较为成熟,有许多烟熏液制造商,如 Kerry Group PLC、Besmoke、Red Arrow International、Baumer Foods

Inc 和 Azelis SA^[10]，以枫木、牧豆树、苹果木、胡桃木、樱桃木、橡木、毛榉木等木材和某些芳香植物制备了多种成熟的商用烟熏液。而国内的研究起步较晚，山楂核烟熏液是国内当前唯一允许使用的商用烟熏液，但是国内研究者对于不同原料制得的烟熏液的风味开展了较多研究，如表 2 所示。不同木材或生物质原料主要组分的差异并不明显，但其产生的烟熏液风味差异很明显，主要与烟熏液中挥发性风味化合物的相对含量或组成比例差异有关。尽管有研究初步解析了木材中主要原料热解及其中风味物质形成的基本途径，但目前对于不同来源木

材或生物质原料热解过程中各种风味物质的形成机理尚不清楚，因此尚未能够实现以不同木材或生物质原料定向制备烟熏液。当前的研究主要发现，通过混合不同原料能够改善烟熏液的风味特征，使其更加平衡，或者生产出具有复杂感官特性组合的烟熏液。已有许多商业烟熏液通过这种方法生产，如 SmokEz C-10（枫木、橡木、胡桃木）和 SmokEz C-Enviro 23（枫木、橡木），国内也有这种类似的研究，如柿木烟熏液（橘皮、蔗糖、柿木）^[60]，蔗糖烟熏液（蔗糖、果糖、葡萄糖）^[22]，核桃壳烟熏液（核桃壳、橘皮、桦木、山楂核、葡萄树枝）等。

表 2 不同木材或生物质原料的主要组分（峰面积相对含量）
Table 2 Relative ratio of main components in different raw material

烟熏液种类	酚类化合物	羰基类化合物	其它化合物	总计	文献
松塔（550℃）	12 种（21.73%）	25 种（24.3%）	18 种（42.87%）	55 种	2010 ^[61]
核桃枝（550℃）	20 种（28.21%）	26 种（14.46%）	13 种（51.62%）	59 种	2010 ^[61]
核桃壳（550℃）	17 种（29.65%）	20 种（15.22%）	18 种（54.66%）	55 种	2010 ^[61]
木菠萝（400℃）	17 种（13.53%）	45 种（33.23%）	74 种（53.24%）	136 种	2012 ^[22]
杨木	4 种（32.92%）	6 种（19.8%）	2 种（11.22%）	12 种	2013 ^[62]
松木	4 种（33.85%）	6 种（23.62%）	2 种（4.28%）	12 种	2013 ^[62]
苦杏壳（550℃）	5 种（10.92%）	11 种（6.77%）	7 种（77.77%）	23 种	2014 ^[63]
杜仲叶林枝（550℃）	16 种（74.48%）	7 种（10.76%）	10 种（11.55%）	33 种	2014 ^[64]
桉树（330℃）	10 种（28.6%）	19 种（20.97%）	30 种（50.43%）	59 种	2015 ^[65]
苹果木（450℃）	26 种（36.15%）	10 种（30.06%）	6 种（1.81%）	42 种	2016 ^[13]
稻壳（400℃）	14 种（11.72%）	38 种（27.13%）	45 种（54.5%）	97 种	2017 ^[66]
稻壳（500℃）	10 种（14.56%）	17 种（31.2%）	8 种（52.42%）	35 种	2017 ^[67]
稻草（500℃）	10 种（11.9%）	22 种（39.6%）	11 种（23.61%）	43 种	2017 ^[67]
大豆秸秆（500℃）	7 种（6.62%）	17 种（31.27%）	7 种（43.87%）	31 种	2017 ^[67]
玉米芯（500℃）	7 种（12.62%）	14 种（35.68%）	7 种（40.06%）	28 种	2017 ^[67]
玉米秸秆（500℃）	6 种（7.99%）	10 种（27.15%）	5 种（47.87%）	21 种	2017 ^[67]
荔枝木（400℃）	12 种（63.24%）	8 种（23.24%）	7 种（9.52%）	27 种	2018 ^[16]
龙眼木（400℃）	11 种（73.41%）	7 种（12.15%）	6 种（13.65%）	24 种	2018 ^[17]
茶树枝	9 种（29.22%）	15 种（33.92%）	12 种（11.07%）	36 种	2019 ^[21]
刺梨渣	7 种（21.64%）	13 种（33.56%）	12 种（13.99%）	32 种	2019 ^[21]
松柏枝	8 种（21.93%）	12 种（45.51%）	13 种（8.33%）	33 种	2019 ^[21]
混合烟熏液（橘皮/柿木/蔗糖）	14 种（41.266%）	21 种（36.529%）	21 种（0.421%）	56 种	2021 ^[60]

4.2 熏材燃烧温度

烟熏液的生产离不开高温热解反应,研究发现温度是影响烟雾挥发性成分形成的最重要因素之一,例如研究表明烟熏液中特征性风味物质如愈创木酚、丁香酚和其他酚类化合物的产量随温度升高而增加,并在 500 °C 时达到最大值。基于温度对木材或其它生物质原料在热解过程中的影响,近年来有研究关注了温度对烟熏液制备过程中风味物质的影响。Wei 等^[68]以核桃木枝为原料制备烟熏液,发现在 100~200 °C、200~310 °C 和 310~500 °C 下制得烟熏液的组分类似,主要含有有机酸类化合物、酚类化合物、酮类化合物和呋喃衍生物等,但它们的含量和比例存在显著差异,呈现出明显不同的风味特征;郭根茂等^[69]的研究发现,桉树烟熏液中酸类化合物和酚类化合物的组成与热解温度密切相关。研究结果表明,主要的化合物变化在 350 °C 处有较为明显的分界点。在热解温度低于 350 °C 时,桉树烟熏液中酸类化合物的含量较高,而相比之下,酚类化合物的含量较低。然而,当热解温度超过 350 °C 时,酸类化合物的含量显著降低,而酚类化合物的含量明显增加。与此相对,酮类、酯类和醛类化合物的含量在温度变化下并没有表现出明显的差异;在一项对不同温度范围内热解芦竹制备烟熏液的研究中,发现在 300~600 °C 的热解温度范围内,总挥发性物质含量和温度变化趋势一致。具体而言,酸类化合物的含量随温度升高而降低,而酮类和酚类化合物的含量则呈现升高的趋势^[70];Cheng 等^[71]进行了关于热解温度(300、350、400、450、500 和 550 °C)对棉花秸秆制备烟熏液的研究。研究结果显示,随着温度的升高,酮类化合物的含量逐渐降低,而在 300 °C 时,酸类化合物的含量最高。在 350 °C 时,酸类化合物的含量显著下降。此外,550 °C 时苯酚及其衍生物的含量达到最大值;韩明等^[15]在 200、300 和 400 °C 干馏温度下制备龙眼木烟熏液,发现烟熏液中挥发性成分主要是酚类化合物、酮类化合物、醛类化合物等,其中酚类化合物相对含量最高,在 400 °C 时达到最大。

从上述研究中可以看出,低温有助于酸类物质的产生,而高温有助于酚类物质的产生,可以通过调节烟熏液的产生温度定向控制酚类化合物。

4.3 氧气

氧气不仅在部分氧化反应中释放热量以供给热解反应,还显著改变了烟熏液挥发性成分的组成和

分布,从而极大地影响了烟熏液的风味特征。理论上,氧气浓度越高,原料燃烧速率越快,热解过程中达到的最高温度也越高。然而,过多的氧气会使氧化反应优于热解反应,导致不稳定的热解反应产物在高温下发生氧化燃烧分解,从而显著降低产物产率。在无氧或氧气限制的条件下,可以限制烟熏液中某些含氧化合物的形成。只有在适当的氧气浓度下,原料才能在较高的温度下持续发生氧化分解,从而在产量和最佳风味之间取得平衡。

因此,近年来研究人员对氧气在烟熏液制备过程中对风味物质的影响进行了关注。一项研究利用商业烟雾发生器进行热解生产烟熏液,发现在最佳空气流量下,所得烟熏液在理想的烟雾特性和产量之间取得了完美的平衡。尽管酸类和酚类化合物因氧化或挥发而导致烟熏液的风味相对减弱,但仍能满足商业风味调节的需求。Schwanke 等^[72]对不同氧气处理条件(0%、10%、20%、30%、40%、50%)下热解木屑对烟雾冷凝物中风味化合物和感官特性的影响进行了研究,发现随着氧气百分比的增加,以糠醇为代表的呋喃类杂环化合物不断减少。在 10% 氧气处理组中,酚类化合物(愈创木酚)和羰基类化合物(环戊烯酮)的含量达到最大值,随后随着氧气含量的增加而减少。

此外,氧气与热解产物发生二次反应,对于形成优质烟熏液的风味至关重要。研究者通过让热解产生的烟雾与氧气进行二次反应,发现可以显著改善烟雾的风味^[9]。这些次级反应通常发生在相对较低的热解温度下,与刚产生的烟雾相比,通过这些反应产生的烟雾在成分上有着显著的差异,并且通常具有出色的感官特性^[73]。因此,不论是在热解木材阶段还是在烟雾产生后的二次反应中,氧气在塑造优质烟熏液风味方面都扮演着至关重要的角色。

4.4 水分含量

木材中的水分蒸发会阻碍热解反应的进行。在热解干燥阶段,木材中的水分蒸发需要更多的热量,这会增加能量需求,降低传热效率和燃烧速率。同时,水分的蒸发也会阻碍某些挥发性成分的形成,但却促进了烟雾的生成。相比之下,水分含量低的木材燃烧更迅速,产生更多的挥发性成分。然而,这也可能导致不完全燃烧,增加多环芳烃和焦油的形成。因此,木材中水分的存在对热解反应和燃烧过程具有复杂的影响,需要在烟熏液的制备中进行综合考虑。

在实际生产过程中,通常需要对原料进行干燥,降低原料中水分含量,提高原料热传递效率,加快热解反应进行。Maga 等^[74]对比了不同平衡水分含量下毛榉木热解后获得烟熏液的挥发性成分后发现,烟熏液中酚类化合物、酸类化合物和甲醛的含量随着木材含水量的增加而减少。进一步研究发现,水分含量较低的木材所产生的烟熏液中挥发性成分总量更高,有利于烟熏液液体产量的提升和重要风味化合物的形成,例如低水分含量山核桃木所生产的烟熏液中吡嗪类化合物的含量更高。

水分含量影响热解及产生烟雾的湿度,通过湿度可以控制燃烧速率和温度,使用含水量高的木材会获得湿度和密度较高的烟雾,而湿度较高的烟雾更容易在水中凝结。低水分含量的原料则有利于挥发性成分的产生,而利用中等水分含量的原料似乎能生产出具有良好风味的烟熏液。对于水分含量在调节烟熏液风味的相关机制还有待进一步研究,它可能通过同时影响其它多个因素对烟熏液风味产生影响。

4.5 木材粒径

粒径指的是原料颗粒的大小,是原料热解过程中需要考虑的一个关键因素。通常来说,热解过程中热量首先传递到颗粒表面,再由表面传导到颗粒内部。而粒径大小直接影响了热量在原料中的传递,较大的粒径会导致热量由木材表面到中心的传导距离增加,从而减缓了热量在原料上的传导速度。同时,气体在原料上停留的时间增加,并导致更多的二次反应的发生。因此,粒径大小在热解反应和烟熏液制备过程中的选择对于提高能量传递效率和优化反应条件至关重要。

有研究利用数学和化学手段评估各种燃烧条件(包括温度)对产生烟熏液挥发性成分的影响,提出了燃烧速率方程 $Y=A+B(T \times u)$,指出在一定范围内,燃烧速率与木材粒径成反比^[75]。例如在一项利用木菠萝枝制备烟熏液的研究中发现,木材粒径大小间接影响升温速率,随着木材粒径增加,物料受热不均,导致烟熏液中酚类物质、羰基化合物含量显著降低^[76]。总之,适当的原料粒径能够降低表面和内外温差,提升传热效率和液体产量。如果原料粒径较大,可以通过改变空气流速降低粒径对燃烧速率的影响,进而保证最终的烟熏液成分稳定。

4.6 精炼

粗制烟熏液中含有有机酸、甲醛、多环芳烃、

甲醇和焦油等有毒有害物质和易氧化、聚合、变色的不稳定化合物,需要精炼后才作为烟熏液应用在食品加工过程中^[77]。根据精炼目的及方法,一般分为初次精炼和二次精炼,不同精炼方法得到的烟熏液产品组分与风味特征差异较大。表3中总结了不同精炼方法对烟熏液中挥发性风味物质的影响

4.6.1 初次精炼

初次精炼是指通过物理方法去除烟熏液中的有毒有害物质和不稳定成分,保留基本的挥发性风味物质,尽量提升烟熏液的风味更加理想。

静置是最常用的精炼方法,具有操作简单,成本低廉等优点。韩明等^[17]在龙眼木烟熏液的加工工艺研究中,利用低温静置结合滤纸过滤净化烟熏液,将组分分离时间缩短至24 h,苯并芘未检出。研究发现,低温静置通常伴随着陈化作用的发生,即烟熏液中的部分化合物在静置或储存过程中仍具有较强的反应活性,在温度和光照等因素作用下形成棕色缩合或聚合产物(二聚体或焦油),致使烟熏液颜色变暗,甚至发生相分离。但也有研究表明,陈化能够提高感官质量,羰基类化合物等化学性质活泼的成分在陈化过程中发生转变(如酯类),使烟熏液的风味更加柔和^[78]。Ma 等^[79]同样指出,在5℃低温静置时烟熏液组分分离速率最快,完全分离所需时间低于12 h,并且低温条件下静置酚类物质可转化为酚酮,或与醛反应生成缩合产物,对烟熏液风味具有潜在影响。

吸附是另一种广泛使用的烟熏液初次精炼方法,是指利用吸附剂吸附粗制烟熏液中的悬浮物、沉淀物及焦油,从而达到精炼的目的。研究发现,烟熏液经过吸附后不仅能有效去除有毒有害物质,同时还能很好地保留其特征风味。赵冰等^[13]用XAD-4大孔树脂精炼苹果木烟熏液后,相较于其它商业烟熏液,精炼后的苹果木烟熏液在风味上仍有较高品质。王路^[22]比较了XAD-4大孔树脂、活性炭及硅藻土对木菠萝枝、龙眼木及蔗糖烟熏液的精炼效果,结果表明硅藻土和颗粒炭不仅能够较好的吸附有害物质,吸附后风味成分基本没有变化。国外研究者也同样发现,采用树脂吸附降低了烟熏液中酚类和其它主要成分的浓度,但保持了烟熏液赋予肉类和其他食品烟熏色泽的能力,获得的烟熏液的风味相比精炼前得到了改善。

过滤是在外加推动力的作用下,使液、固相混合物流过多孔介质,截留固体颗粒,使液体通过介

质的孔隙，也是常用的精炼方法之一。研究指出采用膜过滤等方式处理松木烟熏液，在减少了悬浮物、沉淀物的同时也去除了有色大分子和部分有机酸如乙酸、丁酸和丙酸等，并且还有利于对烟熏液中苯酚和愈创木酚等酚类风味物质的富集^[80]。

4.6.2 二次精炼

二次精炼是在初次精炼的基础上，进一步进行提纯、浓缩、分离等工艺，彻底去除多环芳烃、改善原有风味或在保留烟熏风味的基础上改变烟熏液的应用方式及稳定性，烟熏液经过二次精炼后被称为烟熏香味料。二次精炼方法涉及许多商业和食品

工业生产机密，其工艺对烟熏液风味的研究较少。国外研究者在一项以减压蒸馏制备精炼烟熏液的研究中发现，减压蒸馏或真空蒸馏等工艺可显著提高烟熏液中麦芽酚、愈创木酚、丁香酚和儿茶酚的含量，赋予烟熏液更加强烈风味和香味分级^[25]。

国内一项以常压蒸馏制备山楂核烟熏液的研究同样发现，在蒸馏时去除低沸点和高沸点及其它不良气味的成分，保留中等沸点的酚类化合物对烟熏液风味十分重要，它具有纯净而独特的烟味^[9]。并且研究者进一步通过分馏或有机溶剂萃取，将烟熏液酚类化合物分离后重新混合，能够实现定向调控烟熏风味或制得获得特殊混合风味的烟熏液^[81]。

表 3 不同精炼方法总结
Table 3 Summary of different refining methods

精炼方法	特点	样品	技术	主要结论	参考文献
静置	一般需要放置 1~6 个月，烟熏液中 大分子在重力作用下自然沉淀。优点操作简单，成本低廉；缺点耗时长，效率低，若要将烟熏液应用于食品加工，还需进行进一步的精炼处理	苹果木烟熏液	低温静置	组分分离时间缩短至 24 h， 苯并芘未检出	[13]
		红柳枝烟熏液	活性炭吸附	对烟熏液 pH 值没有影响，但降低苯并(a)芘含量、酚含量、羰基化合物含量和烟熏液产率	[18]
		龙眼木烟熏液	大孔树脂吸附	六种树脂对烟熏液中 3,4-苯并芘的选择性较小。烟熏液的浓度越高，各种树脂对烟熏液中 3,4-苯并芘的吸附量越大，而对于烟熏液中酚类物质的吸附量，是随着烟熏液浓度的减小先减小后增大	[22]
吸附	利用吸附剂吸附粗制烟熏液中的悬浮物、沉淀物及焦油，优点操作简单；缺点常用吸附剂一般没有选择吸附性，不仅可以吸附有害成分，也可以吸附风味物质。需要严格控制用量和操作时间	蔗糖烟熏液	硅藻土吸附	烟熏液中的 80% 的苯类物质及甲基萘基本被吸附，而对烟熏液中风味物质的种类变化基本没有影响	[22]
		松木烟熏液	膜过滤	减少了悬浮物、沉淀物的同时也去除了有色大分子和部分有机酸如乙酸、丁酸和丙酸等，并且还有利于对烟熏液中苯酚和愈创木酚等酚类风味物质的富集	[80]
		按树烟熏液	减压和真空蒸馏结合	显著提高烟熏液中麦芽酚、愈创木酚、丁香酚和儿茶酚的含量，赋予烟熏液更加强烈风味和香味分级	[25]
二次精炼	单一精炼方法处理的效果不佳，无法完全除去焦油和其它有毒有害物质，在现有研究中常将几种精炼方法结合使用，以到达最佳的精炼效果。优点可以定向分离目标组分，缺点是操作复杂，需要设定合适的分离条件	酸枣木烟熏液	静置、蒸馏和萃取相结合	呋喃类、酮类化合物含量降低，而主要风味物质如酚类和酸类化合物的含量增加，总酚含量增加近 30 倍	[49]

5 总结和展望

熏制食品的消费市场潜力巨大,熏制食品的风味品质是影响消费者购买欲的重要因素之一。随着当前液熏技术在熏制食品加工业中的普及应用,具有良好特征风味品质的食品级烟熏液,是提升熏制食品品质的关键所在。本文首先总结了烟熏液中已鉴定的挥发性成分,并重点围绕烟熏液生产制备工艺中的关键环节与工艺参数,讨论了影响烟熏液中挥发性风味物质形成的潜在因素。尽管当前对于烟熏液中特征挥发性风味成分的分离鉴定,形成机制解析等方面已经做了大量研究工作,但从食品级烟熏液的发展来看仍然存在很大的不足,一是国内食品级烟熏液的生产工艺与技术研究较少,还未形成优良稳定的烟熏液产品生产工艺。二是针对烟熏液风味的研究,仅仅关注单一或已知的有限数量的风味物质,忽略了未知或潜在的挥发性风味物质的影响。三是现有研究主要关注烟熏液中的挥发性风味物质,而忽略了非挥发性物质对风味的潜在影响。因此,未来一方面需要进一步鉴定烟熏液中特征性风味物质以及研究不同风味物质的交互作用对烟熏液风味品质的影响,另一方面还需要解析烟熏液生产工艺对风味物质形成的影响,找到影响烟熏液风味的核心因素,从而在生产工艺层面进行定向调控,是烟熏液在较短时间内实现风味品质提升的关键。这对未来开发风味丰富、特征明显、品质优良的食品级烟熏液系列产品具有重要意义。烟熏液是一种高附加值的化学产品,它能够高效利用各种林业废弃物进行生产。由于其无污染、无毒无害、易于降解的特性,烟熏液对环境友好,符合我国的绿色发展理念“绿水青山就是金山银山”,与实现碳达峰、碳中和的战略目标相一致。

参考文献

- [1] 赵亚丽,张香美,卢涵,等.传统腌腊肉制品质量安全管理研究[J].食品与机械,2023,39(1):55-60,156.
- [2] 郭园园,娄爱华,沈清武.烟熏液在食品加工中的应用现状与研究进展[J].食品工业科技,2020,41(17):339-344,351.
- [3] KNOWLES M E, GILBERT J, MCWEENY D J. Phenols in smoked cured meats. Phenolic composition of commercial liquid smoke preparations and derived bacon [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1975, 26(2): 189-196.
- [4] 周益群,周洪仁.水产品的液熏原理和方法[J].渔业现代化,2004,4:42-43.
- [5] JODY M LINGBECK, PAOLA CORDERO, CORLISS A O'BRYAN, et al. Functionality of liquid smoke as an all-natural antimicrobial in food preservation [J]. Meat Science, 2014, 97(2): 197-206.
- [6] XUE R, CUI E L, HU G Q, et al. The composition, physicochemical properties, antimicrobial and antioxidant activity of wood vinegar prepared by pyrolysis of *Eucommia ulmoides* Oliver branches under different refining methods and storage conditions [J]. Industrial Crops and Products, 2022, 178: 114586.
- [7] SURBOYO M D C, MAHDANI F Y, AYUNINGTYAS N F, et al. The cytotoxicity, anti-inflammation, anti-nociceptive and oral ulcer healing properties of coconut shell liquid smoke [J]. Journal of Herbmmed Pharmacology, 2021, 10(4): 459-467.
- [8] EL-FAWY M M, ABO-ELYOUSR K A M, SALLAM N M A, et al. Fungicidal effect of guava wood vinegar against *Colletotrichum coccodes* causing black dot disease of potatoes [J]. Horticulturae, 2023, 9(6): 710.
- [9] MAGA J A. The flavor chemistry of wood smoke [J]. Food Reviews International, 1987, 3(1-2): 139-183.
- [10] XIN X, DELL K, UDUGAMA I A, et al. Transforming biomass pyrolysis technologies to produce liquid smoke food flavouring [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 294: 125368.
- [11] BALAT M, BALAT M, KIRTAY E, et al. Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 1: Pyrolysis systems [J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(12): 3147-3157.
- [12] 高宁宁,胡萍,朱秋劲,等.烟熏液及其在肉制品中的应用研究进展[J].肉类研究,2019,33(1):66-70.
- [13] 赵冰,李素,王守伟,等.苹果木烟熏液的品质特性[J].食品科学,2016,37(8):108-114.
- [14] 宋丽,陈星星,谷凤林,等.GC-MS与电子感官结合对烟熏液风味物质的分析[J].食品科学,2020,41(16):193-201.
- [15] 韩明,郑玉玺,董蕾,等.干馏温度对龙眼木精制烟熏液挥发性成分的影响[J].食品工业,2018,39(7):223-225.
- [16] 韩明,郑玉玺,陈烽华,等.荔枝木烟熏液的精制及挥发性成分分析[J].林业科技,2018,43(1):54-56.
- [17] 韩明,郑玉玺,董蕾,等.龙眼木烟熏液的精制及其挥发性风味物质成分分析[J].中国食品添加剂,2018,2:94-97.
- [18] 阿依姑丽·吾布力.不同烟熏液的制备及其对风干鱼品质特性的影响[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2021.
- [19] 宋丽.基于西式熏煮火腿烟熏剂的研发及其微胶囊工艺研究[D].贵阳:贵州大学,2020.
- [20] 胡可.特征烟熏成分与熏煮火腿蛋白相互作用及呈味机理研究[D].贵阳:贵州大学,2020.
- [21] 高宁宁.茶树枝烟熏液的制备及应用研究[D].贵阳:贵州大学,2019.

- [22] 王路.食品烟熏液的制备和精制工艺研究及香气成分的分析[D].湛江:广东海洋大学,2012.
- [23] GUILLEN M D, MANZANOS M J. Extractable components of the aerial parts of *Salvia lavandulifolia* and composition of the liquid smoke flavoring obtained from them [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1999, 47(8): 3016-3027.
- [24] XIN X, BISSETT A, WANG J, et al. Production of liquid smoke using fluidised-bed fast pyrolysis and its application to green lipped mussel meat [J]. Food Control, 2021, 124: 107874.
- [25] PIMENTA A S, FASCIOTTI M, MONTEIRO T V, et al. Chemical profiling of liposoluble liquid smokes obtained from *Eucalyptus* wood tar: confirmation of absence of polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. Food Additives and Contaminants Part a-Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment, 2020, 37(6): 882-894.
- [26] PINO J A. Characterisation of volatile compounds in a smoke flavouring from rice husk [J]. Food Chemistry, 2014, 153: 81-86.
- [27] GUILLEN M D, IBARGOITIA M L. Influence of the moisture content on the composition of the liquid smoke produced in the pyrolysis process of *Fagus sylvatica* L. wood [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1999, 47(10): 4126-4136.
- [28] GUILLEN M D, MANZANOS M J. Smoke and liquid smoke: Study of an aqueous smoke flavouring from the aromatic plant *Thymus vulgaris* L [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1999, 79(10): 1267-1274.
- [29] GUILLEN M D, MANZANOS M J. Study of the volatile composition of an aqueous oak smoke preparation [J]. Food Chemistry, 2002, 79(3): 283-292.
- [30] VAZQUEZ T D. Formation of key aroma compounds generated in condensed wood smoke for the flavoring of foods [D]. Columbus: The Ohio State University, 2022.
- [31] 董园园.超声波辅助处理对牛肉干品质的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2022.
- [32] RUPERT SIMON, BEATRIZ DE LA CALLE, SONJA PALME, et al. Composition and analysis of liquid smoke flavouring primary products [J]. Journal of Separation Science, 2005, 28(9-10): 871-882.
- [33] 帅雨桐,黄业传,何元琪,等.分子动力学模拟加热对肌动蛋白结构及酚类物质吸附的影响[J].肉类研究,2021,35(3):8-13.
- [34] 粟桂蓉,彭钰媛,周璐璐,等.传统土家腊肉加工过程中风味物质研究[J].食品科技,2017,42(3):118-123.
- [35] 王飞,乔明武,黄现青,等.烟熏液的形成与应用[J].中国食品学报,2022,22(9):386-397.
- [36] BALTES W, SOCHTIG I. Nachweis eines Raucharomakondensatzusatzes zu Wurstwaren mit Hilfe der Glascapillar gaschromatographie [J]. Zeitschrift for Lebensmittel-Untersuchung und -Forschung, 1979, 169(1): 17-21.
- [37] KIM K, KURATA T, FUJIMAKI M. Identification of flavor constituents in carbonyl, non-carbonyl neutral and basic fractions of aqueous smoke condensates [J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1974, 38(1): 53-63.
- [38] NAIM M, ALEXANDRA C O, BRIAN H H, et al. Chemical characterization of commercial liquid smoke products [J]. Food Science & Nutrition, 2013, 1(1): 102-115.
- [39] 王琼,李聪,高磊峰,等.不同类型烟熏香精对西式培根风味的影响[J].现代食品科技,2017,33(7):220-230.
- [40] XIE J C, SUN B G, WANG S B. Aromatic constituents from Chinese traditional smoke-cured bacon of mini-pig [J]. Food Science and Technology International, 2008, 14(4): 329-340.
- [41] ZHAI X, ZHANG L, GRANVOGL M, et al. Flavor of tea (*Camellia sinensis*): A review on odorants and analytical techniques [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2022, 21(5): 3867-3909.
- [42] 刘登勇,王道,吴金城,等.肉制品烟熏风味物质研究进展[J].肉类研究,2018,32(10):53-60.
- [43] SHARIFZADEH M, SADEQZADEH M, GUO M, et al. The multi-scale challenges of biomass fast pyrolysis and bio-oil upgrading: Review of the state of art and future research directions [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2019, 71: 1-80.
- [44] MAGA J A. Smoke in Food Processing [M]. New York: CRC Press, 1988.
- [45] YU S, WANG L, LI Q, et al. Sustainable carbon materials from the pyrolysis of lignocellulosic biomass [J]. Materials Today Sustainability, 2022, 19: 100209.
- [46] 李承宇,张军,袁浩然,等.纤维素热解转化的研究进展[J].燃料化学学报,2021,49(12):1733-1751.
- [47] 梁嘉晋.纤维素和半纤维素热解机理及其产物调控途径的研究[D].广州:华南理工大学,2016.
- [48] ZHOU X, LI W, MABON R, et al. A mechanistic model of fast pyrolysis of hemicellulose [J]. Energy & Environmental Science, 2018, 11(5): 1240-1260.
- [49] 蒋谦.木醋液作为防腐剂在食品和化妆品中的应用研究[D].长春:吉林大学,2023.
- [50] Red Arrow International LLC. Red Arrow Layman's Report 2015 [EB/OL]. (2015-04-08)[2024-07-12]. <https://www.kerry.com/products/taste-ingredients/smoke.html>.
- [51] NOLLET L M L. Handbook of Meat, Poultry and Seafood Quality [M]. British: John Wiley & Sons Inc., 2012.
- [52] GUILLEN M D, SOPELANA P, PARTEARROYO M A. Study of several aspects of a general method for the determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in liquid smoke flavourings by gas chromatography-mass spectrometry [J]. Food Additives and Contaminants, 2000, 17(1): 27-44.

- [53] GUILLEN M D, SOPELANA P, PARTEARROYO M A. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in commercial liquid smoke flavorings of different compositions by gas chromatography-mass spectrometry [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48(2): 126-131.
- [54] GUILLEN M D, SOPELANA P, PARTEARROYO M A. Polycyclic aromatic hydrocarbons in liquid smoke flavorings obtained from different types of wood: Effect of storage in polyethylene flasks on their concentrations [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48(10): 5083-5087.
- [55] GUILLEN M D, MANZANOS M J. Study of the components of a solid smoke flavouring preparation [J]. Food Chemistry, 1996, 55(3): 251-257.
- [56] GUILLEN M D, MANZANOS M J. Characterization of the components of a salty smoke flavouring preparation [J]. Food Chemistry, 1997, 58(1-2): 97-102.
- [57] GUILLEN M D, IBARGOITIA M L. Volatile components of aqueous liquid smokes from *Vitis vinifera* shoots and *Fagus sylvatica* wood [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1996, 72(1): 104-110.
- [58] GUILLEN M D, IBARGOITIA M L. New components with potential antioxidant and organoleptic properties, detected for the first time in liquid smoke flavoring preparations [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46(4): 1276-1285.
- [59] GUILLEN M D, MANZANOS M J, ZABALA L. Study of a commercial liquid smoke flavoring by means of gas chromatography/mass spectrometry and fourier transform infrared spectroscopy [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1995, 43(2): 463-468.
- [60] 郭园园. 基于柿木的混合烟熏液制备及在草鱼中的应用研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2021.
- [61] 何文君. 不同木醋液生物活性的比较研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2010.
- [62] 董长青, 张智博, 廖航涛, 等. 基于Py-GC-MS的杨木和松木快速热解比较研究[J]. 林产化学与工业, 2013, 33(6): 41-47.
- [63] 易允喻. 苦杏壳木醋液的精制与应用基础研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2014.
- [64] 胡瑞瑞. 杜仲叶林枝木醋液成分分析及其生物活性研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2014.
- [65] 包宇婷. 桉树烟液液熏尼罗罗非鱼、太平洋牡蛎产品的研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2015.
- [66] 王建刚. 稻壳木醋液化学成分气相色谱质谱分析[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(31): 15-17.
- [67] 崔晓宇, 李铨军, 刘芳芳, 等. 以农业废弃物为原料的生物质热解液的理化特性[J]. 吉林农业大学学报, 2017, 39(5): 551-557.
- [68] WEI Q, MA X, DONG J. Preparation, chemical constituents and antimicrobial activity of pyroligneous acids from walnut tree branches [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2010, 87(1): 24-28.
- [69] 郭根茂, 黄青, 王青青, 等. 基于实验与文献研究热解温度和原料对木醋液组分的影响[J]. 天然产物研究与开发, 2021, 33(8): 1371-1381.
- [70] ZHENG H, SUN C, HOU X, et al. Pyrolysis of *Arundo donax* L. to produce pyrolytic vinegar and its effect on the growth of dinoflagellate *Karenia brevis* [J]. Bioresource Technology, 2018, 247: 273-281.
- [71] CHENG J, HU S C, SUN G T, et al. The effect of pyrolysis temperature on the characteristics of biochar, pyroligneous acids, and gas prepared from cotton stalk through a polygeneration process [J]. Industrial Crops and Products, 2021, 170: 113690.
- [72] SCHWANKE S K, IKINS W G, BREWER M S. Phenol compounds identified in selected liquid smokes [J]. Journal of Food Lipids, 1995, 2(4): 239-247.
- [73] TOTH L, POTTHAST K. Chemical Aspects of the Smoking of Meat and Meat Products [M]. New York: Elsevier, 1984.
- [74] MAGA J A, CHEN Z. Pyrazine composition of wood smoke as influenced by wood source and smoke generation variables [J]. Flavour and Fragrance Journal, 1985, 1(1): 37-42.
- [75] BORYS A, KLOSSOWSKA B, OBIEDZINSKI M, et al. Influence of combustion conditions on the composition of carbonylic, carboxylic, polynuclear hydrocarbons, and phenolic compounds present in wood smoke [J]. Acta Alimentaria Polonica, 1977, 3(3): 335-341.
- [76] 胡武, 王维民, 谌素华, 等. 木菠萝烟熏液制备工艺的研究[J]. 食品科技, 2014, 39(3): 246-249.
- [77] 吴巧美. 生物质热解制备液态产物木醋液的研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2015.
- [78] OASMAA A, FONTS I, PELAEZ-SAMANIEGO M R, et al. Pyrolysis oil multiphase behavior and phase stability: a review [J]. Energy & Fuels, 2016, 30(8): 6179-6200.
- [79] MA C, SONG K, YU J, et al. Pyrolysis process and antioxidant activity of pyroligneous acid from *Rosmarinus officinalis* leaves [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2013, 104: 38-47.
- [80] 许英梅, 高连连, 朴永哲, 等. 不同精制法松树木醋液中生物活性组分的富集[J]. 大连民族学院学报, 2015, 17(3): 207-210.
- [81] BAUMEISTER J, VELTL G, ZIMMER N. Aufschäumbarer metallkörper, verfahren zu seiner herstellung und seine verwendung [J]. Angewandte Chemie, 2003, 72(24): 994-1000.