

多糖的热裂解性质分析及其在卷烟中的应用

Analysis of pyrolytic properties of polysaccharides and its application in cigarette

刘欢¹ 楚桂林¹ 何力² 胡婕伦¹ 罗海涛²

LIU Huan¹ CHU Gui-lin¹ HE Li² HU Jie-lun¹ LUO Hai-tao²

(1. 南昌大学食品科学与技术国家重点实验室, 江西 南昌 330047;

2. 江西中烟工业有限责任公司, 江西 南昌 330096)

(1. Nanchang University, State Key Laboratory of Food Science and Technology, Nanchang, Jiangxi 330047, China; 2. Jiangxi China Tobacco Industry Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi 330096, China)

摘要:对目前卷烟保润增香研究中已使用的多糖种类进行了归纳,从卷烟自身多糖以及外部添加多糖两个方面详细阐述其热裂解产物种类、热裂解机制以及对卷烟保润、增香、主流烟气的影响规律,并对其未来发展方向进行了展望。

关键词:卷烟;多糖;热裂解;保润;增香

Abstract: The types of polysaccharides that have been used in the research on moisturizing and flavoring of cigarettes are summarized. The types of pyrolysis products, pyrolysis mechanism, and the law of influence on cigarette moisturizing, flavor enhancement, and mainstream smoke are described in detail from the two aspects of cigarettes' own polysaccharides and externally added polysaccharides. The direction for future development is proposed.

Keywords: cigarette; polysaccharide; pyrolysis; moisturizing; fragrant

卷烟的香味、口感、回味、醇和度等是评价卷烟品质的重要指标^[1]。近年来,为提高中国卷烟的甜香度、保湿性等感官品质,越来越多的研究开始针对性地寻找新型天然物质应用于卷烟中,希望可以起到保湿增香的效果。多糖因其分子链富含多羟基结构及在高温热裂解时产生香气物质,可以对卷烟实现较好的保润增香作用,因此将其应用于卷烟中已成为卷烟制品的发展新趋势。

研究^[2]表明,多糖是由许多单糖分子通过糖苷键发生聚合反应生成的生物大分子,其与脂肪、蛋白质合称为

3大营养类物质。多糖不仅具有热稳定性、保湿性、吸湿性、乳化性等特性^[3],还能抗氧化^[4]、抗肿瘤^[5]、抗病毒^[6]及降低血糖^[7]、促进免疫调节^[8-9]等生物活性作用。此外,多糖在高温下热解时可以产生大量的有机物^[10],如酚类、酯类等,这些物质在较高温度下会产生宜人的香味^[11],因此,将多糖喷洒在卷烟烟丝中可以显著改善卷烟在吸食时的感官舒适度。同时,在多糖分子链内部又富含大量的多羟基结构,可与外部水分子发生紧密结合,对卷烟起到很好的保润保湿作用^[12],是一类自然界中不可多得的天然保润增香剂。

文章立足国内外相关研究,对目前卷烟保润增香研究中已使用的多糖种类进行归纳,并从卷烟自身多糖以及外部添加多糖两个方面,阐述其热裂解特性及对卷烟保润、增香、主流烟气成分的影响规律,旨在为未来多糖大规模应用于卷烟工业、提高卷烟品质提供理论依据。

1 应用于卷烟的多糖种类及其热裂解产物

1.1 卷烟自身多糖

卷烟烟丝主要由烟草植物制备而来,烟草植物中富含大量的多糖类物质,因此在卷烟的抽吸过程中,这些卷烟自身含有的多糖将会被热裂解,目前研究较多的主要为烟叶多糖和改性烟叶多糖。

1.1.1 烟叶多糖 烟叶多糖是烟草自身携带的一种天然植物型的生物活性多糖,具有较强的抵抗外界氧化能力的作用^[13]。其主要组成包括阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖和果糖等各种单糖分子^[14],属于一种天然的酸性 β -吡喃糖,分子量为 6.587×10^4 。此外,烟叶多糖在水溶液中的状态为球状,并以高度分支的构象形式存在^[15]。许春平等^[16]从香料烟中分离出了烟叶多糖的两种不同组分 Fr-I

基金项目:国家自然科学基金青年项目(编号:31901648)

作者简介:刘欢,男,南昌大学教授,博士。

通信作者:罗海涛(1981—),男,江西中烟工业有限责任公司工程师,硕士。E-mail:273874991@qq.com

收稿日期:2020-06-08

和 Fr-II,并对其进行无氧环境下的热裂解测试,发现这两个组分的主要热解产物很相似,都含有醛、酯、羧酸及酚类物质等。其中,醛、酯在高温下可以产生甜果香;羧酸类物质可以调节主流烟气的 pH 值,降低卷烟在吸食过程中对喉部产生的刺激性;而酚类化合物则可以产生药香^[17]。李仙等^[18]利用羊肚菌自身含有的菌丝体可以代谢烟叶中木质素和纤维素的特性,将烟叶中无法提取利用的基质转变成多糖类物质,再对其在高温下的热裂解产物变化过程进行研究。结果显示烟叶发酵多糖在 300, 600, 900 °C 时热裂解产物完全不一样,即低温时得到的产物种类和含量很少,主要以醛酮类物质为主;高温时得到的产物则很复杂,不仅有糠醛类物质,还包括多种醛酮类和呋喃类化合物等,并且烟叶发酵多糖经高温热裂解后得到的产物还会产生沁人心脾的甜香和烟草香气味,给人一种舒服宜人的感觉。

1.1.2 改性烟叶多糖 为了使烟叶多糖具有更加出色的保润效果,艾绿叶等^[19]对烟叶多糖进行了一定程度的改性,即在多糖的内部结构中引入了大量与外界水分子结合效果更好的羧基^[20]。经对比发现,改性羧甲基烟叶多糖与普通烟叶多糖的高温热裂解产物均含有糠醛类、酮类、吡嗪类、呋喃类和吡啶类物质,其中糠醛类具有杏仁香,酮类具有奶油香、水果香,吡啶类具有香草、烟草气味,吡嗪类物质在高温下可以产生烤香和坚果香,呋喃类物质具有甜香和焦糖香等。但不同的是羧甲基化烟叶多糖在热裂解时不仅保持了呋喃类、糠醛类等致香物质的存在,还减少了苯酚、甲苯酚等致癌物质的含量。

1.2 外加多糖

随着人们对卷烟吸食品质要求的进一步提高,仅依靠烟草自身含有的多糖远不足以起到长期保润及遮掩卷烟中拙劣气味的效果。因此,通过在卷烟中添加其他类型的多糖来增强卷烟的保润性能以及吸食过程中产生的香气已成为研究的热点。目前,已有相关报道对外加多糖的热裂解特性进行了叙述,涉及到的多糖种类较多,主要包括枸杞多糖、香加皮多糖、巴戟天根茎类多糖、藻类多糖以及真菌多糖等。

1.2.1 枸杞多糖 枸杞作为一种可以直接食用的植物果实,具有丰富的营养及药用价值,其成分主要含有多糖、类胡萝卜素、类黄酮、甜菜碱等多种生物活性物质^[21],其中最主要的活性物质为枸杞多糖,它是一种水溶性的、以一O—连接的高分子类糖蛋白^[22]。研究表明,枸杞多糖的单糖组成主要有阿拉伯糖、鼠李糖、葡萄糖、木糖、甘露糖和半乳糖等天然物质^[23],具有抵抗外界氧化、人体衰老、肿瘤恶化,促进免疫调节、保护神经系统等^[24-25]多种活性作用。祖萌萌等^[17]研究发现,枸杞多糖在高温环境下的热裂解产物主要可以分为 4 大类,第 1 类是类似亚油酸、2-环戊烯酮等物质的酮、酸、醛和酯类物质;第 2 类

是包括一些吡啶、吡嗪、呋喃等化合物的杂环类;第 3 类是如苯酚、对甲酚等类的酚类化合物;第 4 类物质是产物中含有的少量有害物质,包括邻二甲苯、2,5-二羟基甲苯等在内的苯及其同系物。这些产物的主要形成机制为枸杞多糖在高温下由于获得大量的热源能量,使其在低温条件下裂解生成的小分子化合物又发生了重新的聚合反应,形成了稳定性更好的物质(如苯及其同系物)。同时,酮、醛、酸和酯类化合物在高温吸食时可产生果甜香气味;吡咯、吡啶等杂环类可以增强卷烟烟气的烤烟香及焦糖香,尤其是 5-甲基糠醛、5-羟甲基糠醛的存在对香烟的增香作用和影响效果最大。王全等^[26]对不同浓度的枸杞多糖(5×10^{-6} , 10×10^{-6} , 20×10^{-6} , 50×10^{-6} g)进行了有氧和无氧环境下的热裂解产物和致香效果分析,发现枸杞多糖在有氧条件下的裂解产物是以酸类和酚类物质为主,而在无氧条件下的裂解产物则是以醇类和烯烃类物质为主,且在有氧环境下比在无氧环境下产生了更多的氧化物质类物质,表明在模拟卷烟燃烧过程中,有必要考虑外界环境(有氧和无氧)对多糖热裂解过程的影响。同时,加香试验结果显示枸杞多糖在高温下的热裂解产物在卷烟抽吸时不仅会产生花甜香、烘烤香、奶果香和坚果香,还可以产生草木香、辛香及酒甜香等韵调,具有十分丰富的香韵。

1.2.2 香加皮多糖 香加皮是传统中药中的一种果皮,具有多种生物学功能,如祛除风湿、治疗心悸气短和腰膝酸软及增强筋骨、治疗慢性心力衰竭等作用^[27]。香加皮多糖主要由 D-甘露糖和乳糖等组成^[28],同时含有 α -型和 β -型糖苷键,是一种不含糖醛酸的中性杂多糖,相对分子量为 12.2~34.4 kDa^[29]。张翼飞等^[30]研究显示,香加皮多糖的失重过程主要经历 4 个阶段:第 1 阶段香加皮多糖的质量损失不是很大,主要是自由水的散失导致的;第 2 阶段的失重台阶是整个过程中的主要质量损失阶段,此现象的产生表明,香加皮多糖在此阶段因受到大量热量而产生分解,导致质量损失急剧下降;第 3 阶段的重量损失率呈平缓下降趋势,表明香加皮多糖的热裂解速率逐渐减慢;第 4 阶段不存在失重现象,质量不再下降,说明香加皮多糖已分解完全。根据香加皮的热裂解产物鉴定结果,可以将其热解产物分为 4 大类,第 1 类产物为类似糠醛、5-甲基糠醛的杂环类物质,其形成机制可能是高温下香加皮多糖内部含有的葡萄糖残基和半乳糖残基经分解反应产生;第 2 类产物包括如 3-戊酮、2-甲基环戊烯-1-酮、苯乙烯、苯乙酸苯乙酯等在内的酯、醛、酮、烯和酸类物质,这类物质在高温下可以产生沁人心脾的甜果香味^[31];其次是包括苯酚、对甲酚及对乙基苯酚等在内的酚类化合物,而这类化合物在高温下则可以产生宜人的药草香气味,是烟丝和主流烟气中常见的致香类物质^[32];第 4 类是以苯、甲苯、2-甲基苯并呋喃为主的苯及其同系

物类化合物,这类物质极易在高温条件下转变成稳定性更好的稠环类和芳香族化合物^[33],继而导致其对卷烟的增香作用更加强烈。

1.2.3 巴戟天根茎类多糖 巴戟天是天然的根类植物,从中提取出的巴戟天水溶性多糖是巴戟天的主要活性成分之一,具有强筋骨、祛风湿、促进骨质合成^[34]等作用。研究发现,巴戟天水溶性多糖由果糖和葡萄糖组成^[33],是一种由果糖以(2→1)位糖苷键连接成的菊淀粉性多糖^[35],是很好的卷烟保润剂。杨振民等^[33]对比了巴戟天水溶性多糖在有氧和无氧环境下的热裂解产物差别,发现在2种环境下巴戟天水溶性多糖产生了相似的3类物质,即第1类物质主要以糠醛类为主的杂环类化合物;第2类物质包括如丙酮、乙酸丁香酚酯、乙酸、丙酸等在内的酮、醛、酯和酸类化合物;第3类热裂解产物则是产生了一些有害化合物,即苯及其同系物,如苯、苯乙烯、苯乙炔、1-乙基-3-甲基苯、苯并呋喃等。其热裂解机制包括两个方面:①果糖残基通过链的剪切后,失去3个水形成5-羟甲基-2-糠醛;②巴戟天水溶性多糖内部含有的葡萄糖残基经过一系列的脱水反应,最终形成了化合物2-呋喃甲醇。此外,巴戟天水溶性多糖热裂解后也产生了很多对烟香有益的物质,除一些挥发性小分子物质外,经热裂解产生的5-甲基糠醛、5-羟甲基糠醛等物质对卷烟烟香的增强具有非常积极的作用,同时吡喃酮和呋喃酮类化合物的产生在高温下吸食时也能提供宜人的甜烤香和焦糖香。

1.2.4 藻类多糖 藻类的主要成分为蛋白质、脂肪和多糖^[36],其中多糖在藻类物质中所占的含量是最多的^[37-38],且大部分为水溶性多糖^[39-40]。目前常见的应用于卷烟中的藻类多糖主要包括铜藻多糖、裙带菜多糖和龙须菜多糖。

(1) 铜藻多糖:铜藻作为一种富含有益生源要素的植物海藻,被广泛应用于医学、药品及食品等领域。研究^[41]表明,铜藻多糖主要由甘露糖、鼠李糖、半乳糖和岩藻糖等构成,单糖构型为吡喃糖构型,分子量分布范围为 $4.6 \times 10^3 \sim 6.8 \times 10^5$ Da。铜藻多糖具有消炎软坚、清热利水的功效,并且由于其分子结构中还含有多个羟基官能团,故具有很好的保润作用^[42]。黄芳芳等^[43]利用不同的提取分离方法从铜藻中得到了4种多糖提取物,并对其热裂解产物种类进行了分析,结果显示,提取物A、B、C和D中分别检测出了52,50,14,26种物质,前两个提取物热裂解产物种类明显高于后两个,其原因可能是分离纯化时产生的差异导致大分子化合物被大量去除。随后,经过对热解产物种类的归纳总结,发现4种铜藻多糖提取物的主要热解产物有杂环类化合物、酮类和醛类等,其中以杂环类化合物为主,这几类物质在高温下均可以产生甜香和焦糖香等香味。

(2) 裙带菜多糖:裙带菜多糖是一种由1→2或1→4位糖苷键^[44]连接而成的,包含葡萄糖、半乳糖、木糖和鼠李糖等多种单糖在内的一种海藻型杂多糖,具有抗肿瘤、抗氧化、免疫调节等生物活性功效^[45]。研究^[46]表明,经提取得到的裙带菜多糖提取物在加入卷烟烟丝后可以提升烟气的生津度,同时降低刺激感,起到改善感官舒适度和提高卷烟吸食品质的作用。刘珊等^[47]探索了裙带菜多糖在高温下的热裂解反应过程及致香化合物的生成情况,同时开展了将多糖添加至卷烟中的实用研究。鉴定分析结果表明,其在300℃时产生的物质含量和类别是非常稀少的,以呋喃类化合物为主,其中糠醛、5-羟甲基糠醛和5-甲基糠醛的生成含量是最多的;随着反应器内温度逐渐达到600,900℃,产物含量和种类都显著增加,主要是一些低分子量的物质如酮类化合物,但呋喃类物质仍处于主导地位。因此,裙带菜多糖的主要裂解产物为呋喃类、酮类、有机酸类、醛类4大类。其裂解机制为,较低温度时多糖处于热裂解初期,其内部发生了各种化学反应,如脱水反应和解聚反应等复杂过程。同时,裙带菜多糖内部的糖醛酸侧链发生了断裂,继而导致其内在结构逐渐发生改变;随着温度的逐步升高,多糖热裂解程度变得更加急剧,即多糖结构中含有的主要糖苷键和C—C键都发生断裂,导致脱羟、脱羧和脱羰等一系列反应的产生,最终形成一系列稳定的羰基和羧基化合物^[48]。

(3) 龙须菜多糖:龙须菜多糖是龙须菜中的主要活性成分,其分子结构主要由葡萄糖、半乳糖和内醚半乳糖组成^[49],具有抗免疫活性^[50]、抗突变和清除自由基^[51]以及对流感病毒^[52]等生物活性功效。刘珊等^[53]分别对龙须菜多糖进行了300,600,900℃条件下的热裂解特性分析,结果显示裂解产物种类和数量的复杂程度与温度正相关,3种温度下的产物种类分别为13,27,37种,且热裂解产物主要以有机酸、呋喃和酮类化合物为主。其中,含量最多的热解产物为呋喃类物质,其形成机理可能是龙须菜多糖含有的葡萄糖单元和半乳糖单元发生裂解导致的;其次是产物中的有机酸和酮类物质,产生原因则是C—C先发生断裂,再经脱水、羰基转移等反应,利用中间产物的过渡形成的。但是,龙须菜多糖热解反应中唯一的缺点在于,高温下的热裂解过程中产生了较多的苯乙烯、苯酚等有害物质,若应用于卷烟中将存在一定的危害。

1.2.5 真菌多糖 拟层孔菌是一种真菌,可将其分为红缘拟层孔菌属和药用拟层孔菌属两类子实体。从拟层孔菌中提取出的拟层孔菌胞外多糖则是一种具有抗氧化、抗炎镇痛、抑菌保肝等生物活性功效的真菌多糖^[54]。王林嵩等^[55]利用液体深层发酵法对拟层孔菌的胞外多糖进行了提取,再采用高温热裂解技术对其产物进行了分析鉴定,发现产物由酮类、酯类、醛类、醇类、呋喃类、氮杂环类和

酚类等构成,这些物质可以产生清香、香甜气味,给人一种沁人心脾的舒适感。

2 多糖在卷烟中的应用效果及影响规律

2.1 卷烟保润

传统卷烟生产过程中常常通过添加山梨醇、木糖醇、甘油和丙二醇等物质保持香烟的湿润^[56],但这类小分子保润剂属于单向保润剂,保润效果较差^[57],且在卷烟的高温燃吸过程中会形成焦油、甲苯、苯酚等致癌物质^[58],对人体健康带来危害。而多糖作为一种天然活性物质,其分子链具有多羟基结构,可以与水分子形成亲水性化合物^[59]。同时,在多糖内部结构中,其分子链之间由于存在相互纠缠交错的关系,使得彼此之间形成紧密的网络状结构,从而可以针对性地抑制烟丝中水分的流失,表现出很强的保水作用^[60]。杨君等^[61-63]研究发现,由于多糖的存在,使得低湿环境下的烟丝失水率更低,其平均含水率可达 10% 以上,低于甘油、丙二醇的(10% 以下);高湿条件下的烟丝吸水率更低,平均含水率达 14%,较普通甘油、丙二醇的吸水率低(15% 以上)。说明多糖的添加促使卷烟在低湿、高湿环境下均具有很强的保湿、防潮作用。将其添加至卷烟中,卷烟的烟气细腻感增强、刺激性降低,同时卷烟吸食时的干燥感也有所改善,在口腔中的残留物也明显减少。

2.2 卷烟增香

经各种萃取方法(如超声萃取^[64]、超高压萃取^[65]、微波辅助萃取^[66]及超临界 CO₂ 萃取^[67])分离出的各种纯化多糖在卷烟加香试验感官评定的过程中,均可以显示出柔和细腻、协调性好、香气丰满的效果,显著改善卷烟的感官舒适度,这是因为各种纯化多糖在热裂解过程中均会产生一系列酚类、杂环类、醛类及酯类等物质。这些物质在高温下均可以产生果香、甜香、焦糖香等香味,能对卷烟起到很好的增香作用。王大锋等^[68-70]研究发现,将多糖添加至卷烟中,卷烟的烟香品质、细腻程度、甜润感及生津余味等均有所改善,同时卷烟的杂气和刺激感等缺陷也显著降低。

卷烟中添加的多糖含量不宜过多也不宜过少,需追求适量原则。邓梅忠等^[64-66]研究表明,添加过量的多糖会导致卷烟香气被掩盖,协调性很差,口感过于黏腻;添加量过少,杂气和刺激性仍存在,不足以达到很好的感官舒适度。因此,适量的多糖添加量才可以更好地达到预期的改善效果。

2.3 卷烟主流烟气成分

卷烟的主流烟气是指卷烟在抽吸时从卷烟嘴端流出的烟气,主要包括碳基化合物、酚类、酮类和烃类物质等^[71]。研究^[72-73]表明,多糖对卷烟主流烟气成分的影响主要在水分和 pH 两个方面。前者直接影响卷烟对喉部

的感官舒适度,且二者呈正相关,即烟气水分含量越高,对人体喉部的舒适度越好。而后者是反映卷烟质量的指标之一,会影响整体感受,即刺激感、残留感等,一般控制烟气 pH 为酸性时感官舒适度最佳。通过将各种纯化多糖的热裂解产物添加至卷烟中,在吸食时可以显著增加主流烟气中的水分比例,同时达到降低主流烟气 pH 值的目的。刘珊等^[53]将龙须菜多糖添加至卷烟中进行评吸时发现,烟气中水分含量百分比空白对照组显著增加,且多糖的加入不会对主流烟气中的一氧化碳及氢氰酸的量产生显著影响,说明多糖的加入只改善了主流烟气含水率的变化,并无其他影响效果。谢玉龙等^[74]发现植物多糖的添加使得主流烟气中的水分含量较空白样品高,且主流烟气中的气相水分含量也明显高于粒相水分,是由于周围环境对主流烟气中粒相的影响小于气相;同时,植物多糖的加入可以显著降低主流烟气的 pH 值,是因为多糖热裂解后产生了羧酸类化合物。因此多糖的添加对主流烟气成分的影响主要涉及两个方面,分别是增加主流烟气的水分含量和降低主流烟气的 pH 值,并不会对主流烟气成分中的有害物质含量产生显著影响。

3 结论

不同的多糖热裂解时会产生不同的热裂解产物,且热裂解机理也不完全相同。但是,将其应用于卷烟中时,会产生相似的保润效果,主要是因为每种多糖结构中均含有多羟基基团,只是数量上存在一定的差别,故一般只要含有多羟基结构的多糖,都可以应用于卷烟中进行热裂解,达到预期的保润效果。其次,添加至卷烟的多糖在卷烟吸食过程中会发生热裂解,产生酚类、酯类、杂环类等物质,这些物质的香味对卷烟品质有较优的影响,但这也仅限于适度原则。此外,多糖的添加还会对卷烟主流烟气中的水分和 pH 存在一定的影响,但目前相关研究还比较少,关于多糖添加量对卷烟品质其他方面的影响还需进一步探究。

虽然现有的研究已证明多糖的加入可以对卷烟品质产生保润增香的显著效果,但是其在卷烟中的应用目前还比较少,主要是适合添加至卷烟的多糖研究并不多,测试过的多糖种类也较少;其次多糖的分离纯化目前大多还处于实验室制备阶段,真正进行工业化生产的多糖非常少。中国的多糖种类非常丰富,将多糖作为保润增香剂加入卷烟中具有非常大的应用潜力。

参考文献

- [1] 邵干辉,袁庆钊,温东奇,等. 国内国际品牌卷烟香味特征和致香成分比较分析[J]. 广东科技, 2008(20): 43-46.
- [2] 刘艳红,唐祥,李娅琳,等. 活性多糖提取纯化及结构解析的研究进展[J]. 中国民族民间医药, 2020, 29(3): 67-73.
- [3] 王笑月,刘效兰,薛燕,等. 黄精及其复配植物多糖提取工

- 艺优化及人体保湿评价[J]. 食品工业科技, 2018, 39(5): 221-225, 240.
- [4] HUANG Gang-liang, HU Jin-chuan, MEI Xin-ya. The antioxidant activities of natural polysaccharides[J]. Current Drug Targets, 2017, 18(11): 1 296-1 300.
- [5] WANG Yun, WANG Sheng-xuan, SONG Rong-zhen, et al. Ginger polysaccharides induced cell cycle arrest and apoptosis in human hepatocellular carcinoma HepG2 cells[J]. International Journal of Biological, 2019, 123: 81-90.
- [6] CHEN Ling, HUANG Gang-liang. The antiviral activity of polysaccharides and their derivatives [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 115: 77-82.
- [7] ZHANG Qian-ping, OPEYEMI J O, CHEN Hong-xia, et al. Evaluation of the anti-diabetic activity of polysaccharide from cordyceps cicadae in experimental diabetic rats[J]. Chemistry & Biodiversity, 2018, 15(8): e1800219.
- [8] MARIANNE S K, JOHAN G, JAN W. Immune cell activation and cytokine release after stimulation of whole blood with pneumococcal C-polysaccharide and capsular polysaccharides[J]. International Journal of Infectious Diseases, 2016, 52: 1-8.
- [9] LI Rui, ZHANG Xing-jian, LV Xue-fei, et al. Microvalve controlled multi-functional microfluidic chip for divisional cell co-culture[J]. Analytical Biochemistry, 2017, 539: 48-53.
- [10] DANIELA G L, VALERIO C D S, ERIC B R, et al. Diesel-like fuel obtained by pyrolysis of vegetable oils[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2003, 71(2): 987-996.
- [11] STEDILE T, ENDER L, MEIER H F, et al. Comparison between physical properties and chemical composition of bio-oils derived from lignocellulose and triglyceride sources [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 50: 92-108.
- [12] DORONIN V P, LIPIN P V, POTAPENKO O V, et al. Features of combined conversion of naphthenic hydrocarbons and fatty acids under catalytic cracking conditions[J]. Petroleum Chemistry, 2016, 56(8): 745-752.
- [13] XU Chun-ping, YANG Chen-chen, MAO Duo-bin. Fraction and chemical analysis of antioxidant active polysaccharide isolated from flue-cured tobacco leaves[J]. Pharmacognosy magazine, 2014, 10(37): 66-69.
- [14] 舒俊生, 田振峰, 陈开波, 等. 烟叶中多糖的分离及单糖组成[J]. 食品与机械, 2013, 29(3): 34-36.
- [15] 许春平, 王充, 曾颖, 等. 烤烟上部鲜烟叶多糖的结构及保湿性能[J]. 烟草科技, 2017, 50(4): 58-64.
- [16] 许春平, 杨琛琛, 郝辉, 等. 香料烟烟叶多糖的热裂解产物研究[J]. 轻工科技, 2014, 30(8): 18-21.
- [17] 祖萌萌, 郭春生, 王政, 等. 枸杞多糖的热裂解产物研究[J]. 农产品加工(学刊), 2012(11): 77-80.
- [18] 李仙, 董伟, 段继铭, 等. 羊肚菌发酵烟草多糖及其在卷烟中的初步应用[J]. 中国烟草科学, 2011, 32(3): 36-40.
- [19] 艾绿叶, 冯雪研, 潘婷婷, 等. 羧甲基烟叶多糖的持水性及热解产物研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(5): 31-36.
- [20] DORINE L V, JOOP A P, JAN G B, et al. Carboxymethylation of inulin[J]. Carbohydrate Research, 1995, 271(1): 101-112.
- [21] 高凯. 宁夏枸杞子的活性成分研究和应用开发[D]. 西安: 第四军医大学, 2014: 11-14.
- [22] ZHANG Xiao-rui, LI Ying-jie, CHENG Jun-ping, et al. Immune activities comparison of polysaccharide and polysaccharide-protein complex from *Lycium barbarum* L.[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2014, 65: 441-445.
- [23] 张喜康, 赵宇慧, 刘军, 等. 枸杞不同生长期多糖的理化特性及结构分析[J/OL]. 食品科学. (2019-09-18) [2020-07-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20190917.1655.082.html>.
- [24] 侯学谦, 祝婉芳, 曲玮, 等. 枸杞化学成分及药理活性研究进展[J]. 海峡药学, 2016, 28(8): 1-7.
- [25] 叶兴乾, 周声怡, 姚舒婷, 等. 枸杞多糖的提取方式、结构及生物活性研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(6): 292-300.
- [26] 王全, 周肇峰, 陆建南, 等. 枸杞多糖的热裂解及其在卷烟中的应用[J]. 郑州轻工业学院学报(自然科学版), 2015, 30(2): 38-41.
- [27] 李金楠, 赵丽迎, 于静, 等. 香加皮化学成分的研究[J]. 中成药, 2010, 32(9): 1 552-1 556.
- [28] 段漓童, 刘正猛, 劳风云, 等. 香加皮多糖分离提取及含量测定[J]. 中国煤炭工业医学杂志, 2007(7): 766-768.
- [29] 王小莉. 香加皮多糖提取纯化及其在烟草中的保润增香效应研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2018: 59.
- [30] 张翼飞, 刘志凯, 林雨晨, 等. 香加皮精多糖的单糖组成、热重和热裂解分析[J]. 食品工业科技, 2019, 40(6): 256-262, 272.
- [31] 殷全玉, 王霞, 杨铁钊, 等. 叶面分泌物和中性香气物质在不同烤烟品种(系)和地区间的变化及其与常规化学成分的关系[J]. 中国烟草学报, 2010, 16(3): 17-23.
- [32] 张献忠. 废次烟末中烟草香味物质提取、应用及生物活性[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 2.
- [33] 杨振民, 伊勇涛, 胡军, 等. 巴戟天水溶性多糖热裂解产物研究[J]. 中草药, 2011, 42(4): 656-660.
- [34] 朱孟勇, 赫长胜, 王彩娇. 巴戟天多糖对骨质疏松大鼠骨密度及血清微量元素的影响[J]. 中草药, 2010, 41(9): 1 513-1 515.
- [35] 杨振民, 伊勇涛, 高川川, 等. 中药巴戟天中水溶性多糖的分离及结构鉴定(英文)[J]. 天然产物研究与开发, 2011, 23(1): 1-5, 24.
- [36] WANG S, WANG Q, HU Y M, et al. Study on the synergistic-pyrolysis behaviors of mixed rice husk and two types of seaweed by a combined TG-FTIR technique[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2015, 114:

- 109-118.
- [37] WANG Shuang, HU Ya-min, BENJAMIN B U, et al. Pyrolysis mechanisms of typical seaweed polysaccharides[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2017, 124: 373-383.
- [38] CHAIWONG K, KIATSIRIROAT T, VORAYOS N, et al. Study of bio-oil and bio-char production from algae by slow pyrolysis [J]. Biomass and Bioenergy, 2013, 56: 600-606.
- [39] AYHAN D. Use of algae as biofuel sources[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(12): 2 738-2 749.
- [40] ODLARE M, NEHRENHEIM E, RIBE V, et al. Cultivation of algae with indigenous species; Potentials for regional biofuel production[J]. Applied Energy, 2011, 88(10): 3 280-3 285.
- [41] 李伟. 铜藻多糖的纯化、结构及免疫活性的研究[D]. 温州: 温州大学, 2015: 3-27.
- [42] 邵平, 杨君, 黄芳芳, 等. 径向流耦合超滤分离纯化铜藻多糖及其烟丝保润的应用[J]. 食品与发酵工业, 2012, 38(8): 197-202.
- [43] 黄芳芳, 尹洁, 严志鹏, 等. 铜藻多糖在烟丝中的保润性能、热裂解及其生物安全性分析[J]. 浙江农业学报, 2017, 29(5): 831-839.
- [44] 游丽君, 黄诗铭, 郑桂青, 等. 裙带菜多糖的结构及抗氧化、免疫调节活性[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2018, 46(11): 29-38.
- [45] 刘一鹿, 方月妮, 钱强. 裙带菜多糖提取方法及其功用研究概述[J]. 大家健康(学术版), 2013, 7(4): 12.
- [46] 朱尊权, 胡有持, 刘惠民, 等. 羊栖菜多糖及其在烟草中的应用: 1962699B[P]. 2012-02-01.
- [47] 刘珊, 张军涛, 胡军, 等. 裙带菜多糖的热裂解产物分析及卷烟应用研究[J]. 中国烟草学报, 2013, 19(5): 10-15.
- [48] 彭云云, 武书彬. 蔗渣半纤维素的热裂解特性研究[J]. 中国造纸学报, 2010, 25(2): 1-5.
- [49] 卢佳芳, 杨文鸽, 颜伟华, 等. 龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)多糖的分离纯化及其组成研究[J]. 海洋与湖沼, 2009, 40(4): 484-488.
- [50] 宫春宇, 唐庆九, 张劲松, 等. 龙须菜免疫活性多糖的分离纯化及结构鉴定[J]. 天然产物研究与开发, 2010, 22(4): 603-606, 624.
- [51] 陈美珍, 余杰, 龙梓洁, 等. 龙须菜多糖抗突变和清除自由基作用的研究[J]. 食品科学, 2005(7): 219-222.
- [52] 陈美珍, 廖灶辉, 陈鸿霖. 龙须菜多糖硫酸基含量对抗流感病毒活性的影响[J]. 食品科学, 2008(8): 587-590.
- [53] 刘珊, 杨军, 胡军, 等. 龙须菜多糖的热裂解及其对卷烟主流烟气中 7 种有害成分释放量的影响[J]. 烟草科技, 2013(5): 27-30, 67.
- [54] 贾力耕, 包海鹰. 药用拟层孔菌研究进展[J]. 菌物研究, 2011, 9(2): 119-124.
- [55] 王林嵩, 刘帅, 孙斯文, 等. 一株拟层孔菌胞外多糖在卷烟生产上的应用[J]. 贵州农业科学, 2014, 42(5): 92-96.
- [56] 易锦满, 文俊, 杨庆. 几种保润剂的性能比较[J]. 烟草科技, 2006(4): 9-12.
- [57] 雷声, 刘秀明, 李源栋, 等. 不同植物多糖对烟丝吸湿性和保润性的影响及其作用机制[J]. 食品与机械, 2019, 35(8): 49-54.
- [58] CARMINES E L, GAWORSKI C L. Toxicological evaluation of glycerin as a cigarette ingredient[J]. Food & Chemical Toxicology, 2005, 43(10): 1 521-1 539.
- [59] 吴学谦, 贺亮, 程俊文, 等. 香菇多糖的化学修饰及结构表征[J]. 天然产物研究与开发, 2009, 21(6): 934-938.
- [60] 陈文, 王楠, 张民. 燕麦多糖的纤维素酶降解及理化性质分析[J]. 中国食品添加剂, 2014(2): 159-163.
- [61] 杨君, 黄芳芳, 秦敏朴, 等. 裂片石莼多糖微波辅助提取工艺优化及其卷烟保润应用[J]. 河南农业大学学报, 2015, 49(5): 688-695.
- [62] 许春平, 孙懿岩, 白家峰, 等. 怀山药多糖的羧甲基化修饰及保润性能[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2019, 40(6): 8-9, 70-74.
- [63] 唐丽, 刘娟, 雷声, 等. 硬脂酸改性普鲁兰多糖衍生物在卷烟中的应用研究[J]. 食品工业, 2016, 37(11): 8-10.
- [64] 邓梅忠. 水提取—超声萃取乌饭树树叶多糖及在卷烟中的应用[J]. 食品工业, 2014, 35(6): 134-137.
- [65] 龚荣岗, 白晓莉, 唐杰, 等. 青钱柳多糖的超高压萃取及在卷烟中的应用[J]. 食品工业, 2014, 35(9): 138-141.
- [66] 郭松斌. 微波辅助提取水华蓝藻多糖及在卷烟中的应用[J]. 食品工业, 2013(12): 82-85.
- [67] 彭国岗, 龚荣岗, 白晓莉, 等. 超临界 CO₂ 萃取淫羊藿多糖及其在卷烟中的应用[J]. 食品工业, 2014, 35(5): 65-68.
- [68] 王大锋. 茯苓多糖的提取及对卷烟感官品质的影响研究[J]. 轻工科技, 2015, 31(9): 23-24, 26.
- [69] 王吉中, 耿卢婧, 席攀攀, 等. 发酵产云芝胞外多糖的分析及其在卷烟中的应用[J]. 食品工业科技, 2012, 33(8): 140-142.
- [70] 吕浩铭, 黎艳玲, 杨华武, 等. 超声辅助提取雪梨多糖及其在卷烟中的应用[J]. 精细化工, 2016, 33(2): 142-146.
- [71] 周志磊. 烤烟主流烟气中主要甜味物质的鉴别及其形成机理[D]. 无锡: 江南大学, 2014: 19-22.
- [72] 孙凯, 杨燕, 侯英, 等. 卷烟主流烟气气相水分检测与感官分析[J]. 云南化工, 2012, 39(4): 22-24.
- [73] 顾永波, 肖作兵, 刘强, 等. 卷烟主流烟气 pH 值的测定及其与感官评吸的相关性研究[J]. 食品工业, 2011, 32(2): 97-99.
- [74] 谢玉龙, 朱先约, 翟玉俊, 等. 6 种西北地区植物多糖对卷烟主流烟气水分含量及 pH 的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 33(22): 189-191.