



张峻松,胡云怿,张新龙,等.秋葵多糖在烟草中的保润性能及热解行为研究[J].轻工学报,2026,41(1):81-89,126.
ZHANG J S, HU Y Y, ZHANG X L, et al. Study on humectant performance and pyrolytic behavior of okra polysaccharides in tobacco[J]. Journal of Light Industry, 2026, 41(1): 81-89, 126.
DOI: 10.12187/2026.01.008

秋葵多糖在烟草中的保润性能及热解行为研究

张峻松¹, 胡云怿¹, 张新龙², 王嘉奇¹, 于国锋², 梁森¹, 张骁¹

1. 郑州轻工业大学 烟草科学与工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 山东中烟工业有限责任公司 技术中心, 山东 济南 250014

摘要:【目的】探究秋葵多糖(OPs)作为一种绿色新型烟草保润剂的应用潜力,阐明其保润与热解增香的双重作用机制。【方法】通过多种检测分析技术对OPs的单糖组成、烟丝表面微观结构、水分赋存状态、保润性能及热解增香作用机制进行研究。【结果】OPs主要由半乳糖(44.6%)、鼠李糖(25.8%)和半乳糖醛酸(15.6%)组成,富含羟基官能团。施加OPs后,烟丝表面更为饱满,结合水占比在低湿度环境(温度(22±1)℃、相对湿度(32±2)%)下显著提升,在高湿度(温度(22±1)℃、相对湿度(84±2)%)和低湿度环境下的平衡含水率分别为41.93%和6.98%,干燥速率常数($k=0.6845$)较空白组降低了7.5%,保润性能优于丙二醇且接近甘油。热解分析显示,OPs可产生5-羟甲基糠醛、呋喃醇、2,5-二甲基吡嗪、愈创木酚等多种芳香物质,有助于提升卷烟香气丰富性及改善感官舒适度。【结论】OPs兼具高效保润与热解增香的双重功能,具备替代传统多元醇类保润剂的潜力,可为开发天然功能性烟草添加剂提供参考。

关键词:秋葵多糖;保润性能;热裂解;增香

中图分类号:TS411 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2026)01-0081-09

0 引言

烟草的水分含量对卷烟的整体品质至关重要,直接影响其加工稳定性、燃烧特性及消费者感官体验。烟草组织的多孔毛细结构限制了其保持水分的能力,尤其是在湿度较低的环境条件下,卷烟烟支更易快速失去水分,导致刺激性增强、余味苦涩。目前,在卷烟生产过程中,甘油、丙二醇等多元醇类保润剂被广泛用于增强烟草的保湿能力^[1-2],但其在热解过程中可能释放一些有害物质,如丙二醇热

解会产生乙醛、丙醛^[3],甘油受热诱导会释放环丙烷、丙烯醛^[4]。因此,开发兼具高效保润性能与绿色无害特性的新型保润剂非常重要^[5]。

近年来,天然多糖因其绿色安全特性成为新型保润剂的研究焦点。研究表明,植物多糖一方面可通过丰富的羟基官能团与烟草纤维结合形成致密的氢键网络,从而抑制水分的流失;另一方面,可在热解过程中裂解生成芳香物质,实现保润与增香的双重作用。例如,王海阳等^[6]通过乙醇分馏和DEAE-52纤维素柱色谱获得了低相对分子质量胡

收稿日期:2025-03-28;修回日期:2025-06-29;出版日期:2026-02-15

基金项目:山东中烟工业有限责任公司科技项目(202302017);中国烟草总公司重点研发项目(110202402037)

作者简介:张峻松(1971—),男,河南省郑州市人,郑州轻工业大学教授,博士,主要研究方向为烟草化学与香精香料。E-mail: 13283712413@163.com

通信作者:张骁(1967—),男,河南省信阳市人,郑州轻工业大学教授,博士,主要研究方向为作物发育调控。E-mail: xzhang@henu.edu

芦巴多糖(FP),发现其在 200 ℃ 以下表现出优异的热稳定性,且在高温下可分解生成芳香族物质。张峰等^[7]证明了添加适量珊瑚藻多糖具有显著改善卷烟吸食品质的效果。刘欢等^[8]研究表明,在烟草中添加甲基纤维素(MC)、刺槐豆胶(LBG)、灵芝多糖(GLP)、莲子多糖(LSP)、茶多糖(TP)等植物多糖,可起到保润及增香作用。这些研究成果证实了植物多糖在烟草保润领域的技术可行性。

秋葵是锦葵科秋葵属草本植物,因丰富的营养成分而受到业界的广泛关注^[9]。秋葵的种植适应性强,产量高,秋葵多糖(OPs)的提取加工工艺简便,易于满足大规模应用需求。OPs 分子中含有大量羟基官能团,可通过氢键作用有效锁住烟丝中的水分,具有良好的保润性能。朱彬娜等^[10]研究发现,黄秋葵多糖具有较好的保湿性能,其吸湿性随环境湿度的增大而增大。

鉴于此,本文拟系统解析 OPs 分子结构特征,通过低场核磁共振进行水分赋存状态分析,利用吸湿解湿动力学模型阐明其保润性能,结合热裂解-气质联用分析揭示其热解增香作用,以期为天然烟草保润剂的开发及提升卷烟品质提供参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

烟丝样品,由山东中烟提供;OPs,泰芝康生物科技有限公司;鼠李糖、阿拉伯糖、半乳糖、半乳糖醛酸、葡萄糖等单糖标准品,上海麦克林生化科技股份有限公司;丙二醇、丙三醇(分析纯),天津市富宇精细化工有限公司;三氟乙酸(TFA)、1-苯基-3-甲基-5-吡唑酮(PMP),上海阿拉丁生化科技股份有限公司;其余常用试剂,国药集团上海有限公司。上述试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器与设备

1260infinity 型高效液相色谱(HPLC)仪、8890/5977A 型气相色谱-质谱联用(GC-MS)仪,美国 Agilent 公司;SPECTRUM 3 型傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪,美国 Perkin Elmer 公司;Sigma 360 型扫描电子显微镜(SEM),德国蔡司公司;NMI20-040 型低场核磁共振成像分析(LF-NMR)仪,苏州纽麦

分析仪器股份有限公司;DHG-9140A 型鼓风干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司;NETZSCH STA 209F3 型热重分析(TG)仪,德国耐驰公司。

1.3 实验方法

1.3.1 单糖组成测定 参考檀茜倩等^[12]的方法,采用 HPLC 仪检测 OPs 中的单糖组成,具体方法如下:取 5 mg OPs,溶解于 2 mol/L TFA 溶液,在 100 ℃ 条件下水解 6 h;与甲醇共蒸发去除 TFA,再将真空干燥后的水解产物溶解在 100 μL 0.3 mol/L NaOH 溶液中,加入 100 μL 0.5 mol/L 的 PMP 溶液,在 70 ℃ 条件下反应 1 h;将混合物与 100 μL 0.3 mol/L 的 HCl 溶液混合,离心 5 min,取上清液过 0.22 μm 滤膜,最后取 10 μL 过滤后的上清液注入 C18 柱,用于 HPLC 分析。

色谱柱为 Prevail Carbohydrate ES 糖分析柱(4.6 mm×250 mm×5 μm);柱温为 30 ℃;漂移管温度为 100 ℃;气体流量为 2.2 L/min。流动相梯度洗脱条件如下:流动相为 25% 超纯水和 75% 乙腈,流量为 0.5 mL/min,压力<100 bar,洗脱时间为 40 min。

1.3.2 FTIR 检测 采用 KBr 压片法进行 FTIR 检测。取 2 mg OPs 和约 100 mg KBr,充分研磨,压片机压片 30 s 后迅速放入 FTIR 仪进行扫描,波数范围为 4000~400 cm⁻¹,分辨率为 4 cm⁻¹。

1.3.3 SEM 分析 采用喉头喷雾器分别将甘油、丙二醇、秋葵多糖溶液均匀喷洒于烟丝表面,使溶质质量为烟丝质量的 2%,空白组喷洒等体积蒸馏水。再将处理后的烟草样品置于低湿度环境(温度(22±1)℃、相对湿度(32±2)%)下平衡 48 h,喷金并将其上表面固定在载体台上。采用 SEM 于放大 300 倍、1000 倍条件下拍摄烟叶表面。

1.3.4 LF-NMR 检测 将烟丝样品置于温度(22±1)℃、相对湿度(60±2)%的恒温恒湿箱中平衡 48 h 后,取烟丝 20 g,分 4 组,每组 5 g,采用喉头喷雾器分别将甘油、丙二醇、OPs 溶液均匀喷洒于烟丝表面,使溶质质量为烟丝质量的 2%,空白组喷洒等体积蒸馏水;再将烟草样品置于温度(22±1)℃、相对湿度(60±2)%的恒温恒湿箱中平衡 48 h 后,分别置于相对湿度(32±2)%和(84±2)%(高湿度环境)的干燥器中,定时监测烟草样品水分增加或减

少情况,并计算样品的干基含水率。称取 1.5 g 干燥器中的烟草样品放入 LF-NMR 样品管(1 cm×3.5 cm)进行分析,并设置 3 次重复。CPMG 序列参数参考 W. P. Fan 等^[13]的方法。

1.3.5 吸湿性和保湿性测定 1) 烟丝样品制备方法同 1.3.4,再分别置于温度为(22±1)℃、相对湿度为(84±2)%和(32±2)%的恒温恒湿环境中,进行吸湿和解湿实验。每隔一定时间取样,测定烟丝样品的质量变化,计算其干基含水率(%)。以时间为横坐标,干基含水率为纵坐标,采用 Origin 绘制吸湿和解湿曲线。

2) 模型评价方法。将干基含水率数据按下式转换为水分比(MR),以准确反映不同时间段干基烟叶的含水率。

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}$$

式中, M_t 为 t 时刻烟丝样品的干基含水率/%, M_e 为烟丝样品平衡干基含水率/%, M_0 为烟丝样品初始干基含水率/%。

3) 动力学模型建立。选择以下 3 种常用动力学模型对 MR 进行拟合,并选出最适模型。

Lewis 模型:
$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt)$$

Page 模型:
$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt^n)$$

Henderson&Pabis 模型:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = a \exp(-kt)$$

式中, k 为干燥速率常数/ s^{-1} , t 为干燥时间/s, n 和 a 为干燥模型待定系数。

3 个模型对数据拟合后,通过下式所示决定系数 R^2 和 χ^2 评价模型的拟合效果,其中 R^2 越接近 1 且 χ^2 越低,表明模型的拟合效果越好。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{cak,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^n (\overline{MR} - MR_{exp,i})^2}$$
$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{cak,i})^2}{N - Z}$$

式中, $MR_{cak,i}$ 为第 i 个相对含水率的模型预测值, $MR_{exp,i}$ 为第 i 个相对含水率的实验观测值; \overline{MR} 为相对含水率实验值的平均值, N 为实验值个数, Z 为参数个数。

1.3.6 TG 检测 参考文献[14]中的方法对 OPs 进行 TG 分析实验。载气为 N_2 ,流速为 35 mL/min,升温速率为 20℃/min,温度范围为室温至 800℃。均以加热温度($\theta/^\circ C$)为横坐标,TG 曲线以烟草样品的质量变化率($w/\%$)为纵坐标,微商热重(DTG)曲线以烟草样品的质量变化率与时间的微商($(dw/dt)/(\% \cdot min^{-1})$)为纵坐标,绘制 TG 和 DTG 曲线。

1.3.7 热裂解检测 称取约 30 mg OPs 置于长度为 25 mm、两端均塞有适量石英棉的石英管中,对其进行瞬间裂解,热裂解温度为 350℃,热裂解产物由 He 直接导入 GC-MS 仪中进行分离和鉴定。

GC 条件:UA-5MS 色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm);升温程序为初温 50℃保持 2 min,然后以 8℃/min 的速率升温至 280℃;载气为 He;流速为 1.0 mL/min;进样口温度为 280℃;进样量为 1 μL ;分流比为 15:1。

MS 条件:电子轰击(EI)离子源;电子能量为 70 eV;传输线温度为 280℃;离子源温度为 230℃,四极杆温度为 150℃;扫描方式为离子检测(SIM)。

用 WILEY 和 NIST 标准质谱库对热裂解产物挥发性成分进行定性分析,并采用面积归一化法测定其相对含量。

2 结果与分析

2.1 OPs 单糖组成分析

单糖是决定多糖结构和性能特征的基本单位。OPs 的 HPLC 图如图 1 所示。由图 1 可知,OPs 的单糖主要为鼠李糖、阿拉伯糖、半乳糖醛酸、半乳糖

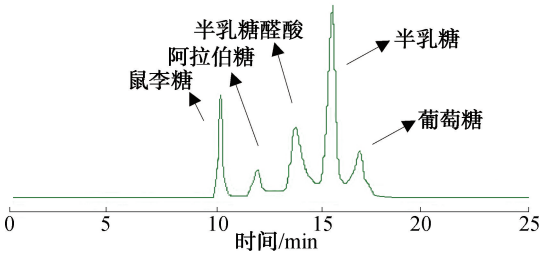


图 1 OPs 的 HPLC 图
Fig. 1 HPLC profile of OPs

和葡萄糖,其中半乳糖占比最高,为44.6%,推测其可能是构建骨架的残基^[15]。鼠李糖和半乳糖醛酸占比分别为25.8%和15.6%,与先前的研究^[16]结果相似。而葡萄糖和阿拉伯糖占比分别为8.2%和5.8%。

OPs 的 FTIR 图如图 2 所示。由图 2 可知,在 3600~3100 cm^{-1} 波数范围内出现了羟基(O—H)伸缩振动吸收带^[17],这与多糖富含羟基、具有典型的亲水特征一致。2928 cm^{-1} 处的特征峰归属于 C—H 键(如 CH、CH₂ 和 CH₃)的伸缩振动,这表明样品中存在碳链结构。1643 cm^{-1} 和 1416 cm^{-1} 处的特征峰分别对应 C=O 和 C=C 的伸缩振动。1025 cm^{-1} 处的特征峰与 C—O 伸缩振动相关,表明 OPs 分子中存在醚键和羟基官能团,这与其他果胶多糖的结构特征相符^[18]。同时,OPs 的这些特征峰可能与其生物活性、溶解性等有关。

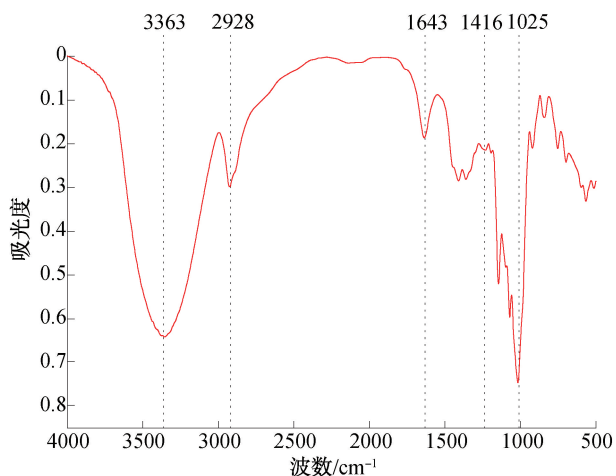


图 2 OPs 的 FTIR 图
Fig. 2 FTIR spectrum of OPs

2.2 OPs 对烟丝结构及水分赋存状态的影响

施加不同保润剂的烟丝在低湿度环境下的表面微观结构如图 3 所示。由图 3a) 和 b) 可知,因水分流失迅速,施加水的烟丝表面呈明显的不规则沟壑结构,并伴随局部组织塌缩现象;此外,这些烟丝表面因水分快速迁移形成密集凹槽,导致有效孔隙率降低,进一步加剧了水分散失。由图 3c)—h) 可知,经丙二醇、甘油和 OPs 处理后,烟丝表面的皱缩明显减少,表面结构更加饱满平整。这表明施加丙二醇、甘油和 OPs 能够有效缓解烟草在水分散失过程中的组织收缩。这可能一方面是由于保润剂分子中羟基的存在增强了水分子与烟丝之间的结合力,从而起到保水的效果;另一方面,这些保润剂可在烟丝表面形成保护层,缓解水分散失,防止因失水而导致的收缩和塌陷。此外,OPs 特有的三维网络结构可作为骨架减缓气孔的收缩,并能够有效包裹水分,减少水分流失^[19]。

水分子在烟草基质中的赋存状态与其结合水分的能力紧密相关,不同水分状态具有特定的弛豫率及横向弛豫时间 T_2 , 弛豫时间越长,水分子运动性越高^[5]。烟丝在不同湿度环境下的弛豫时间和水分分布如图 4 所示。由图 4a) 和 b) 可知,横向弛豫时间呈现出的双峰特征 T_{21} 和 T_{23} 分别代表烟丝中两种不同的水分状态, T_{21} (0.1~10 ms) 代表与烟草结合较为紧密的结合水, T_{23} (10~100 ms) 代表细胞间隙中流动的自由水^[20]。经甘油、丙二醇和 OPs 处理后,烟丝的 T_{21} 峰值均高于空白组,且略向右偏移,而 T_{23} 峰值均低于空白组,这表明保润剂的加入

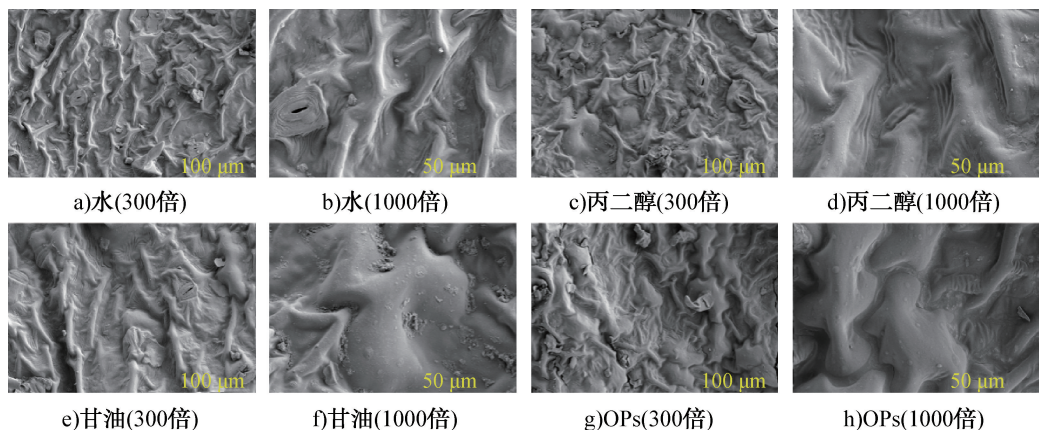


图 3 施加不同保润剂的烟丝在低湿度环境下的表面微观结构

Fig. 3 Surface microstructure of tobacco cuts treated with different humectants under the low-humidity conditions

使水分与烟丝的结合更加紧密,降低了烟丝中水分的流动性。

由图 4c) 和 d) 可知,添加甘油、丙二醇和 OPs 的烟丝中结合水占比明显高于空白组。相较于高湿度环境,在低湿度环境下烟丝的结合水占比均有所降低,但仍高于空白组。无论在高湿度还是低湿度环境下, T_{21} 峰面积大小均为甘油>OPs>丙二醇>空白组。上述结果表明,保润剂中的羟基、羧基等亲水基团可通过氢键等作用调控烟丝结合水占比,

从而实现保润效果,且保润效果依次为甘油(三羟基)>OPs(多糖)>丙二醇(双羟基),这主要与保润剂分子极性与结构有关。

2.3 OPs 吸湿解湿性能分析

2.3.1 OPs 对烟丝吸湿性和解湿性的影响 施加不同保润剂后烟丝的吸湿和解湿曲线如图 5 所示。由图 5a) 可知,在高湿度环境下,烟丝的含水率均在前 7 h 内迅速增加,然后缓慢增加,并在 24 h 后趋于稳定,此时空白组烟丝、丙二醇组烟丝、甘油组烟丝

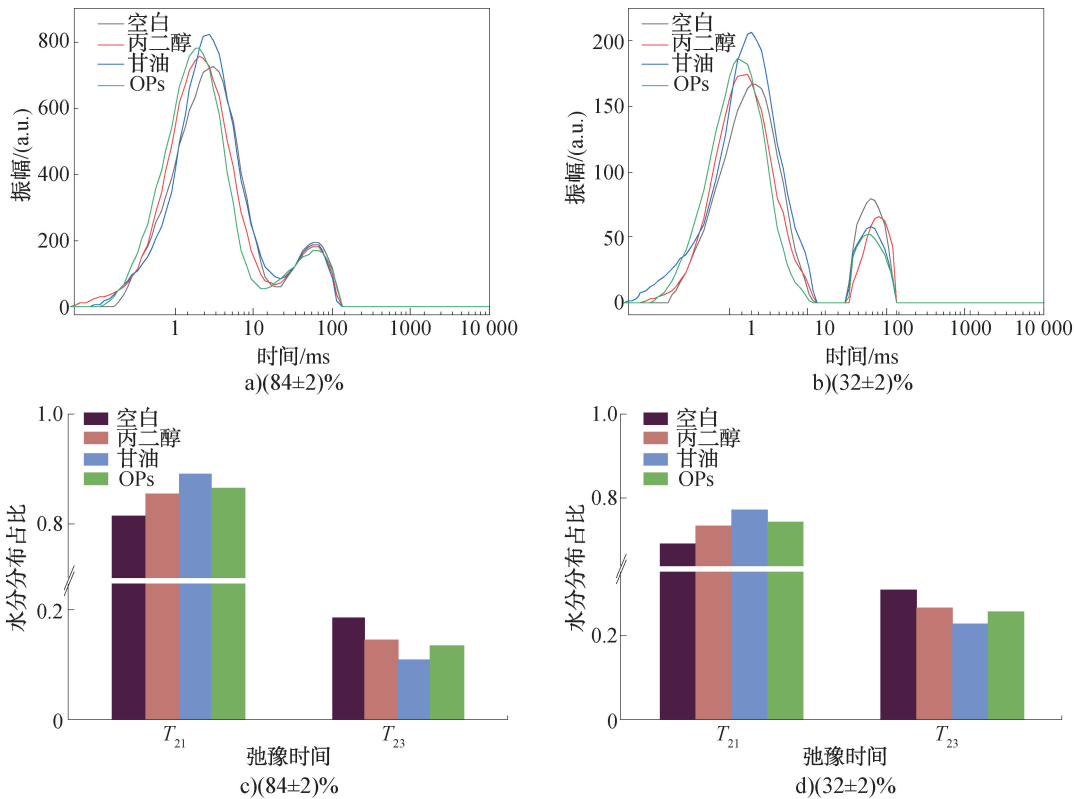


图 4 烟丝在不同湿度环境下的弛豫时间和水分分布

Fig. 4 Relaxation times and moisture distribution of tobacco cuts under different humidity conditions

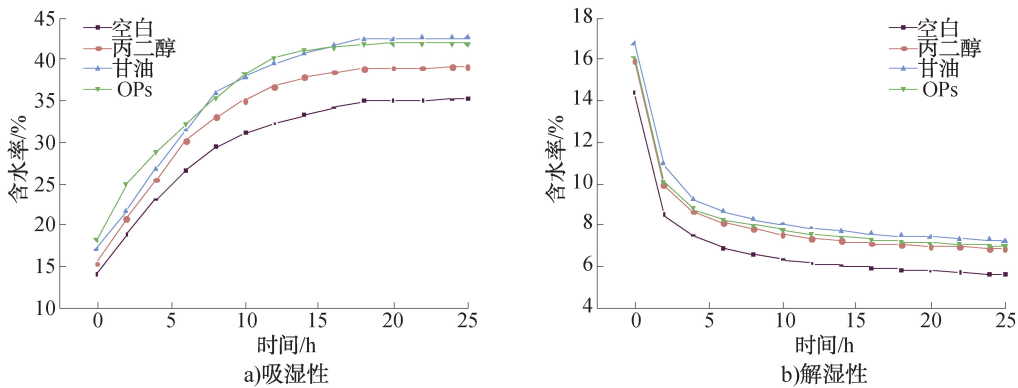


图 5 施加不同保润剂后烟丝的吸湿和解湿曲线

Fig. 5 Moisture absorption and desorption curves of tobacco cuts treatbd with different humectants

和 OPs 组烟丝的含水率分别达 35.83%、38.99%、42.60%和 41.93%。由图 5b) 可知,在低湿度环境下,所有样品的含水率均在前 5 h 内呈现相同的下降趋势,在 24 h 后趋于稳定,此时空白组烟丝、丙二醇组烟丝、甘油组烟丝和 OPs 组烟丝的含水率分别达 6.60%、6.86%、7.26%和 6.98%。

无论在低湿度还是高湿度的环境下,施加了甘油、丙二醇、OPs 的烟丝样品吸湿和解湿性均高于空白组,且施加 OPs 的烟丝样品的吸湿和解湿性略高于丙二醇组,证明施加 OPs 能够有效增强烟丝的保水能力^[21]。多糖类保湿剂通常通过以下两种方式影响烟丝:其一,它们渗透到烟丝组织的内部,利用其丰富的功能基团与水分子形成氢键,从而有效保持水分;其二,它们可在烟丝表面形成一层膜,阻止水分的流失。结合表面微观结构可知,OPs 可能主要通过渗透作用进入烟丝组织内部以起到保润的效果。

2.3.2 吸湿解湿动力学模型 低湿度和高湿度环境下不同动力学模型的拟合结果分别见表 1 和表 2。由表 1 可知,Page 模型的 $R^2>0.99$,表明该模型的拟合效果较好。Lewis 和 Henderson&Pabis 模型的 $R^2<0.99$,表明二者的拟合效果均较差。由表 2 可知,Page、Lewis 和 Henderson&Pabis 模型的 R^2 均 >0.98 ,表明烟丝的解湿行为可以用多种模型进行拟合。综合结果来看,Page 模型能够更准确反映不同湿度环境下烟丝的水分变化规律。

选择 Page 模型拟合参数来描述施加不同保润剂后烟丝在高湿度和低湿度环境下的水分吸附和脱附行为,结果见表 3。以脱附为例,施加不同保润剂的干燥速率常数各异。在环境温湿度相同的条件下,干燥速率常数的大小能反映样品自身持水能力的强弱。对于未添加保润剂的空白组,其干燥速率常数最大,为 0.739 5,丙二醇组和 OPs 组次之,甘油组最低,其 k 值分别下降了 3.3%、7.5%、13.9%,表明外加保润剂可有效增加烟丝的保润能力。

2.4 OPs 热解行为分析

OPs 的 TG 和 DTG 曲线如图 6 所示。由图 6 可知,OPs 的热解过程主要分为 4 个阶段:阶段 I 中 (30~160 ℃),OPs 的最大失重速率达 1.27 %/min,失重占比为 4%,主要源于其内部水分的蒸发,这表明 OPs 中含有一定水分,证实了其具有亲水性。阶段 II 中 (190~270 ℃),OPs 的最大失重速率为 8.54 %/min,失重占比为 23%,是主要质量损失阶段。在这一阶段,多糖内部的糖苷键开始断裂,并伴随大量挥发性成分的释放。阶段 III 中 (270~400 ℃),OPs 的最大失重速率达 10.19 %/min,对应 OPs 中纤维素和木质素的热解,表明随着温度升高,多糖进入深度裂解阶段,释放出更多挥发性成分。第 IV 阶段 (400~800 ℃),OPs 的残余质量稳定为 19.89%,残留物主要为多糖热解后的碳化骨架,表明 OPs 在高温下具有良好的热稳定性。

表 1 低湿度环境下不同动力学模型的拟合结果

Table 1 Fitting results of different kinetic models under the low-humidity conditions

样品	Page 模型		Lewis 模型		Henderson&Pabis 模型	
	R^2	χ^2	R^2	χ^2	R^2	χ^2
空白	0.999 1	6.07E-05	0.961 9	2.61E-03	0.960 1	2.74E-03
丙二醇	0.999 3	5.20E-05	0.972 8	1.90E-03	0.971 3	2.00E-03
甘油	0.999 0	6.84E-05	0.976 1	1.69E-03	0.974 9	1.77E-03
OPs	0.998 7	9.20E-05	0.971 2	2.00E-03	0.969 7	2.11E-03

表 2 高湿度环境下不同动力学模型的拟合结果

Table 2 Fitting results of different kinetic models under the low-humidity conditions

样品	Page 模型		Lewis 模型		Henderson&Pabis 模型	
	R^2	χ^2	R^2	χ^2	R^2	χ^2
空白	0.998 7	1.32E-04	0.991 9	8.34E-04	0.992 8	7.52E-04
丙二醇	0.999 0	1.06E-04	0.987 7	1.30E-03	0.989 0	1.17E-03
甘油	0.997 0	3.43E-04	0.972 1	3.24E-03	0.975 7	2.82E-03
OPs	0.993 8	6.36E-04	0.987 0	1.34E-03	0.986 8	1.36E-03

表3 Page模型的吸湿解湿拟合参数

Table 3 Fitting parameters of the Page model of moisture absorption and desorption

样品	吸附		脱附	
	<i>k</i>	<i>n</i>	<i>k</i>	<i>n</i>
空白	0.107 3	1.195 4	0.739 5	0.536 4
丙二醇	0.099 0	1.275 5	0.714 9	0.575 0
甘油	0.060 4	1.451 7	0.636 6	0.612 0
OPs	0.113 3	1.212 0	0.684 5	0.546 4

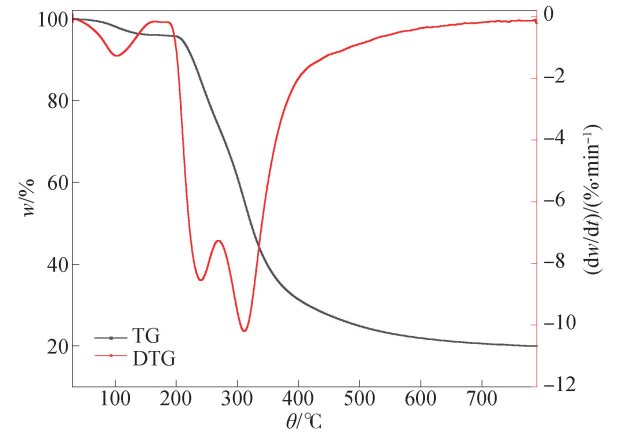


图6 OPs的TG和DTG曲线

Fig. 6 TG and DTG curves of OPs

OPs的热裂解产物及其相对含量见表4。由表4可知,OPs在350℃和900℃热裂解过程中共生成46种芳香物质,主要包括糠醛、5-羟甲基糠醛、乙二醛甲酯、2-呋喃甲醇、呋喃醇、DDMP、1,6-脱水- α -D-半乳呋喃糖、1,6-脱水- β -D-吡喃葡萄糖、2,5-二甲基吡嗪、愈创木酚、4-乙基愈创木酚等挥发性成分。在350℃热裂解过程中,中间体1,6-脱水- β -D-吡喃葡萄糖的相对含量最高,达56.04%,其主要源于高温下多糖链糖苷键的断裂,以及半纤维素、纤维素协同热解生成的中间产物;而900℃热裂解过程中,糖类完全分解,裂解路径转向美拉德反应、脱氧芳构化及脂肪酸重组,生成2,5-二甲基吡嗪、愈创木酚、4-乙基愈创木酚等产物。

此外,350℃时的热裂解产物共28种,除糖类产物外,醛类相对含量最高,为21.16%,其中5-羟甲基糠醛相对含量最大,为18.26%。5-羟甲基糠醛作为重要的香气前体物质,可增加烟气的烤烟香及焦甜香,对卷烟的加香效果具有重要作用^[22-23]。900℃时的热裂解产物共37种,其中酚类相对含量

表4 OPs的热裂解产物及其相对含量

Table 4 Pyrolysis products of OPs and their relative contents

保留时间/min	产物名称	相对含量/%	
		350℃	900℃
1.896	丙酮	0.79	0.36
2.241	2,3-丁二酮	0.93	0.43
2.343	乙二醛甲酯	1.47	0.97
2.654	甲酸	0.34	0.09
3.033	乙酸	1.97	0.09
3.225	1-羟基-2-丙酮	0.94	0.25
4.933	2-氧代-甲酯丙酸	0.42	0.09
5.149	1-环丙基-2-(1-吡咯烷基)-乙酮	0.45	0.13
5.504	2,5-二氢-3,4-二甲基-呋喃	0.38	—
5.641	糠醛	1.76	0.91
6.804	2-呋喃甲醇	1.01	—
7.541	苯甲醛	—	11.23
8.947	2,5-二甲基吡嗪	—	13.13
9.251	2-乙酰呋喃	—	2.87
9.391	5-甲基-2-呋喃甲醛	0.37	—
9.852	吡咯啉酮	—	1.84
9.943	苯乙醛	—	5.62
10.15	甲基吡咯	—	3.11
10.741	2-乙酰基吡咯	—	4.38
11.212	3-甲基-1,2-环戊二酮	0.30	—
11.245	愈创木酚	—	7.04
11.658	苯酚	—	5.11
11.75	邻甲酚	—	3.83
11.931	呋喃醇	1.55	—
12.327	2-糠酸甲酯	0.69	0.23
12.467	左旋葡萄糖苷酮	0.83	—
12.652	1-丁基吡咯	—	3.52
12.667	戊醛	0.68	0.31
13.143	麦芽酚	0.63	2.23
13.357	2-乙基吡啶	—	4.82
13.413	3-顺式-甲氧基-5-反式-甲基-1R-环己醇(DDMP)	2.05	0.46
14.004	六氢-1-吡啶乙酸	0.36	0.02
14.198	1,4:3,6-二氢- α -D-吡喃葡萄糖	2.00	0.33
14.365	3,5-二羟基-2-甲基-4H-吡喃-4-酮	0.40	0.12
14.679	4-乙基愈创木酚	—	6.72
14.776	5-羟甲基糠醛	18.26	1.13
15.235	苯乙酮	—	5.37
15.725	3-顺式-甲氧基-5-反式-甲基-1R-环己醇	1.29	0.46
15.921	甲基苯乙酮	—	2.92
16.544	香兰素	—	2.26
16.926	γ -辛内酯	—	3.62
17.252	(E)-3-己烯酸	0.47	0.07
17.284	γ -壬内酯	—	3.93
17.414	甲基B-D-吡喃葡萄糖苷	0.65	—
19.008	1,6-脱水- β -D-吡喃葡萄糖	56.04	—
19.368	1,6-脱水- α -D-半乳呋喃糖	2.97	—

注:—表示未检出。

为 24.93%,吡嗪类、吡咯类、醛类、酮类的相对含量分别为 13.13%、12.85%、18.07%和 9.33%。随着温度的升高,OPs 热裂解产物中的醛类相对含量下降,而酮类、吡啶类、吡嗪类、酚类相对含量上升,推测高温下的美拉德反应、木质素脱甲氧基等途径生成了具有坚果香气的 2,5-二甲基吡嗪、烟熏香的愈创木酚等成分,提升了卷烟香气丰富性及改善感官舒适度^[24-25]。

3 结论

本文系统研究了 OPs 作为新型天然保润剂在烟草中的应用潜力,揭示了其单糖组成、保润性能、热解行为等,得到如下结论:OPs 丰富的羟基和碳链结构为其保润性能提供了结构基础;OPs 通过渗透作用进入烟丝内部形成氢键网络,显著提升结合水占比,有效抑制了烟丝表面收缩;Page 模型中,OPs 组的干燥速率常数($k = 0.6845$)较空白组降低了 7.5%,证实 OPs 具有良好的保润性能;OPs 在高温下具有良好的热稳定性,可在热裂解过程中生成 5-羟甲基糠醛、呋喃醇、2,5-二甲基吡嗪等具有烤烟香、焦甜香、坚果香等芳香味的物质。综上所述,OPs 凭借天然来源、绿色安全及“保润-增香”双功能特性,展现出替代传统保润剂的潜能。

参考文献:

- [1] 雷声,刘秀明,蒋举兴,等.天然多糖对烟草保润效果的影响及动力学研究[J].食品与机械,2020,36(7):28-32,38.
- [2] LEI S, LIU X M, JIANG J X, et al. Effect of natural polysaccharide on moisture retention capacity and moisture kinetic of tobacco[J]. Food & Machinery, 2020, 36(7):28-32,38.
- [3] 张劲,程柏杰,张晓宇,等.非对称 POSS 多功能纳米杂化材料制备与烟草抗湿性研究[J].功能材料,2023,54(12):12105-12112.
- [4] ZHANG J, CHENG B J, ZHANG X Y, et al. Preparation of asymmetric POSS multifunctional nano-hybrid materials and study on moisture resistance of tobacco[J]. Journal of Functional Materials, 2023, 54(12):12105-12112.
- [5] LIANG J K, ZHANG D D, CAO Y, et al. Insight into pyrolysis mechanism of 1, 2-propylene glycol: Based on density functional theory and wavefunction analysis[J].

- Journal of Molecular Graphics and Modelling, 2022, 116:108277.
- [4] DAI Y J, XU J, ZHU L J, et al. Mechanism study on the effect of glycerol addition on tobacco pyrolysis[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2021, 157:105183.
- [5] 舒俊生.降低卷烟主流烟气中羰基化合物和一氧化氮研究[D].无锡:江南大学,2010.
- [6] SHU J S. Study on the reduction of carbonyl compounds and nitric oxide in mainstream cigarette smoke [D]. Wuxi:Jiangnan University, 2010.
- [7] WANG H Y, LAI M, LI H Y, et al. Moisturizing and aroma-enhancing effects of low molecular weight fenugreek polysaccharides in cigarettes[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 259:129320.
- [8] 张峰,谢全灵,余志强,等.珊瑚藻多糖酶法提取工艺优化及其在卷烟中的应用[J].中国烟草科学,2021,42(6):79-85.
- [9] ZHANG F, XIE Q L, YU Z Q, et al. Optimization of enzymatic extraction process of coralline polysaccharides and its application in cigarette [J]. Chinese Tobacco Science, 2021, 42(6):79-85.
- [10] LIU H, XIONG W J, HE L, et al. Moisturizing and aroma enhancing effects of polysaccharides during pyrolysis[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2023, 12:100609.
- [11] 李慧,岳柯昕,王其凤,等.秋葵属植物多糖的研究进展[J].食品工业,2024,45(7):181-185.
- [12] LI H, YUE K X, WANG Q F, et al. Research advances on okra polysaccharides [J]. The Food Industry, 2024, 45(7):181-185.
- [13] 朱彬娜,孙佳颖,胡国盼,等.黄秋葵多糖的吸湿保湿性能研究[J].湖南农业科学,2018(11):98-100.
- [14] ZHU B N, SUN J Y, HU G P, et al. Hygroscopicity and moisture-retention capacity of polysaccharose from okra [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2018(11):98-100.
- [15] 王小秋,仇亮,翟彩娇,等.黄秋葵多糖提取、分离纯化及结构分析方法研究进展[J].浙江农业科学,2023,64(3):694-704.
- [16] WANG X Q, QIU L, ZHAI C J, et al. Research progress on extraction, separation, purification and structure analysis methods of okra polysaccharide [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2023, 64(3):694-704.
- [17] 檀植倩,王晓晴,杨兆欣,等.木瓜蛋白酶水解及黏质沙雷菌发酵对海参卵多糖结构及益生特性的影响[J].中国食品学报,2025,25(4):83-92.
- [18] TAN X Q, WANG X Q, YANG Z X, et al. Effects of papain hydrolysis and *Serratia marcescens* fermentation on the structures and prebiotic characteristics of sea cucumber ovum polysaccharides [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(4):83-92.
- [19] FAN W P, TIAN H Y, CHEN H L, et al. Moisture

property and thermal behavior of two novel synthesized polyol pyrrole esters in tobacco[J]. ACS Omega, 2023, 8(5):4716-4726.

[14] 张改红,许航,杜帅,等. 麦芽酚- β -D-葡萄糖苷的稳定性及其在卷烟加香中的应用[J]. 轻工学报, 2024, 39(5):102-108.

ZHANG G H, XU H, DU S, et al. The stability of maltol- β -D-glucoside and its application in cigarette flavoring[J]. Journal of Light Industry, 2024, 39(5):102-108.

[15] LIU J, ZHAO Y P, WU Q X, et al. Structure characterisation of polysaccharides in vegetable “okra” and evaluation of hypoglycemic activity[J]. Food Chemistry, 2018, 242:211-216.

[16] AL-SHAWI A A A, HAMEED M F, HUSSEIN K A, et al. Review on the “biological applications of okra polysaccharides and prospective research”[J]. Future Journal of Pharmaceutical Sciences, 2021, 7(1):102.

[17] YUAN Q, LIN S, FU Y, et al. Effects of extraction methods on the physicochemical characteristics and biological activities of polysaccharides from okra (*Abelmoschus esculentus*) [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 127:178-186.

[18] 王川林,刘浩文,刘嘉轩,等. 栅藻多糖的纯化、结构表征及抗氧化活性研究[J]. 饲料研究, 2025, 48(13):73-79.

WANG C L, LIU H W, LIU J X, et al. Study on purification, structural characterization, and antioxidant activity of *Scenedesmus* polysaccharides [J]. Feed Research, 2025, 48(13):73-79.

[19] ZHANG C L, ZHAO F S, LI R H, et al. Purification, characterization, antioxidant and moisture-preserving activities of polysaccharides from *Rosa rugosa* petals[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 124:938-945.

[20] 贾学伟,马兵杰,崔春,等. 丙二醇添加量对卷烟滤棒中薄荷颗粒持香能力的影响[J]. 烟草科技, 2023, 56(11):62-69, 78.

JIA X W, MA B J, CUI C, et al. Effect of propylene glycol addition on aroma retention capacity of peppermint powders in cigarette filter rods[J]. Tobacco Science & Technology, 2023, 56(11):62-69, 78.

[21] 贾学伟,代玉祥,崔春,等. 甘草固体颗粒香料的改良及卷烟加香应用[J]. 中国烟草学报, 2025, 31(1):30-39.

JIA X W, DAI Y X, CUI C, et al. Improvement of licorice solid granular spice and its application in cigarette flavoring[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2025, 31(1):30-39.

[22] 张皓楠,金桂勇,席高磊,等. 细辛多糖提纯、保润和热裂解产物研究及应用[J]. 河南农业大学学报, 2022, 56(3):451-459, 470.

ZHANG H N, JIN G Y, XI G L, et al. Research and application of purification, moisture retention and pyrolysis products of *Asarum* polysaccharide[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2022, 56(3):451-459, 470.

[23] 刘欢,楚桂林,何力,等. 多糖的热裂解性质分析及其在卷烟中的应用[J]. 食品与机械, 2020, 36(11):217-222.

LIU H, CHU G L, HE L, et al. Analysis of pyrolytic properties of polysaccharides and its application in cigarette[J]. Food & Machinery, 2020, 36(11):217-222.

[24] 楚文娟,樊文鹏,高子婷,等. 新型保润剂丙二醇吡咯酯的制备及其对再造烟叶保润效果研究[J]. 轻工学报, 2024, 39(2):87-93.

CHU W J, FAN W P, GAO Z T, et al. Preparation of a novel moisturizing agent propylene glycol pyrrolide and its moisturizing effect on reconstructed tobacco leaves[J]. Journal of Light Industry, 2024, 39(2):87-93.

[25] 王嘉梁,马立超,张小利,等. 麦芽糖-色氨酸 Amadori 化合物的合成及其热解作用[J]. 食品科技, 2025, 50(2):252-258.

WANG J L, MA L C, ZHANG X L, et al. Synthesis of typ-fru-glu amadori compound and its pyrolysis properties[J]. Food Science and Technology, 2025, 50(2):252-258.

Study on humectant performance and pyrolytic behavior
of okra polysaccharides in tobacco

ZHANG Junsong¹, HU Yunyi¹, ZHANG Xinlong², WANG Jiaqi¹, YU Guofeng², LIANG Miao¹, ZHANG Xiao¹

1. College of Tobacco Science and Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

2. Technology Center, China Tobacco Shandong Industrial Co., Ltd., Jinan 250014, China

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the application potential of okra polysaccharides (OPs) as a novel green humectant in tobacco and elucidate their dual mechanisms of moisture retention and pyrolysis-induced aroma enhancement. **[Methods]** Multiple detection and analytical techniques were employed to investigate on the monosaccharide composition of OPs, the microstructure of tobacco cut surface, the occurrence state of water, humectant performance, and the mechanism of pyrolysis-induced aroma enhancement. **[Results]** OPs were (下转第 126 页)

biological method were used to screen and identify the dominant aroma-producing strains from its roots, stems and leaves; then, the fermentation conditions were optimized by the single factor test and response surface method ; and volatile oil was extracted by simultaneous distillation extraction (SDE) and subjected to cigarette flavoring evaluation. **【Results】**A total of 38 strains of endophytic bacteria were isolated. Sensory evaluation confirmed that strain J-3-6 had the best aroma quality, which was identified as *Pantoea ananatis* exhibiting a sweet jasmine aroma with indole as the main aroma-producing substance. The optimal fermentation conditions were as follows: lactose mass concentration of 10.2 g/L, yeast extract powder mass concentration of 50.7 g/L, liquid volume of 259 mL, inoculation amount of 7%, initial pH value of 7, fermentation temperature of 26 °C, shaker rotation speed of 180 r/min, and fermentation time of 48 h. Under these conditions, the indole yield was 5.53 times the initial yield. A total of 45 volatile organic compounds were identified in the fermentation system, mainly composed of alcohols, esters and heterocyclic compounds. The aroma characteristics were based on a fresh fruity aroma, integrated with complex floral and woody notes. Cigarette flavoring evaluation showed that the most suitable addition level was 4 µg/cigarette. **【Conclusion】**Optimization of the fermentation conditions for *Pantoea ananatis* J-3-6 by the response surface method significantly enhances indole production, and its metabolites extracted as volatile oils can effectively harmonize tobacco aroma and reduce the offensive odor and irritation of cigarettes.

Key words: *Ocimum × citriodorum*; *Pantoea ananatis*; optimisation of fermentation conditions; microbial aroma production; cigarette flavouring

[责任编辑:王晓波 刘春奎]

(上接第 89 页)

primarily composed of galactose (44.6%), rhamnose (25.8%) and galacturonic acid (15.6%), with abundant hydroxyl functional groups. After the application of OPs, the tobacco cut surface became fuller, with a significant increase in the proportion of bound water under low-humidity conditions (temperature (22±1) °C, relative humidity (32±2)%). The equilibrium moisture content of OPs-treated tobacco under the high-humidity environment (temperature (22±1) °C, relative humidity (84±2)%) and low-humidity conditions was 41.93% and 6.98%, respectively. The drying rate constant ($k = 0.6845$) decreased by 7.5% compared to the blank control group, indicating that its humectant performance was superior to propylene glycol and close to that of glycerol. Pyrolysis analysis revealed that OPs could generate various aromatic substances, including 5-hydroxymethylfurfural, furfuryl alcohol, 2,5-dimethylpyrazine, and guaiacol, helping to enhance the richness of cigarette aroma and improve sensory comfort. **【Conclusion】**OPs possess dual functions of efficient humectant property and pyrolysis-induced aroma enhancement, demonstrating potential to replace traditional polyol-based humectants, thus providing a reference for the development of natural functional tobacco additives.

Key words: okra polysaccharide; humectant performance; pyrolysis; aroma enhancement

[责任编辑:杨晓娟 贾学伟]