

天然多糖对烟草保润效果的影响及动力学研究

Effect of natural polysaccharide on moisture retention capacity and moisture kinetic of tobacco

雷 声¹ 刘秀明¹ 蒋举兴¹ 邵帅臻²

LEI Sheng¹ LIU Xiu-ming¹ JIANG Ju-xing¹ SHAO Shuai-zhen²

周 雪² 张晓鸣² 杨乾栩¹

ZHOU Xue² ZHANG Xiao-ming² YANG Qian-xu¹

(1. 云南中烟工业有限责任公司技术中心, 云南 昆明 650231; 2. 江南大学食品学院, 江苏 无锡 214122)

(1. Technology Center, China Tobacco Yunnan Industrial Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650231, China;

2. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

摘要:以添加蒸馏水和丙二醇的烟丝为对照,比较具有代表性的微生物多糖和海藻多糖在烟丝中的热力学保润效果,并选取3种常见的烟丝动力学模型对烟丝的吸湿和解吸过程进行拟合。结果表明,海带多糖及螺旋藻多糖的保润效果优于丙二醇;Page模型拟合效果最好。根据保润指数综合考虑热力学与动力学因素,螺旋藻多糖、海带多糖和猴头菇多糖具有较优的保润效果。低场核磁表明,与添加蒸馏水和丙二醇的烟丝相比,添加3种较优保润剂的烟丝化学结合水含量大幅增加,烟丝中的水分更不易失去。

关键词:天然多糖;螺旋藻多糖;海带多糖;猴头菇多糖;保润性能;低场核磁

Abstract: Thermodynamic moisture retention properties of microbial polysaccharides and seaweed polysaccharides were investigated as compared with water and propylene glycol. Then three common dynamic models of tobacco were selected to fit the hygroscopic and desorption processes of tobacco. The results showed that the moisture retention of *Laminaria japonica* polysaccharides and *Spirulina platensis* polysaccharides was significantly better than that of propylene glycol, and page model was the best. Considering the thermodynamic and kinetic factors according to the moisturizing index, *Laminaria japonica*, *Spirulina platensis* and *Hericium erinaceus* polysaccharides were considered to have better moisturizing effect. Low field nuclear

magnetic results showed that the addition of aforementioned three polysaccharides increased the chemically bound water content in tobacco as compared with the addition of water and propylene glycol, thus the moisture in the tobacco is less likely to be lost.

Keywords: natural polysaccharides; *Spirulina platensis* polysaccharides; *Laminaria japonica* polysaccharides; *Hericium erinaceus* polysaccharides; moisture retention; low field nuclear magnetic

中式卷烟普遍存在烟丝水分散失快、烟气干燥、辛辣、刺喉、甜润感不够等问题^[1]。张安丰等^[2]发现保润剂可以打开烟丝表面的气孔,使组织膨大,结构疏松,减少小沟和褶皱,扩大断面孔隙,增加断面厚度,从而提高烟丝含水率。目前,保润剂仍以多元醇类为主,如甘油、丙二醇、丁二醇等^[3]。而实际应用中,多元醇类保润剂存在保润性时效短,刺激感、干燥感强烈,吸食舒适度改善不明显等缺点,且高温下,甘油、丙二醇等保润剂会发生裂解,生成丙烯醛等有害物质^[4-6]。

天然多糖分子中含有丰富的羟基,易与水分子形成氢键,使烟丝的毛细管吸附作用受到抑制,由化学吸附起主要作用,从而使水分结合更牢固,减少环境条件变化对烟丝水分的影响^[7]。近年来,天然多糖类的保润剂备受关注^[8-9],其中某些海藻多糖和微生物多糖具有独特的化学结构,这些化学结构在具有生理活性的同时具有较好的保润潜力。马伟伟^[10]发现褐藻多糖具有很好的保润性以及生理活性,这些性质与褐藻多糖末端连接的硫酸基团有关。蔡冰娜等^[11]发现螺旋藻多糖中具有较多糖醛基团,这些基团可能是螺旋藻多糖保润性能优异的原因。同时,在烟草中添加天然多糖可增加烟丝香气量,减

基金项目:云南中烟工业有限责任公司科技项目(编号:2017CP06);国家“十三五”重点研发计划(编号:2017YFD0400105)

作者简介:雷声,男,云南中烟工业有限责任公司工程师,博士。

通信作者:杨乾栩(1987—),男,云南中烟工业有限责任公司高级工程师,博士。E-mail: 18314300710@126.com

收稿日期:2020-03-20

少杂气,增加回甜感,但目前关于天然多糖在烟草中的应用还缺乏深入、系统的研究。

研究拟选取几种具有代表性的微生物多糖和海藻多糖,研究其对烟草吸湿保润效果的影响,同时选择3种烟丝吸湿和干燥模型,探寻烟丝吸湿与干燥的最优模型。综合考虑热力学和动力学因素筛选出最佳保润剂,并通过低场核磁技术分析烟丝中水分存在状态,进一步探究天然多糖在烟丝中的保润机理。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

烟丝:云南中烟工业有限责任公司;

虫草、普鲁兰、灵芝、猴头菇、小球藻、螺旋藻、岩藻、海带多糖及 β -酵母葡聚糖:纯度 $>95\%$,西安文竹生物科技有限公司;

丙二醇:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

电子天平:AL204型,梅特勒—托利多仪器有限公司;

电热鼓风恒温干燥箱:BGZ-140型,上海博迅实业有限公司医疗设备厂;

真空干燥箱:DZG-6020型,上海森信实验仪器有限公司;

恒温恒湿培养箱:HWS-150型,上海森信实验仪器有限公司;

低场核磁共振成像分析仪:MesoMR23-060V-I型,苏州(上海)纽迈电子科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品预处理 分别将微生物多糖和海藻多糖置于真空干燥箱中,于 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 0.01 MPa 真空度下干燥 12 h 后保存备用;将烟丝过 20 目筛,除去碎末,放置在 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\text{RH}(60\pm 2)\%$ 的恒温恒湿箱中平衡 48 h 备用。

1.3.2 烟丝初始水分含量测定 根据YC/T 31—1996的烘箱法。

1.3.3 烟丝干基含水率测定 称取适量的多糖,加入蒸馏水配制成质量分数 1.2% 的溶液。将多糖溶液均匀喷洒到烟丝表面,直至多糖含量达烟丝总质量的 0.4% ,同时以添加等量蒸馏水与丙二醇的烟丝作为对照,随后置于 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\text{RH}(60\pm 2)\%$ 的恒温恒湿箱中平衡 72 h 。最后,将所有样品分别放置于 $\text{RH}(84\pm 2)\%$ (高湿)和 $\text{RH}(32\pm 2)\%$ (低湿)的干燥器中,每隔一段时间测定样品的水分增加量,并计算样品的干基含水率^[12]。

1.3.4 烟丝动力学模型筛选

(1) 模型评价方法:将烟丝的干基含水率按式(1)转化为水分比 MR ^[9,13]。

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}, \quad (1)$$

式中:

M_e ——干基含水率, $\%$;

M_t —— t 时刻干基含水率, $\%$;

M_0 ——初始干基含水率, $\%$ 。

采用不同的模型对 $MR-t$ 数据进行拟合,并计算出决定系数(R^2)和均方根误差($RMSE$)。其中, R^2 越接近 1 , $RMSE$ 越小,则说明模型越可靠^[14]。 R^2 和 $RMSE$ 分别按式(2)、(3)计算。

$$R^2 = \sum_i^N \frac{(MR_{pre,i} - \overline{MR_{exp,i}})^2}{(MR_{exp,i} - \overline{MR_{exp,i}})^2}, \quad (2)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_i^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2}, \quad (3)$$

式中:

MR_{exp} ——水分比试验值;

MR_{pre} ——水分比模型预测值;

$\overline{MR_{exp}}$ ——水分比试验值的算术平均值;

N ——试验观察数。

(2) 动力学模型的建立:选取常见的3种模型(Page模型、Newton模型和Wang and Singh模型)对添加不同多糖的烟丝进行吸湿和解吸过程拟合,对各种天然多糖保润剂进行对比分析,筛选出最优模型,常用的烟丝动力学模型如式(4)~(6)所示。

$$\text{Page: } MR = \exp(-kt^n), \quad (4)$$

$$\text{Newton: } MR = \exp(-kt), \quad (5)$$

$$\text{Wang and Singh: } MR = at^2 + bt + 1. \quad (6)$$

1.3.5 保润指数及防潮指数计算 参照文献^[15]的方法,按式(7)、(8)计算保润指数。

$$v = \frac{|M_0 - M_e| \times 1/2}{t_{1/2}}, \quad (7)$$

$$MRI = 2 - \frac{v}{\overline{v}} + \frac{M_e}{\overline{M_e}}, \quad (8)$$

式中:

MRI ——保润指数(其值越大,保润能力越强);

M_0 ——初始干基含水率, $\%$;

M_t —— t 时刻干基含水率, $\%$;

M_e ——平衡时干基含水率, $\%$;

t ——时间, h ;

$t_{1/2}$ ——半衰期时间, h ;

$\overline{v}$ ——各样品 v 的平均值, $\%/h$;

$\overline{M_e}$ ——各样品 M_e 的平均值, $\%$ 。

1.3.6 低场核磁共振(LF-NMR)检测 将添加不同多糖平衡后的烟丝(5 g)置于直径 15 mm 的核磁试管中进行水分状态扫描试验。参数设置:脉冲序列为CPMG序列,采样点数 $37\ 490$,累加次数 8 ,采样重复时间 $2\ 500\text{ ms}$ 。将扫描后的数据进行反演,得出横向弛豫时间(T_2)分布值、弛豫积分面积及其相应占比^[9]。

1.4 数据分析

使用 Origin 9.0 进行模型拟合, IBM SPSS 20(Tukey 法)对数据进行显著性分析, $P < 0.05$ 时存在显著差异。

2 结果与分析

2.1 对烟丝吸湿性能与保润性能的影响

2.1.1 吸湿性能 由图 1 可知, 高湿条件下, 所有烟丝样品的干基含水率均在 0~60 h 内呈现出快速增加的趋势, 60~140 h 内增加速率逐渐变慢, 而后基本达到平衡。与空白烟丝和添加丙二醇的烟丝相比, 添加微生物多糖和海藻多糖并未显著提高烟丝的平衡含水率, 说明在高湿环境(84% RH)下, 这两类多糖保润剂的添加不会明显增加烟草吸湿性。

2.1.2 保润性能 由图 2 可知, 低湿条件下, 烟丝的干基含水率随时间的增加不断下降, 0~12 h 内的解吸速率较快, 12 h 后的解吸速率逐步变缓, 84 h 后基本达到平衡。添加丙二醇烟丝的平衡含水率为 7.50%, 显著高于空白烟丝(6.99%), 说明丙二醇具有良好的保润性能。添加不同微生物多糖的烟丝平衡含水率由大到小依次为猴头菇多糖> β -酵母葡聚糖>丙二醇>普鲁兰多糖>灵芝多糖~空白对照>虫草多糖。添加猴头菇多糖烟丝的平衡

含水率显著高于添加虫草多糖烟丝的, 说明猴头菇多糖在烟丝中的保润性能明显优于虫草多糖, 可能是由于猴头菇多糖和虫草多糖在分子量、单糖组成和羟基数量等方面存在差异。添加猴头菇多糖、 β -酵母葡聚糖以及丙二醇烟丝的平衡含水率差异不显著, 但添加猴头菇多糖的烟丝平衡含水率显著高于空白对照的, 其保润能力与丙二醇相当。

添加不同海藻多糖的烟丝平衡含水率由大到小依次为海带多糖>螺旋藻多糖>小球藻多糖~岩藻多糖>丙二醇>空白对照。添加海带多糖和螺旋藻多糖的烟丝平衡含水率分别为 8.58%, 8.05%, 显著高于添加丙二醇和其他海藻多糖的, 说明海带多糖和螺旋藻多糖具有比丙二醇更好的保润性, 可能是因为海带多糖和螺旋藻多糖不仅含有大量的羟基, 还含有较多吸湿性更强的酸性基团。综上, 海带多糖和螺旋藻多糖在烟丝中的保润效果优于传统保润剂丙二醇。

2.2 吸湿、解吸动力学模型

2.2.1 烟丝动力学模型筛选 由表 1 可知, 模型的 $R^2 > 0.94$, 说明 3 种模型的拟合效果均较好, 其中 Page 模型的 R^2 最大, RMSE 最小, 其拟合效果最好。

由表 2 可知, Page 模型和 Newton 模型的 $R^2 > 0.98$,

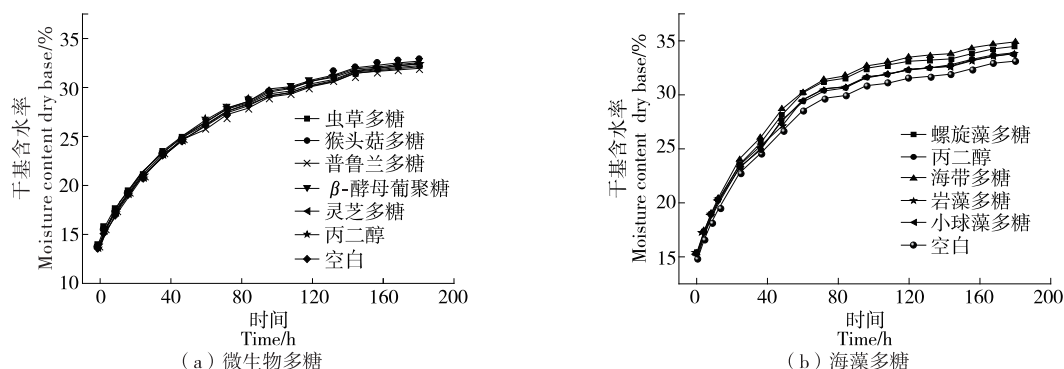


图 1 天然多糖在烟丝中的吸湿曲线

Figure 1 The moisture absorption curves of different natural polysaccharides in tobacco [22 °C, RH (84±2)%]

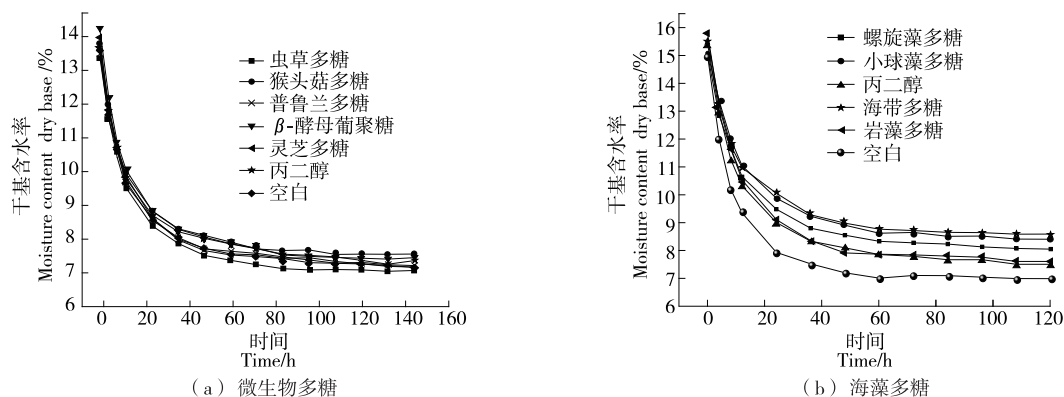


图 2 天然多糖在烟丝中的解吸曲线

Figure 2 The moisture retention curves of different natural polysaccharides in tobacco [22 °C, RH (32±2)%]

说明这两种模型的拟合效果均较优,其中 Page 模型的拟合效果最优,能较好地反映烟丝的解吸过程。

综上,吸湿和解吸过程均以 Page 模型为最佳,最高模型拟合度 R^2 可达 0.999 1, $RMSE$ 低至 0.009 6,说明该模型可以较精确地描述和预测烟丝在不同湿度环境中的

水分变化规律(动力学过程),具有较高的参考应用价值。

2.2.2 最佳模型拟合参数 由表 3、4 可知,各烟丝样品的 k 值差异显著,说明 k 值与样品自身特性有关。吸湿状态下,灵芝多糖和小球藻多糖的 k 值最小,普鲁兰多糖和螺旋藻多糖的 k 值最大;解吸状态下,虫草多糖和岩藻

表 1 不同模型的烟丝吸湿拟合结果

Table 1 Fitting results of different models about moisture absorption in tobacco

多糖来源	多糖种类	Page 模型		Newton 模型		Wang and Singh 模型	
		R^2	$RMSE$	R^2	$RMSE$	R^2	$RMSE$
微生物	虫草多糖	0.997 3	0.017 5	0.997 2	0.018 0	0.969 9	0.058 3
	猴头菇多糖	0.996 8	0.018 9	0.996 4	0.020 1	0.969 9	0.057 9
	普鲁兰多糖	0.995 2	0.023 0	0.994 2	0.025 2	0.965 7	0.061 2
	β -酵母葡聚糖	0.996 9	0.018 8	0.996 8	0.018 9	0.974 4	0.053 7
	灵芝多糖	0.996 7	0.019 2	0.996 8	0.018 9	0.976 7	0.051 2
海藻	螺旋藻多糖	0.997 8	0.015 6	0.997 1	0.018 1	0.950 8	0.074 0
	海带多糖	0.998 7	0.012 0	0.998 0	0.014 8	0.954 2	0.071 7
	岩藻多糖	0.997 2	0.017 6	0.996 5	0.019 7	0.956 8	0.069 3
	小球藻多糖	0.997 5	0.016 7	0.997 0	0.018 2	0.957 7	0.068 8

表 2 烟丝解吸拟合结果

Table 2 Fitting results of different models about moisture retention in tobacco

多糖来源	多糖种类	Page 模型		Newton 模型		Wang and Singh 模型	
		R^2	$RMSE$	R^2	$RMSE$	R^2	$RMSE$
微生物	虫草多糖	0.998 8	0.011 1	0.991 9	0.029 2	0.615 9	0.200 6
	猴头菇多糖	0.998 2	0.013 4	0.988 0	0.034 9	0.576 8	0.207 4
	普鲁兰多糖	0.997 9	0.014 4	0.984 2	0.039 7	0.576 7	0.205 1
	β -酵母葡聚糖	0.997 9	0.014 7	0.986 7	0.036 8	0.577 4	0.207 0
	灵芝多糖	0.998 0	0.013 8	0.983 0	0.040 8	0.549 5	0.209 7
海藻	螺旋藻多糖	0.999 0	0.010 1	0.990 1	0.031 7	0.682 0	0.179 6
	海带多糖	0.997 7	0.015 1	0.986 6	0.036 4	0.625 2	0.192 7
	岩藻多糖	0.998 9	0.010 7	0.993 4	0.025 9	0.651 7	0.188 0
	小球藻多糖	0.999 1	0.009 6	0.989 9	0.031 5	0.618 1	0.193 9

表 3 Page 模型的烟丝吸湿拟合结果

Table 3 Fitting results of Page models about moisture absorption in tobacco

多糖来源	多糖种类	k	n
微生物	虫草多糖	0.023 5	0.964 9
	猴头菇多糖	0.024 2	0.952 1
	普鲁兰多糖	0.025 7	0.932 6
	β -酵母葡聚糖	0.022 0	0.970 1
	灵芝多糖	0.020 5	0.980 6
藻类	螺旋藻多糖	0.030 1	0.940 6
	海带多糖	0.028 8	0.946 0
	岩藻多糖	0.028 2	0.942 3
	小球藻多糖	0.027 3	0.950 3

表 4 Page 模型的烟丝解吸拟合结果

Table 4 Fitting results of Page models about moisture retention in tobacco

多糖来源	多糖种类	k	n
微生物	虫草多糖	0.117 4	0.812 9
	猴头菇多糖	0.132 1	0.776 2
	普鲁兰多糖	0.135 9	0.749 8
	β -酵母葡聚糖	0.134 3	0.768 2
	灵芝多糖	0.143 0	0.737 4
海藻	螺旋藻多糖	0.130 4	0.787 1
	海带多糖	0.152 3	0.761 2
	岩藻多糖	0.127 8	0.818 2
	小球藻多糖	0.147 3	0.773 6

多糖的 k 值最小,普鲁兰多糖和海带多糖的 k 值最大。热力学过程所反映的平衡含水率与动力学过程 Page 模型拟合的参数 k 值并不一致,可能是平衡含水率反映了某种样品保持水分的能力,而 k 值反映了某种样品水分散失或是吸收速率的快慢^[16]。

2.3 热力学及动力学保润效果的综合评价

由图 3 可知,螺旋藻多糖、猴头菇多糖和海带多糖的 MRI 大于其他多糖的,说明其保润性能优于其他多糖。

2.4 天然多糖对烟丝水分分布的影响

根据不同种类多糖在烟丝中的保润效果,选取了 4 种多糖进行低场核磁共振分析,其反演谱图如图 4 所示。

由图 4 可知,低湿条件下,各样品的 T_{21} 、 T_{22} 和 T_{23} 峰面积明显减小,说明烟丝中的水分含量急剧减少。同时,低湿条件的烟丝反演谱图中出现了一些杂峰,可能是因为烟丝水分含量过低,烟丝中的脂肪酸、甾醇、萜类等物质对峰信号产生了干扰^[17]。

由图 5 可知,当烟丝解吸达到平衡时,添加多糖的烟丝中化学结合水比例高于空白烟丝,这是因为多糖中含有羟基和羧基等亲水基团,可以通过氢键束缚烟丝中的

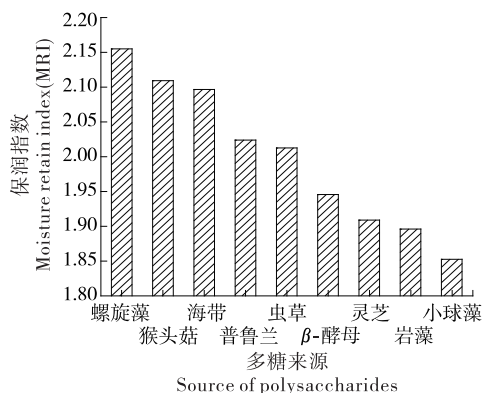


图 3 天然多糖的保润指数

Figure 3 Moisture retention index of natural polysaccharides

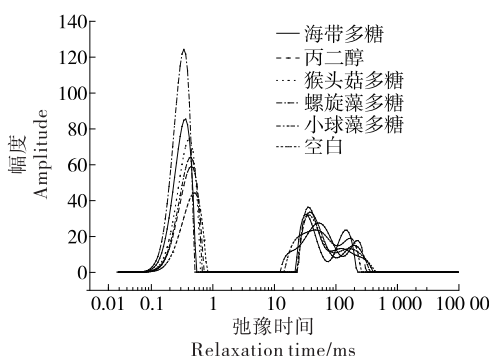


图 4 添加不同天然多糖烟丝的横向弛豫时间分布曲线
Figure 4 The distribution curve of transverse relaxation time of tobacco with different natural polysaccharides [22 °C, RH (32±2)%]

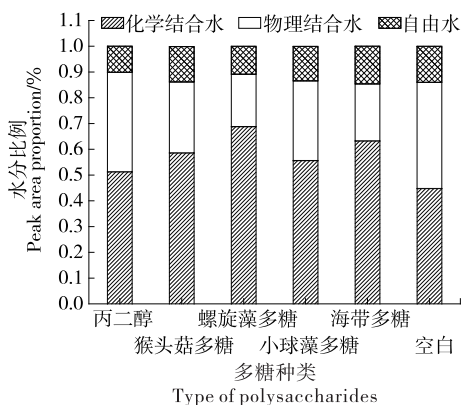


图 5 添加不同天然多糖烟丝的峰面积占比

Figure 5 Peak area proportion of tobacco samples with different natural polysaccharides [22 °C, RH (32±2)%]

水分,增加烟丝内的化学结合水。此外,烟丝中含有较多的物理结合水,说明添加多糖烟丝的保润性不仅与化学吸附作用有关,在一定程度上还与物理吸附作用有关。烟丝的物理吸附作用取决于毛细管作用,而天然多糖大都具有一定的成膜性,容易将烟丝的毛细管堵塞,从而减小烟丝的毛细管作用,影响其物理吸附作用。不同多糖的成膜性能不同,故其物理吸附作用不同。螺旋藻多糖、海带多糖和猴头菇多糖的化学结合水含量最多,与解吸过程的平衡含水率结果一致;空白对照和添加丙二醇的烟丝具有最多的物理结合水,可能是小分子物质对表面以及截面的孔隙影响最小,使得这部分水分能够完整地以物理结合水的方式存在于烟丝中^[3,9]。

3 结论

结果表明,不同种类天然多糖对烟丝的保润性能效果不同,其中添加螺旋藻多糖、海带多糖和猴头菇多糖的烟丝保润性能显著提升,且优于添加丙二醇的。通过对 3 种常见烟丝吸湿和解吸动力学模型进行非线性拟合,发现 Page 模型为描述烟丝水分变化过程的最佳模型。根据保润指数筛选出保润性能较优的多糖为螺旋藻多糖、海带多糖和猴头菇多糖。通过低场核磁共振技术进一步明确了天然保润剂提升烟丝保润性能的原因是两者的加入能增加烟丝中化学结合水含量,从而使烟丝中的水分不易散失。新型烟用保润剂的开发需将烟丝的保润效果与烟丝抽吸时感官品质相结合,可进一步研究烟丝中添加螺旋藻多糖、猴头菇多糖和海带多糖后,烟丝的感官品质变化。

参考文献

- [1] 石怀彬. 中式卷烟保润技术研究的几点思考[C]//中国烟草自主创新高层论坛文集. 武汉: 国家烟草专卖局, 2007: 594-599.

(下转第 38 页)

- [6] IKEDA S, FUNAMI T, ZHANG G. Visualizing surface active hydrocolloids by atomic force microscopy[J]. Carbohydrate Polymers, 2005, 62(2): 192-196.
- [7] NAKAMURA A, FUJI N, TOBE J, et al. Characterization and functional properties of soybean high-molecular-mass polysaccharide complex[J]. Food Hydrocolloids, 2012, 29(1): 75-84.
- [8] 杨晓泉, 齐军茹, 司华静, 等. 大豆多糖的研究进展及在含乳饮料、米面等食品上的应用[J]. 中国食品添加剂, 2008(3): 135-139.
- [9] 杨慧娇, 蔡志祥, 张洪斌, 等. 水溶性大豆多糖的分子表征和溶液流变学性质[J]. 食品科学, 2016, 37(1): 1-5.
- [10] XIONG Xiao-hui, ZHAO Lu-ping, CHEN Ye-ming, et al. Effects of alkali treatment and subsequent acidic extraction on the properties of soybean soluble polysaccharides[J]. Food and Bioproducts Processing, 2015, 94: 239-247.
- [11] FURUTA H, TAKAHASHI T, TOBE J, et al. Extraction of water-soluble soybean polysaccharides under acidic conditions[J]. Bioscience Biotechnology & Biochemistry, 1998, 62(12): 2 300-2 305.
- [12] 李小林, 孙晓燕. 大豆多糖及酶改性磷脂在食品、饮料及酒类中的应用[J]. 中国食品添加剂, 2009(增刊 1): 237-241.
- [13] NAKAMURA A, YOSHIDA R, MAEDA H, et al. Soy soluble polysaccharide stabilization at oil-water interfaces[J]. Food Hydrocolloids, 2006, 20(2/3): 277-283.
- [14] 卞春, 赵全, 季澜洋, 等. 大豆多糖的功能及应用研究进展[J]. 粮食与油脂, 2015(4): 12-15.
- [15] MURRAY B S. Stabilization of bubbles and foams[J]. Current Opinion in Colloids and Interface Science, 2007, 12(4/5): 232-241.
- [16] 朱昌玲, 孙达峰. 豆渣水溶性多糖的精制及抗氧化活性研究[J]. 中国野生植物资源, 2015(3): 69-71.
- [17] 刘佳维, 周君, 高亚杰, 等. 红参多糖脱蛋白的研究[J]. 食品科技, 2018(7): 188-192.
- [18] LI Wei-wei, ZHAO Hai-bo, HE Zhi-yong, et al. Modification of soy protein hydrolysates by Maillard reaction: Effects of carbohydrate chain length on structural and interfacial properties[J]. Colloids and surfaces B: Biointerfaces, 2015, 138: 70-77.
- [19] KUNARAYAKUL S, THAIPIANIT S, ANPRUNG P, et al. Optimization of coconut protein deamidation using protein-glutaminase and its effect on solubility, emulsification, and foaming properties of the proteins[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 79: 197-207.
- [20] NAKAMURA A, TAKAHASHI T, YOSHIDA R, et al. Emulsifying properties of soybean soluble polysaccharide[J]. Food Hydrocolloids, 2004, 18(5): 795-803.
- [21] CHIVERO P, GOHTANI S, IKEDA S, et al. The structure of soy soluble polysaccharide in aqueous solution[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 35(1): 279-286.
- [22] 李雷, 汪东风, 周小玲, 等. 茶叶多糖食品功能性研究[J]. 茶叶科学, 2006(2): 28-33.
- [23] AN Ya-ping, CUI Bing, WANG Yun-tao, et al. Functional properties of ovalbumin glycosylated with carboxymethyl cellulose of different substitution degree[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 40: 1-8.
- [24] XU Yao, YANG Nan, YANG Ji-xin, et al. Protein/polysaccharide intramolecular electrostatic complex as superior food-grade foaming agent[J]. Food Hydrocolloids, 2019, DOI: 10.1016/j.foodhyd.2019.105474.

(上接第 32 页)

- [2] 张安丰, 刘春波, 申钦鹏, 等. 烟草保润剂的物理保润性能研究[J]. 江西农业学报, 2016, 28(7): 73-77.
- [3] 阮晓明, 王青海, 徐海涛, 等. 新型天然保润剂 PDS 在卷烟中的应用[J]. 烟草科技, 2006(9): 8-10.
- [4] RODGMAN A. Some studies of the effects of additives on cigarette mainstream smoke properties II: Casing materials and humectants[J]. Beiträge zur Tabakforschung International, 2014, 20(4): 279-299.
- [5] 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.
- [6] LAINO T, TUMA C, MOOR P, et al. Mechanisms of propylene glycol and triacetin pyrolysis[J]. Journal of Physical Chemistry A, 2012, 116(18): 4 602-4 609.
- [7] 韩聘. 卷烟吸湿规律及机制研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014: 10-26.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 马伟伟. 海葵子褐藻多糖硫酸酯的分离纯化及生物功能研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2013: 35-58.
- [11] 蔡冰娜, 陈纯馨, 陈忻, 等. 抗氧化钝顶螺旋藻多糖的分离纯化[J]. 食品科学, 2013, 34(23): 83-87.
- [12] 徐迎波, 陈开波, 徐志强, 等. 卷烟烟丝食用蜡复配保润剂的保润性能及应用[J]. 食品与机械, 2017, 33(2): 179-182.
- [13] 殷春燕, 徐志强, 汪华, 等. 贮藏过程中不同保润剂对烟丝保润效果及水分散失动力学的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(1): 96-101.
- [14] 黄锋, 陈清, 王乐, 等. 片烟增湿与干燥的薄层动力学模型[J]. 中国烟草学报, 2014, 20(6): 34-40.
- [15] 楼佳颖, 沙云菲, 吴达, 朱等. 一种烟草保润性能的测试方法: 中国, 105842103 A[P]. 2018-09-25.
- [16] 韩聘, 田兆福, 王宏生, 等. 基于低场核磁共振和环境扫描电镜的卷烟吸湿机制研究[J]. 食品与机械, 2015, 31(4): 14-18.
- [17] 李国富. 烟草油分物质基础研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2015: 3-27.