

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

Moisture retention properties of polygonatum polysaccharide in tobacco and its mechanism

雷 声¹ 刘秀明¹ 李源栋¹ 蒋举兴¹ 曾熠程¹

LEI Sheng¹ LIU Xiu-ming¹ LI Yuan-dong¹ JIANG Ju-xing¹ ZENG Yi-cheng¹

王慧娟² 林 钊² 汪雪娇² 杨乾栩¹

WANG Hui-juan² LIN Chao² WANG Xue-jiao¹ 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:以常见的烟草保润剂丙二醇和水为对照,比较了黄精多糖、葫芦巴多糖、小球藻多糖和灵芝多糖的吸湿保润效果,结果表明黄精多糖具有与丙二醇类似的吸湿性,但其保润效果显著优于丙二醇。以常见薄层干燥模型对烟丝低湿条件下的解吸过程进行非线性拟合,比较干燥速率常数(k)和解吸速率,发现添加黄精多糖的烟丝,干燥速率常数最小,解吸速率最慢。低场核磁(LF-NMR)结果表明,相比于空白烟丝和添加丙二醇的烟丝,黄精多糖的添加使得烟丝中物理结合水含量下降,化学结合水含量显著增加。因此,黄精多糖可以作为一种天然高效的保润剂应用于烟草,防止烟草在贮藏过程中水分的散失。

关键词:多糖;烟草;保润剂;吸湿性;保润性

Abstract: The moisture absorption and moisture retention properties of polygonatum polysaccharides, fenugreek polysaccharides, chlorella polysaccharides and ganoderma lucidum polysaccharides were investigated as compared with propylene glycol and water. The results showed that polygonatum polysaccharides had similar moisture absorption properties as propylene glycol, but its moisture retention was significantly better than that of propylene glycol. Therefore, the desorption process of tobacco under low humidity conditions was fitted nonlinearly by common thin-

layer drying models. It was found that the tobacco added with polygonatum polysaccharides have the lowest drying rate constant and the slowest moisture retention rate. Low field nuclear magnetic (LF-NMR) results showed that, the addition of polygonatum polysaccharides reduced the physical bound water content where as the chemically bound water content in tobacco was increased. Therefore, polygonatum polysaccharides could be used as a natural and efficient humectant in tobacco to prevent the loss of moisture during storage.

Keywords: polysaccharide; tobacco; humectant; moisture absorption; moisture retention

卷烟在加工、贮藏和销售过程中常常经历不同的环境,湿度较高容易引起卷烟霉变,而湿度较低则容易引起卷烟过度失水,导致其质量劣变,进而影响感官抽吸品质。因此,在烟草中加入保润剂以减少加工过程中的造碎,降低环境湿度敏感性,从而改善烟草的感官品质。目前,中国在卷烟生产中通常添加甘油、丙二醇、山梨醇等小分子多羟基化合物作为烟草保润剂,可与周围环境中的水分子形成氢键,从而达到束缚水分子,抑制水分散失的作用,表现出一定的吸湿保润性。但这类小分子保润剂属于单向保润剂,在产品的贮藏过程中保润效果较差^[1]。然而,多糖分子中含有的羟基、羧基和其他亲水性基团,易与水分子形成氢键,从而能结合更多的水分,同时多糖分子链互相缠绕交叉形成致密的网状结构,可抑制水分的散失,表现出很强的保水作用,是一类不可多得的天然保润剂^[2]。

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工程师,博士。E-mail: 18314300710@126.com

收稿日期: 2019-04-03

黄精多糖和葫芦巴多糖属于植物多糖,小球藻多糖属于海洋多糖,灵芝多糖属于微生物多糖。黄精多糖是黄精的主要功能成分,具有一定的保湿效果,已被用于化妆品的制造和生产研究^[3];陶陶等^[4]报道了葫芦巴多糖对烟丝的保湿能力强于丙二醇,且能够改善卷烟抽吸品质;小球藻多糖通常被用作免疫调节剂^[5];陈芝飞等^[6]发现灵芝多糖对卷烟具有较好的物理和感官保润作用,且可降低卷烟的刺激性和杂气,提高卷烟烟气的圆润感与舒适性。但黄精多糖及小球藻多糖在烟草保润方面的应用尚未报道。此外,上述研究仅限于多糖的物理和感官保润,并未对其在烟丝中的保润机制进行深入研究。因此,试验拟选取黄精多糖、葫芦巴多糖、小球藻多糖和灵芝多糖分别作为植物多糖、海洋多糖和微生物多糖的代表性多糖,将其作为烟草保润剂,并对其吸湿保润效果进行评价,筛选出保润性能较好的多糖。从热力学和动力学的角度分析其保润性能的变化规律,并利用LF-NMR技术对烟丝的水分存在状态及迁移变化进行分析,进一步揭示其保润作用机制。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

烟丝:云南中烟工业有限责任公司技术中心;

黄精多糖、灵芝多糖、小球藻多糖、葫芦巴多糖: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。

1.1.2 仪器与设备

电子天平:EL3002 型,梅特勒—托利多仪器(上海)有限公司;

鼓风电热干燥箱: DGG-9070A 型,上海森信实验仪器有限公司;

真空干燥箱: DZG-6020 型,上海森信实验仪器有限公司;

恒温恒湿箱: CTHI-150B 型,施度凯仪器设备有限公司;

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

1.2 试验方法

1.2.1 样品的预处理 将多糖样品置于真空干燥箱中,以变色硅胶为干燥剂,40℃干燥至恒重,保存在干燥器中备用;将烟丝过 20 目筛,置于 22℃、RH(60±2)% 的恒温恒湿箱中平衡 48 h,使平衡后的烟丝湿基含水量在 12.5% 左右。

1.2.2 烟丝中初始水分含量测定 根据 YC/T 31—1996,用烘箱法测定烟丝的含水量。

1.2.3 烟丝中初始水分含量测定

(1) 吸湿性:准确称取一定量预处理好的多糖样品置于已恒重的称量瓶中精确称重,以丙二醇为对照,每个样品设置 3 组平行,置于饱和氯化钾溶液 RH(84±2)% 的干燥器中,每隔一段时间记录样品质量变化,结果取平均值。按式(1)计算吸湿率^[7]。

$$W_1 = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

W_1 ——吸湿率,%;

m_1 ——平衡样品质量,g;

m_0 ——初始样品质量,g。

(2) 保湿性:将所有多糖样品分别配制成 2%(质量分数)的溶液,精确称取 3.0 g 左右于恒重的称量瓶中,以相同质量分数的丙二醇为对照,置于饱和氯化镁溶液 RH(32±2)% 的干燥器中,每隔一段时间称重并记录。每个样品设置 3 组平行,按式(2)计算保湿率^[8]。

$$W_2 = \frac{m_2 - m_1}{m_2} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

W_2 ——保湿率,%;

m_1 ——平衡样品溶液质量,g;

m_2 ——初始样品溶液质量,g。

1.2.4 烟丝体系保润剂吸湿性和保润性的测定 将一定质量的多糖溶液(质量分数 1.2%)均匀喷到预处理好的烟丝样品表面使多糖含量达到烟丝质量的 0.4%,以等量的蒸馏水和丙二醇为对照,将烟丝置于温度(22±1)℃、RH(60±2)% 的恒温恒湿箱中平衡 72 h,然后分别置于 RH(84±2)% 和 RH(32±2)% 的干燥器中,采用差量法计算样品的干基含水率^[9]。

1.2.5 保润剂对烟丝水分散失动力学的影响

(1) 烟丝干燥动力学模型的建立:利用 Origin 9.0 对试验数据进行非线性拟合,建立最佳的烟丝干燥动力学模型,研究保润剂对烟丝水分散失动力学的影响,常用的薄层干燥动力学模型^[10-11]如式(3)~(6)。

$$\text{Henderson-Pabis: } MR = a \exp(-kt), \quad (3)$$

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

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

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}, \quad (6)$$

式中:

M_e ——干基平衡含水量,kg/kg;

M_t —— t 时刻干基含水量,kg/kg;

M_0 ——初始干基含水量,kg/kg;

t ——时间,h;

k ——干燥速率常数;

n ——模型的常数。

对试验所测的样品,分别采用上述3种薄层干燥模型进行非线性拟合[式(3)~(5)],以决定系数(R^2)和均方根误差(RMSE)为统计检验指标, R^2 越接近1说明模型越能更好地解释变量的变异程度,RMSE越小模型越可靠。 R^2 和RMSE分别按式(7)、(8)进行计算。

$$R^2 = \frac{\sum_i^N (MR_{pre,i} - \overline{MR_{exp}})^2}{\sum_i^N (MR_{exp,i} - \overline{MR_{exp}})^2}, \quad (7)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_i^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2}, \quad (8)$$

式中:

MR_{exp} ——试验观测值;

MR_{pre} ——模型预测值;

$\overline{MR_{exp}}$ ——试验观测值的算术平均值;

N ——试验观察数。

(2) 解吸速率的测定:根据拟合得到的最佳模型,分别计算出各样品不同时刻的干基含水率,按式(9)计算 $t_0 \sim t$ 时间段内样品的解吸速率。

$$v_t = - \frac{M_t - M_0}{t - t_0}, \quad (9)$$

式中:

v_t —— t 时刻的解吸速率;

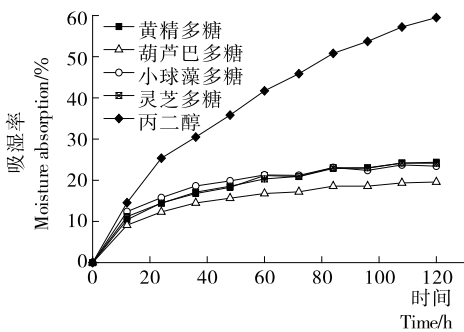
M_t —— t 时刻的干基含水率;

M_0 ——初始干基含水率。

1.2.6 低场核磁共振(LF-NMR)分析 取5g解吸平衡的烟丝样品,置于磁场中心位置的射频线圈中,利用FID调节中心频率,CPMG脉冲序列进行扫描试验。 $TD = 25\,920$, $NS = 32$, $TW = 3\,000$,扫描结束后反演 T_2 分布值和弛豫积分面积。

1.3 数据处理

使用Excel 2016制表,使用Origin 9.0进行非线性拟合和绘图,样品间显著性差异用Duncan法进行多重比较($P < 0.05$)。



(a) 22 °C、RH (84 ± 2)%下吸湿曲线

2 结果与分析

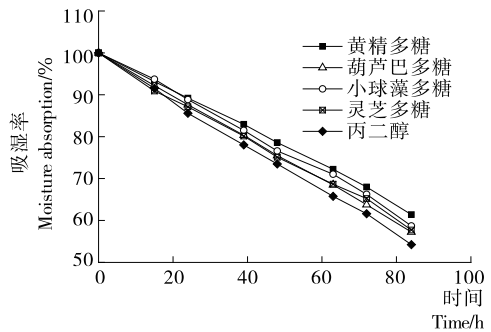
2.1 不同多糖的吸湿保润性能

由图1(a)可知,在RH (84 ± 2)%的条件下,丙二醇的吸湿率明显优于所有多糖,是多糖吸湿率的3倍左右,可能是丙二醇的分子量较小,且1个丙二醇分子中含有2个羟基,羟基易与水分子形成氢键,亲水性很强;多糖中虽含有羟基,但分子量很大,一般在万级以上,有些甚至高达几百万^[12]。随着时间的增加,丙二醇的吸湿率不断增加,黄精多糖、葫芦巴多糖、小球藻多糖、灵芝多糖的吸湿率在前36h随时间的增加迅速增加,36h后基本达到平衡,其中黄精多糖和丙二醇的吸湿性能最好。

由图1(b)可知,在低湿条件下,多糖溶液的质量随着时间的增加不断减少,但多糖的保湿率均高于丙二醇,84h时,各种多糖的保湿率由高到低依次为黄精多糖>小球藻多糖>灵芝多糖>葫芦巴多糖,由于多糖含有大量的羟基,通过氢键作用结合大量的水分子,因此,一般的多糖类物质都具有良好的持水能力^[13]。此外,多糖可以形成网状结构,能够截留更多的水分子^[2],而丙二醇为小分子物质,主要依靠羟基保持体系的水分稳定性,这类化合物虽然具有十分显著的吸湿性,但并无防潮和长效保润作用,黄精多糖持水性优于丙二醇和其他多糖的持水性,可能是黄精多糖具有更多的羟基,可以与水分子形成更多的氢键,从而使水分散失能力减弱。

2.2 不同多糖对烟丝吸湿性和保润性的影响

由图2(a)可知,高湿条件下,由于保润剂的亲水性,添加了保润剂的烟丝的初始含水率高于空白烟丝,其中葫芦巴多糖和丙二醇的初始含水率最大。0~48h烟丝干基含水率迅速上升,48h后烟丝的干基含水率增加速率变慢,120h后基本达到平衡。通过比较发现,添加不同的多糖,烟丝平衡含水率从高到低依次为黄精多糖>葫芦巴多糖>灵芝多糖>小球藻多糖。由此可知,在烟丝体系中黄精多糖具有和丙二醇类似的吸湿性,可能是丙二醇和黄精多糖含有较多的亲水基团,很容易吸收周



(b) RH (32 ± 2)%下解吸曲线

图1 多糖的吸湿、解吸曲线

Figure 1 The moisture absorption curves and moisture retention curves of different polysaccharides

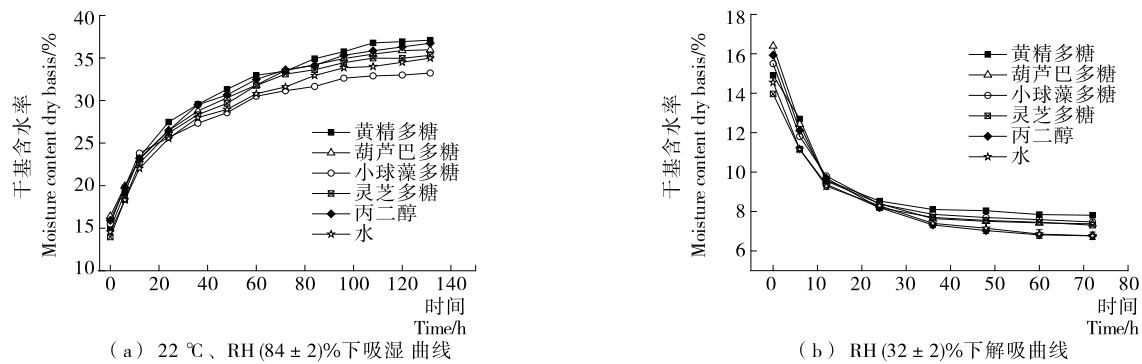


图 2 多糖在烟丝中的吸湿、解吸曲线

Figure 2 The moisture absorption curves and moisture retention curves of tobacco

围环境中的水分子^[4]。

由图 2(b)可知,低湿条件下,随着时间的增加,烟丝的干基含水率持续下降,前 24 h 下降速率较快,72 h 后基本达到平衡,平衡含水率从高到低依次为黄精多糖>葫芦巴多糖>小球藻多糖>灵芝多糖>丙二醇>空白。通过比较发现,丙二醇具有较高的初始含水率,但其失水速率较快,随着时间的延长,添加丙二醇的烟丝平衡含水率与空白相当,说明丙二醇属于单向保润剂,不具有防潮和长效性。黄精多糖的平衡含水率最高,可能是黄精多糖含有多个羟基,并且每个羟基都可以和 1 个或者多个水分子通过氢键与水结合,增加了对水分子的束缚能力,抑制了烟丝中水分的散失。此外,复杂的三维网状结构以及成膜性可以进一步阻止水分的散失,提高烟丝的保润能力^[14]。

由图 1、2 可知,保润剂在纯多糖体系和实际应用体系中的吸湿性和保润性存在一定的差异。由于多糖体系的吸湿性反映的是在高湿条件下多糖自身的吸水能力,而烟丝为毛细管多孔结构,且含有果胶、蛋白等易吸湿的物质,这些物质与保润剂以及烟丝本身与保润剂之间都存在一定的相互作用^[15]。此外,由于多糖溶液中存在大量的游离水,在低湿条件下很容易蒸发,保湿率直线下降[图 1(a)],与烟丝体系的解吸过程存在较大的差别,无法反映多糖分子在烟丝中的保润性。总之,在烟丝中添加

保润剂只是在一定程度影响烟丝本身的吸湿保润机制,在测定多糖在烟丝中的吸湿性和保润性时,应结合实际应用体系。

2.3 不同多糖对烟丝水分散失动力学的影响

2.3.1 烟丝水分散失过程中模型的建立 烟丝样品在低湿度下的曲线拟合结果如表 1 所示。所有情况下, R^2 值>0.90,表明 3 种模型都拟合良好。Page 模型 R^2 最大, RMSE 最小,因此 Page 模型能更好地预测烟丝在低湿度下水分解吸的情况。

Page 模型中拟合得到的模型常数如表 2 所示,在相同的条件下,空白烟丝样品的干燥速率常数 k 值最大,而添加保润剂的烟丝样品的 k 值均小于空白对照的烟丝,黄精多糖的 k 值最小,即添加黄精多糖能更大程度地降低样品的 k 值,进而提高烟丝的保润性。故 k 值不仅与干燥过程的温度和风速有关,样品本身的持水性也会影响 k 值^[16]。

2.3.2 不同多糖对烟丝解吸速率的影响 由图 2 可知,添加了不同多糖的烟丝在 48 h 后含水率变化较慢。因此,根据拟合得到的最佳模型,分别计算出各样品不同时刻的解吸速率,研究 48 h 内添加不同保润剂时烟丝的解吸速率,考察不同的保润剂的添加对烟丝解吸速率的影响。由图 3 可知,低湿条件下,所有烟丝样品初始解吸速率最高,随着时间的延缓解吸速率逐渐减小。保润剂的

表 1 3 种模型拟合统计结果

Table 1 Statistical results obtained from three models of tobacco

级别	Page 模型		Lewis 模型		Henderson-Pabis 模型	
	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
黄精多糖	0.989 06	0.038 78	0.933 00	0.112 54	0.988 55	0.045 60
葫芦巴多糖	0.995 19	0.024 91	0.995 88	0.023 07	0.995 21	0.024 88
小球藻多糖	0.998 80	0.012 30	0.998 33	0.014 52	0.998 07	0.015 61
灵芝多糖	0.998 64	0.013 12	0.998 38	0.014 30	0.998 12	0.015 39
丙二醇	0.998 11	0.015 50	0.996 97	0.019 65	0.996 54	0.020 97
空白	0.996 11	0.021 62	0.986 25	0.040 64	0.984 89	0.042 61

表 2 Page 模型的拟合结果

Table 2 Fitting results of the page model

组别	K	N
黄精多糖	0.034 91	1.449 61
葫芦巴多糖	0.102 40	1.009 15
小球藻多糖	0.118 24	0.922 00
灵芝多糖	0.118 76	0.931 94
丙二醇	0.113 06	0.899 75
空白	0.159 80	0.765 49

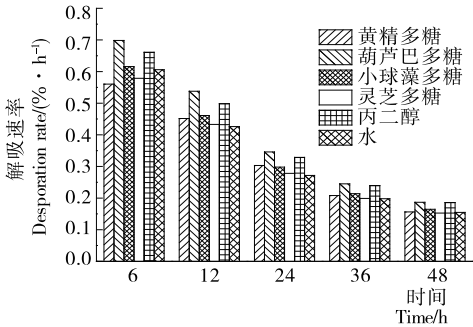


图 3 添加不同保润剂的烟丝在 48 h 内样品的解吸速率
Figure 3 The moisture retention rate of tobacco samples with different humectants within 48 hours

添加不同程度地影响烟丝的解吸过程,添加丙二醇和葫芦巴多糖烟丝的解吸速率最快,添加黄精多糖的烟丝解吸速率最慢。

由图 2(b)、表 1 和图 3 可知,黄精多糖不仅可以提高烟丝解吸的平衡含水率,而且可以降低烟丝解吸时的 k 值和解吸速率,可能是黄精多糖含有多个羟基、羧基以及其他亲水基团,这些基团易于通过氢键缔合邻近的水分子形成更稳定的化学结合水,阻止水分穿过多糖膜,从而形成一层保护屏障。因此,黄精多糖可以作为一种天然的保润剂应用于烟草,不仅可以提高平衡含水率,也可以降低成品烟在干燥环境中水分的散失速率和 k 值。

2.4 低湿条件下黄精多糖对烟丝水分分布与迁移的影响

保润剂对烟草的水分分布及其存在状态有一定程度的影响,比较添加黄精多糖后烟丝在低湿条件下的水分分布状态和构成。烟丝中的水分主要有 3 种,弛豫时间最长的 T_{23} (10~100 ms)受到烟丝干物质束缚力最小,是能够流动的自由水,中间弛豫时间的 T_{22} (1~10 ms)为烟丝中以毛细管吸附等方式截留的物理结合水,弛豫时间最短的 T_{21} (0.1~1.0 ms)是烟丝中干物质分子以氢键、疏水作用等力结合的化学结合水。弛豫时间越短,代表该部分水分子与干物质的结合程度越紧密,自由度越小,束缚力越强;弛豫时间越长,表明该部分水受到的束缚力越弱,流动性越强^[17]。

由图 4 可知,低湿条件下,添加保润剂后烟丝的弛豫时间 T_{23} 较空白烟丝的小,即添加保润剂后烟丝与水的结合程度更紧密,对水分的束缚能力更强。添加黄精多糖的烟丝水分散失时间最长,是因为丙二醇和黄精多糖分子中含有羟基可以与环境中的水分子形成氢键,抑制了烟丝内水分的散失,黄精多糖分子中含有更多的羟基、羧基以及其他亲水性基团,其结合水的能力更强,水分散失所需时间延长。

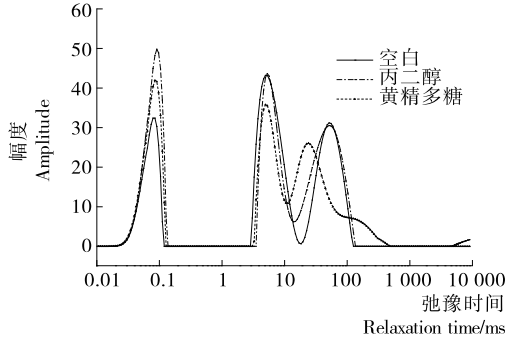


图 4 烟丝样品解吸平衡时的弛豫时间曲线
Figure 4 Transverse relaxation time of tobacco sample [22 °C, RH (32±2)%]

由图 5 可知,添加黄精多糖和丙二醇后,烟丝化学结合水和自由水的比例升高,物理结合水所占比例减少,且相比添加丙二醇的烟丝,添加黄精多糖的烟丝化学结合水含量更高、物理结合水含量更低,是因为黄精多糖的亲水基团较丙二醇多,可以增加烟丝内部的化学结合水。此外,黄精多糖是生物大分子,喷洒在烟丝的表面,具有一定的成膜性,可以堵塞毛细管,毛细管吸附作用被削弱,因此烟丝的物理结合水显著下降。由于化学结合水是烟丝中最稳定的水分存在形式,添加黄精多糖又能显著增加化学结合水的含量,可能正是在低湿条件下,相对于丙二醇,黄精多糖能更大程度地降低水分的散失速率和 k 值,进而提高烟丝的长效保润性的原因。因此,黄精多糖具有优于丙二醇的保润性能。

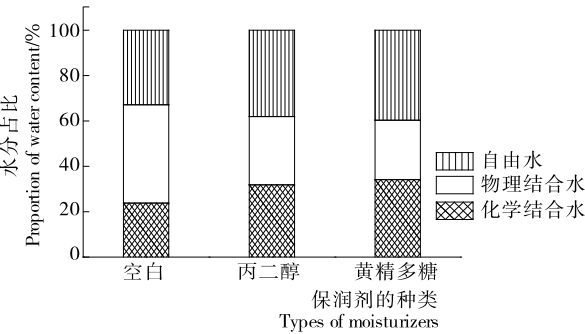


图 5 烟丝样品解吸平衡时的水分组成和占比
Figure 5 Water composition and proportion of tobacco sample [22 °C, RH (32±2)%]

3 结论

研究表明,黄精多糖可减小样品失水过程的 k 值和解吸速率,将黄精多糖作为烟丝保润剂时,其保润效果显著优于丙二醇及其他多糖保润剂;黄精多糖可增加烟丝的化学结合水含量,进而提高烟丝的长效保润能力。因此,黄精多糖可替代丙二醇作为烟草保润剂,防止烟丝在低湿条件下水分的散失。同时,多糖的保润性能也与其结构和链长有关,通过适当的工艺(如酶解、酸降解)改变多糖的链长,可进一步提高其保润性能,改善烟丝中的水分稳定性。

参考文献

- [1] 马晓静,刘新歌,徐志强,等. 槐糖脂的保润性能及其在卷烟中的应用[J]. 安徽农业大学学报, 2017, 44(2): 356-362.
- [2] 陈文,王楠,张民,等. 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.
- [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]. 食品与机械, 2018, 39(5): 221-225.
- [4] 陶陶,贺凡,姬小明,等. 响应面法优化闪式提取葫芦巴多糖及其保润性能研究[J]. 精细化工, 2016, 33(6): 666-673.
- [5] QI Jia, KIM S M. Characterization and immunomodulatory activities of polysaccharides extracted from green alga *Chlorella ellipsoidea*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 95: 106-114.
- [6] 陈芝飞,郝辉,孙志涛,等. 灵芝多糖、提取纯化方法及其作为烟草保润剂的应用: 中国, 103965369A[P]. 2014-08-06.
- [7] WANG Jing, JIN Wei-hua, HOU Yun, et al. Chemical composition and moisture-absorption/retention ability of polysaccharides extracted from five algae[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 57(6): 26-29.
- [8] YAN Heng, CAI Bing, CHENG Yan, et al. Mechanism of lowering water activity of konjac glucomannan and its derivatives[J]. Food Hydrocolloids, 2012, 26(2): 383-388.
- [9] 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.
- [10] ERTEKIN C, YALDIZ O. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 63(3): 349-359.
- [11] DOYMAZ Ibrahim. Drying behaviour of green beans[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 69(2): 161-165.
- [12] 田大昕,冀小雄,毛海波,等. 几种天然多糖的吸湿和保湿性能的初步研究[J]. 化学与生物工程, 2007, 24(10): 46-48.
- [13] 艾绿叶,冯雪研,张昊,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.[2019-02-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.TS.20180918.1705.015.htm>.
- [14] SHAO Ping, CHEN Xiao-xiao, SUN Pei-long. Improvement of antioxidant and moisture-preserving activities of sargassum horneri polysaccharide enzymatic hydrolyzates[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 74: 420-427.
- [15] 韩聃. 卷烟吸湿规律及机制研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014: 10-26.
- [16] 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.
- [17] WEI Shuo, TIAN Bing-qiang, JIA Hong-fang, et al. Investigation on water distribution and state in tobacco leaves with stalks during curing by LF-NMR and MRI[J]. Drying Technology, 2018, 36(4): 1-8.
- [18] 钱静漪,王梦茹,张宁宁,等. 亚抑菌浓度茅苍术挥发油对金黄色葡萄球菌毒力因子表达的抑制作用初步研究[J]. 中国病原生物学杂志, 2014, 9(5): 408-411.
- [19] OSTYN A, GUILLIER F, PRUFER A L, et al. Intra-laboratory validation of the Ridascreen® SET total kit for detecting staphylococcal enterotoxins SEA to SEE in cheese[J]. Letters in Applied Microbiology, 2011, 52(5): 468-474.
- [20] QIU Jia-zhang, FENG Hai-hua, LU Jing, et al. Eugenol reduces the expression of virulence-related exoproteins in *Staphylococcus aureus*[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2010, 76(17): 5 846-5 851.
- [21] 徐晓,王欢,吕火焯. 金黄色葡萄球菌溶血素的研究进展[J]. 中国微生态学杂志, 2017, 29(6): 720-724, 730.
- [22] 刘宏巨. 关于影响葡萄球菌血浆凝固酶试验因素的探讨[J]. 临床医药实践, 2009, 18(24): 578-579.
- [23] 云盛,索晓敏,徐正挺,等. 金黄色葡萄球菌肠毒素检测的研究进展[J]. 现代生物医学进展, 2012, 12(19): 3 756-3 758.
- [12] 王振中,林孔勋. Weibull 曲线拟合方法的研究: 优选法在拟合植物病害流行方程的应用[J]. 华南农业大学学报, 1986(1): 17-20.
- [13] 刘泽,李斌,于川芳. 复合传热对薄层烟丝干燥强化传质作用的动力学分析[J]. 烟草科技, 2009, 42(11): 5-10.
- [14] 徐德龙,戴永生,金殿明,等. 干燥脱水条件对片烟复水特性的影响[J]. 烟草科技, 2013, 46(4): 5-8, 15.
- [15] 孙志涛,崔凯,霍现宽,等. 盒包材料对烟支水分散失速率的影响[J]. 烟草科技, 2017, 50(7): 82-87.
- [16] 马骥,崔凯,陈芝飞,等. 滤嘴对卷烟物理保润性能的影响[J]. 烟草科技, 2016, 49(3): 68-76.
- [17] 白峻文,王吉亮,肖红伟,等. 基于 Weibull 分布函数的葡萄干干燥过程模拟及应用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16): 278-285.
- [18] 张峻松,李强,崔凯,等. 不同烟草原料物理保润性能影响因素研究[J]. 轻工学报, 2016, 31(2): 47-53.
- [19] 巨浩羽,肖红伟,郑霞,等. 干燥介质相对湿度对胡萝卜片热风干燥特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 296-304.

(上接第 14 页)

(上接第 48 页)