

文章编号: 1006-3080(2026)03-0377-12

DOI: 10.14135/j.cnki.1006-3080.20250916001

多品种烟丝平衡含水率模型构建及机理研究

沈 凯¹, 张 灿², 焦凯旋¹, 高雪峰¹, 潘凡达¹, 黄 华¹, 夏 琛¹, 叶博文², 詹望成², 樊 虎¹
(1. 浙江中烟工业有限责任公司技术中心, 杭州 310008; 2. 华东理工大学工业催化研究所, 上海 200237)

摘要:为满足生产过程中对烟丝含水率的稳定控制, 迫切需要对环境温湿度进行精准预测。针对叶丝、膨胀烟丝、薄片丝和膨胀梗丝等的平衡含水率, 分别构建了恒定温度下以水活度为自变量的典型等温吸湿模型和包含温度、湿度双变量的平衡含水率/平衡相对湿度模型。通过评估决定系数(R^2)和均方根误差(RMSE), 确定DLP(Double Logarithm Polynomial)模型和Modify Oswin模型具有较好的拟合精度, 其中Modify Oswin模型的 $R^2>0.99$, RMSE<0.3%。通过分析不同烟丝的孔隙结构、糖类物质等, 发现膨胀梗丝和薄片丝的中大孔径(>7.5 μm)占比较高, 其水分主要以自由水形式存在, 吸湿性波动较大; 而叶丝和膨胀烟丝的还原糖质量分数较高, 易于形成结合水, 具有较强的水分保持能力。研究结果为车间烟丝生产和贮藏过程的温湿度设置提供了指导。

关键词:平衡含水率; 环境温湿度; 数学模型; 孔隙结构; 糖类质量分数

中图分类号:TS452

文献标志码:A

烟丝含水率是卷烟生产过程中的核心控制参数, 不仅影响生产效率和产品合格率, 而且影响产品感官品质。因此, 调控生产车间环境温湿度, 使烟丝在生产、贮存过程中达到最佳含水率, 对卷烟高品质生产具有重要意义。目前, 为控制生产过程中烟丝含水率, 普遍采用重复试验法获得环境温湿度的经验参数, 即固定温湿度, 通过人为大量测定贮存时间与烟丝含水率的线性关系, 以获得最佳温湿度参数。例如, 王春风等^[1]通过比较不同工艺参数烟丝含水率、填充值等, 确定最佳工艺参数为温度 28 $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度(RH) 71%。刘华等^[2]利用统计方法, 确定贮丝条件(温度、湿度、时间)与烟丝水分之间的定量关系, 发现烟丝水分与贮丝时间之间存在紧密关联, 但贮丝温度与烟丝水分之间没有明显规律, 无法建立有效的回归方程, 且缺乏在实际工业生产中的应用验证。

为了更加高效、准确地预测烟丝含水率, 优化生产工艺参数, 研究人员^[3-5]对烟丝含水率的预测模型进

行了广泛研究, 以建立不同工艺条件下烟丝含水率的变化规律, 其中主要包括: 一是以 GAB(Guggenheim-Anderson-de Boer)^[6]、BET(Brunauer-Emmett-Teller)^[7]等经典方程为代表的典型等温吸湿模型, 描述在恒定温度下物质的水活度(a_w)与平衡含水率(EMC, Equilibrium Moisture Content)之间的关联; 二是应用评估不同物料水分吸附性能的 EMC/ERH(Equilibrium Relative Humidity)模型, 将温度引入数学方程中, 在温度和湿度双变量与物料平衡含水率之间建立关联, 显著增加了模型的应用价值。薛诗凡等^[8]研究了在 22 $^{\circ}\text{C}$ 下包装后卷烟烟丝的吸湿特性, 发现 GAB 模型对原料的等温吸湿曲线具有较高的拟合精度。张峻松等^[9]研究了 22 $^{\circ}\text{C}$ 下烤烟、再造烟叶、膨胀梗丝、白肋烟、香料烟的吸湿特性, 发现相较于 BET、Smith 和 Kühn 模型, GAB 模型的拟合精度较高, 具有较宽的水活度适用范围。迟广俊等^[10]在 22 $^{\circ}\text{C}$ 下, 利用包含 BET、GAB在内的 14 种常见模型对 18 种

收稿日期: 2025-09-16

基金项目: 教育部基本科研业务费(222201717003); 中国烟草总公司重点研发项目(110202402027); 浙江中烟工业有限责任公司重点科技项目(ZJZY2023A003)

作者简介: 沈 凯(1983—), 男, 浙江杭州人, 博士生, 高级工程师, 主要研究方向为卷烟工艺研究。E-mail: dennisveron@126.com

通信联系人: 詹望成, E-mail: zhanwc@ecust.edu.cn; 樊 虎, E-mail: 18347551@qq.com

引用本文: 沈 凯, 张 灿, 焦凯旋, 等. 多品种烟丝平衡含水率模型构建及机理研究[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2026, 52(3): 377-388.

Citation: SHEN Kai, ZHANG Can, JIAO Kaixuan, et al. Model Fitting and Mechanism Study of Equilibrium Moisture Content for Multi-Variety Tobacco Shreds[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2026, 52(3): 377-388.

烟丝进行研究,发现 GAB 模型和 DLP(Double Logarithm Polynomial)模型在不同烟丝含水率方面具有较好的预测准确性。谭再钰等^[11]利用 GAB、BET、Smith、Kühn 这 4 种等温吸湿模型,分别拟合了 20、30、40 ℃ 下雪茄原料及成品烟支的等温吸湿曲线,发现 GAB 模型在 3 个不同温度下的拟合度均为最佳,并通过实验证实 GAB 模型可准确预测 4 种雪茄产品相关物料的含水率。

以水活度为参数建立的等温吸湿模型可较好地预测特定温度下的烟丝含水率,但由于其模型不包含温度参数,因此在某一特定温度下建立的模型无法适用于其他温度下烟丝平衡含水率的预测。相反,EMC/ERH 模型包括温度和相对湿度两个参数,可适用于不同温度下烟丝平衡含水率的准确预测。Chen 等^[12]对比分析了 4 种 EMC/ERH 方程对 36 种物料(谷物、种子、纤维材料、玉米芯、花生荚等)吸湿过程的拟合情况,发现农产品的吸收特性没有通用模型,最佳模型的选择取决于其具体的成分和种类。赵亮等^[13]利用 4 个 EMC/ERH 方程对成品烟丝的平衡含水率进行拟合研究,发现 Modify Halsey 模型对成品烟含水率具有最佳的拟合效果,但未进行相应的验证分析。

综上所述,目前针对烟丝平衡含水率建立了以 GAB、BET 等经典方程为代表的等温吸湿模型,以及可涵盖温度参数的 EMC/ERH 模型。但现有研究存在如下问题:(1)普遍采用等温吸湿模型对特定温度下烟丝的吸湿过程进行拟合,没有涉及多个温度下的对比分析,无法适用于不同温度下烟丝含水率的预测;(2)不同模型之间缺乏对比分析,不同模型拟合的准确性尚不确定;(3)缺失系统性验证,在卷烟厂典型温湿度工况下,模型对烟丝平衡含水率的预测误差尚未量化分析。

本文针对 6 种不同的典型烟丝品种,分别采用 8 种典型等温吸湿模型和 4 种 EMC/ERH 模型,考察环境温湿度对烟丝平衡含水率的影响规律,并进行系统分析,深入比较不同模型对不同烟丝、环境温湿度的适用性,然后通过实验室验证,最终建立可准确预测烟丝平衡含水率的模型,指导优化制丝以及贮丝工艺温湿度参数,实现精准控制烟丝含水率以及降低能耗的目标。

1 实验部分

1.1 原料与仪器

原料:某卷烟厂生产的 6 种烟丝,其中包含叶丝

(3 种不同配方)、膨胀烟丝、薄片丝、膨胀梗丝。6 种烟丝的编号如表 1 所示。

表 1 6 种类型烟丝编号

Table 1 Numbers of six types of tobacco shreds

Number	Type
1#	Tobacco lamina 1
2#	Tobacco lamina 2
3#	Tobacco lamina 3
4#	Expanded tobacco
5#	Thin-cut tobacco
6#	Stem shred

仪器:电子天平(瑞士 Mettler Toledo 公司, XS203S 型);多样品动态水分吸/脱附仪(合肥众沃仪器技术有限公司, MAD800 型);电热鼓风干燥箱(广州爱斯佩克环境仪器有限公司, PHH101 型);硅胶干燥器(上海精科科学仪器有限公司, $\Phi 300$ mm);水活度仪(美国 Decagon 公司, Aqualab 4TE 型);恒温恒湿箱(德国 BINDER 公司, KBF 720 E5.2 型);汞压入式孔隙度仪(美国 Anton Paar 公司, Poremaster60 型);连续流动仪(德国 Netzsch 公司, AutoAnalyzer 3 型)。

1.2 实验方法

1.2.1 等温吸湿曲线模型 基于水活度^[14]的等温吸湿模型体系呈现多样性,其选择需结合物性特征与预测场景进行系统性优化。根据烟草行业以及食品行业^[15-18]对等温吸湿曲线的研究,选取了 8 种典型的水活度与平衡含水率的数学模型,如表 2 所示。其中 BET 模型与 GAB 模型均是描述多孔材料吸附行为的经典理论;Kühn 模型为假设水分子与吸附位点发生了竞争性吸附,适用于谷物、淀粉类材料,但不适用于高水活度区;Smith 模型 1 和 Smith 模型 2 均适用于低水活度区,因此对于奶粉以及香精等食品配料的生产具有较好的指导效果;Halsey 模型是描述多孔材料水分吸附等温线的经典模型,由 Halsey^[21]于 1948 年提出,它特别适用于解释多层物理吸附行为,尤其在中等水活度范围内具有高精度特点;Oswin 模型首次采用多项式形式的经验方程,解决了食品包装中水分吸附预测的难题;DLP 模型是一种经验型多项式模型,通常用于拟合非线性吸湿等温曲线,用于预测平衡含水率与水活度之间的关系,该模型虽缺乏明确物理意义,但在数据拟合的灵活性方面表现优异。

1.2.2 等温吸湿曲线的绘制 设定相对湿度为 50%、55%、60%、65% 和 70%,温度为 22、24 ℃ 和 26 ℃,

每个样品进行 15 组实验。具体过程如下: 分别称取烟丝样品 3 份, 放置于质量已知的铝制样品盒中(加盖), 调节恒温恒湿箱, 设定对应的温湿度条件, 待恒温恒湿箱数显稳定后, 放入称取的烟丝样品, 铝盒盖子为敞口状态, 保证铝盒内部烟丝与箱内环境水分充分交换。取适当烟丝样品, 用水活度仪测定, 每组样品测试 3 组平行样, 结果取平均值。按照 GB/T 16447—2004《烟草及烟草制品调节和测试的大气环境》^[24] 规定, 样品的质量相对变化率在 3 h 以内不大于 0.2% 即可认为达到平衡。因此每 3 h 取出样品称重, 当样品质量符合规定后, 即认为烟丝样品达到平衡, 加盖取出铝盒。取出样品, 使用水活度仪测定其水活度, 每个湿度条件测定 3 个平行样, 结果取平均值。按 YC/T31—1996《烟草及烟草制品试样的制备和水分的测定-烘箱法》^[25] 方法检测样品平衡含水率。同样检测 3 组平行样, 结果取平均值。测定完成后, 分别以水活度和平衡含水率为横坐标和纵坐标, 绘制不同烟丝原料在不同温度下的等温吸湿曲线。

表 2 8 种典型的等温吸湿模型
Table 2 Eight moisture sorption isotherm models

Type	Isothermal moisture sorption model	Model equation
Theoretical model	BET ^[6]	$m = \frac{m_0 c a_w}{(1 - a_w) [1 + (c - 1) a_w]}$
	GAB ^[7]	$m = \frac{m_0 k c a_w}{(1 - k a_w) (1 - k a_w + k c a_w)}$
	Kühn ^[19]	$m = \frac{K_1}{\ln a_w} + K_2$
	Smith1 ^[19-20]	$m = B - A \ln(1 - a_w)$
	Smith2 ^[19]	$\frac{m}{1 + m} = B - A \ln(1 - a_w)$
	Halsey ^[21]	$m = \left(\frac{-A}{\ln a_w} \right)^{1/B}$
Empirical model	Oswin ^[22]	$m = A \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^{1/B}$
	DLP ^[23]	$m = b_3 \chi^3 + b_2 \chi^2 + b_1 \chi + b_0$

m —Sample moisture content; m_0 —Monolayer moisture content; c 、 k 、 K_1 、 K_2 、 A 、 B 、 $b_0 \sim b_3$ —Constants; $\chi = \ln(-\ln a_w)$

1.2.3 EMC/ERH 模型的选择 烟丝在储存过程中, 环境温湿度都会显著影响烟丝平衡含水率。表 2 中 8 种典型的等温吸湿模型只包含环境湿度, 不包含环境温度参数, 在某一特定温度下建立的模型无法适用于其他温度下烟丝平衡含水率的预测。因此, 进一步选用同时涵盖环境温度和湿度参数的 4 种典型 EMC/ERH 模型(表 3), 对烟丝平衡含水率进行拟合分析。表 3 中 A 、 B 、 C 为常数, 与样品性质有关。

Halsey 模型来源于多层分子吸附理论, 用于描述多层凝结现象的方程^[21], Iglesias 等^[26] 分析了 Halsey 方程参数, 发现它可将经验指数函数与温度进行联系, 并提出了新的 Modify halsey 方程; 基于对玉米干燥过程的研究, Thompson 等^[27] 建立了包含温度变量的 Modify Henderson 数学模型; 基于吸附自由能与水分质量分数有关的假设, Chung 和 Pfo^[28] 提出了 Chung-Pfo 模型, Pfo 在温度项中增加了新参数 B , 整合为 Modify Chung-Pfo 方程; Oswin 方程^[22] 解决了对水敏感商品的包装问题, Chen 等^[12] 将温度作为变量引入其中, 建立了新的 Modify Oswin 方程。

表 3 典型 EMC/ERH 模型
Table 3 Typical EMC/ERH model

Model	Equation
Modify Halsey ^[26]	$EMC = \left[\frac{\exp(A + B \cdot T)}{-\ln(RH)} \right]^C$
Modify Henderson ^[27]	$EMC = \left[\frac{-\ln(1 - RH)}{A(T + B)} \right]^C$
Modify Chung-Pfo ^[28]	$EMC = C \ln \left[-\frac{T + B}{A \ln(RH)} \right]$
Modify Oswin ^[12]	$EMC = (A + BT) \cdot \left(\frac{RH}{1 - RH} \right)^C$

1.2.4 利用动态水分吸/脱附仪测定烟丝平衡含水率以及 EMC/ERH 模型曲线的绘制 多样品动态水分吸/脱附仪是基于质量法原理的高精度分析设备, 通过实时监测样品在不同温湿度条件下的质量变化, 研究样品的吸/脱附行为。

吸/脱附仪可同时测定 8 个样品。在进行实验时, 4 种烟丝样品可设置 1 组平行样, 实验结果取平均值。具体过程如下: 将干燥的样品放进吸/脱附仪中, 设定温度(22、24、26、28、30 ℃)和湿度梯度(45%→50%→55%→60%→65%→70%→75%→80%)共 40 组不同实验, 分别计算干基平衡含水率, 计算式如式(1)所示:

$$EMC = \frac{m_e - m_0}{m_0} \times 100$$

(1)

其中, m_0 为样品初始干基质量, g; m_e 为样品平衡质量, g。根据实验结果, 绘制温度(22~30 ℃)、相对湿度(45%~80%)与平衡含水率三维曲面图。

1.3 数据分析方法及模型评价指标

通过 EMC/ERH 模型方程对温度-湿度-平衡含水率三维图进行非线性曲面拟合处理, 对 8 种典型等温吸湿模型进行非线性曲线拟合处理, 通过决定系数(R^2)和均方根误差(RMSE)评价模型的拟合效果,

计算式如式(2)、式(3)所示。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - m_{pi})^2}{\sum_{i=1}^n (m_i - m_{mi})^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - m_{pi})^2}{n}} \quad (3)$$

其中, m_i 是测定值, m_{pi} 是预测值, m_{mi} 是平均测定值, n 是测试数。

1.4 利用汞压入式孔隙度仪测定烟丝的孔隙结构

为表征烟丝的孔隙结构特性,采用汞压入式孔隙度仪进行测试。样品在测试前经真空条件下脱气处理,以去除可能残留的水分和气体。压汞过程的压力范围为 0.2~60 000 psi(约 0.001~414 MPa),对应的孔径范围为 3 nm~1 060 μm 。其中汞的接触角设定为 140°,表面张力为 480 mN/m。测试过程中,仪器自动记录了在不同压力下汞逐步侵入烟丝孔隙的体积变化,从而获得完整的孔径分布曲线及相关结构参数。烟丝作为植物组织,其孔径分布区间较宽,参考研究植物组织的孔隙区分范围^[29-31],将孔径 0~50 nm 称为微孔,50 nm~7.5 μm 称为中孔,7.5 μm 以上称为大孔。

1.5 利用连续流动仪分析烟丝糖类质量分数

采用连续流动分析仪测定不同类型烟丝样品的糖类成分。实验依据国家标准 YC/T 159—2019《烟草及烟草制品 水溶性糖的测定 连续流动法》^[32] 和 YC/T 216—2013《烟草及烟草制品淀粉的测定连续流

动法》^[33] 进行测试。测试成分包括总糖、还原糖和淀粉,检出限分别为 0.006 3%(总糖与还原糖)和 0.46 mg/L(淀粉)。实验所用样品均为固体丝状。

2 结果与讨论

2.1 不同等温吸湿模型的拟合研究

分别在环境温度为 22、24、26 $^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 50%、55%、60%、65% 和 70% 的条件下,测定烟丝平衡状态下的水活度及平衡含水率,然后采用 8 种典型等温吸湿模型对 6 种烟丝的吸湿过程进行拟合分析,以确定最佳适用模型。图 1 所示为 22 $^{\circ}\text{C}$ 环境温度下 8 种典型等温吸湿模型对 6 种烟丝吸湿过程的拟合曲线,通过比较 R^2 和 RMSE(表 4),发现 DLP 模型具有较好的拟合精度。进一步研究了 24 $^{\circ}\text{C}$ 和 26 $^{\circ}\text{C}$ 环境温度下 DLP 模型对 6 种烟丝吸湿过程的拟合曲线(图 2),结果均具有较好的拟合精度。24 $^{\circ}\text{C}$ 和 26 $^{\circ}\text{C}$ 下 8 种典型等温吸湿模型对 6 种烟丝吸湿过程的拟合结果见表 4~表 6,也说明 DLP 模型在不同类型烟丝的等温吸湿曲线拟合中均表现出极高的精度,其 R^2 普遍接近于 1, RMSE 维持在极低水平,相较于其他常用模型更具优势。这表明 DLP 模型不仅能够准确反映平衡含水率与水活度之间的关系,而且在多种烟丝样品中均具有良好的适用性和稳定性。另外,在各温度下,6#烟丝与其他烟丝的等温吸湿曲线相差较大,在相同温度和 0.5~0.7 $^{\circ}$ 水活度范围内,平衡含水率更高。这可能是因为 6#烟丝孔容较大,导致对水的吸附量更大所造成的^[34-36]。

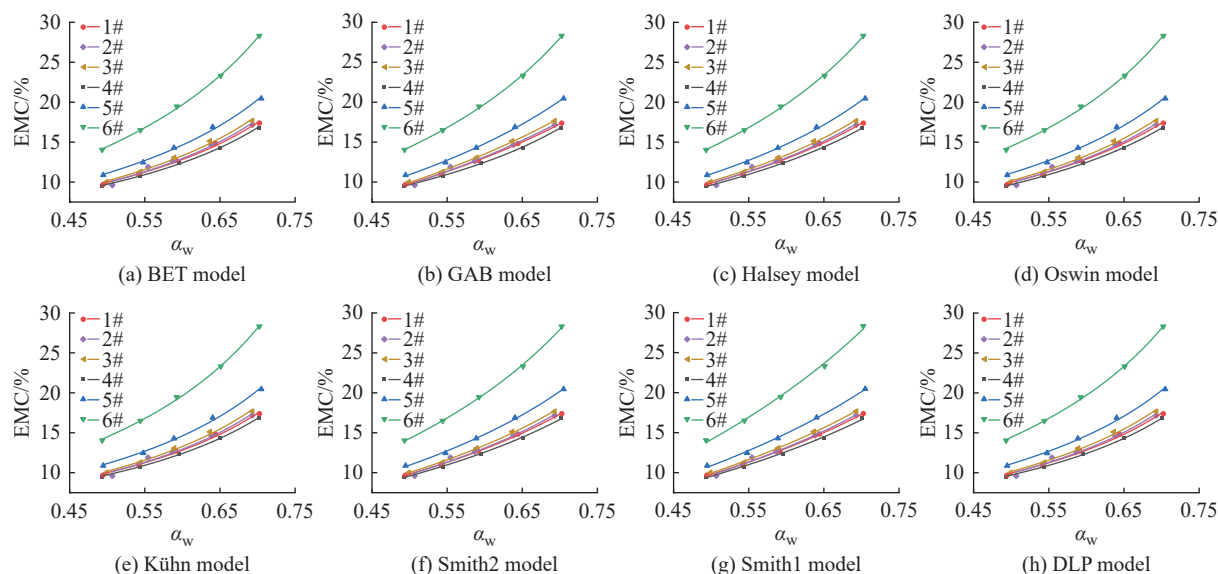


图 1 22 $^{\circ}\text{C}$ 环境温度下 8 种典型等温吸湿模型对 6 种烟丝吸湿过程的拟合曲线

Fig. 1 Fitting curves of the eight isothermal moisture absorption models for the moisture process of six types of tobacco shreds at 22 $^{\circ}\text{C}$

表 4 22 ℃ 下 8 种典型等温吸湿模型对 6 种烟丝吸湿过程的拟合结果

Table 4 Fitting results of eight moisture sorption isotherm models for the moisture absorption process of six types of tobacco shreds at 22 ℃

Sample	BET		GAB		Kühn		Smith1		Smith2		Halsey		Oswin		DLP	
	R^2	RMSE/%	R^2	RMSE/%	R^2	RMSE/%	R^2	RMSE/%	R^2	RMSE/%	R^2	RMSE/%	R^2	RMSE/%	R^2	RMSE/%
1#	0.994 82	0.26	0.999 68	0.08	0.994 40	0.27	0.999 64	0.07	0.999 31	0.09	0.998 5	0.14	0.996 46	0.21	0.999 97	0.03
2#	0.948 15	0.79	0.948 15	0.97	0.948 32	0.79	0.943 14	0.83	0.946 00	0.81	0.947 81	0.79	0.948 33	0.79	0.999 48	0.13
3#	0.976 07	0.55	0.976 36	0.66	0.976 09	0.55	0.973 82	0.57	0.975 31	0.55	0.975 77	0.55	0.976 36	0.54	0.999 97	0.03
4#	0.999 27	0.09	0.999 78	0.06	0.999 19	0.10	0.997 46	0.17	0.998 92	0.11	0.999 54	0.07	0.999 74	0.08	0.999 79	0.06
5#	0.999 34	0.17	0.999 50	0.18	0.999 03	0.20	0.996 97	0.36	0.999 22	0.18	0.999 5	0.15	0.999 04	0.20	0.999 69	0.20
6#	0.996 45	0.26	0.998 68	0.20	0.995 83	0.28	0.997 99	0.20	0.998 64	0.16	0.998 22	0.19	0.996 78	0.25	0.999 94	0.06

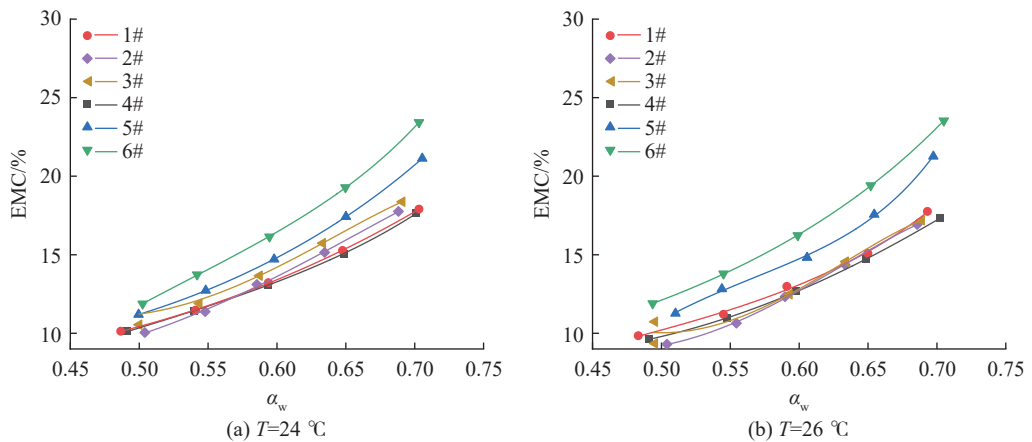


图 2 24 ℃ 和 26 ℃ 环境温度下 DLP 模型对 6 种烟丝吸湿过程的拟合曲线

Fig. 2 Fitting curves of the DLP model for the moisture absorption process of six types of tobacco shreds at 24 ℃ and 26 ℃

表 5 24 ℃ 下 8 种典型等温吸湿模型对 6 种烟丝吸湿过程的拟合结果

Table 5 Fitting results of eight moisture sorption isotherm models for the moisture absorption process of six types of tobacco shreds at 24 ℃

Sample	BET		GAB		Kühn		Smith1		Smith2		Halsey		Oswin		DLP	
	R^2	RMSE/%	R^2	RMSE/%	R^2	RMSE/%	R^2	RMSE/%	R^2	RMSE/%	R^2	RMSE/%	R^2	RMSE/%	R^2	RMSE/%
1#	0.998 24	0.15	0.999 82	0.06	0.998 32	0.15	0.998 39	0.14	0.999 53	0.08	0.999 77	0.05	0.999 52	0.08	0.999 94	0.05
2#	0.994 91	0.25	0.998 89	0.14	0.994 01	0.27	0.998 83	0.12	0.998 24	0.15	0.996 98	0.19	0.994 83	0.25	0.999 16	0.18
3#	0.974 34	0.57	0.974 83	0.70	0.974 39	0.57	0.972 80	0.59	0.974 12	0.58	0.974 42	0.57	0.974 83	0.57	0.999 97	0.02
4#	0.998 56	0.13	0.999 83	0.05	0.998 67	0.13	0.998 34	0.14	0.999 44	0.08	0.999 76	0.05	0.999 65	0.06	0.999 94	0.05
5#	0.999 12	0.16	0.999 57	0.14	0.998 69	0.19	0.998 02	0.24	0.999 43	0.13	0.999 52	0.12	0.998 75	0.19	0.999 97	0.05
6#	0.999 91	0.04	0.999 91	0.05	0.999 9	0.05	0.995 22	0.32	0.998 08	0.20	0.999 35	0.11	0.999 93	0.04	0.999 99	0.01

综合评估各评价指标,将相应的参数代入 DLP 模型公式,可得到不同烟丝在 22、24、26 ℃ 这 3 种温度下的 DLP 模型拟合方程(表 7),即可预测各种烟丝在特定温度和不同湿度下的平衡含水率。

2.2 EMC/ERH 模型拟合研究

按 1.2.4 节方法绘制温度-湿度-EMC 三维图像,

采用表 3 中 4 种 EMC/ERH 模型对 6 种烟丝的吸湿过程进行拟合分析,以确定最佳适用模型,拟合结果如表 8 所示。图 3 所示为 4 种模型对 1#烟丝的拟合曲面,图 4 所示为 Modify Oswin 模型对 6 种烟丝吸湿过程的拟合曲面。以上结果表明,Modify Oswin 模型对 6 种烟丝都具有最好的拟合精度(对 1#烟丝的

表 6 26 ℃ 下 8 种典型等温吸湿模型对 6 种烟丝吸湿过程的拟合结果

Table 6 Fitting results of eight moisture sorption isotherm models for the moisture absorption process of six types of tobacco shreds at 26 ℃

Sample	BET		GAB		Kühn		Smith1		Smith2		Halsey		Oswin		DLP	
	R^2	RMSE/%	R^2	RMSE/%	R^2	RMSE/%	R^2	RMSE/%	R^2	RMSE/%	R^2	RMSE/%	R^2	RMSE/%	R^2	RMSE/%
1#	0.997 28	0.19	0.997 87	0.21	0.997 49	0.18	0.989 83	0.37	0.993 02	0.30	0.994 88	0.26	0.996 84	0.20	0.997 89	0.29
2#	0.995 64	0.23	0.997 02	0.23	0.995 12	0.24	0.996 23	0.14	0.996 88	0.20	0.996 37	0.21	0.995 02	0.25	0.999 42	0.15
3#	0.971 59	0.61	0.972 15	0.73	0.971 81	0.60	0.964 80	0.67	0.967 58	0.65	0.969 14	0.63	0.971 10	0.61	0.999 52	0.14
4#	0.999 12	0.11	0.999 52	0.09	0.998 98	0.11	0.996 80	0.20	0.998 56	0.13	0.999 28	0.09	0.999 47	0.08	0.999 96	0.04
5#	0.999 96	0.03	0.999 97	0.04	0.999 94	0.04	0.995 18	0.37	0.998 38	0.22	0.999 57	0.11	0.999 97	0.03	0.999 99	0.03
6#	0.999 96	0.03	0.999 97	0.04	0.999 94	0.04	0.995 18	0.37	0.998 38	0.22	0.999 57	0.11	0.999 97	0.03	0.999 99	0.03

表 7 6 种烟丝在不同温度下的 DLP 等温吸湿模型方程式

Table 7 Equations of the DLP isothermal moisture absorption model for six types of tobacco shreds at different temperatures

Sample	$T/^\circ\text{C}$	DLP fitting equation
1#	22	$m = 0.062\,51\chi^3 + 0.147\,47\chi^2 - 0.004\,66\chi + 0.079\,64$
	24	$m = 0.025\,40\chi^3 + 0.08708\chi^2 - 0.028\,33\chi + 0.083\,46$
	26	$m = -0.053\,54\chi^3 - 0.038\,73\chi^2 - 0.090\,12\chi + 0.071\,60$
2#	22	$m = 0.512\,13\chi^3 + 1.124\,66\chi^2 + 0.649\,90\chi + 0.208\,84$
	24	$m = 0.090\,89\chi^3 + 0.200\,45\chi^2 + 0.010\,74\chi + 0.080\,48$
	26	$m = 0.248\,29\chi^3 + 0.539\,83\chi^2 + 0.239\,50\chi + 0.119\,70$
3#	22	$m = 0.188\,99\chi^3 + 0.436\,78\chi^2 + 0.203\,16\chi + 0.131\,70$
	24	$m = 0.212\,95\chi^3 + 0.482\,68\chi^2 + 0.226\,32\chi + 0.140\,83$
	26	$m = 0.362\,72\chi^3 + 0.810\,74\chi^2 + 0.448\,74\chi + 0.173\,75$
4#	22	$m = -0.016\,04\chi^3 + 0.006\,34\chi^2 - 0.072\,37\chi + 0.068\,51$
	24	$m = -0.037\,83\chi^3 - 0.043\,41\chi^2 - 0.109\,71\chi + 0.067\,21$
	26	$m = 0.052\,29\chi^3 + 0.151\,97\chi^2 + 0.018\,40\chi + 0.086\,85$
5#	22	$m = -0.097\,05\chi^3 - 0.123\,78\chi^2 - 0.226\,01\chi + 0.072\,45$
	24	$m = -0.115\,67\chi^3 - 0.189\,77\chi^2 - 0.254\,04\chi + 0.044\,41$
	26	$m = -0.009\,87\chi^3 + 0.057\,14\chi^2 - 0.069\,91\chi + 0.087\,32$
6#	22	$m = 0.062\,51\chi^3 + 0.147\,47\chi^2 - 0.004\,66\chi + 0.079\,64$
	24	$m = 0.025\,40\chi^3 + 0.087\,08\chi^2 - 0.028\,33\chi + 0.083\,46$
	26	$m = -0.053\,54\chi^3 - 0.038\,73\chi^2 - 0.090\,12\chi + 0.071\,60$

拟合效果最佳), R^2 值均维持在较高水平, 同时其 RMSE 值整体较低, 能够较为准确地表征水活度与平衡含水率之间的关系。

由图 4 可以看出, 不同种类的烟丝在相同的温湿度条件下平衡含水率不同, 这主要是由于烟丝的内部结构以及组成不同。在一定温度下, 随着环境温湿度的增大, 烟丝的平衡含水率逐渐增加, 但不同

烟丝品种的水分吸附速率和达到平衡的时间存在差异。

综合评估各评价指标, 将相应的参数代入表 3 所示 Modify Oswin 公式, 可得到 6 种不同烟丝的 Modify Oswin 模型拟合方程(表 9)。在实际应用过程中, 通过输入环境的温湿度, 即可预测相应条件下的烟丝平衡含水率。

2.3 两种最佳模型的试验验证

在建立 DLP 模型和 Modify Oswin 模型的基础上, 对模型预测的准确度进行了验证。根据某卷烟厂给定的烟丝适宜温湿度范围, 选择 3 种储存烟丝的温度, 分别利用两种模型计算烟丝达到理想平衡含水率(1#、2#、3#为 12.2%, 4#和 5#为 12.5%, 6#为 12.4%)时所需的环境湿度。然后将烟丝置于上述温湿度环境下测量平衡含水率, 分析测量值与理论值之间的差异, 以此判断模型的准确性。

首先, 选择 22 ℃/60%、24 ℃/58%、26 ℃/58% 这 3 种温湿度环境进行实验。将 6 种烟丝分别放置于上述 3 种恒温恒湿环境中平衡 48 h 以上, 待烟丝水分平衡后, 测定水活度和实际平衡含水率。利用已知水活度代入 DLP 拟合模型, 即可求出 DLP 模型预测的平衡含水率; 通过环境温湿度和 Modify Oswin 模型, 即可得出 Modify Oswin 模型预测的平衡含水率。表 10 所示为 6 种烟丝在不同温湿度下的水活度、实际(Act)平衡含水率以及两种模型预测的平衡含水率。结果表明, 3 种平衡含水率整体接近, 说明模型具有较高的准确性, 能够对烟丝平衡含水率进行较为准确地预测。

为了更直观地对比 DLP 和 Modify Oswin 两种预测模型对于 6 种烟丝的拟合效果, 进一步分析平衡含水率的模型预测值与实测值之间的绝对误差, 以确定最佳模型, 结果如表 11 所示。通过比较 3 种环

表 8 EMC/ERH 模型对 6 种烟丝吸湿过程的拟合结果

Table 8 Fitting results of EMC/ERH models for the moisture absorption process of six types of tobacco shreds

Sample	Model	Parameter			Evaluation index	
		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>R</i> ²	RMSE/%
1#	Modify Oswin	0.083 49	6.35×10 ⁻⁴	0.688 33	0.994 39	0.28
	Modify Halsey	-3.255 05	7.44×10 ⁻³	0.848 89	0.993 93	0.29
	Modify Henderson	0.018 99	273.1500	1.104 12	0.979 17	0.55
	Modify Chung-Pfost	91.735 89	108.643 2	0.128 00	0.985 71	0.45
2#	Modify Oswin	0.101 85	-9.18×10 ⁻⁵	0.686 63	0.984 06	0.12
	Modify Halsey	-3.046 62	-0.001 08	0.846 78	0.983 53	0.48
	Modify Henderson	0.019 06	273.15	1.105 46	0.981 60	0.56
	Modify Chung-Pfost	9.90×10 ¹⁴	1.46×10 ¹⁵	0.126 9	0.975 98	0.58
3#	Modify Oswin	0.093 16	1.56×10 ⁻⁴	0.688 67	0.982 68	0.09
	Modify Halsey	-3.142 32	0.001 88	0.849 31	0.982 25	0.48
	Modify Henderson	0.019 38	273.15	1.107 32	0.977 45	0.51
	Modify Chung-Pfost	396.150 7	554.981 6	0.124 51	0.974 28	0.57
4#	Modify Oswin	0.087 9	3.50×10 ⁻⁴	0.687 06	0.994 76	0.26
	Modify Halsey	-3.212	0.004 22	0.847 47	0.994 66	0.26
	Modify Henderson	0.019 57	273.15	1.102 99	0.985 15	0.45
	Modify Chung-Pfost	175.773 20	232.906 4	0.123 66	0.984 92	0.44
5#	Modify Oswin	0.080 25	0.001 11	0.798 48	0.999 38	0.23
	Modify Halsey	-2.871 74	0.010 27	0.980 66	0.999 06	0.65
	Modify Henderson	0.013 52	273.15	1.286 12	0.983 58	0.68
	Modify Chung-Pfost	62.427 35	53.452 6	0.171 17	0.976 89	1.08
6#	Modify Oswin	0.129 55	-6.87×10 ⁻⁴	0.902 43	0.991 48	0.23
	Modify Halsey	-2.178 14	-0.005 6	1.108 97	0.990 23	0.65
	Modify Henderson	0.010 59	273.15	1.465 3	0.989 37	0.68
	Modify Chung-Pfost	9.16×10 ²⁰	1.02×10 ²¹	0.214 15	0.973 17	1.08

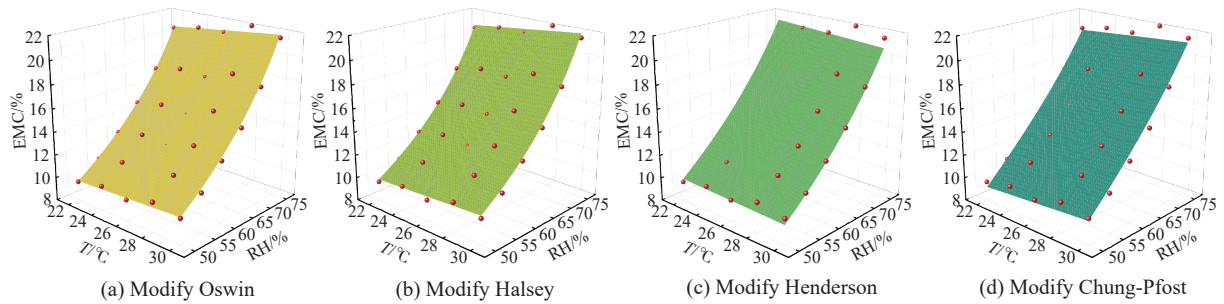


图 3 4 种模型对 1# 烟丝的拟合曲面

Fig. 3 Fitting surfaces of the four models for 1# tobacco shred

境下两种不同类型的 EMC 的绝对误差,发现 Modify Oswin 模型的拟合精度整体优于 DLP 模型,所有预测值平均绝对误差为 0.33%,远低于 DLP 模型的对应值 (0.88%)。这是因为 Modify Oswin 模型基于温

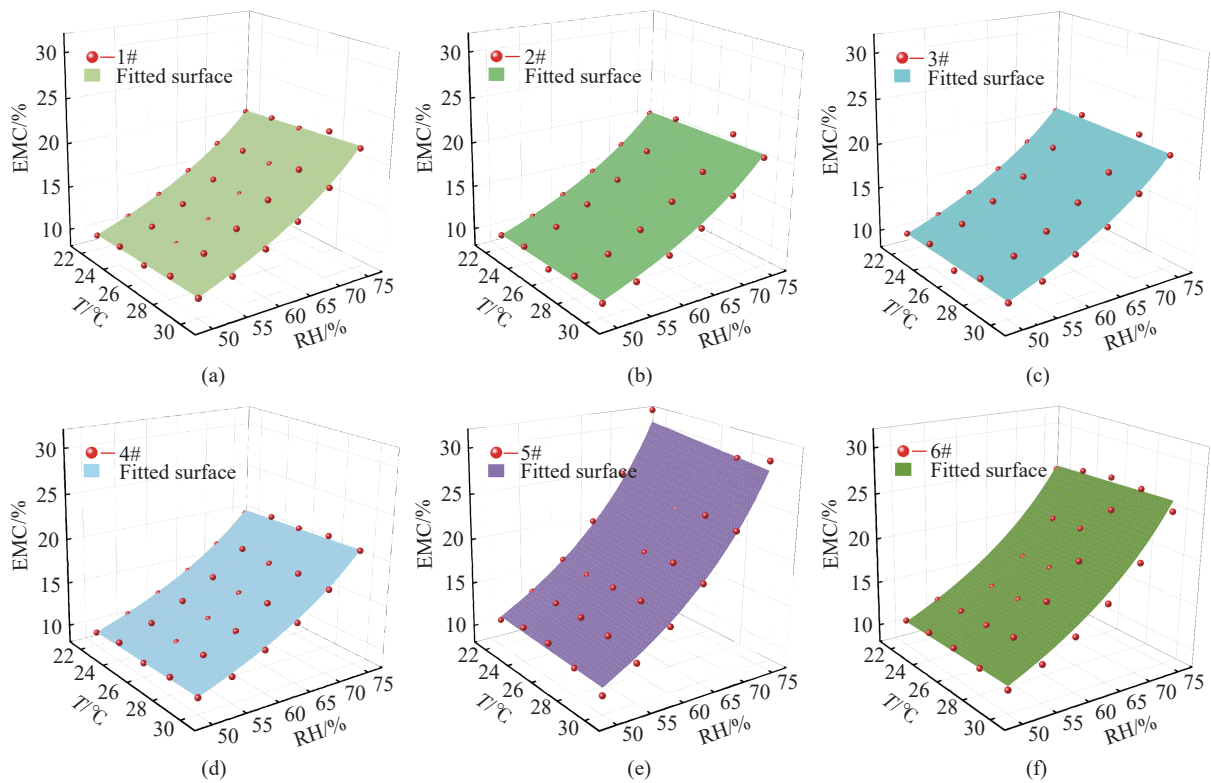


图 4 Modify Oswin 模型对 6 种烟丝吸湿过程的拟合曲面

Fig. 4 Fitting surfaces of Modify Oswin model for the moisture absorption process of six types of tobacco shreds

表 9 6 种烟丝的 Modify Oswin 模型方程式

Table 9 Equations of Modify Oswin model for six types of tobacco shreds

Sample	Modify Oswin fitting equation
1#	$EMC = (0.083\,49 + 6.354\,4 \times 10^{-4}T) \left(\frac{RH}{1 - RH} \right)^{0.688\,33}$
2#	$EMC = (0.156\,42 - 2.40 \times 10^{-3}T) \left(\frac{RH}{1 - RH} \right)^{0.689\,83}$
3#	$EMC = (0.055\,65 + 0.002\,03T) \left(\frac{RH}{1 - RH} \right)^{0.665\,12}$
4#	$EMC = (0.087\,90 + 3.501\,36 \times 10^{-4}T) \left(\frac{RH}{1 - RH} \right)^{0.687\,06}$
5#	$EMC = (0.129\,550 - 6.871\,32 \times 10^{-4}T) \left(\frac{RH}{1 - RH} \right)^{0.902\,43}$
6#	$EMC = (0.080\,25 + 0.001\,1T) \left(\frac{RH}{1 - RH} \right)^{0.798\,48}$

湿度双变量调控所致,相反,DLP模型在数学结构上对水活度变化响应较强,因此,物料结构(孔隙率、纤维比例、成分等)上的微小差异对DLP模型拟合结果的影响更为显著,这种敏感性导致预测稳定性下降,因而其对于各类烟丝平衡含水率的预测值与实测值之间的绝对误差较大。另外,在3种温湿度条件下,1#、2#、3#、4#烟丝的预测结果误差相对较小,但5#、6#烟丝的预测结果不太稳定。

利用压汞仪分析6种烟丝的孔隙结构,结果如

图5、图6和表12所示。从孔隙分布来看,5#和6#烟丝的孔容较大,且以大孔(>7.5 μm)为主,占比均超过90%(分别为91.2%和91.3%),表现出较强的吸湿能力和较高的平衡含水率^[37],但由于大孔中水分多以自由水形式存在,其水分平衡时间较长,导致含水率波动较大。相反,4#烟丝的中孔(50 nm~7.5 μm)占比为34.6%,显著高于其他烟丝(普遍在8%~13%左右),而大孔比例仅65.4%,且几乎不含微孔,因而在环境湿度变化下表现出更好的含水稳定性。1#、2#、3#烟丝的孔隙结构则处于二者之间,大孔占比均在85%~88%,中孔占比为10%~13%,因此模型预测的稳定性处于中等水平。

糖类物质(尤其是还原糖)具有较强的亲水性^[38-39],能与水分子形成氢键^[40],从而提高结合水比例^[41-42]。图7所示为6种烟丝中的总糖、还原糖和淀粉等物质的质量分数比较,5#烟丝的总糖质量分数仅11.9%,还原糖质量分数为10.8%,使其结合水比例偏低,自由水质量分数较高,水分稳定性较差。6#烟丝虽具有较高的总糖质量分数,但还原糖质量分数相对偏低(19.5%),因此结合水比例有限,水分主要以自由水形式存在,稳定性不佳。因此,综合考虑不同烟丝的孔隙结构和糖类物质组成,1#、2#、3#、4#烟丝的含水率较为稳定,预测精度较高,而5#、6#烟丝的含水率波动性较大,预测性能较差。

表 10 6 种烟丝在不同温湿度环境下的实际平衡含水率和 DLP、Modify Oswin 两种模型的预测平衡含水率

Table 10 Actual equilibrium moisture content of six types of tobacco shreds under different temperature and humidity conditions, and the equilibrium moisture content predicted by DLP and Modify Oswin models

$T/^{\circ}\text{C}$	RH/%	Sample	α_{w}	EMC/%		
				DLP	Modify Oswin	Act
22	60	1#	0.5760	12.14	12.76	12.78
		2#	0.5742	11.16	12.71	12.68
		3#	0.5769	12.60	12.72	13.23
		4#	0.5693	11.52	12.67	12.76
		5#	0.5751	13.80	14.43	16.11
		6#	0.5801	13.84	16.50	15.52
24	58	1#	0.5734	12.49	12.33	12.36
		2#	0.5681	12.27	12.10	12.13
		3#	0.5609	12.67	12.44	12.33
		4#	0.5613	12.06	12.00	11.90
		5#	0.5625	14.64	13.82	13.21
		6#	0.5767	13.81	15.13	15.78
26	58	1#	0.5876	12.66	12.49	12.27
		2#	0.5825	11.87	12.14	12.21
		3#	0.5853	12.12	12.41	12.45
		4#	0.5789	11.97	12.11	12.06
		5#	0.5854	15.57	14.11	14.30
		6#	0.5905	14.38	14.94	15.65

表 11 6 种烟丝平衡含水率的实测值与模型预测值之间的绝对误差

Table 11 Absolute error between the measured and model-predicted values of equilibrium moisture content for six types of tobacco shreds

$T/^{\circ}\text{C}$	RH/%	Type ¹⁾	Absolute error of EMC/%					
			1#	2#	3#	4#	5#	6#
22	60	1	0.63	1.52	0.63	1.24	2.31	1.69
		2	0.02	0.03	0.51	0.08	1.68	0.97
24	58	1	0.13	0.14	0.34	0.16	1.43	1.97
		2	0.03	0.03	0.11	0.10	0.61	0.65
26	58	1	0.39	0.34	0.33	0.10	1.27	1.27
		2	0.22	0.07	0.04	0.04	0.19	0.71

1) Type 1—Absolute error of EMC between the measured and the DLP predicted value; Type 2—Absolute error of EMC between the measured and the Modify Oswin predicted value

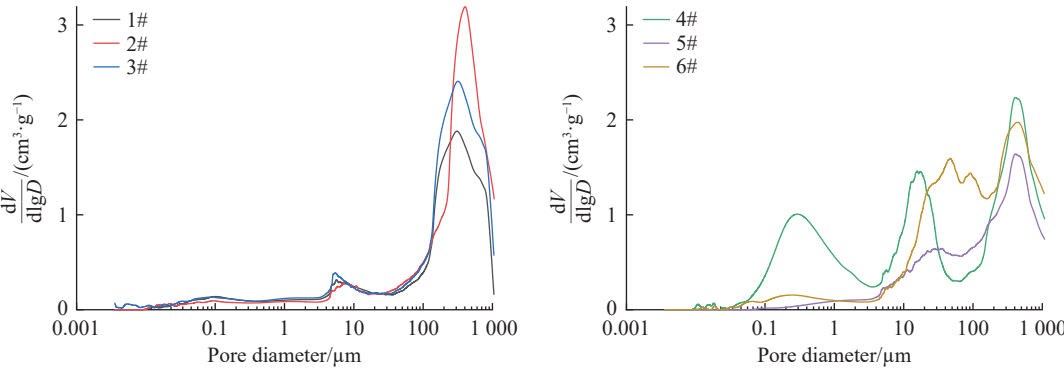


图 5 6 种烟丝不同孔径范围的孔体积分布

Fig. 5 Pore volume distribution of six tobacco shreds with respect to pore diameter

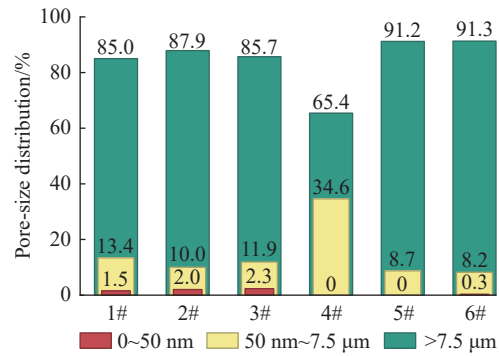


图 6 6 种烟丝的孔径分布统计

Fig. 6 Statistical analysis of pore size distribution of six tobacco shreds

表 12 6 种烟丝的孔容

Table 12 Pore volume of six types of tobacco shreds

Sample	Pore volume/(cm ³ ·g ⁻¹)
1#	2.005 1
2#	2.415 0
3#	2.470 2
4#	3.103 1
5#	2.907 3
6#	3.449 3

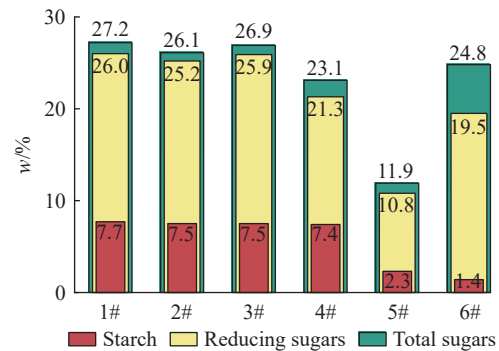


图 7 6 种烟丝中的总糖、还原糖和淀粉等的质量分数比较

Fig. 7 Comparison of total sugar, reducing sugar and starch mass fraction in six tobacco shreds

3 结 论

(1)研究了以水活度为参数的 8 种典型等温吸湿模型对不同烟丝平衡含水率的拟合曲线和曲面,在 22、24、26 ℃ 环境温度和 50%~75% 湿度范围内,DLP 模型具有最佳的拟合精度,决定系数 R^2 均大于 0.99, RMSE 均小于 0.1%,可用于预测特定温度下不同环境湿度时的烟丝平衡含水率。

(2)研究了同时包含环境温湿度的 4 种 EMC/ERH 模型对不同烟丝平衡含水率的拟合结果,在

22~30 ℃ 和 50%~75% 环境湿度范围内,Modify Oswin 模型具有最佳的拟合精度, R^2 均大于 0.99, RMSE 位于 0.1%~0.3% 之间,可用于预测不同环境温湿度条件下的烟丝平衡含水率。

(3)对模型预测的准确度进行了验证,通过比较实际平衡含水率与模型预测平衡含水率的绝对误差,发现相较于水活度单变量的 DLP 模型,含有环境温湿度双变量的 Modify Oswin 模型对平衡含水率具有更好的预测准确性,可为车间烟丝生产和贮藏过程的温湿度准确设置提供指导。

(4)孔隙结构和糖类成分是造成不同烟丝模型预测精度差异的重要内在因素。薄片丝和膨胀梗丝的大孔占比超过 90%,导致其水分以自由水为主,吸湿性波动大;而膨胀烟丝中大孔占比仅 65.4%,表现出较好的吸湿稳定性。糖分分析结果显示,薄片丝中总糖和还原糖质量分数最低,结合水比例偏低,吸湿调控能力较弱,而叶丝和膨胀烟丝中还原糖质量分数较高,有利于形成结合水,吸湿能力比较稳定。

参考文献:

[1] 王春风,张温泽,王彬彬,等. 贮丝房温湿度的优化 [J]. 烟草科技, 2009(2): 21-24.

[2] 刘华,何蓉,谭奇忠,等. 贮丝条件对烟丝水分的影响 [J]. 重庆与世界(学术版), 2013, 30(12): 27-28.

[3] 郑赛晶,刘广超,陈嘉彬,等. 烟芯材料吸湿特性评价技术研究进展 [J]. 轻工学报, 2024, 39(3): 109-118.

[4] 张晓宇,周顺,林泳鸿,等. 加热卷烟烟草颗粒水分吸附特性及水分状态研究 [J]. 中国烟草学报, 2025, 31(1): 57-65.

[5] MERIAMA F, SAID B, AKIL L, et al. Experimental determination and modeling of the moisture-sorption isotherms and isosteric heat of tobacco leaves[J]. Instrumentation Measure Métrologie, 2021, 20(5): 269-277.

[6] ANDERSON R B. Modifications of the brunauer, emmett and teller equation1[J]. Journal of the American Chemical Society, 1946, 68(4): 686-691.

[7] BRUNAUER S, EMMETT P H, TELLER E. Adsorption of gases in multimolecular layers[J]. Journal of the American Chemical Society, 1938, 60(2): 309-319.

[8] 薛诗凡,凌荣鑫,张玮,等. 基于 GAB 模型预测包装后卷烟烟丝水活度和含水率的方法 [J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2025, 51(3): 316-321.

[9] 张峻松,李皓,霍现宽,等. 烟草等温吸湿线和净等量吸附热的研究 [J]. 轻工学报, 2017, 32(1): 28-34.

[10] 迟广俊,郭鹏,洪广峰,等. 烟草样品等温吸湿模型的比较与分析 [J]. 中国烟草学报, 2017, 23(2): 50-59.

[11] 谭再钰,王剑,潘勇,等. 雪茄原料和烟支等温吸湿模型的建立 [J]. 包装工程, 2022, 43(19): 273-283.

[12] CHEN C C, VANCE M R. Comparison of four EMC/ERH equations[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(3): 983-

- 990.
- [13] 赵亮, 常纪恒, 王宏生, 等. 成品烟丝平衡含水率预测模型研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(31): 17817-17820.
- [14] LABUZA T P, ALTUNAKAR B. Water Activity Prediction and Moisture Sorption Isotherms: Water Activity in Foods [M]. [s.l.]: AACC International Publishing, 2020: 161-205.
- [15] 程学雨, 钱奕含, 卢立新. 米威化饼干二组分食品的等温吸湿特性及模型表征[J]. 食品与机械, 2019, 35(5): 144-148.
- [16] 王超, 刘国鹏, 郭绍琦, 等. 水活度用于食品质量与安全控制的研究进展[J]. 粮食科技与经济, 2020, 45(10): 35-36.
- [17] 褚振辉, 卢立新. 韧性饼干的等温吸湿特性及模型表征[J]. 包装工程, 2011, 32(3): 12-15.
- [18] 胥伟. 黑毛茶等温吸湿模型构建和高湿霉变微生物及理化研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2018.
- [19] RAHMAN M S. Food Properties Handbook [M]. 2nd Edition. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [20] SMITH S E. The sorption of water vapor by high polymers[J]. Journal of the American Chemical Society, 1947, 69(3): 646-651.
- [21] HALSEY G. Physical adsorption on non-uniform surfaces[J]. The Journal of Chemical Physics, 1948, 16(10): 931-937.
- [22] OSWIN C R. The kinetics of package life: III. The isotherm[J]. Journal of the Society of Chemical Industry, 1946, 65(12): 419-421.
- [23] NURTAMA B, LIN J. Moisture sorption isotherm characteristics of taro flour[J]. World Journal of Dairy & Food Sciences, 2010, 5: 1-6.
- [24] 中国烟草标准化研究中心. 烟草及烟草制品 调节和测试的大气环境: GB/T 16447—2004 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [25] 国家烟草质量监督检验中心. 烟草及烟草制品试样的制备和水分的测定-烘箱法: YC/T 31—1996 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [26] IGLESIAS H A, CHIRIFE J. Prediction of the effect of temperature on water sorption isotherms of food material[J]. International Journal of Food Science & Technology, 1976, 11(2): 109-116.
- [27] THOMPSON T L, PEART M, G H FOSTER R. Mathematical simulation of corn drying: A new model[J]. Transactions of the ASAE, 1968, 11(4): 582-586.
- [28] CHUNG D S, PFOST H B. Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products: Part II. Development of the general isotherm equation[J]. Transactions of the ASAE, 1967, 10(4): 552-555.
- [29] ZHANG J, XIAO H, CHEN Y, *et al.* Porosity and pore size distribution of recent and ancient buried *Phoebe zhennan* wood determined by mercury intrusion porosimetry[J]. Wood Research, 2021, 66: 277-283.
- [30] GRIFFIN D. Water potential and wood-decay fungi[J]. Annual Review of Phytopathology, 1977, 15: 319-329.
- [31] ZAUER M, HEMPEL S, PFRIEM A, *et al.* Investigations of the pore-size distribution of wood in the dry and wet state by means of mercury intrusion porosimetry[J]. Wood Science and Technology, 2014, 48(6): 1229-1240.
- [32] 国家烟草专卖局. 烟草及烟草制品 水溶性糖的测定 连续流动法: YC/T159—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [33] 国家烟草专卖局. 烟草及烟草制品 淀粉的测定 连续流动法: YC/T216—2013 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [34] MIYAUCHI M. Water adsorption on hydrophilic fibers and porous and deliquescent materials: Cellulose, polysaccharide, silica, inorganic salt, sugar alcohol, and amino acid[J]. ACS Omega, 2023, 8(46): 44212-44220.
- [35] ZHANG S, FU J, XING G, *et al.* Porous materials for atmospheric water harvesting[J]. ChemistryOpen, 2023, 12(5): e202300046.
- [36] KYRIAKOPOULOS G L, TSIMNADIS K, SEBOS I, *et al.* Investigating the effect of pore size distribution on the sorption types and the adsorption-deformation characteristics of porous continua: The case of adsorption on carbonaceous materials[J]. Crystals, 2024, 14(8): 742.
- [37] YIN C, XU Z, SHU J, *et al.* Influence of physicochemical characteristics on the effective moisture diffusivity in tobacco[J]. International Journal of Food Properties, 2015, 18(3): 690-698.
- [38] İLHAN E, POÇAN P, KRUK D, *et al.* Water dynamics in starch based confectionery products including different types of sugar[J]. Molecules, 2022, 27(7): 2216.
- [39] BLANCH M, SANCHEZ-BALLESTA M T, ESCRIBANO M I, *et al.* The Relationship between bound water and carbohydrate reserves in association with cellular integrity in fragaria vesca stored under different conditions[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(4): 875-884.
- [40] EDELMAN R, KUSNER I, KISILIAK R, *et al.* Sugar stereochemistry effects on water structure and on protein stability: The templating concept[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 48: 27-37.
- [41] MUTASA E S, SEAL K J, MAGAN N. The water content/water activity relationship of cured tobacco and water relations of associated spoilage fungi[J]. International Biodeterioration, 1990, 26(6): 381-396.
- [42] IEVINSH G. Water content of plant tissues: So simple that almost forgotten?[J]. Plants, 2023, 12(6): 1238.

Model Fitting and Mechanism Study of Equilibrium Moisture Content for Multi-Variety Tobacco Shreds

SHEN Kai¹, ZHANG Can², JIAO Kaixuan¹, GAO Xuefeng¹, PAN Fanda¹, HUANG Hua¹, XIA Chen¹, YE Bowen²,
ZHAN Wangcheng², FAN Hu¹

(1. Technology Center, China Tobacco Zhejiang Industrial Co. Ltd, Hangzhou 310008, China; 2. Institute of Industrial Catalysis, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Moisture content in cut tobacco is a critical factor influencing cigarette production efficiency, product qualification rate, and smoking quality. To achieve stable control of tobacco moisture content during production, accurate prediction of ambient temperature and humidity is urgently required. Typical isothermal moisture absorption models with water activity as the independent variable at constant temperature, as well as equilibrium moisture content/equilibrium relative humidity models involving both temperature and humidity variables, were established for the equilibrium moisture content of cut leaf tobacco, expanded cut tobacco, cut sheet tobacco and expanded cut stem tobacco, respectively. By evaluating the coefficient of determination (R^2) and Root Mean Square Error (RMSE), the Double Logarithm Polynomial (DLP) model and the Modify Oswin model were confirmed to exhibit satisfactory fitting accuracy, among which the Modify Oswin model achieved $R^2 > 0.99$ and $RMSE < 0.3\%$. Through analyzing the pore structure and sugar components of different cut tobacco types, it was found that expanded cut stem tobacco and cut sheet tobacco have a high proportion of mesopores and macropores ($>7.5\ \mu\text{m}$), with moisture mainly existing as free water, resulting in significant fluctuations in hygroscopicity. In contrast, cut leaf tobacco and expanded cut tobacco possess a higher mass fraction of reducing sugars, which tend to form bound water and present strong water retention capacity. The results provide guidance for setting temperature and humidity parameters in the production and storage of cut tobacco in manufacturing workshops.

Key words: equilibrium moisture content; environmental temperature and humidity; mathematical model; pore structure; sugar mass fraction

(责任编辑: 张欣)