

不同加工工艺速溶茶物理和吸湿特性比较

杜文忠¹, 蒋玉兰², 范振鑫^{3,4}, 陈霜⁵, 潘俊娴², 朱跃进^{2,4}, 张瑞阳⁶, 吕杨俊^{2,4*}, 王霏菲^{2,4*}

(1. 龙游县农业农村局, 浙江衢州 324400) (2. 中华全国供销合作总社杭州茶叶研究所, 浙江省茶资源跨界应用技术重点实验室, 浙江杭州 310016) (3. 浙江茗皇天然食品开发股份有限公司, 浙江衢州 324000) (4. 浙江省龙游黄茶产业“浙农英才”工作站, 浙江衢州 324000) (5. 浙江农林大学食品与健康学院, 浙江杭州 311300) (6. 香飘飘食品股份有限公司, 浙江湖州 313000)

摘要: 为了解不同加工工艺对速溶茶吸湿性的影响, 本研究以速溶绿茶、红茶、茉莉花茶为对象, 开展了不同加工技术(市售速溶茶、中空造粒速溶茶, 工业化生产)、不同干燥技术(喷雾干燥、冷冻干燥, 实验室制备)的速溶茶物理特性和吸湿特性研究, 并基于常用的等温吸湿模型对实验数据进行了拟合表征。结果表明: 中空造粒速溶茶流动性优于市售速溶茶, 且堆积密度显著更低; 冷冻干燥速溶茶的流动性优于喷雾干燥速溶茶, 且堆积密度显著更高、水分含量更低。从吸湿性看, 水分活度越高, 不同加工工艺速溶茶间的平衡吸湿率差异越大, 其中中空造粒速溶茶和冷冻干燥速溶茶的平衡吸湿率更低。吸湿模型拟合结果显示 Ferro-Fontan 模型能够同时描述不同加工工艺的吸湿行为 ($R^2>0.99$), 由此计算得出在 20 °C 条件下, 不同加工技术、干燥技术速溶茶的绝对安全含水率分别为 4.00%~4.59%、3.47%~6.09%, 相对安全含水率为 10.42%~12.12%、8.54%~12.73%。综上, 中空造粒和冷冻干燥工艺的速溶茶吸湿性显著低于普通喷雾干燥工艺, 这为速溶茶工艺优化、贮藏环境调控等方面提供了理论参考。

关键词: 速溶茶; 中空造粒; 喷雾干燥; 冷冻干燥; 平衡吸湿率; 等温吸湿模型

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.6.0488

Comparison of the Physical and Moisture Absorption Characteristics of Instant Tea with Different Processing Methods

DU Wenzhong¹, JIANG Yulan², FAN Zhenxin^{3,4}, CHEN Shuang⁵, PAN Junxian², ZHU Yuejin^{2,4}, ZHANG Ruiyang⁶, LYU Yangjun^{2,4*}, WANG Peifei^{2,4*}

(1.Agricultural and Rural Bureau of Longyou County, Quzhou 324400, China) (2.Hangzhou Tea Research Institute, CHINA COOP, Zhejiang Key Laboratory of Transboundary Applied Technology for Tea Resources, Hangzhou 310016, China) (3.Zhejiang Minghuang Natural Products Development Co. Ltd., Quzhou 324000, China) (4.Zhejiang Agricultural Talent" Workstation for Longyou Huang tea Industry of Zhejiang Province, Quzhou 324000, China) (5.College of Food and Health, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China) (6.Xiang Piao Piao Food Co. Ltd., Huzhou 313000, China)

Abstract: To understand the influence of different processing methods on the hygroscopicity of instant tea, this study investigated the physical and hygroscopic properties of instant tea produced by different processing techniques including commercial instant tea and hollow granulated instant tea (industrial production), and different drying techniques including spray drying and freeze drying (laboratory preparation). The investigation encompassed three representative tea categories: instant green tea, instant black tea, and instant jasmine tea. The experimental data were fitted and characterized based on isothermal hygroscopic models which are commonly used. The results showed that the fluidity of hollow granulated instant tea was better than that of commercial instant tea, and its bulk density was significantly lower. The fluidity of freeze-dried instant tea was better than that of spray-dried instant tea, also with significantly higher bulk density and lower moisture content. In terms of hygroscopicity, the higher the water activity, the greater the difference in equilibrium moisture absorption rate among instant teas produced by different processing methods, with hollow granulated instant tea and freeze-dried instant tea showing a lower value. The fitting

收稿日期: 2026-03-30; 修回日期: 2026-05-26; 接受日期: 2026-05-27

基金项目: 龙游县科技计划项目 (2025060); 浙江省团队科技特派员项目

作者简介: 杜文忠 (1989-), 男, 硕士, 农艺师, 研究方向: 农业技术推广, E-mail: 740574995@qq.com。

通讯作者: 吕杨俊 (1989-), 男, 硕士, 副研究员, 研究方向: 茶食品技术研发, E-mail: lvyangjun1989@126.com; 共同通讯作者: 王霏菲 (1995-), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 茶原料、茶饮品质分析与开发应用研究, E-mail: 1063960377@qq.com

results of isothermal hygroscopic models indicated that the Ferro-Fontan model could accurately describe the hygroscopic behavior of instant tea produced by different processing methods ($R^2>0.99$). Calculated by the model, the absolute safe moisture content ranges for instant tea produced by different processing techniques and drying techniques at 20 °C were 4.00%~4.59% and 3.47%~6.09%, respectively, while the relative safe moisture content ranges were 10.42%~12.12% and 8.54%~12.73%, respectively. In conclusion, the hygroscopicity of instant tea produced by hollow granulation and freeze-drying processes was significantly lower than that of the conventional spray drying process, which provides theoretical reference for optimizing instant tea processing and regulating storage conditions.

Key words: instant tea; hollow granulation; spray drying; freeze drying; equilibrium moisture absorption rate; isothermal hygroscopic model

速溶茶是一种以鲜茶叶或成品茶叶为原料,经过热水浸提或榨汁,再通过真空浓缩、杀菌、干燥等方法制备而成的粉末状、颗粒状或片状产品,与传统茶叶相比,具有即冲即饮、方便携带、品质稳定等优点,在现代化快消费市场中占据重要地位^[1]。然而,在加工与贮藏过程中,速溶茶普遍表现出较强的吸湿性,这一特性主要由于其微观多孔结构、较高比表面积及原料本身的理化性质所决定,并与环境温湿度密切相关^[2]。吸湿不仅影响速溶茶的物理状态例如结块、流动性下降,还会引发一系列产品品质的劣变。研究表明,随着水分吸附,茶叶(粉)中茶多酚等活性成分易发生氧化降解,色泽褐变加剧,特征香气逸散,且微生物滋生风险增加,从而显著降低产品品质与安全性^[3-5]。

目前关于茶的吸湿特性研究主要集中在干茶上,对速溶茶吸湿特性的报道相对较少。在干茶的吸湿性研究中,有研究通过静态称重法测定不同温度和不同水分活度条件下的吸湿特性,发现平衡含水率与水分活度呈正比、与温度呈反比。Botheju 等^[6]的结果显示修正后的 Oswin 模型能较好拟合红茶的实验数据,胥伟等^[7]的结果显示 GAB 模型和 Oswin 模型是黑毛茶较优的等温吸湿模型。在速溶茶的吸湿性研究中,研究者发现微胶囊化速溶红茶能够降低速溶茶的水分含量和吸湿性能,乔绚^[8]制备的某一壁材的微胶囊化速溶茶在 15~25℃、湿度 60%~70%环境中避光放置 12 h 后吸湿率仅为 7.92%;Akbarmehr 等^[9]制备的不同壁材的马黛茶提取物微胶囊的吸湿性为 10%~15.9%,且吸湿特征与其溶解度大小相匹配。还有研究者发现加入辅料后能够明显改善原料(茯苓健脾速溶茶)的吸湿性^[10]。由此可见,加工工艺能够影响速溶茶的吸湿特性。另外,不同茶类的吸湿特性存在差异,红茶对环境湿度的耐受度相对更高^[5,11]。

鉴于此,本文选取了不同加工技术(市售速溶茶、中空造粒速溶茶,工业化生产)、不同干燥技术(喷雾干燥、冷冻干燥,实验室制备)的速溶绿茶、速溶红茶以及速溶茉莉花茶为研究对象,比较其堆积密度、流动性等物理特性和吸湿特性,并进行吸湿模型表征,以期提升速溶茶产品贮藏稳定性提供理论依据与工艺优化方向。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

市售速溶茶:速溶绿茶(SSL)、速溶红茶(SSH)、速溶茉莉花茶(SSM),工业化生产,由浙江龙游茗皇黄茶开发有限公司提供。

中空造粒速溶茶:中空造粒速溶绿茶(ZKL)、中空造粒速溶红茶(ZKH)、中空造粒速溶茉莉花茶(ZKM),工业化生产,浙江龙游茗皇黄茶开发有限公司生产线制得。

中空造粒速溶茶加工工艺为:浸提-卧螺离心-冷却-碟片离心-膜过滤-膜浓缩-调配-超高温瞬时杀菌(UHT)-CO₂气液混合-喷粉。CO₂气液混合参数为:料液流量 100~150 L/h, CO₂流量 0.5~2 Nm³/h,循环 20~30 min。市售速溶茶的加工工艺仅减少“CO₂气液混合”工艺,其余工艺相同。

喷雾干燥工艺:喷雾干燥速溶绿茶(PWL)、喷雾干燥速溶红茶(PWH)、喷雾干燥速溶茉莉花茶(PWM),实验室自制,喷雾干燥工艺参数为:进风温度 220 °C,出风温度 95.7 °C。

冷冻干燥工艺:冷冻干燥速溶绿茶(LDL)、冷冻干燥速溶红茶(LDH)、冷冻干燥速溶茉莉花茶(LDM),实验室自制。冷冻干燥工艺参数为:-50 °C,48 h。

1.2 仪器与设备

YC-15 实验型喷雾干燥机, 上海雅程仪器设备有限公司; ALPHA 1-2 LD plus 冷冻干燥机, 德国 Martin Christ 公司; DHG-9140A 型电热恒温干燥箱, 上海精宏实验设备有限公司; AL204 电子分析天平, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 水分含量的测定

参照 GB/T5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》第一法, 即将铝盒洗净烘干至恒重, 再称取 2 g 试样于铝盒中, 放入烘箱于 105 °C 恒温干燥箱中 4 h, 取出置于干燥器中冷却 0.5 h 后称重, 按照公式(1)计算试样中的水分含量:

$$X = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_3} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

X ——水分含量, %;

m_1 ——干燥前铝盒与试样总质量, g;

m_2 ——干燥后铝盒与试样总质量, g;

m_3 ——铝盒质量, g。

1.3.2 自由流动和紧密堆积密度测定

参照 GB/T 18798.5—2013《固态速溶茶第五部分: 自由流动和紧密堆积密度的测定》并做一定修改, 将充分混合的试样通过漏斗自由流动至洁净的 10 mL 刻度试管中, 在此过程中避免人为振动或敲击试管, 试样填充至适宜刻度线时停止装填, 保持表面平整, 称量装有试样的试管总质量, 然后减去测量试管的质量, 按照公式(2)计算试样的自由流动堆积密度。

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

式中:

ρ ——密度, g·mL⁻¹;

m ——试样质量, g;

V ——试样体积, mL。

精确称取一定质量试样, 然后将试样转移至 10 mL 刻度试管中, 采用固定频率、固定力度振动 100 次以消除颗粒间隙, 读取试管内试样的体积, 按照公式(2)计算紧密堆积密度。

1.3.3 流动性的测定

流动性采用压缩度(Carr's Compressibility index)和豪斯纳比(Hausner Ratio)、休止角进行表征^[12,13]。相应的流动性等级分类见表 1^[14]。

压缩度和豪斯纳比: 根据 1.3.2 测得的堆积密度结果按照公式(3)和(4)分别计算压缩度和豪斯纳比。

$$C = \frac{\rho_T - \rho_B}{\rho_T} \times 100\% \quad (3)$$

$$H = \frac{\rho_T}{\rho_B} \quad (4)$$

式中:

C ——压缩度, %;

ρ_T ——紧密堆积密度, g·mL⁻¹;

ρ_B ——自由堆积密度, g·mL⁻¹;

H ——豪斯纳比。

休止角: 参照 GB/T 11986-1989《表面活性剂 粉体和颗粒休止角的测量》并做一定修改。将一张白纸平铺在

水平桌面上,垂直固定漏斗于白纸正上方,使漏斗下端出口与白纸表面保持垂直距离(h)为0.60 cm。随后,缓慢地将待测试样倒入漏斗中,直至试样在白纸上自然堆积形成的圆锥体顶部恰好接触漏斗下端出口,测量白纸上形成的试样圆锥堆底部直径 d ,最后根据垂直高度 h 与圆锥底面半径 r 按照公式(5)计算休止角:

$$\theta = \arctan\left(\frac{h}{r}\right) \quad (5)$$

式中:

θ ——休止角,°;

h ——漏斗下口距离纸面高度,cm;

r ——试样所形成的圆锥底部的半径,cm。

表1 流动性等级分类

Table 1 Classification of liquidity levels

压缩度/%	豪斯纳比	流动性判别	休止角/°	流动性判别
1~10	1.00~1.11	非常好	25~30	非常好
11~15	1.12~1.18	好	31~35	好
16~20	1.19~1.25	较好	36~40	较好
21~25	1.26~1.34	尚可	41~45	尚可
26~31	1.35~1.45	差	46~55	差
32~37	1.46~1.59	非常差	56~65	非常差
>38	>1.60	极差	>66	极差

注:第一个流动性判别的依据为压缩度和豪斯纳比,第二个流动性判别的依据为休止角。

1.3.4 吸湿实验

1.3.4.1 脱湿平衡实验

将洁净的称量皿于105℃烘箱中干燥至恒重,转移至干燥器中冷却至室温备用,记录空称量皿质量,并称取1 g经不同干燥工艺制成的速溶茶试样置于称量皿内,轻微摇晃称量皿使速溶茶均匀平铺于瓶底,开盖置于底部放有变色硅胶的干燥器中脱湿63 h(20℃),使速溶茶达到脱湿平衡,称量速溶茶与称量皿的总质量,按照公式(6)计算试样的平衡脱湿率:

$$W = \frac{m_2 - (m_3 - m_1)}{m_2} \times 100\% \quad (6)$$

式中:

W ——平衡脱湿率, %;

m_1 ——恒重后的称量皿质量, g;

m_2 ——试样的质量, g;

m_3 ——脱湿后试样和称量皿的质量, g。

1.3.4.2 吸湿平衡实验

控制环境温度稳定在20℃;干燥器内的相对湿度由饱和盐溶液调节控制,所选取的饱和盐溶液在20℃条件下所对应的相对湿度为:LiCl 11%、MgCl₂ 33%、NaBr 57%、NaCl 75%、K₂SO₄ 98%^[15]。

采用静态称重法测定试样的吸湿率,将放有饱和盐溶液的干燥器放置于20℃环境中,放置63 h,使干燥器内温度稳定在20℃,再将达到脱湿平衡的试样连同称量皿一起开盖置于干燥器中,分别在第1、3、5、8、23、31、47、55、71、78、94 h时取出称重,试样的吸湿率按照公式(7)计算:

$$A = \frac{m_3 - m_2}{m_2 - m_1} \times 100\% \quad (7)$$

式中:

A ——吸湿率, %;

m_1 ——恒重后的称量皿质量, g;

m_2 ——脱湿平衡后试样和称量皿的质量, g;

m_3 ——吸湿试样和称量皿的质量，g。

1.3.5 等温吸湿模型表征

为进一步探究不同加工工艺速溶茶的吸湿特性，本文选取了 7 种模型进行拟合分析^[16,17]，并采用决定系数(R^2)与误差平方和 (SSE) 评估模型拟合效果的优劣， R^2 值的范围为[0,1]，SSE 的范围为[0,+∞)，且 R^2 越接近于 1、SSE 越接近于 0，表明模型拟合度越高、拟合效果越优^[8]，具体数学模型表达式见表 2。

表 2 等温吸湿模型

Table 2 Isothermal hygroscopic models	
模型名称	模型表达式
Lewickil	$M_{eq} = a(\frac{1}{A_w} - 1)^{b-1}$
Chen	$M_{eq} = \frac{b - \ln(-\ln A_w)}{a}$
Ferro-Fontan	$M_{eq} = \left[\frac{a}{\ln(\frac{b}{A_w})} \right]^{\frac{1}{c}}$
Henderson	$M_{eq} = \left[-\frac{\ln(1 - A_w)}{a} \right]^{\frac{1}{b}}$
Halsey	$M_{eq} = (-\frac{a}{\ln A_w})^{\frac{1}{b}}$
Smith	$M_{eq} = a + b \ln(1 - A_w)$
Oswin	$M_{eq} = a(\frac{A_w}{1 - A_w})^{\frac{1}{b}}$

注： A_w 为水分活度， M_{eq} 为平衡含水率；a、b、c 为模型常数。

1.4 数据处理

每组实验平行测定 3 次，结果以平均值 ($\bar{X}$) ±标准差 (SD) 表示。采用 Origin 2021 作图和等温吸湿模型拟合，SPSS 27.0 作显著性分析， $P<0.05$ 表示显著性差异。

2 结果与分析

2.1 不同加工工艺的速溶茶水分分析

2.1.1 不同加工技术速溶茶水分

由表 3 可知，市售速溶绿茶、速溶红茶、速溶茉莉花茶的水分含量分别为 4.29%、4.91%、4.38%；中空造粒速溶绿茶、中空造粒速溶红茶、中空造粒速溶茉莉花茶的水分含量分别为 4.79%、4.83%、4.61%。整体来看，市售速溶茶和中空造粒速溶茶的水分含量相差较小，但在统计学上是具有显著性差异的。

表 3 不同加工技术速溶茶水分含量

Table 3 Water content of instant teas with different processing techniques	
样品名称	水分含量/%
SSL	4.29±0.02 ^e
SSH	4.91±0.03 ^a
SSM	4.38±0.07 ^d
ZKL	4.79±0.03 ^b

ZKH	4.83±0.03 ^{ab}
ZKM	4.61±0.03 ^c

注：不同字母代表差异显著（ $P<0.05$ ），下同。

2.1.2 不同干燥技术速溶茶水分

不同干燥技术的速溶茶含水量见表 4。经过冷冻干燥的速溶绿茶、红茶、茉莉花茶的水分含量分别为 6.28%、6.48%和 7.08%，而喷雾干燥得到的速溶茶水分含量分别为 2.43%、2.83%和 2.45%。两种干燥技术得到的速溶茶水分含量差别较大，这可能是因为两种干燥技术的原理不同：冷冻干燥技术是利用低温升华原理，先将物料冷冻使其中的水分固化成冰，随后在高真空环境下，冰直接升华为水蒸气排出，然而，该过程因其升华速率较低，且低温环境不利于水分的迁移，难以实现水分的深度脱除^[18]，因此产品水分残留相对较多；而喷雾干燥技术是基于热质快速交换原理，将液态物料雾化成微米级雾滴后，与热空气充分接触，可以实现水分快速蒸发，同时高温环境为水分的蒸发创造了有利条件，能够高效降低物料水分含量^[19]，因此，喷雾干燥得到的速溶茶水分含量整体要低于冷冻干燥。

表 4 不同干燥技术速溶茶水分含量
Table 4 Water content of instant teas with different drying processes

样品名称	水分含量/%
LDL	6.28±0.07 ^c
LDH	6.48±0.04 ^b
LDM	7.08±0.03 ^a
PWL	2.43±0.07 ^e
PWH	2.83±0.01 ^d
PWM	2.45±0.03 ^e

2.2 不同加工工艺的速溶茶物理品质特性分析

2.2.1 不同加工技术速溶茶物理品质特性分析

堆积密度能反映粉体的表面结构和颗粒间隙，堆积密度越大，代表物料间的空隙越小，颗粒表面越光滑、形状越规则。如表 5 所示，在堆积密度方面，市售速溶绿茶、速溶红茶、速溶茉莉花茶，其自由堆积密度与紧密堆积密度整体均显著高于中空造粒对应的各茶类（ $P<0.05$ ）。由此计算得到的压缩度和豪斯纳比结果显示：中空造粒速溶茶的压缩度在 11%~15%之间，豪斯纳比在 1.12~1.18 之间，均显著低于市售速溶茶（压缩度在 21%~25%之间，豪斯纳比在 1.26~1.34 之间）；参照表 1，中空造粒速溶流动性判别为“好”，市售速溶茶流动性为“尚可”。这可能是由于中空造粒速溶茶在堆积时空隙率高，导致自由堆积密度显著降低，在振实状态下，速溶茶内部空腔可以产生缓冲效应，削弱颗粒间作用力，降低紧密堆积密度，使速溶茶具有更好的流动性^[20]。

休止角又称为自流角，它的大小可用于辅助分析成品的流动性，在一定范围内，颗粒的平均粒径与休止角成反比，颗粒越大，休止角越小，颗粒的流动性也就越好。结果显示不同加工技术的所有样品的休止角在 26~31°之间，根据表 1，流动性均为“非常好”，这与压缩度和豪斯纳比的结果不同，原因在于两个指标测量的物理本质不同：休止角主要表征颗粒的滚动摩擦特性，而压缩度主要表征颗粒间的内聚与重组能力。市售速溶茶和中空造粒速溶茶中多为球形或近球形颗粒，滚动摩擦小，休止角相对较小，但两种加工技术得到的茶粉颗粒间内聚力不同，因此由压缩度和豪斯纳比得到的流动性判别出现差异。由此说明压缩度和豪斯纳比指标比休止角更适用于速溶茶的流动性评价。

表 5 不同加工技术速溶茶物理品质特性
Table 5 Physical quality characteristics of instant teas with different processing techniques

样品名称	自由堆积密度/(g·mL ⁻¹)	紧密堆积密度/(g·mL ⁻¹)	压缩度/%	豪斯纳比	流动性判别	休止角/°	流动性判别
SSL	0.48±0.00 ^b	0.62±0.00 ^b	21.59±0.77 ^a	1.28±0.01 ^a	尚可	26.89±0.57 ^{bc}	非常好
SSH	0.39±0.01 ^c	0.50±0.01 ^c	22.31±0.66 ^a	1.29±0.01 ^a	尚可	27.95±1.63 ^{bc}	非常好
SSM	0.50±0.02 ^a	0.66±0.02 ^a	24.97±1.39 ^a	1.33±0.02 ^a	尚可	30.56±0.70 ^a	非常好
ZKL	0.22±0.00 ^e	0.26±0.01 ^e	13.99±3.17 ^b	1.16±0.04 ^b	好	28.31±1.61 ^b	非常好

现代食品科技		Modern Food Science and Technology				2027, Vol.43, No.6	
ZKH	0.25±0.01 ^d	0.28±0.01 ^d	11.76±4.19 ^b	1.13±0.05 ^b	好	25.99±1.42 ^c	非常好
ZKM	0.21±0.00 ^e	0.24±0.01 ^e	13.13±3.43 ^b	1.15±0.05 ^b	好	30.56±0.70 ^a	非常好

注：第一个流动性判别的依据为压缩度和豪斯纳比，第二个流动性判别的依据为休止角。

2.2.2 不同干燥技术速溶茶物理品质特性分析

不同干燥技术通过改变颗粒结构，显著影响了速溶茶的物理品质特性。在堆积密度方面，冷冻干燥绿茶、红茶和茉莉花茶的自由堆积密度与紧密堆积密度均显著高于喷雾干燥的对应茶类 ($P<0.05$)。究其原因，一方面，冷冻干燥是通过低温升华脱水，粉体表面呈现疏松多孔的不规则结构^[21]，在堆积时能互相嵌合填充，使得冷冻干燥样品堆积密度较高；另一方面，堆积密度与水分含量和水分活度高度正相关^[22]，本研究中冷冻干燥获得的速溶茶粉中水分含量显著高于喷雾干燥，较高的残留水分可能意味着样品表面具有一定粘性或塑性，使颗粒在堆积时能够更紧密嵌合，一定程度上提高了堆积密度；而喷雾干燥是将液态物料高温雾化后快速脱水，温度过高会导致干燥后的样品呈现多孔或碎裂的结构^[23]，堆积时点接触空隙大，从而导致速溶茶样品的堆积密度更低。由此计算得到的压缩度和豪斯纳比结果显示：冷冻干燥速溶茶的压缩度在 26%~31%之间，豪斯纳比在 1.35~1.45 之间，均显著低于喷雾干燥速溶茶（压缩度>36%，豪斯纳比>1.60）；参照表 1，冷冻干燥速溶茶流动性判别为“差”，喷雾干燥速溶茶流动性为“极差”。造成两种干燥技术的流动性差异的原因可能是喷雾干燥技术制得的速溶茶颗粒粒径小，表面能高，颗粒间易产生静电吸附和范德华力，从而出现结块导致流动性变差^[24]。

从休止角来看，冷冻干燥样品的休止角在 31~36°之间，被判别为“好”；喷雾干燥样品在测定时无法行成稳定堆积，究其原因，一方面，实验室喷雾干燥设备干燥腔体小、热容量低，雾滴在塔内的停留时间短，工艺参数的微小波动都容易导致最终茶粉的干燥不彻底或局部过热；另一方面，实验室在样品的收集过程中对环境湿度的控制不及工厂严格，易产生静电和吸湿，从而导致流动性的下降。故本试验没有对实验室自制喷雾干燥样品的休止角进行测定。这也进一步说明压缩度和豪斯纳比指标比休止角更适用于速溶茶的流动性评价。喻卉采用压缩度比较不同干燥技术的速溶苦荞茶粉的流动性时，也发现真空干燥加工得到的产品流动性比喷雾干燥更好^[25]。

表 6 不同干燥技术速溶茶物理品质特性

Table 6 Physical quality characteristics of instant teas with different drying techniques							
样品名称	自由堆积密度/(g·mL ⁻¹)	紧密堆积密度/(g·mL ⁻¹)	压缩度/%	豪斯纳比	流动性判别	休止角/°	流动性判别
LDL	0.66±0.01 ^b	0.92±0.01 ^a	28.07±1.29 ^c	1.39±0.02 ^c	差	35.22±0.00 ^a	好
LDH	0.69±0.01 ^a	0.93±0.01 ^a	26.08±1.88 ^c	1.35±0.03 ^c	差	30.99±1.27 ^b	好
LDM	0.64±0.01 ^b	0.86±0.02 ^b	26.04±1.48 ^c	1.35±0.03 ^c	差	34.71±0.88 ^a	好
PWL	0.29±0.02 ^c	0.55±0.01 ^c	47.97±3.29 ^a	1.93±0.12 ^a	极差	-	-
PWH	0.27±0.02 ^c	0.48±0.00 ^d	42.85±3.28 ^b	1.75±0.10 ^b	极差	-	-
PWM	0.24±0.01 ^d	0.44±0.00 ^e	44.60±1.39 ^{ab}	1.81±0.05 ^{ab}	极差	-	-

注：第一个流动性判别的依据为压缩度和豪斯纳比，第二个流动性判别的依据为休止角。“-”表示未测量。

2.3 不同加工工艺的速溶茶吸湿特性

2.3.1 不同加工技术速溶茶吸湿性

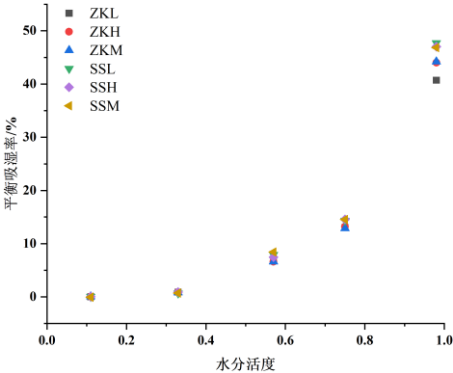


图 1 不同加工技术速溶茶的平衡吸湿率（20 °C）

Fig.1 Moisture absorption of instant teas with different processing techniques (20 °C)

由图 1，20 ℃时，两种加工技术的速溶茶的平衡吸湿率均随着水分活度的增加而增大，且变化规律符合食品粉末物质的典型特征，即，在低水分活度区间($A_w<0.5$)，平衡吸湿率增长相对平缓，当水分活度持续升高($A_w>0.8$)后，平衡吸湿率呈现急剧上升的趋势，这与其他研究报道结果一致^[6,26]。整体而言，市售速溶茶的平衡吸湿率高于中空造粒速溶茶，且水分活度越高，两种加工技术的平衡吸湿率差异越大。这说明中空造粒可能有助于提高速溶茶的贮藏稳定性（尤其在高湿度环境中），减少速溶茶结块、潮解、变色和变质等现象的出现。

2.3.2 不同干燥技术速溶茶吸湿性

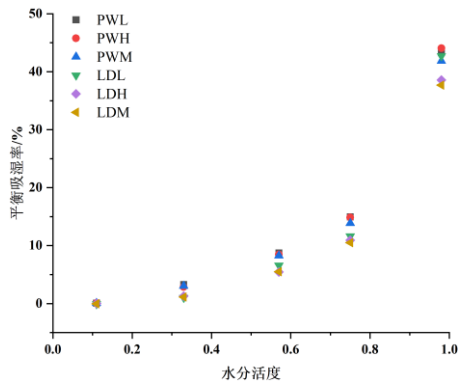


图 2 不同干燥技术速溶茶的平衡吸湿率（20 ℃）

Fig.2 Moisture absorption of instant teas with different drying techniques (20 °C)

由图 2，20 ℃时，随水分活度的升高，不同干燥技术速溶茶样品的平衡吸湿率也呈上升趋势，变化规律同样符合食品粉末物质的典型吸湿特征。与不同加工技术速溶茶平衡吸湿率增长规律不同的是，在较低水分活度条件下 ($A_w<0.4$)，不同干燥技术速溶茶的平衡吸湿率的增长速率相对更大。在相同水分活度下，喷雾干燥绿茶、红茶、茉莉花茶平衡吸湿率整体高于冷冻干燥速溶茶，且随着水分活度的进一步升高，两种干燥技术得到的速溶茶的平衡吸湿率差异逐渐扩大，这表明速溶茶的干燥工艺对其吸湿性有一定影响。受干燥速率、干燥温度及物料粘度等因素的影响，喷雾干燥制备的颗粒表面可能会出现凹凸不平、褶皱、孔洞和空隙，从而更容易在环境中吸湿^[27]。另外，在相同干燥技术处理下，速溶绿茶、红茶和茉莉花茶的吸湿曲线较为接近，但仍存在细微差异，这可能与茶叶中所含的特殊成分有关，进一步影响了整体吸湿表现，总体来说，相比于喷雾干燥技术，冷冻干燥技术所制得的速溶茶平衡吸湿率更低，在贮藏方面可能有更好的稳定性。

2.4 等温吸湿模型表征

2.4.1 不同加工技术速溶茶等温吸湿模型

根据实验所得的等温吸湿数据，分别应用表 1 的模型对不同加工技术速溶茶等温吸湿特性进行拟合，得到相应的模型参数及拟合效果评价指标如表 7 所示，结果显示，Chen 模型、Ferro-Fontan 模型、Henderson 模型、Smith 模型拟合效果的评价指标较好，均在可接受范围之内，Ferro-Fontan 模型的 SSE 值在 1~6 之间，在三者之中相对较低，说明其拟合精度更高，拟合效果最好，是所比较模型中最可靠的模型。Ferro-Fontan 模型在食品中的应用也很常见，比如冻干苹果粉^[28]、聚葡萄糖^[29]等都可以用此模型来预测食品的水分吸附行为。

表 7 不同加工技术速溶茶等温吸湿模型参数及拟合效果评价指标

Table 7 Parameters and fitting effect evaluation indicators of isothermal hygroscopic models for instant teas with different processing techniques						
样品名称	模型	模型参数			R^2	SSE
		a	b	c		
SSL	Lewickil	6.44	0.48		0.98	28.10
	Chen	0.09	0.35		0.96	42.91
	Ferro-Fontan	2.06	1.71	0.34	0.99	4.38
	Henderson	0.16	0.82		0.99	6.59
	Halsey	16.88	1.74		0.96	43.13

SSH	Smith	-3.07	-12.91		1.00	4.87
	Oswin	6.45	1.94		0.98	28.10
	Lewickil	6.44	0.49		0.98	28.24
	Chen	0.10	0.36		0.96	40.04
	Ferro-Fontan	2.08	1.86	0.31	1.00	2.46
	Henderson	0.16	0.83		1.00	6.08
	Halsey	17.25	1.75		0.96	43.27
	Smith	-2.95	-12.72		1.00	3.97
SSM	Oswin	6.45	1.95		0.98	28.24
	Lewickil	6.64	0.50		0.97	30.58
	Chen	0.10	0.37		0.97	35.73
	Ferro-Fontan	2.14	1.74	0.34	0.99	5.66
	Henderson	0.15	0.85		0.99	7.79
	Halsey	19.09	1.78		0.96	46.56
	Smith	-2.76	-12.65		1.00	4.38
	Oswin	6.64	1.99		0.97	30.58
ZKL	Lewickil	5.85	0.50		0.97	23.07
	Chen	0.11	0.38		0.97	26.15
	Ferro-Fontan	2.07	1.90	0.31	1.00	2.16
	Henderson	0.17	0.85		0.99	5.07
	Halsey	15.60	1.79		0.96	35.31
	Smith	-2.32	-10.99		1.00	2.55
	Oswin	5.85	2.00		0.97	23.07
ZKH	Lewickil	5.81	0.48		0.98	22.06
	Chen	0.10	0.34		0.96	39.04
	Ferro-Fontan	1.97	1.77	0.32	1.00	1.72
	Henderson	0.18	0.81		1.00	4.38
	Halsey	13.74	1.72		0.97	34.22
	Smith	-2.93	-11.93		1.00	4.03
	Oswin	5.81	1.92		0.98	22.06
ZKM	Lewickil	5.70	0.47		0.98	20.27
	Chen	0.10	0.34		0.96	41.66
	Ferro-Fontan	1.93	1.65	0.35	1.00	2.05
	Henderson	0.19	0.80		1.00	3.86
	Halsey	12.89	1.70		0.97	31.87
	Smith	-3.03	-11.98		1.00	4.58
	Oswin	5.70	1.89		0.98	20.27

注: a、b、c 为模型常数。

水分活度可以用来预测食品贮藏稳定性, 通过控制水分活度, 能够有效地抑制微生物生长繁殖。目前, 普遍认为当食品中的水分活度小于 0.70 时, 可显著抑制酵母菌、霉菌及细菌的生长; 当水分活度小于 0.50 时, 几乎所有微生物无法生长繁殖^[30]。因此当速溶茶水分活度为 0.70 时的水分含量是相对安全的, 由此计算得到的水分含量为相对安全含水率; 水分活度为 0.50 时的水分含量是绝对安全的, 由此计算得到的水分含量为绝对安全含水率。

根据 Ferro-Fontan 模型, 计算速溶茶在 20 °C 下的相对安全含水率和绝对安全含水率, 结果见表 8。在加工时将速溶茶的水分含量控制在绝对安全含水率以下, 有利于速溶茶的贮藏。

表 8 不同加工技术速溶茶贮藏过程中的绝对安全含水率和相对安全含水率

Table 8 The absolute safe moisture content and relative safe moisture content of instant teas with different processing techniques

样品名称	绝对安全含水率/%	相对安全含水率/%
SSL	4.59	11.79
SSH	4.50	11.83
SSM	4.83	12.12
ZKL	4.17	10.71
ZKH	4.03	10.66
ZKM	4.00	10.42

2.4.2 不同干燥技术速溶茶等温吸湿模型

不同模型对不同干燥技术速溶茶等温吸湿数据拟合得到的模型参数及拟合效果评价指标如表 9 所示，结果显示，Chen 模型、Ferro-Fontan 模型、Henderson 模型、Smith 模型拟合效果的评价指标较好， R^2 均大于 0.99。其中，Ferro-Fontan 模型与 Henderson 模型的 R^2 与 SSE 均较为接近，表现出极高的拟合精度，这说明两种模型均能准确描述冷冻干燥速溶茶和喷雾干燥速溶茶的水分吸附行为。

表 9 不同干燥技术速溶茶等温吸湿模型参数及拟合效果评价指标

Table 9 Parameters and fitting effect evaluation indicators of isothermal hygroscopic models for instant teas with different drying techniques

样品名称	模型	模型参数			R^2	SSE
		a	b	c		
LDL	Lewickil	5.33	0.46		0.98	14.48
	Chen	0.11	0.33		0.96	41.54
	Ferro-Fontan	1.90	1.40	0.45	1.00	2.78
	Henderson	0.21	0.78		1.00	2.39
	Halsey	11.05	1.68		0.97	24.20
	Smith	-3.01	-11.55		0.99	5.13
	Oswin	5.33	1.87		0.98	14.48
LDH	Lewickil	4.89	0.47		0.99	11.47
	Chen	0.12	0.34		0.96	33.60
	Ferro-Fontan	1.81	1.45	0.42	1.00	0.66
	Henderson	0.22	0.79		1.00	1.23
	Halsey	9.80	1.69		0.97	19.39
	Smith	-2.62	-10.42		1.00	3.67
	Oswin	4.89	1.88		0.99	11.47
LDM	Lewickil	4.75	0.47		0.99	10.99
	Chen	0.12	0.33		0.96	31.78
	Ferro-Fontan	1.79	1.43	0.43	1.00	1.13
	Henderson	0.23	0.79		1.00	1.32
	Halsey	9.21	1.68		0.97	18.59
	Smith	-2.61	-10.18		1.00	3.48
	Oswin	4.74	1.87		0.99	10.99
PWL	Lewickil	7.44	0.55		0.98	19.84
	Chen	0.11	0.52		0.98	15.17
	Ferro-Fontan	2.71	1.42	0.53	1.00	2.13
	Henderson	0.11	0.95		1.00	1.62

	Halsey	33.63	1.96		0.96	35.32
	Smith	-1.08	-11.37		1.00	0.21
	Oswin	7.44	2.20		0.98	19.84
	Lewickil	7.24	0.53		0.98	20.35
	Chen	0.10	0.48		0.98	19.45
	Ferro-Fontan	2.54	1.45	0.50	1.00	1.78
PWH	Henderson	0.12	0.92		1.00	1.82
	Halsey	29.25	1.92		0.96	35.55
	Smith	-1.44	-11.64		1.00	0.19
	Oswin	7.25	2.15		0.98	20.35
	Lewickil	6.95	0.54		0.98	15.92
	Chen	0.11	0.50		0.98	17.36
	Ferro-Fontan	2.66	1.36	0.56	1.00	2.21
PWM	Henderson	0.12	0.92		1.00	1.13
	Halsey	27.47	1.93		0.97	29.20
	Smith	-1.24	-11.02		1.00	0.09
	Oswin	6.95	2.16		0.98	15.92

注：a、b、c 为模型常数。

鉴于 Ferro-Fontan 模型能够同时描述不同加工技术速溶茶的水分吸附行为,因此更具有适用性。由 Ferro-Fontan 模型计算在 20 ℃下速溶茶的相对安全含水率和绝对安全含水率,结果如表 10 所示。

表 10 不同干燥工艺速溶茶贮藏过程中的绝对安全含水率和相对安全含水率

Table 10 Absolute safe moisture content and relative safe moisture content of instant teas with different drying techniques

样品名称	绝对安全含水率/%	相对安全含水率/%
LDL	3.94	9.58
LDH	3.55	8.80
LDM	3.47	8.54
PWL	6.09	12.73
PWH	5.81	12.53
PWM	5.70	11.84

3 结论

本试验系统探究了不同加工工艺（加工技术、干燥技术）对速溶绿茶、速溶红茶、速溶茉莉花茶物理品质特性及吸湿特性的影响。结果表明，不同加工工艺间速溶茶的性质差异较大，而不同茶类间的差异相对较小。具体而言，工业化生产中，不同加工技术对速溶茶的堆积密度、流动性影响较大，中空造粒速溶茶的自由堆积密度与紧密堆积密度整体均显著低于市售速溶茶，且流动性更好（以压缩度和豪斯纳比为参考依据）；实验室制备中，不同干燥技术对速溶茶水分含量、堆积密度、流动性的影响均较为明显，冷冻干燥速溶茶的整体水分含量、自由堆积密度与紧密堆积密度均高于喷雾干燥速溶茶，流动性也优于喷雾干燥速溶茶(以压缩度和豪斯纳比为参考依据)。20 ℃条件下，不同加工技术、不同干燥技术速溶茶的平衡吸湿率均随水分活度的增大而增大，尤其在高分活度下呈指数增长趋势，以中空造粒速溶茶、冷冻干燥速溶茶的平衡吸湿率相对较低，相比于普通喷雾干燥速溶茶可能更有助于其在高湿度环境中的贮藏稳定性。由于两者原料的不同，本文未进行中空造粒速溶茶与冷冻干燥速溶茶的比较。通过等温吸湿模型拟合,发现 Ferro-Fontan 模型能同时精确描述不同工艺速溶茶的吸湿行为($R^2>0.99$)，是预测速溶茶储藏稳定性、指导包装设计的优选模型。基于该模型计算得到，在 20 ℃条件下，不同加工技术制得的速溶茶的绝对安全含水率为 4.00%~4.59%，相对安全含水率为 10.42%~12.12%；不同干燥工艺制得的速溶茶的绝对安全含水率为 3.47%~6.09%，相对安全含水率为 8.54%~12.73%，这为速溶茶加工工艺优化与安全贮藏提供理

论参考。未来可进一步结合微观结构分析阐明其与吸湿行为的关系,并通过多温湿度条件下的长期贮藏实验验证模型预测效果,从而为速溶茶产品的精准工艺设计与质量控制提供更充分的科学支撑。

参考文献

- [1] ASIF M, SIDDIQUI A J, THADHANI V M, et al. Untargeted metabolomics study of unprocessed tea materials, instant tea products, and their byproducts [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2026, 20(4): 5812-5822.
- [2] 涂云飞,杨秀芳,孔俊豪,等.固态速溶茶贮藏过程中含水率、儿茶素及茶黄素含量变化的研究[J].*中国茶叶加工*,2020,4:76-80.
- [3] 杜芷茵,王玉莲,万欣雨,等.贮藏温度和湿度条件对茶叶、干贝和枸杞贮藏期间品质变化的影响[J].*食品科技*,2023,48(5):34-41.
- [4] LV H L, FENG X Y, SONG H Z, et al. Tea storage: A not thoroughly recognized and precisely designed process [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2023, 140: 104172.
- [5] ANETA O, TOMASZ P, KATARZYNA Ż, et al. The influence of storage conditions on the stability of selected health-promoting properties of tea [J]. *LWT*, 2023, 184: 115029.
- [6] BOTHEJU W S, AMARATHUNGE K S P, ZIYAD M M T. Modeling moisture desorption isotherms and thermodynamic properties of fermented tea dhool (*Camellia sinensis* var. *assamica*) [J]. *Drying Technology*, 2008, 26(10): 1294-1299.
- [7] 胥伟,赵仁亮,姜依何,等.湖南黑毛茶等温吸湿模型建立及霉变安全性研究[J].*食品科学*,2018,39(7):27-32.
- [8] 乔绚.速溶红茶浸提工艺与微胶囊化的制备及其品质特性研究[D].杭州:浙江工商大学,2020.
- [9] AMIR A, SEYED H P, MARAL S, et al. Microencapsulation of Yerba mate extract: The efficacy of polysaccharide/protein hydrocolloids on physical, microstructural, functional, and antioxidant properties [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 234: 123678.
- [10] 李想,陈洁,张惠萍,等.茯苓健脾速溶茶原料及成品吸湿性比较研究[J].*湖南中医药大学学报*,2022,42(9):1465-1469.
- [11] 蒋玉兰,吕杨俊,林剑峰,等.碎茶吸湿特性研究[J].*农产品加工*,2021,9:13-17.
- [12] 张伟,李来存.药物制剂开发中的粉体流动性表征技术概述[J].*现代盐化工*,2025,52(1):29-31.
- [13] RUTH H N, AURELIO L M, ENRIQUE P, et al. Encapsulation of oregano essential oil (*Origanum vulgare*) by complex coacervation between gelatin and chia mucilage and its properties after spray drying [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 109: 106077.
- [14] HALAH H A, AHMED A H. Oral solid self-nanoemulsifying drug delivery systems of candesartan citexetil: formulation, characterization and in vitro drug release studies [J]. *AAPS Open*, 2017, 3(1): 6.
- [15] 刘飞宇.茶梗基调湿材料的制备及性能研究[D].南昌:南昌大学,2023.
- [16] ROBERTA C S T, CACIANO P Z N, LIGIA D F M, et al. Adsorption isotherms of pinhã (*Araucaria angustifolia* seeds) starch and thermodynamic analysis[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 100(3): 468-473.
- [17] ASMA K B, NOURHÈNE B M, NABIL K. Moisture sorption isotherms – Experimental and mathematical investigations of orange (*Citrus sinensis*) peel and leaves [J]. *Food Chemistry*, 2012, 132(4): 1728-1735.
- [18] 路希,郭桂华.冷冻干燥技术在胶原蛋白中的应用进展[J].*山东化工*,2025,54(9):104-106.
- [19] 李星君,李明富.喷雾干燥技术在核工程领域研究及应用现状概述[J].*广东化工*,2025,52(15):50-53.
- [20] 李美焕,李库,郭辉,等.杂色蛤中空盐粒的制备与品质评价[J].*现代食品科技*,2026,42(5):175-183.
- [21] JORDANIA C C S, NAYANE M S, NAYARA S S, et al. Characterization of flours from the aroeira leaf (*Schinus terebinthifolius* Raddi), obtained by different drying methods [J]. *Journal of Chromatography B*, 2024, 1239: 124126.
- [22] MICHALSKA C A, MAJERSKA J, BRZEZOWSKA J, et al. The influence of maltodextrin and inulin on the physico-chemical properties of cranberry juice powders [J]. *ChemEngineering*, 2020, 4: 12.
- [23] MAHBOUBEH F, ZAHRA E D, AHMAD K A, et al. Effect of spray drying conditions and feed composition on the physical properties of black mulberry juice powder [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2012, 90(4): 667-675.
- [24] CHEN S Y, FAN L J, CHEN X Y, et al. Microencapsulation of *Lonicera caerulea* pomace extract by spray drying: Characterization and stability studies [J]. *LWT*, 2025, 223: 117778.
- [25] 喻卉.速溶苦荞茶粉的制备及其品质评价研究[D].成都:西华大学,2020.
- [26] 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.
- [27] 阮晓颖.瑞德西韦吸入粉雾剂的制备及吸入特性研究[D].南京:东南大学,2022.

- [28] YANG X T, WEI Y J, LIU J, et al. Effects of gliadin and glutenin on the hygroscopicity of freeze-dried apple powders [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 894176.
- [29] LIU C, LI X Y, SONG H D, et al. Moisture sorption isotherms of polydextrose and its gelling efficiency in inhibiting the retrogradation of rice starch [J]. *Gels*, 2024, 10(8): 529.
- [30] 夏晓霞,薛艾莲,寇福兵,等.冬枣粉吸湿的色泽、热力学特性及糖物质基础分析[J].*食品科学*,2022,43(11): 29-38.