

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.81069

# 热风烘干关键因素对浒苔物理特性的影响

王震 杨进

(江苏海洋大学机械工程学院, 江苏 连云港 222005)

**摘要:** [目的] 探究浒苔在热风干燥过程中的品质变化规律。[方法] 考察热风温度、风速及物料厚度 3 个关键烘干因素对浒苔物理特性(含水率、孔隙率、比热容及热导率)的影响。通过单因素试验与多因素相关性分析相结合的方法, 明确各因素的影响规律, 并构建偏最小二乘回归预测模型。[结果] 升高温度可显著降低浒苔含水率, 提高孔隙率和比热容, 同时使热导率呈下降趋势; 风速增大能有效促进水分脱除和孔隙结构形成, 对降低热导率作用显著; 物料厚度对热导率的影响最为突出, 厚度增加会抑制孔隙结构发展。皮尔逊相关性表明, 浒苔各物理特性之间均存在显著相关性。基于偏最小二乘回归建立的物理特性的预测模型, 其中含水率、孔隙率、比热容、热导率的  $R^2$  值分别为 96.8%, 97.6%, 94.2%, 95.2%, 模型拟合良好, 准确性较高, 验证实验证实模型可靠。[结论] 热风温度、风速及物料厚度对浒苔物理特性的影响规律, 可以为浒苔工业化干燥工艺优化与品质调控提供参考。

**关键词:** 浒苔; 热风烘干装置; 物理特性; 含水率; 相关性分析; 偏最小二乘回归分析

## Effects of key factors in hot air drying on the physical properties of *Ulva prolifera*

WANG Zhen YANG Jin

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang, Jiangsu 222005, China)

**Abstract:** [Objective] To explore the quality change patterns of *Ulva prolifera* during the hot air drying process. [Methods] The effects of three key drying factors (hot air temperature, air velocity, and material thickness) on the physical properties of *U. prolifera* (including moisture content, porosity, specific heat capacity, and thermal conductivity) are systematically investigated. Then, the influence patterns of each factor are clarified by single-factor experiments combined with multi-factor correlation analysis. Finally, a partial least squares regression prediction model is constructed. [Results] An increase in temperature significantly reduces the moisture content, increases porosity and specific heat capacity, while causing a downward trend in thermal conductivity. An increase in air velocity facilitates water removal and pore structure formation, significantly reducing thermal conductivity. The effect of material thickness on thermal conductivity is the most prominent, as increased thickness inhibits pore structure development. Pearson correlation analysis indicates significant correlations between the physical properties of *U. prolifera*. A prediction model on physical properties is constructed based on partial least squares, with  $R^2$  values of 96.8%, 97.6%, 94.2%, and 95.2% for moisture content, porosity, specific heat capacity, and thermal conductivity, respectively. The model fits well and exhibits high accuracy, confirmed to be reliable by the verification test. [Conclusion] The influence patterns of temperature, air velocity, and material thickness on the physical properties of *U. prolifera* provide a reference for industrial drying process optimization and quality control.

**Keywords:** *Ulva prolifera*; hot air drying device; physical property; moisture content; correlation analysis; partial least squares regression analysis

基金项目: 江苏省现代农机装备与技术推广项目(编号: NJ2025-13)

通信作者: 杨进(1973—), 男, 江苏海洋大学副教授, 硕士。E-mail: lyqyangjin@163.com

收稿日期: 2025-11-17 改回日期: 2026-03-07

引用格式: 王震, 杨进. 热风烘干关键因素对浒苔物理特性的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(3): 183-188.

Citation: WANG Zhen, YANG Jin. Effects of key factors in hot air drying on the physical properties of *Ulva prolifera*[J]. Food & Machinery, 2026, 42(3): 183-188.

浒苔(*ulva prolifera*)隶属于绿藻门石莼目石莼科浒苔属,是一种常见的大型天然经济绿藻,具有适应性强、生长周期短、增殖迅速等特点<sup>[1]</sup>。2008 年发生于黄海海域的浒苔绿潮,具有异地起源与跨区域成灾的显著特征,在同类灾害中独一无二<sup>[2]</sup>。受环境因素、藻类自身生物学特性及人类活动的影响绿潮灾害时有发生,对当地海洋生态系统与沿海经济构成了显著威胁<sup>[3]</sup>。值得注意的是,浒苔在营养学上展现出突出的优势,高蛋白与低脂肪的特征,表明其拥有巨大的开发与利用潜力<sup>[4]</sup>。浒苔除了作为食物被直接利用外,其应用还覆盖医药、功能食品、化妆品等领域,是实现其高值化利用的重要途径<sup>[5]</sup>。

然而,新鲜浒苔含水量极高(达 90% 以上),采收后极易腐败变质,因此干燥是其加工与贮藏的关键环节<sup>[6]</sup>。热风干燥作为目前比较成熟的干燥技术,其技术门槛低、设备资金投入少、适应性较强,是目前普遍使用的干燥技术<sup>[7]</sup>。Visconcini 等<sup>[8]</sup>开发了一种计算代码,用于将大豆干燥过程中热质传递现象与流体动力学耦合,其中加热气体为空气。结果表明,整个干燥过程中,大豆的水分和温度行为以及空气温度与试验数据表现出良好的相关性。Kang 等<sup>[9]</sup>设计了一种新型温室双蒸发器太阳能辅助热泵干燥系统,建立了预测海带含水率的 Page 模型。结果表明,最佳干燥条件为温度 40 °C,辐照度 ≥400 W/m<sup>2</sup>,此条件下干燥 3 h 的海带颜色绿色均匀,形状完整,风味天然,甘露醇含量丰富。卢焯等<sup>[10]</sup>探讨了不同物料铺设厚度、蒸汽温度、蒸汽流速及初始干基含水率对紫菜干燥特性的影响,建立了紫菜过热蒸汽干燥动力学数学模型。结果表明,物料铺设厚度、蒸汽温度、蒸汽流速及初始干基含水率对物料干燥有较明显影响,过热蒸汽干燥满足 Page 模型,预测值与实际值拟合程度良好。目前,有关海带、紫菜等海藻的干燥研究较多,但针对浒苔,尤其是有关烘干因素对其物理特性影响规律的研究尚不充分。试验拟考察热风温度、风速及物料厚度 3 个关键烘干因素对浒苔含水率、孔隙率、比热容及热导率的影响规律。通过单因素与多因素相结合的分析方法明确主次影响关系,并构建偏最小二乘回归模型,以量化烘干因素与物料特性间的复杂关系,为浒苔的精准化、高品质干燥提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料与设备

#### 1.1.1 试验材料

新鲜浒苔:浙江宁波奉化雅青水产品经营部。

#### 1.1.2 主要设备

电热鼓风干燥箱:101-00A 型,浙江天宇智能科技有限公司;

电子天平:JJ500 型,常熟双杰测试仪器厂;

全自动真密度分析仪:Ultrapyc 5000 型,美国康塔仪

器公司;

差示扫描量热仪:DSC 214 Polyma 型,德国耐驰公司;

导热系数测试仪:TPS 2500S 型,瑞典 Hot Disk 公司。

### 1.2 试验方法

1.2.1 单因素试验 固定风速 1.0 m/s、物料厚度 1.5 cm,温度 70 °C。分别考察温度(60, 70, 80 °C)、风速(0.5, 1.0, 1.5 m/s)和物料厚度(1.0, 1.5, 2.0 cm)对浒苔物理特性的影响。

1.2.2 含水率测定 采用标准烘干法<sup>[11]</sup>。按式(1)、式(2)计算样品含水率。

$$T = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \times 100\%, \quad (1)$$

$$T_e = \frac{(m_1 - m_0)T - (m_1 - m_2)}{m_1 - m_0} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

$T$ ——浒苔样品初始含水率,%;

$T_e$ ——浒苔干燥后含水率,%;

$m_0$ ——容器质量,g;

$m_1$ ——烘干前浒苔与容器总质量,g;

$m_2$ ——烘干后浒苔与容器总质量,g。

1.2.3 孔隙率测定 采用气体置换法<sup>[12]</sup>(以氦气作为置换介质)。按式(3)计算孔隙率。

$$P = \frac{V_1 - V_s}{V_1} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

$P$ ——浒苔样品孔隙率,%;

$V_1$ ——浒苔样品总体积,cm<sup>3</sup>;

$V_s$ ——由真密度仪测得的浒苔样品真实体积,cm<sup>3</sup>。

1.2.4 比热容测定 利用差示扫描量热仪测定浒苔比热容<sup>[13]</sup>,使用蓝宝石(标准物质)作为参考,60, 70, 680 °C 下蓝宝石比热容分别为 0.854 8, 0.871 3, 0.887 1 J/(g·°C)。按式(4)计算比热容。

$$c_1 = \frac{m_2 c_2 W_2}{m_1 W_1}, \quad (4)$$

式中:

$c_1$ ——浒苔样品在特定温度下的恒压比热容, J/(g·°C);

$m_1$ ——浒苔样品质量,g;

$W_1$ ——特定温度下,样品的热流率信号值与基线热流率信号值的差值,m·W;

$m_2$ ——蓝宝石质量,g;

$c_2$ ——蓝宝石在特定温度下的比热容,J/(g·°C);

$W_2$ ——相同温度下,蓝宝石标准物的热流率信号值与基线热流率信号值的差值,m·W。

1.2.5 热导率测定 采用瞬态平面热源法<sup>[14]</sup>。

### 1.3 数据分析

各试验进行3次重复,结果以平均值±标准差表示。采用OriginPro 2024进行单因素方差分析(ANOVA)和Tukey检验以及显著性差异分析( $P<0.05$ )。利用皮尔逊相关性分析烘干因素与浒苔物理特性之间的相关性,利用偏最小二乘回归方法建立烘干因素与浒苔物理特性3种指标的回归模型。

## 2 结果与分析

### 2.1 初始含水率

由表1可知,浒苔的初始平均含水率为93.7%。后续试验的初始含水率均按此平均含水率计算。

表1 浒苔的初始含水率

序号	烘干前/g	烘干后/g	容器/g	含水率/%
1	141.25	112.89	110.86	93.3
2	140.20	110.26	108.32	93.9
3	140.33	117.11	115.61	93.9
4	140.86	114.82	113.11	93.8
5	140.44	113.14	111.27	93.6
平均值				93.7

### 2.2 单因素试验

2.2.1 温度对浒苔物理特性的影响 由表2可知,当温度从60℃升至70℃,再升至80℃时,含水率依次显著降低( $P<0.05$ ),这是由于温度升高,提高了热空气的水蒸气承载能力,增大了物料表面与干燥介质之间的水蒸气分压差,从而强化了水分外部扩散的驱动力<sup>[15]</sup>;孔隙率依次显著增加( $P<0.05$ ),是因为升高温度能显著促进浒苔内部多孔结构的形成,提高孔隙率<sup>[16]</sup>;比热容随着温度的升高而显著减小( $P<0.05$ ),是因为水的比热容远高于浒苔固体的,所以水分占比越低,整体的比热容越大;热导率随着温度的升高呈线性下降趋势( $P<0.05$ ),固体浒苔骨架的热导率远高于静止空气,当温度升高,孔隙率增大时,大量的低热导率空气充斥于固体骨架之中,有效降低了浒苔样品的热导率<sup>[17]</sup>。

表2 温度对浒苔物理特性的影响及显著性分析<sup>†</sup>

Table 2 Effects of temperature on physical properties of *U. prolifera* and significance analysis

温度/℃	含水率/%	孔隙率/%	比热容/ ( $J \cdot g^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ )	热导率/ ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )
60	7.8±0.3 <sup>c</sup>	68.5±1.2 <sup>a</sup>	1.67±0.05 <sup>c</sup>	0.045±0.002 <sup>c</sup>
70	6.2±0.2 <sup>b</sup>	73.4±1.0 <sup>b</sup>	1.52±0.04 <sup>b</sup>	0.038±0.002 <sup>b</sup>
80	5.1±0.2 <sup>a</sup>	78.2±0.8 <sup>c</sup>	1.38±0.04 <sup>a</sup>	0.032±0.001 <sup>a</sup>

† 同列字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )。

2.2.2 风速对浒苔物理特性的影响 由表3可知,随着风速的增加,含水率依次显著降低( $P<0.05$ ),增加风速可显著强化物料表面的对流传质过程<sup>[18]</sup>;孔隙率显著升高( $P<0.05$ ),增加风速会使内部水分快速相变产生稳定的蒸汽压,能够有效地在细胞水平上“撑开”并固定住微孔道,因此孔隙率变大<sup>[19]</sup>;比热容显著降低( $P<0.05$ ),增加风速可促进对流质量传递,加速水分脱除,从而降低整体比热容;热导率显著降低( $P<0.05$ ),增加风速可促进孔隙结构的发展,空气在孔隙中占比增加,极大地增加了热流的传导阻力<sup>[20]</sup>。

表3 风速对浒苔物理特性的影响及显著性分析<sup>†</sup>

Table 3 Effects of air velocity on physical properties of *U. prolifera* and significance analysis

风速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	含水率/ %	孔隙率/ %	比热容/ ( $J \cdot g^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ )	热导率/ ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )
0.5	7.2±0.3 <sup>c</sup>	70.5±1.1 <sup>a</sup>	1.58±0.05 <sup>c</sup>	0.041±0.002 <sup>a</sup>
1.0	6.5±0.2 <sup>b</sup>	73.4±1.0 <sup>b</sup>	1.52±0.04 <sup>b</sup>	0.038±0.002 <sup>b</sup>
1.5	5.9±0.2 <sup>a</sup>	75.8±0.8 <sup>c</sup>	1.46±0.04 <sup>a</sup>	0.034±0.002 <sup>c</sup>

† 同列字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )。

2.2.3 物料厚度对浒苔物理特性的影响 由表4可知,随着物料厚度的增加,含水率显著升高( $P<0.05$ ),是因为增加物料厚度可显著增大水分从物料内部迁移至表面的扩散路径和阻力<sup>[21]</sup>;孔隙率显著降低( $P<0.05$ ),这一现象符合多数生物质材料厚层干燥的规律<sup>[22]</sup>;比热容显著增大( $P<0.05$ ),与风速的影响类似,比热容主要受材料本体和最终含水率的绝对量影响;物料厚度与热导率呈现明确的正相关关系( $P<0.05$ ),增加物料厚度会导致含水率显著上升,水的热导率远高于空气,也会提高热导率,同时孔隙率显著下降会导致绝热空气减少<sup>[23]</sup>。

### 2.3 多因素与浒苔物理特性的相关性分析

由图1可知,温度与比热容呈强负相关( $r=-0.832$ ),与含水率呈极强的负相关( $r=-0.845$ ),与孔隙率呈显著正相关( $r=0.798$ ),这确立了温度在驱动水分脱除和塑造多孔结构中的核心地位。温度与热导率呈负相关( $r=$

表4 物料厚度对浒苔物理特性的影响及显著性分析<sup>†</sup>

Table 4 Effects of material thickness on physical properties of *U. prolifera* and significance analysis

物料厚度/cm	含水率/%	孔隙率/%	比热容/ ( $J \cdot g^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ )	热导率/ ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )
1.0	6.0±0.2 <sup>a</sup>	75.5±0.9 <sup>c</sup>	1.46±0.04 <sup>a</sup>	0.035±0.002 <sup>a</sup>
1.5	6.5±0.2 <sup>b</sup>	73.4±1.0 <sup>b</sup>	1.52±0.04 <sup>b</sup>	0.038±0.002 <sup>b</sup>
2.0	7.1±0.3 <sup>c</sup>	71.0±1.2 <sup>a</sup>	1.59±0.05 <sup>c</sup>	0.042±0.002 <sup>c</sup>

† 同列字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )。

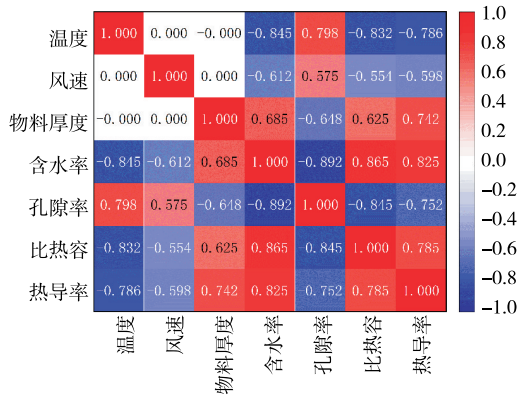


图 1 烘干因素与浒苔物理特性相关性热力图

Figure 1 Correlation heat map between drying factors and physical properties of *U. prolifera*

-0.786),说明温度升高会有效降低浒苔整体的热量传导能力。风速与含水率呈负相关( $r=-0.612$ ),与孔隙率呈正相关( $r=0.575$ ),表明提高风速能有效促进干燥并改善结构<sup>[24]</sup>。值得注意的是,风速与比热容呈负相关( $r=-0.554$ ),与热导率也呈负相关( $r=-0.598$ ),说明增加风速有助于降低比热容和热导率,但影响程度较温度的略弱。物料厚度与热导率呈强正相关( $r=0.742$ ),为影响热导率的关键因素。物料厚度与孔隙率呈负相关( $r=-0.648$ ),表明较厚的物料层会抑制高孔隙结构的形成。物料厚度与含水率呈正相关( $r=0.685$ ),说明增加厚度会减缓水分扩散速度。物料厚度与比热容呈正相关( $r=0.625$ ),根本原因还是物料厚度增加会导致水分增加。

含水率与孔隙率二者存在极显著的负相关关系( $r=-0.892$ ),表明在浒苔干燥过程中,水分的脱除与孔隙结构的形成是紧密耦合的两个过程<sup>[25]</sup>。含水率越低,通常意味着形成的孔隙结构越发达,为通过监测含水率间接判断结构变化提供了依据。含水率与比热容呈显著正相关( $r=0.865$ ),主要源于水的比热容远高于干燥浒苔固体的。含水率与热导率呈正相关( $r=0.825$ ),通常情况下,含水率越高,物料内部由水填充的孔隙比例越大,从而提供了更高效的热传导路径,导致热导率升高<sup>[26]</sup>。热导率与物料厚度的强正相关和与风速的负相关,与其和孔隙率的负相关性( $r=-0.752$ )形成对比。表明热导率并非由孔隙率单一决定,而是受到孔隙形态、贯通性以及固体骨架与空气组成的复合结构的协同影响<sup>[27]</sup>。

3个烘干因素(温度、风速和物料厚度)两两之间的相关系数均为0.000,表明在试验设计的参数范围内,3个因素之间没有显著的线性共线性,为相对独立的变量。

2.4 偏最小二乘回归模型与验证

采用偏最小二乘回归方法,构建以温度、风速和物料

厚度为自变量( $X$ ),以含水率、孔隙率、比热容、热导率为因变量( $Y$ )的PLSR预测模型,模型回归系数与拟合优度见表5。

表 5 偏最小二乘回归方程系数

Table 5 Coefficients of partial least squares regression equation

物理特性	温度	风速	物料厚度	$R^2$
含水率	-0.001 25	-0.006 50	0.005 50	0.968
孔隙率	0.004 85	0.026 50	-0.022 50	0.976
比热容	-0.014 50	-0.006 00	0.006 50	0.942
热导率	-0.000 65	-0.003 00	0.003 50	0.952

温度和风速对含水率的预测均呈负效应,表明升高温度或增加风速均可显著降低含水率,且风速的影响强度约为温度的5倍,是主导因素;物料厚度呈正效应,表明增加物料厚度会导致最终含水率升高,这与内部水分迁移路径变长、阻力增大的机理相符。温度和风速对孔隙率的预测均呈正效应,是形成高孔隙率结构的积极因素;物料厚度呈显著的负效应,是抑制孔隙结构发展的主要因素。物料厚度增加导致干燥不均和结构塌陷,从而降低了整体孔隙率。温度对比热容的预测表现出负效应;风速对比热容也呈负效应,但影响较弱;物料厚度对比热容呈正效应。物料厚度对热导率的预测展现出唯一的正效应,是调控热导率的最关键因素,温度和风速呈现显著的负向影响,但温度的作用相对较弱。

由表5可知,4个物理特性模型的 $R^2$ 值均 $>0.94$ ,表明所建立的PLSR模型能够解释因变量94.2%~97.6%的变异性,具有极佳的拟合效果。

为检验模型的实际预测性能,采用预留的验证集数据进行外部验证。将验证集的工艺参数代入PLSR模型,计算预测值,并与实测值进行比较。验证结果如图2所示,所有预测值与实测值均紧密分布在 $y=x$ 线的两侧,其预测误差均在 $\pm 3\%$ 以内。该结果证实了所建PLSR模型不仅拟合度极高,还具有强大的外推预测能力和可靠性,可用于实际生产工艺的优化与预测。

3 结论

浒苔烘干过程中,热风温度是调控产品品质的主导因素,升高温度能显著降低含水率、比热容和热导率,并有效增加孔隙率;增加风速可有效促进水分脱除与孔隙形成,且对降低比热容和热导率具有突出贡献;物料厚度虽会抑制孔隙结构发展,但比热容和热导率的升高具有积极作用。皮尔逊相关性分析表明,3个烘干因素间无显著共线性,含水率与孔隙率呈极显著负相关,与比热容和

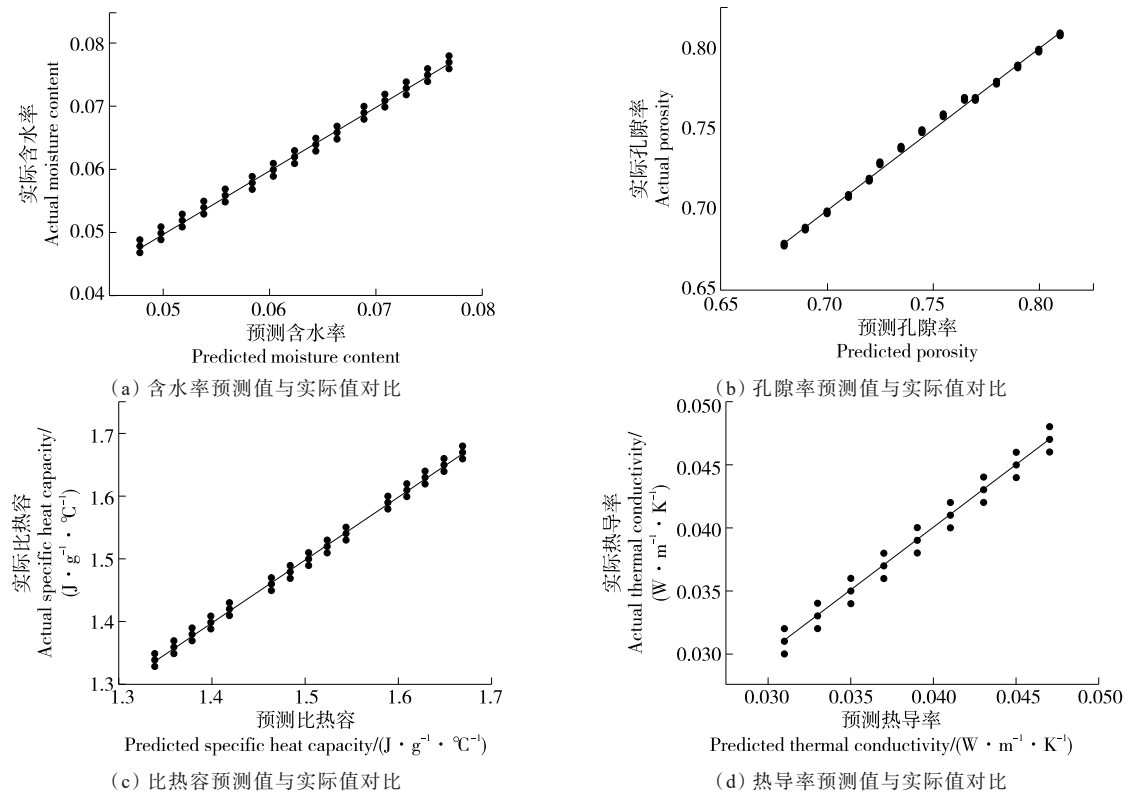


图2 浒苔物理特性指标预测与实际对比图

Figure 2 Comparison of predicted and actual physical characteristic indicators of *U. prolifera*

热导率均呈显著正相关。所建立的偏最小二乘回归模型能精确量化因素间关系,对含水率、孔隙率、比热容和热导率的预测精度分别达96.8%,97.6%,94.2%,95.2%,经验证预测值与实测值均紧密分布在 $y=x$ 线的两侧,表明模型拟合良好。该试验参数范围相对有限,未能覆盖工业化生产的全部可能条件,也未考虑浒苔品种、采收季节等生物学因素对干燥特性的影响。后续将扩大工艺参数范围和更完整的数据库,开展多品种、多季节浒苔样品的比较研究。

### 参考文献

- [1] 庞晓雯. 浒苔等植物发酵物的农用功效研究[D]. 厦门: 集美大学, 2024.
- PANG X W. Study of agricultural efficacy of *Enteromorpha prolifera* and other plant fermented products[D]. Xiamen: Jimei University, 2024.
- [2] 宋伟, 李艳, 王刚, 等. 我国区域性绿潮分析及防控对策与建议[J]. 自然资源情报, 2025(6): 60-67.
- SONG W, LI Y, WANG G, et al. Analysis for regional green tides in China and the control countermeasures and suggestions [J]. Natural Resources Information, 2025(6): 60-67.
- [3] 聂间间, 李刚. 绿藻浒苔多元化应用研究进展浒苔绿藻的成因及其治理[C]// 第二届智能工程与经济建设学术研讨会论

文集. 南昌: 江西省工程师联合会, 2025: 527-529.

- NIE J J, LI G. Research progress on diversified applications of ulva (green algae) [C]// The Second Academic Symposium on Intelligent Engineering and Economic Construction. Nanchang: Jiangxi Engineering Association, 2025: 527-529.
- [4] ZHENG Y F, HUANG C X, ZHOU X, et al. Health benefits of the blooming seaweed *Ulva prolifera*: a review[J]. Aquaculture, 2025, 598: 742035.
- [5] XU J X, LIAO W, LIU Y N, et al. An overview on the nutritional and bioactive components of green seaweeds[J]. Food Production, Processing and Nutrition, 2023, 5(1): 18.
- [6] 樊庆新. 浒苔腐败对褐牙鲆生存环境、肠道微生物及肠转录组影响的研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2022.
- FAN Q X. The effects from the degradation of *Ulva prolifera* on the aquaculture environment, intestinal microbiota and transcriptome of Japanese flounder *Paralichthys olivaceus*[D]. Qingdao: Qingdao University, 2022.
- [7] NURHASLINA C R, ANDI BACHO S, MUSTAPA A N. Review on drying methods for herbal plants[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 63: S122-S139.
- [8] VISCONCINI A R, SOUZA M, COSTA A M S. 3-D modeling for simultaneous heat and mass transfer in fixed-bed drying of soybean grains applying CFD code[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2025, 74: 106899.

- [9] KANG H Y, ZHANG G C, MU G, et al. Design of a greenhouse solar-assisted heat pump dryer for kelp (*Laminaria japonica*): system performance and drying kinetics[J]. *Foods*, 2022, 11(21): 3 509.
- [10] 卢焯, 任彦莲, 方婷, 等. 紫菜过热蒸汽干燥特性研究[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2015, 44(3): 320-328.  
LU Y, REN Y L, FANG T, et al. Study on the superheated steam drying characteristics of *Porphyra haitanensis*[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2015, 44(3): 320-328.
- [11] 刘鹏, 李昕瑶, 李明. 黑果腺肋花楸干燥过程中水分迁移规律及抗氧化能力变化[J]. *食品与机械*, 2026, 42(1): 21-29.  
LIU P, LI X Y, LI M. Moisture migration patters and antioxidant capacity changes during the drying of *Aronia melanocarpa*[J]. *Food & Machinery*, 2026, 42(1): 21-29.
- [12] 田津津, 姚超阳, 张志强, 等. 真空冷冻干燥过程中升华温度对梨瓜细胞微观结构的影响[J]. *食品与机械*, 2023, 39(11): 12-17, 44.  
TIAN J J, YAO C Y, ZHANG Z Q, et al. Effects of sublimation temperature on cell microstructure of pear melon during vacuum freeze drying[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(11): 12-17, 44.
- [13] 刘亚梅, 朱立斌, 马靖, 等. 复合菌发酵对鲜食糯玉米面糊理化性质及其糕点品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2025, 46(20): 21-30.  
LIU Y M, ZHU L B, MA J, et al. Effects of compound bacteria fermentation on physicochemical properties of fresh waxy cornmeal batter and its cake quality[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2025, 46(20): 21-30.
- [14] 庞凌云, 袁志华, 詹丽娟, 等. 铁棍山药片热风干燥过程中传热传质规律[J]. *食品与机械*, 2024, 40(8): 157-165.  
PANG L Y, YUAN Z H, ZHAN L J, et al. Heat and mass transfer of *Dioscorea opposita* Thunb. cv. Tiegung slices during hot - air drying process[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(8): 157-165.
- [15] BISWAS R, HOSSAIN M A, ZZAMAN W. Thin layer modeling of drying kinetics, rehydration kinetics and color changes of osmotic pre-treated pineapple (anasar comosus) slices during drying: development of a mechanistic model for mass transfer[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2022, 80: 103094.
- [16] ZHANG P P, LI B T, LI J C, et al. Thermal deformation behavior and microstructural response of pumpkin seeds during drying[J]. *Food Structure*, 2025, 46: 100472.
- [17] GAO H, ZHU Z W, SUN D W. Determination of anisotropic effective thermo-mechanical properties of leafy vegetables via X-ray CT and finite element modelling using forward and inverse analyses[J]. *Journal of Food Engineering*, 2026, 407: 112801.
- [18] EL-MESERY H S, ASHIAGBOR K, HU Z C, et al. Mathematical modeling of thin-layer drying kinetics and moisture diffusivity study of apple slices using infrared conveyor-belt dryer[J]. *Journal of Food Science*, 2024, 89(3): 1 658-1 671.
- [19] JETHANI H, CHAUHAN V S, KUMAR P H N, et al. Convective heat and moisture transfer coefficients during heat pump drying of *Spirulina platensis* extracts: effect of temperature and additives, and thermal analysis of powders[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2025, 65: 103911.
- [20] FRANCO T S, PERUSSELLO C A, DE SOUZA NEVES ELLENDERSEN L, et al. Foam mat drying of yacon juice: experimental analysis and computer simulation[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 158: 48-57.
- [21] ZHANG Y X, LU Y J, HUANG D, et al. Infrared drying characteristics and optimization of ginseng[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 57: 104334.
- [22] JIN W, ZHANG M, MUJUMDAR A S. A high-efficiency radio-frequency-assisted hot-air drying method for the production of restructured bitter melon and apple chips[J]. *Foods*, 2024, 13(2): 197.
- [23] WANG D, ZHAO Y F, NIU Y, et al. Parameter optimization of vacuum pulsed-infrared drying for honeysuckle extract: bioactive retention and powder properties[J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2025, 154: 79-88.
- [24] HESHMATI M K, KHAIVI H D, DEGHANNYA J, et al. 3D simulation of momentum, heat and mass transfer in potato cubes during intermittent microwave-convective hot air drying [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2023, 59(2): 239-254.
- [25] AMIRI CHAYJAN R, KAVEH M. Physical parameters and kinetic modeling of fix and fluid bed drying of terebinth seeds [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2014, 38(3): 1 307-1 320.
- [26] SOLONA O, SPIRIN A, ZAMRIL M, et al. Determination of the dependence of the physico-mechanical properties of alfalfa seed pods on moisture content[J]. *Technology Audit and Production Reserves*, 2025, 83(3): 84-90.
- [27] HU X Y, GUO L T, WANG J Y, et al. Computational fluid dynamics and machine learning integration for evaluating solar thermal collector efficiency-Based parameter analysis[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 24528.