

基于温度修正和可见/近红外光谱的 油茶籽含水率检测

Water content detection of *Camellia oleifera* seeds based on temperature correction and visible/near infrared spectroscopy

汪志强 李大鹏 刘 强 廖舒怀 易宗霈

WANG Zhi-qiang LI Da-peng LIU Qiang LIAO Shu-huai YI Zong-pei

(中南林业科技大学机电工程学院, 湖南 长沙 410004)

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University of
Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China)

摘要:目的: 解决干燥时温度变化对可见/近红外光谱检测油茶籽含水率的影响, 并提出一种基于温度修正的油茶籽含水率检测模型。方法: 在不同温度下(50, 60, 70 °C)进行干燥试验, 采集光谱数据。通过获取不同温度下采集的光谱数据, 分析温度对光谱影响的原因。对比 3 种光谱预处理方式, 运用竞争性自适应重加权算法(CARS)和偏最小二乘回归算法(PLSR), 建立 60 °C 下的基准 PLSR 模型。并采用斜率/偏差法对 50, 70 °C 下的外部样本预测值进行修正。结果: 50, 70 °C 下, 修正前和修正后的决定系数分别为 0.729 和 0.848, 0.763 和 0.862; 相对分析误差 RPD 值分别为 1.921 和 2.565, 2.054 和 2.692。结论: 修正模型可以有效提高预测精度, 达到良好的预测效果, 克服了温度的影响。

关键词: 温度; 干燥; 含水率; 可见/近红外光谱

Abstract: **Objective:** In order to solve the problem that temperature change during drying can detect the moisture content of *Camellia oleifera* seeds by visible/near infrared spectroscopy, a temperature modified *Camellia oleifera* seed moisture content detection model was proposed. **Methods:** Drying experiments were carried out at different temperatures (50, 60, 70 °C) to collect spectral data. By acquiring the spectral data collected at different temperatures, the reasons why the temperature affected the spectrum were analyzed. Then, by comparing the three spectral preprocessing methods, using the Competitive Adaptive

Reweighting (CARS) and Partial Least Squares Regression (PLSR) were used to establish the benchmark PLSR model at 60 °C. Finally, the slope/bias method was used to correct the predicted values of external samples at 50 °C and 70 °C, which greatly improved the precision and accuracy. **Results:** The coefficients of determination before and after correction at the two temperatures were 0.729 and 0.848, 0.763 and 0.862, respectively. The relative analytical error RPD values were 1.921 and 2.565, 2.054 and 2.692, respectively. **Conclusion:** The modified model could effectively improve the prediction accuracy, achieve good prediction effect, overcome the influence of temperature, and provide a new method to eliminate the influence of temperature when detecting the oil *Camellia oleifera* seed moisture content by visible/near infrared spectroscopy in the drying field.

Keywords: temperature; dry; the moisture content; visible/near infrared spectrum

油茶是一种营养价值丰富的油料作物^[1], 近年来其种植面积和规模不断扩大^[2]。水分对油茶籽干燥时和干燥后影响较大, 是一个重要的评价参数^[3]。研究^[4]表明, 干燥时, 水分含量会影响油茶籽干燥品质和能耗。同时, 在油茶加工步骤中, 干燥是第一步工序, 水分含量是干燥时要控制的参数; 干燥后, 水分含量仍会影响油茶籽的贮藏^[5]。目前, 常用的茶籽水分含量测定方法主要为烘干法, 但该法效率低下、耗时耗力^[6]。

近年来, 利用光谱技术检测农产品中含油率及含水率、鉴别等具有快速分析、无损检测, 以及无需样品准备等优点。周宏平等^[7]利用高光谱技术实现了对油茶籽含油率的无损检测, 利用两组采集到的漫反射高光谱图像, 结合化学方法成功建立了含油率的回归预测模型。彭彦

基金项目: 湖南省科技计划重点研发项目(编号: 2022NK2048); 湖南省教育厅科学项目(编号: 18B192, 20A515); 湖南省自然科学基金(编号: 2020JJ4142)

作者简介: 汪志强, 男, 中南林业科技大学在读硕士研究生。

通信作者: 李大鹏(1983—), 男, 中南林业科技大学讲师, 博士。

E-mail: dapengli@csuft.edu.cn

收稿日期: 2022-05-03 **改回日期:** 2022-11-23

昆等^[8]通过近红外光谱法设计了猪肉水分在线检测分级系统,能够在线准确预测猪肉水分,判断准确率达 90% 以上。郭文川等^[9]利用近红外光谱检测油茶籽油的掺伪,对掺伪质量分数不低于 3% 的掺伪油茶籽油的识别准确率达 100%。Melfsen 等^[10]用漫反射近红外光谱法估测了牛奶中脂肪酸含量,最终预测准确率达 92% 以上。Elsahaby 等^[11]利用红外光谱和偏最小二乘回归预测了奶牛和肉牛初乳免疫球蛋白 G 浓度,平均相对误差为 5%。

然而,近红外光谱检测方法测得的光谱极易受温度、样品种类等因素影响,其中,温度是最常见的影响因素^[12]。分子间的内力受温度影响产生变化,主要表现为光谱振动变化。油茶籽水分中含有 O—H 键,在干燥时,油茶籽表面温度的不同会影响水分子的振动变化,导致 O—H 基团对可见/近红外光谱的吸收波段以及强度发生变化^[13],因此需要修正温度变化对光谱检测的影响。

目前,有关温度影响可见/近红外光谱检测油茶籽含水率的相关研究尚未见报道。研究拟以不同温度下干燥的油茶籽为研究对象,提出一种改进的温度修正模型,解决可见/近红外光谱检测时结果受温度影响的问题,为采用可见/近红外光谱检测干燥过程中油茶籽含水率时消除温度的影响提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料和仪器

1.1.1 材料

油茶籽:选择新鲜的油茶果 360 个(平均分为 3 部分,依次于 50,60,70 °C 下进行试验),去壳,随机选取 360 粒颗粒饱满、大小均匀、无缺陷、单粒均重 4 g 的油茶籽样品,收集其光谱数据,湖南雪峰山茶油专业合作社。

1.1.2 主要仪器设备

光源:HL-1000 型,功率为 5 W 的卤素光源,上海闻奕光电科技有限公司;

光谱仪:Maya2000 Pro 型,波长范围为 199 ~ 1 113 nm,使用 Y 型光纤连接光源和光谱仪,美国 Oceanoptics 公司;

烘干箱:XGQ-2000 型,浙江力辰仪器有限公司;

精密电子天平:JY/YP11003 型,浙江力辰科技制造有限公司。

1.2 光谱采集

使用自行设计的光谱平台采集光谱数据(图 1),该系统包括光源、光谱仪、Y 型光纤、电脑、置物台、支架、暗箱。每次采集前为了消除误差,需进行光谱黑白校正,校正方法^[14]:

$$R = \frac{A - D}{C - D}, \quad (1)$$

式中:

R——油茶籽的反射率;

A——校正前样本原始的反射数据;

C——标准白板的参考反射光谱数据;

D——标准黑板的参考反射光谱数据。

先将漫反射标准白板(反射率 99%)放置在密闭暗箱中(黑暗环境),光纤探头垂直于白板,在其正上方 3 cm 处,收集校正的光谱信息;取出烘干箱中的油茶籽,置于光纤探头正下方 2~3 cm 处收集原始反射光谱数据。

对每一部分的 120 粒油茶籽随机依次编号,分为 10 组。测量时,先将全部油茶籽放入烘干箱中,依次于 50,60,70 °C 下烘干。烘干时,每隔 1 h 取出一组进行光谱测量,迅速采集光谱数据,以免温度下降,模拟干燥时的温度;为使光谱数据与含水率对应更准确,在采集光谱数据后,用天平称重并记录相应数据,完成一组数据收集。1 h 后重复操作直至 10 h 后全部采集完毕,得到 120 个包含不同含水率的光谱数据。

光谱数据由其自带的软件读取,用 Microsoft Excel 2019 记录,采用 MATLAB 2019 b、Python 3.9 软件处理数据。

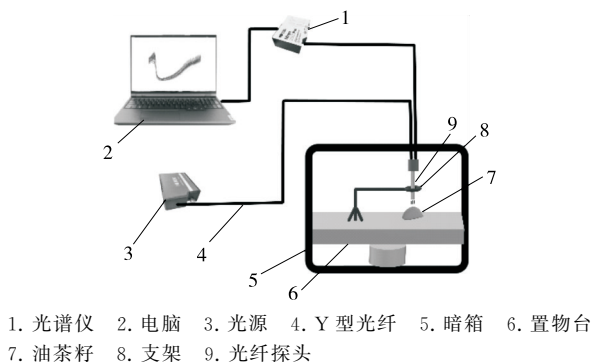


图 1 油茶籽光谱数据采集示意图

Figure 1 Schematic diagram of *Camellia oleifera* seed spectral data acquisition

1.3 含水率检测

按 GB 5009.3—2016 中的直接干燥法测量油茶籽含水率。

1.4 样本集划分和预处理

采用 SPXY 算法将每一温度下的全部样品划分为校正集与预测集,比例为 3 : 1,用 90 份样品建模,其余 30 份样品以预测的方式来建立合适的模型。

为了减少误差,剔除光谱数据中的无用信息,为了提高模型精度和预测效果,需对原始反射数据(RAW)进行预处理^[15]。选取的预处理方法有多元散射校正(MSC)、标准正态变量变换(SNV)和标准化缩放(Au)。其中 MSC 可以消除散射影响,增强采集的光谱和数据之间的关联;SNV 可以消除因为颗粒大小、表面散射对光谱的影响;Au 能够消除因数据差异过大产生的误差^[16]。

1.5 选取特征波长,建模方法和评价指标

采用竞争性自适应重加权算法(CARS)^[17]来消除因

为光谱数据量大导致运行速度慢、误差大、建模效果不理想的缺点,从而选取合适的特征波长建模。

建模方法为偏最小二乘回归法(PLSR)^[18],该方法具有运行速度快,能够同时考虑光谱信息和相应的理化性质,从而避免信息缺失的优点。

采用校正集决定系数 R_c^2 ,校正集均方根误差 RMSEC,预测集决定系数 R_p^2 ,预测集均方根误差 RMSEP 以及相对分析误差 RPD 值来评价模型^[19]。一般来说,模型的 R^2 (R_c^2 和 R_p^2) 和 RPD 值越大(接近于 1),RMSE(RMSEC 和 RMSEP)越小(接近于 0),模型越好。其中 RPD 值范围与模型可靠性关系见表 1。

表 1 RPD 值范围与其对应的含义

Table 1 RPD value ranges and their corresponding meanings

RPD 数值	含义
<1.4	模型不可靠
1.4~2.0	可以预测低值和高值
2.0~2.5	粗略定量预测
2.5~3.0 或更高	良好的模型精度

分别按式(2)~式(4)计算模型的 R^2 、RMSE 和 RPD 值。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{ai} - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{y}_b - y_i)^2}, \quad (2)$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{ai} - y_i)^2}{n}}, \quad (3)$$

$$R_{PD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y}_b - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_{ai} - y_i)^2}}, \quad (4)$$

式中:

y_{ai} ——第 i 个样本的预测值,g/g 湿基;

y_i ——第 i 个样本的真实值,g/g 湿基;

$\bar{y}_b$ ——所有样本的真实值的均值,g/g 湿基;

n ——样本数。

1.6 温度修正原理

采用斜率/偏差法(S/B)对温度进行修正,以 T_a 温度下建立的模型来预测 T_b 温度下的含水率为例,说明温度修正的方法。分别建立 T_a 温度下的光谱矩阵 $\mathbf{X}_a$, T_b 温度下的光谱矩阵 $\mathbf{X}_b$,用 $\mathbf{X}_a$ 和其对应的含水率真实值矩阵 $\mathbf{M}_a$ 建立模型 N,将 $\mathbf{X}_b$ 代入模型 N 中预测 T_b 温度下的含水率矩阵 $\mathbf{M}_b$ 。假设 T_a 温度下的含水率真实值矩阵 $\mathbf{M}_a$ 和 T_b 温度下的含水率矩阵 $\mathbf{M}_b$ 存在如式(5)所示的关系式^[20]。

$$\mathbf{M}_a = \mathbf{B} + \mathbf{S} \times \mathbf{M}_b, \quad (5)$$

式中:

$\mathbf{M}_b$ ——修正前 T_b 温度下的含水率预测值,g/g 湿基;

$\mathbf{M}_a$ —— T_a 温度下样品含水率的真实值,g/g 湿基。

将 T_a 和 T_b 温度下的含水率预测值与真实值进行统一回归,用统计学方法求出统一回归模型的 $\mathbf{S}$ 和 $\mathbf{B}$,采集 T_b 温度下未知样品的光谱矩阵 $\mathbf{X}'_b$,先用模型 N 预测 $\mathbf{M}'_b$,再代入式(6)。

$$\mathbf{M}''_b = \mathbf{B} + \mathbf{S} \times \mathbf{M}'_b, \quad (6)$$

式中:

$\mathbf{M}'_b$ —— T_b 温度下含水率预测值,g/g 湿基;

$\mathbf{M}''_b$ —— T_b 温度下修正后的含水率预测值,g/g 湿基。

2 结果与分析

2.1 原始光谱分析

选用的光谱仪波长范围为 199~1 113 nm,其中 199~780 nm 属于可见光范围,780~1 113 nm 属于近红外范围。以 60 °C 下采集的油茶籽原始反射光谱为例分析,全波段光谱如图 2 所示,为了消除噪音和误差,有效提取光谱信息,需去除光谱首尾两端波段,选择波长范围为 400~1 000 nm,总计 1 366 个波长点。

由图 2 可知,波长为 400~1 000 nm 时,曲线逐渐上升,反射率逐渐变大,420 nm 处出现一个吸收峰,与索雷特吸收有关^[21];960~980 nm 附近出现平台区,形成一个弱吸收峰,是由油茶籽中 O—H 基团的第二泛频所导致的^[22]。

2.2 温度对光谱曲线的影响

试验发现,不同含水率下温度对光谱曲线均会产生明显影响。由于获取的油茶籽含水率分布范围较广(1%~60%),为了更清晰地表明温度对光谱曲线的影响,以最高含水率范围(60±1)%内的光谱数据平均值为例来进行说明。

由图 3 可知,同一含水率不同温度下的光谱曲线虽

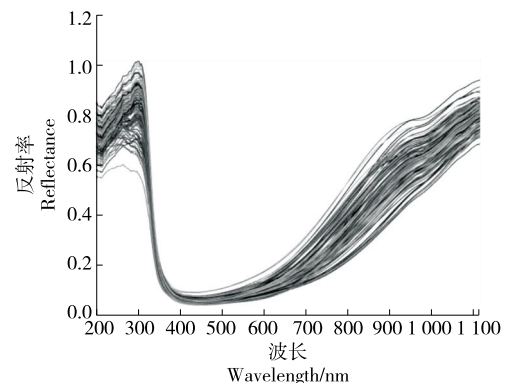


图 2 60 °C 下采集的油茶籽原始反射光谱图
Figure 2 The original reflectance spectrum of *Camellia oleifera* seeds collected at 60 °C

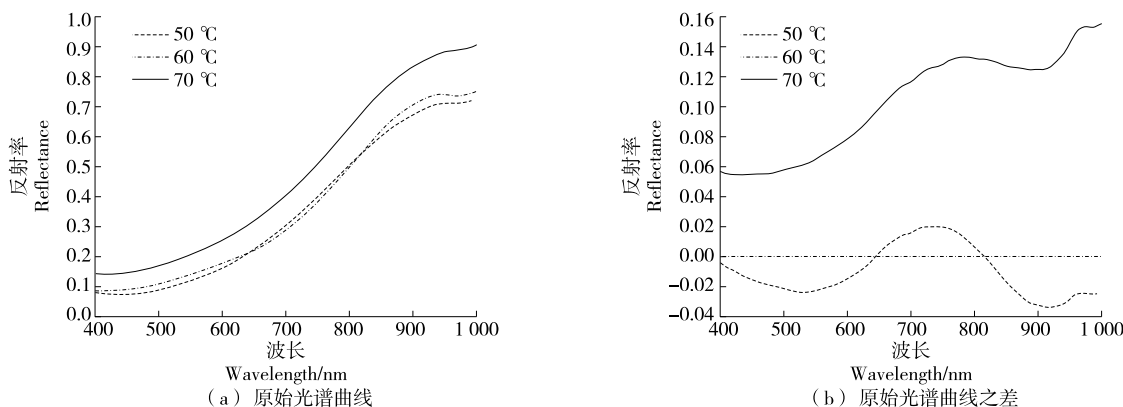


图 3 原始光谱曲线和曲线之差比较
Figure 3 Raw spectral curve and curve subtraction comparison

然走势一样,但其高低不一致。其中 70 °C 对应的光谱曲线最高,而 60 °C 对应的光谱曲线开始时高于 50 °C 的,在 650 nm 处变为最低,之后又逐渐升高,并高于 50 °C 的。

为了更明确说明温度对光谱曲线的影响,以 60 °C 下的光谱数据建立基准模型,因此以 60 °C 对应的光谱曲线为 0 基准,将 50,70 °C 的光谱曲线与 60 °C 的进行差值计算,获得对比曲线。70 °C 对应的光谱曲线与 60 °C 的光谱曲线反射率之差为正值,表明在该区域内温度的升高使油茶籽对光谱的反射越来越强,使光谱接收到的信息变多。50 °C 对应的光谱曲线先为负后为正之后又为负,表明其反射强度先小于后大于之后又小于 60 °C 对应的光谱曲线。

综上,温度对光谱曲线产生了明显影响,是由于温度变化会影响 O—H 键的振动频率,进而改变反射率^[13]。因此建立油茶籽含水率预测模型时需要考虑温度的影响。

2.3 基准模型的建立

以 60 °C 下 90 个校正集样本作为建模集,其余 30 个样本进行预测,采用 MSC、SNV、Au 对其原始光谱(RAW)进行预处理后再进行 PLSR 建模,结果见表 2。

由表 2 可知,60 °C 下测得的反射率 RAW 建立的模型效果最差,经 MSC 预处理后建立的模型效果相对最优,其 R_c^2 和 R_p^2 分别为 0.829 和 0.769,比原始光谱(RAW)的建模结果分别提高了 8.1% 和 43.7%;RMSEC 和 RMSEP

分别为 6.294% 和 5.086%,与原始光谱相比分别降低了 10.6% 和 39.1%;其 RPD 值最高,达到了 2.081,比 RAW 提高了 41.9%。4 种处理得到的校正集评价指标均优于预测集的,说明预测模型可能存在过拟合现象。

为了模型效果更好,精度更高,筛选掉大量的无用信息,需进行 CARS 处理。将经过 MSC 预处理后的数据进行 CARS-PLSR 建模,得到的 R_c^2 和 R_p^2 分别为 0.957 和 0.909;RMSEC 和 RMSEP 值分别为 2.764% 和 3.102%;RPD 值为 3.315。其中,CARS 筛选出的特征波长共 19 个,分别为 402,410,418,419,420,421,433,439,452,950,958,960,963,968,970,972,974,980,986 nm,表明模型 MSC-CARS-PLSR 具有良好的预测精度,可以作为基准模型使用。

2.4 单点温度修正模型

将 50,70 °C 的校正集样本代入基准模型中建模,预测含水率值,结果如图 4 所示。由图 4 可知,当温度低于 60 °C 时,预测值偏高;当温度高于 60 °C 时,预测值偏低。

将 50,70 °C 下的含水率预测值与真实值进行回归分析,得到回归方程:

$$M_{60} = 1.036M_{50} - 5.492, \quad (7)$$

$$M_{60} = 1.122M_{70} + 3.226. \quad (8)$$

由回归方程可知,50,70 °C 下修正斜率分别为 1.036 和 1.122;偏差分别为 -5.492 和 3.226。

修正前,将 50,70 °C 下的预测集代入基准模型中,结果见表 3,其 RPD 值均 < 2.5,说明预测结果较差,精度较低。

用预测集的 30 个样本来评价模型修正结果,用基准模型来预测各温度下的含水率,将预测值矩阵、斜率和偏差代入式(6)中进行修正,得到各温度下含水率的修正值,修正后的结果见表 3。由表 3 可知,50,70 °C 下的 RPD 值均 > 2.5,优于修正前的结果,达到了良好的预测精度;而 60 °C 下的 RPD 值虽有所降低,但仍 > 2.5,可以满足预测需要,下降原因可能是预测时出现过拟合。

表 2 60 °C 下反射率建模结果

Table 2 Modeling results of reflectivity at 60 °C

预处理方法	校正集		预测集		RPD 值
	R_c^2	RMSEC/%	R_p^2	RMSEC/%	
RAW	0.767	7.039	0.535	8.349	1.466
MSC	0.829	6.294	0.769	5.086	2.081
SNV	0.792	6.654	0.725	5.645	1.907
Au	0.725	7.721	0.715	5.961	1.873

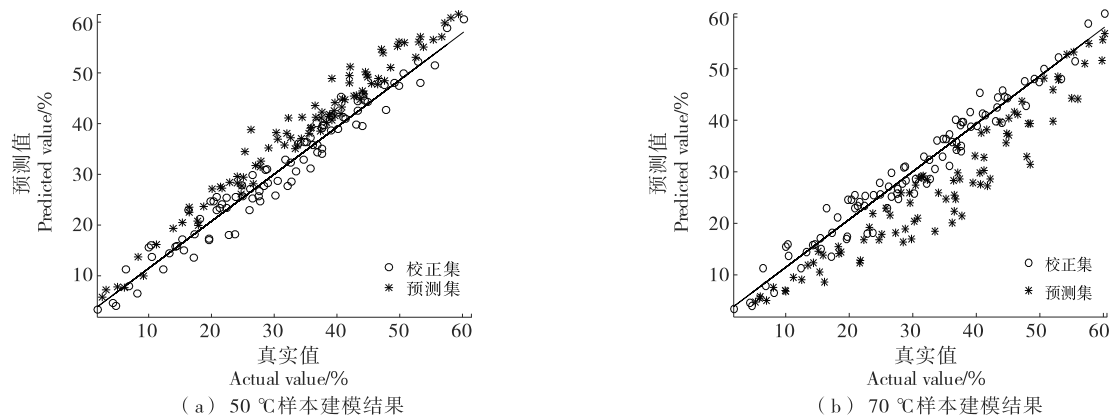


图 4 50 °C 和 70 °C 样本建模结果

Figure 4 Modeling results for 50 °C and 70 °C samples

表 3 各温度下修正前与修正后结果比较

Table 3 Comparison of results before and after correction at each temperature

温度/℃	样本数	修正前			修正后		
		R^2_p	RMSEP/%	RPD 值	R^2_p	RMSEP/%	RPD 值
50	30	0.729	9.556	1.921	0.848	4.526	2.565
60	30	0.909	3.102	3.315	0.889	3.658	3.001
70	30	0.763	8.845	2.054	0.862	4.085	2.692

2.5 连续温度修正模型

观察式(7)、式(8)和其余回归方程可知,斜率接近于 1,其对预测值的偏差近似为线性关系。试验温度以 60 °C 为基准模型,10 °C 为梯度,每上升或下降一个梯度,计算出其偏差约等于 4.359。因此,任意温度下的修正方程拟合为

$$M''_b = 1.079M'_b + 4.359 \times \left(\frac{T - 60}{10} \right), \quad (9)$$

式中:

M'_b ——基准模型下得到的含水率预测值,g/g 湿基;

M''_b ——修正后的含水率预测值,g/g 湿基;

T ——样品温度,50~70 °C。

陆锡昆等^[23]利用高光谱技术检测油茶籽含水率,其经过 MSC 预处理建立的 PLSR 模型的 R_p 值达 0.939,与试验结果类似,但是其利用太阳进行自然烘干来获取不同的含水率样品,未研究温度对光谱的影响,因此其模型可能不适用于干燥时的油茶籽含水率在线检测。

3 结论

为了解决干燥时温度对可见/近红外光谱技术检测油茶籽含水率的影响,分别于 50,60,70 °C 下进行相关干燥试验。结果表明,以 60 °C 下校正集建立基准偏最小二乘回归法模型,对比 3 种预处理方式,得到其相对最佳的预处理方式为多元散射校正处理;同时为了进一步提高模型精度,经竞争性自适应重加权算法处理,其预测集决

定系数、预测集均方根误差以及相对分析误差分别为 0.909、3.102% 和 3.315。用 60 °C 下的基准偏最小二乘回归法模型来预测 50,70 °C 下的含水率值,由预测值与真实值计算出斜率和偏差,采用斜率/偏差法计算出预测集修正后的预测值,精度明显提高,相对分析误差均 > 2.5,可用于一般性的预测。同时由单个温度修正模型分析得到 50~70 °C 范围内,任意温度下模型预测值的修正公式。综上,斜率/偏差法能够解决干燥时温度对油茶籽含水率在线检测的影响问题。后续可在多个温度下进行试验,以使模型精度更高,应用范围更广。

参考文献

[1] 孟桂元, 韩杰铨, 詹兴国, 等. 我国油茶产业分析与发展对策[J]. 中国油脂, 2021, 46(7): 104-108, 113.
MENG G Y, HAN J C, ZHAN X G, et al. Analysis and development countermeasures of *Camellia oleifera* industry in China[J]. China Oils, 2021, 46(7): 104-108, 113.
[2] 郁李. 油茶产业亟需高质量发展[J]. 农经, 2019(12): 52-55.
YU L. *Camellia oleifera* industry urgently needs high-quality development[J]. Agricultural Economics, 2019(12): 52-55.
[3] 陈永忠, 邓绍宏, 陈隆升, 等. 油茶产业发展新论[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(1): 1-10.
CHEN Y Z, DENG S H, CHEN L S, et al. New theory on the development of *Camellia* oil industry [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2020, 44(1): 1-10.
[4] 周显青, 赵希雷, 张玉荣, 等. 谷物水分检测技术现状与展望[J].

- 粮食加工, 2015, 40(4): 29-34.
- ZHOU X Q, ZHAO X L, ZHANG Y R, et al. Present situation and prospect of grain moisture detection technology [J]. Grain Processing, 2015, 40(4): 29-34.
- [5] 罗凡, 费学谦, 李康雄, 等. 预处理条件对油茶籽液压榨油效率和品质的影响研究[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(4): 94-99.
- LUO F, FEI X Q, LI K X, et al. The effect of different pretreatments on the efficiency and quality of camellia oil before hydraulic pressing[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2016, 31(4): 94-99.
- [6] 赵海瑞, 滕兆丽, 杨浩勇, 等. 油茶果干燥特性及烘干脱蒲技术[J]. 农业工程, 2021, 11(10): 61-67.
- ZHAO H R, TENG Z L, YANG H Y, et al. Drying characteristics and drying technology of camellia oleifera [J]. Agricultural Engineering, 2021, 11(10): 61-67.
- [7] 周宏平, 胡逸磊, 姜洪磊, 等. 基于高光谱成像的油茶籽含油率检测方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 308-315.
- ZHOU H P, HU Y L, JIANG H Z, et al. Detection method for oil content of camellia oleifera seeds based on hyperspectral imaging[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 308-315.
- [8] 彭彦昆, 杨清华, 王文秀. 基于近红外光谱的猪肉水分在线检测与分级[J]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 347-353.
- PENG Y K, YANG Q H, WANG W X. Online detection and classification of pork moisture based on near-infrared spectroscopy [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 347-353.
- [9] 郭文川, 朱德宽, 张乾, 等. 基于近红外光谱的掺伪油茶籽油检测[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 350-357.
- GUO W C, ZHU D K, ZHANG Q, et al. Detection of adulterated camellia oil based on near-infrared spectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 350-357.
- [10] MELFSEN A, HOLSTERMANN M, HAEUSSERMANN A, et al. Accuracy and application of milk fatty acid estimation with diffuse reflectance near-infrared spectroscopy [J]. Journal of Dairy Research, 2018, 85(2): 212-221.
- [11] ELSOHABY I, WINDEYER M C, HAINES D M, et al. Application of transmission infrared spectroscopy and partial least squares regression to predict immunoglobulin G concentration in dairy and beef cow colostrum[J]. Journal of Animal Science, 2018, 96(2): 771-782.
- [12] JIANG H Y, XIE L J, PENG Y S, et al. Study on the influence of temperature on near infrared spectra[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(7): 1 510-1 513.
- [13] MAEDA H, OZAKI Y, TANAKA M, et al. Near infrared spectroscopy and chemometrics studies of temperature-dependent spectral variations of water: Relationship between spectral changes and hydrogen bonds[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 1995, 3(4): 191-201.
- [14] 马帅帅, 于慧春, 殷勇, 等. 黄瓜水分和硬度高光谱特征波长选择与预测模型构建[J]. 食品与机械, 2021, 37(2): 145-151.
- MA S S, YU H C, YIN Y, et al. Selection of hyperspectral characteristic wavelength and construction of prediction model for cucumber hardness and moisture[J]. Food & Machinery, 2021, 37(2): 145-151.
- [15] 廉孟茹, 张淑娟, 任锐, 等. 基于高光谱技术的鲜食水果玉米含水率无损检测[J]. 食品与机械, 2021, 37(9): 127-132.
- LIAN M R, ZHANG S J, REN R, et al. Nondestructive detection of moisture content in fresh fruit corn based on hyperspectral technology[J]. Food & Machinery, 2021, 37(9): 127-132.
- [16] 第五鹏瑶, 卞希慧, 王姿方, 等. 光谱预处理方法选择研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(9): 2 800-2 806.
- DIWU P Y, BIAN X H, WANG Z F, et al. Research on the selection of spectral preprocessing methods[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(9): 2 800-2 806.
- [17] 郭阳, 郭俊先, 史勇, 等. CARS-SVM 预测哈密瓜可溶性固形物含量[J]. 食品与机械, 2021, 37(6): 81-85.
- GUO Y, GUO J X, SHI Y, et al. Prediction of soluble solids in Hami melon by CARS-SVM[J]. Food & Machinery, 2021, 37(6): 81-85.
- [18] 张立欣, 杨翠芳, 陈杰, 等. 基于变量优选的苹果糖分含量近红外光谱检测[J]. 食品与机械, 2021, 37(10): 112-118.
- ZHANG L X, YANG C F, CHEN J, et al. Detection of sugar content in apple by near infrared spectroscope based on variable optimization[J]. Food & Machinery, 2021, 37(10): 112-118.
- [19] 吕都, 唐健波, 姜太玲, 等. 基于近红外光谱技术快速检测稻谷水分含量[J]. 食品与机械, 2022, 38(2): 51-56, 63.
- LU D, TANG J B, JIANG T L, et al. Research on rapid prediction model of rice moisture content based on near infrared spectroscope[J]. Food & Machinery, 2022, 38(2): 51-56, 63.
- [20] 王加华, 戚淑叶, 汤智辉, 等. 便携式近红外光谱仪的苹果糖度模型温度修正[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(5): 1 431-1 434.
- WANG J H, QI S Y, TANG Z H, et al. Temperature compensation for portable Vis/NIR spectrometer measurement of apple fruit soluble solids contents[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(5): 1 431-1 434.
- [21] ZHANG Y, GUO W. Moisture content detection of maize seed based on visible/near-infrared and near-infrared hyperspectral imaging technology[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(2): 631-640.
- [22] REN Y, LIN X, LEI T, et al. Recent developments in vibrational spectral analyses for dynamically assessing and monitoring food dehydration processes[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(16): 4 267-4 293.
- [23] 陆锡昆, 罗亚辉, 蒋蕨, 等. 基于高光谱的油茶籽含水量检测方法[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(7): 1 302-1 310.
- LU X K, LUO Y H, JIANG P, et al. Detection of water content in camellia seeds based on hyperspectrum [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2020, 32(7): 1 302-1 310.