

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.043

基于太赫兹光谱分析的猪肉 K 值无损检测方法

齐亮^{1,2} 赵茂程^{1,3} 赵婕^{1,4} 唐于维¹

(1. 南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037; 2. 南京师范大学分析测试中心, 南京 210046;

3. 泰州学院, 泰州 225300; 4. 南京工业职业技术学院航空工程学院, 南京 210023)

摘要: K 值是评价猪肉新鲜度的重要指标, 能够反映猪肉内核苷酸的分解情况, 从而评定肉的变质程度。一般采用高效液相色谱法测定 K 值, 此方法过程耗时, 需破坏被测样品, 不能满足生产和流通环节的快速检测需求。本文利用太赫兹 (THz) 光谱分析技术无损检测猪肉 K 值, 探索快速检测 K 值的可行性。在 0.2 ~ 2 THz 范围内, 采用衰减全反射模式提取 80 份不同新鲜度的猪肉 THz 光谱数据, 同时用高效液相色谱法测定每份样品的 K 值。THz 光谱原始数据经过一阶微分和 Savitzky - Golay 平滑滤波后, 分别用主成分回归 (PCR)、偏最小二乘回归 (PLSR) 和反向传播神经网络回归 (BP-ANN) 建立了 THz 光谱预测猪肉 K 值的数学模型。研究表明: 非线性 BP-ANN 模型预测精度最高, 相关系数为 0.75, 均方根误差为 14.36%; 采用 THz 光谱数据 BP-ANN 模型能够检测猪肉的新鲜度 K 值。与 HPLC 方法相比, 该方法具有快速、无损、简单的特点。

关键词: 猪肉; K 值; 太赫兹光谱; 反向传播神经网络回归; 无损检测

中图分类号: TS251.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)12-0346-08

Non-destructive Detection Method of K Value in Pork with Terahertz Spectroscopy

QI Liang^{1,2} ZHAO Maocheng^{1,3} ZHAO Jie^{1,4} TANG Yuweiyi¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

2. Center for Analysis and Testing, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China

3. Taizhou University, Taizhou 225300, China

4. School of Aeronautical Engineering, Nanjing Institute of Industrial Professional Technology, Nanjing 210023, China)

Abstract: K value is an important freshness index. It indicates nucleotide degradation, which is usually employed to assess meat spoilage. High-performance liquid chromatography (HPLC) is a common analytical method to estimate K value. However, it is time-consuming, destructive, and is not suitable to monitor pork freshness rapidly, non-invasively and in real-time. The feasibility of Terahertz (THz) spectroscopy in predicting K value of pork non-destructively was studied. The THz spectra (0.2 ~ 2 THz) of 80 pork samples with different freshness in the attenuated total reflectance (ATR) mode were acquired. Their K values were also measured by HPLC. Three models were established to predict K value, such as principal component regression (PCR), partial least squares regression (PLSR), and back propagation artificial neural network (BP-ANN) after the sample spectra were preprocessed by the first order derivative and filtered smoothly by Savitzky - Golay. Comparative research results showed that the nonlinear algorithm model of BP-ANN was the most superior way among three models whose root mean square error of prediction (RMSEP) was 14.36% and correlation coefficient (R_p) was 0.75 in the prediction set. The THz spectral combined with BP-ANN model can be used to predict pork K value although it was not perfect. Compared with HPLC, the THz spectral was non-destructive, rapid and simple. The research would lay a theoretical foundation for developing portable THz inspection equipment based on the THz spectroscopy.

Key words: pork; K value; Terahertz spectroscopy; back propagation neural network regression; non-destructive detection

收稿日期: 2017-03-21 修回日期: 2017-04-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(31570714)、江苏省高校自然科学基金项目(15KJD550001)、江苏省高校优势学科建设工程项目(PAPD)、2016年度省级战略性新兴产业发展专项资金项目和南京市2015年度科技发展计划项目(201505058)

作者简介: 齐亮(1983—),男,博士生,南京师范大学实验师,主要从事食品检测技术与装备研究, E-mail: cocoqlg@163.com

通信作者: 赵茂程(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事食品安全与无损检测研究, E-mail: mezhao@njfu.edu.cn

引言

我国猪肉消费量占肉类消费总量的 77%^[1]。猪肉的品质包括营养成分、风味、嫩度、保水性和新鲜度等要素^[2-3]，其中，新鲜度是一个重要品质指标。新鲜度测定通常有 2 种方法，感官评定法和理化分析法。感官评定法主观因素大，重复性差；理化分析法精确可信，重复性高^[4]。理化分析所测定的新鲜度指标包括肉色^[5-6]、微生物指标^[7-8]、挥发性盐基总氮指标^[9-10]、K 值(品质度)^[11]、pH 值^[12-13]和聚胺类化合物质量浓度^[14-15]等，其中，基于 ATP 分解过程的 K 值被证实是可行的，且越来越受到重视^[16-17]。

K 值通常采用高效液相色谱分析法(High performance liquid chromatography, HPLC)获得^[18-19]，虽然此种理化分析法准确且可信，但是过程耗时、对被测样品具有破坏性，不能满足生产和流通环节中快速和广泛性测量要求，用无损检测方法测定猪肉的 K 值成为科研工作的一个重要研究热点。

目前，猪肉新鲜度指标的无损检测方法有近红外光谱分析以及可见-近红外高光谱图像分析方法，这些方法均基于与猪肉新鲜度相关的化学物质在可见和近红外波段有特征表达的原理，建立猪肉新鲜度无损检测的数学模型，实现了新鲜度的快速和比较准确的测定^[20-23]。

但是，利用远红外波段光谱数据无损检测猪肉新鲜度的方法却鲜有报道。太赫兹波(Terahertz, THz)位于毫米波和红外线之间，属于远红外波段，频率在 0.1 ~ 10 THz 范围内^[24]。从能量上看，THz 波处于电子和光子之间。THz 波的多元化特性使得很多化学分子在 THz 波段下表现出在其他波段下所不具备的分子运动特性^[25]。核苷酸类(如 ADP、ATP)及其相关物质(如 IMP)属于生物小分子，在 THz 波段的吸收主要是由于其分子自身的转动、振动或分子集团的整体振动，有 THz 波谱特征结构，在 THz 波段存在多个吸收峰^[26-27]。

本文以 K 值为研究参数，通过探索猪肉新鲜度的 THz 光谱特性，建立 THz 光谱数据与猪肉 K 值之间的关系模型，实现对猪肉 K 值的快速无损检测，研究一种猪肉新鲜度快速无损检测方法。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验材料为冷鲜猪肉的通脊肉，每天上午从当地超市购买，用冷藏箱运回实验室后，将猪肉均匀切

割成 2.5 cm × 2.5 cm × 0.5 cm 的肉片。取样时避开猪肉的脂肪和结缔组织，以防止这些成分对 THz 检测结果的干扰。将猪肉样品用保鲜袋包好并编号后置于 4℃ 冰柜中贮藏待测。连续采集 8 d 的肉样为一个试验周期。在第 8 天的下午，完成 8 个肉样的 THz 光谱采集以及 K 值测定。重复试验 10 个周期，得到 80 个肉样的光谱数据和理化值。

1.2 THz 光谱采集

THz 检测设备型号是 TAS7500SP (日本 Advantest 公司)，在室温(25℃)环境下工作，频率分辨率为 7.6 GHz，检测频率范围是 0.2 ~ 4 THz，共 498 个采样频率点(波点)，样品谱线经过 2 048 次自动扫描并取平均值后得到。

THz 与水有强烈的相互作用，对于富含水的肉样透射深度只有几百微米，所以透射模式不适合肉制品新鲜度无损检测，反射模式也会因为反射波被水吸收而无法检测。用 THz 衰减全反射(Attenuated total reflectance, ATR)检测模式，可以克服样品中富含的游离水以及结合水对 THz 波的强烈吸收，使得样品表面微米级厚度化学物质的 THz 特性能够反映在 THz 全反射波的光谱里^[28]。ATR 检测附件的光路如图 1 所示，THz 波进入 ATR 晶体后发生了全反射，反射后的 THz 波含有与反射面接触的样品表面 THz 光谱信息。

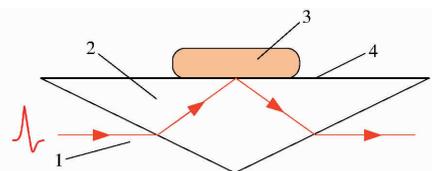


图 1 ATR 附件光路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical path in ATR module

1. THz 波 2. ATR 晶体 3. 样品 4. ATR 检测窗

每个样品从冰箱取出后，去除包装，将样本平整放入 ATR 检测窗表面。样品的上、下 2 个表面分别采集 3 次 THz 光谱数据，每个样本能够获得 6 份 THz 光谱数据，将 6 份光谱数据取算术平均值，作为该样本的最终 THz 光谱数据。因为 THz 光谱仪对温度和湿度比较敏感，所以光谱采集时，保持实验室内温度、湿度基本一致。

1.3 K 值测定

猪肉中的一些物质随保存时间的增加而变质，在宰后的肉品中，三磷酸腺苷(ATP)会自动分解：三磷酸腺苷(ATP) → 二磷酸腺苷(ADP) → 磷酸腺苷(AMP) → 次黄嘌呤核苷酸(IMP) → 肌苷酸(HxR) → 次黄嘌呤(Hx)。

据 ATP 分解过程，测定 K 值的指标方程为^[16]

$$K = \frac{C_{\text{HxR}} + C_{\text{Hx}}}{C_{\text{ATP}} + C_{\text{ADP}} + C_{\text{AMP}} + C_{\text{IMP}} + C_{\text{HxR}} + C_{\text{Hx}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中 C_{ATP} ——样品中 ATP 浓度
 C_{ADP} ——样品中 ADP 浓度
 C_{AMP} ——样品中 AMP 浓度
 C_{IMP} ——样品中 IMP 浓度
 C_{HxR} ——样品中 HxR 浓度
 C_{Hx} ——样品中 Hx 浓度

可见,肉品越是新鲜, K 值越低,反之 K 值越高。采用 HPLC 方法检测肉制品中的 K 值。根据流动相中 ATP 分解的关联产物(ATP、ADP、AMP、IMP、HxR 和 Hx)在固定相中的不同流速,将这 6 种化学组分分离,分别测得这些组分的含量,根据式(1)计算出被测样品的 K 值^[19]。本文采集完样本 THz 光谱数据后立即对同一样本进行 K 值测定。

用于 K 值检测的样品前处理过程如下:将被测样品剁碎成肉泥,从中取 (2.00 ± 0.05) g 放入 50 mL 离心管内,加入冷却后的 10% 高氯酸溶液 20 mL,涡旋振荡 1 min,以 8 000 r/min 速度离心 10 min,取出上清液。再用 5% 高氯酸溶液 20 mL 重提沉淀物中的待测物,以 8 000 r/min 速度离心 10 min,合并上清液。用 10 mol/L 的 NaOH 溶液调节提取液 pH 值近 6.0,然后再用 1.0 mol/L 的 NaOH 溶液继续调节 pH 值至 6.0 ~ 6.4,再用超纯水定容至 50 mL。用 0.45 μm 的微孔滤膜过滤,滤液于 4℃ 下保存,待测。

HPLC 条件如下:Finnigan Surveyor 型液相色谱仪(美国 Thermo-Fisher 公司),AQ-C18 型色谱柱(美国 Thermo-Fisher 公司),流动相为 0.05 mol/L 的 K_3PO_4 缓冲液(pH 值 6.5),缓冲液用超纯水配制,样品的进样量 1 μL ,流速 200 $\mu\text{L}/\text{min}$,检测波长 254 nm。ATP 分解的关联产物由外标法定量,测定范围为 0 ~ 0.5 mmol/L。

试验中使用的试剂如下:ATP 关联物(ATP、ADP、AMP、IMP、HxR 和 Hx)共 6 种标准品(纯度 99% 以上,美国 Sigma-Aldrich 公司);磷酸钾、氢氧化钠、高氯酸(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);试验用水为 Millipore Academic 型超纯水器制备的超纯水。

2 结果与分析

2.1 K 值分析

采用 HPLC 法获得 80 个样本的 K 值,统计分析结果如表 1 所示。通过样本的平均值可以看出,随着储存时间的增加,新鲜度不断降低,样本的 K 值

逐步增加,但增加量不是固定的。其中,5 ~ 6 d、6 ~ 7 d 的增加量相对较大,说明在上述存储周期内,肉样的品质变化程度较大;感官评价也证实肉样在 6 ~ 7 d 存储周期内,触摸较黏,有明显的酸味,因此可推测肉样在此周期内新鲜度显著下降。本试验所有样本的 K 值覆盖了猪肉的不同新鲜度,覆盖范围广,有助于使本文最终建立的 THz 光谱预测 K 值模型有较好的鲁棒性。

表 1 HPLC 测得的 K 值

Tab. 1 K values measured by HPLC

存储时间/d	样本数量	最大值/%	最小值/%	平均值/%
0	10	39.62	22.89	31.96
1	10	47.25	37.17	41.99
2	10	51.93	39.91	48.11
3	10	53.40	44.78	51.41
4	10	56.46	48.17	54.04
5	10	68.73	49.93	59.09
6	10	93.19	64.84	81.54
7	10	96.26	91.66	94.53

80 个样本被随机分为 54 个校正集和 26 个预测集,个数比大致为 2:1。其中校正集用于建立 THz 光谱预测 K 值的数学模型;预测集用来检验所建立的模型预测未知样本 K 值的准确性。通过表 2 可以看出,校正集、预测集和样本总集合的 K 值范围基本相同,平均值和标准差也没有明显区别,因此校正集和预测集的样本分割是合适的。

表 2 校正集与预测集的 K 值统计信息

Tab. 2 Statistic information of all samples in calibration and prediction sets

样本集合	样本个数	K 值范围/%	平均值/%	标准差/%
所有样本	80	22.89 ~ 96.26	57.84	19.95
校正集	54	24.86 ~ 95.96	58.07	19.17
预测集	26	22.89 ~ 96.26	57.35	21.87

2.2 光谱预处理

肉样的同一表面在相同的测试条件下连续测量 6 次,获得 6 条 THz 光谱,理论上这 6 条光谱应该完全重合,但由于仪器的噪声及测试误差的影响,连续重复测得的 6 条光谱不可能完全重合。为了评价光谱质量,可以计算同一样品表面连续重复测试 n_s 次获得的 n_s 条光谱的标准方差光谱(Standard variance spectrum of repeat spectral, SVSRS),SVSRS 值越小,说明光谱质量越好^[29],公式为

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{n_s} (x_{kj} - \bar{x}_j)^2}{n_s - 1}} \quad (2)$$

式中 x_{kj} ——第 k 次测量样本在波点 j 处的 ATR 反射率

\bar{x}_j ——波点 j 处 n_s 次测量 ATR 反射率的均值

S_j ——波点 j 处的 SVSRS 值

图 2a 是某个肉样表面在 0.2~4 THz 的 6 次 THz 光谱,图 2b 是该光谱对应的 SVSRS,从图中可以看出在 2~4 THz 的 SVSRS 值明显增高,重复性差。故选

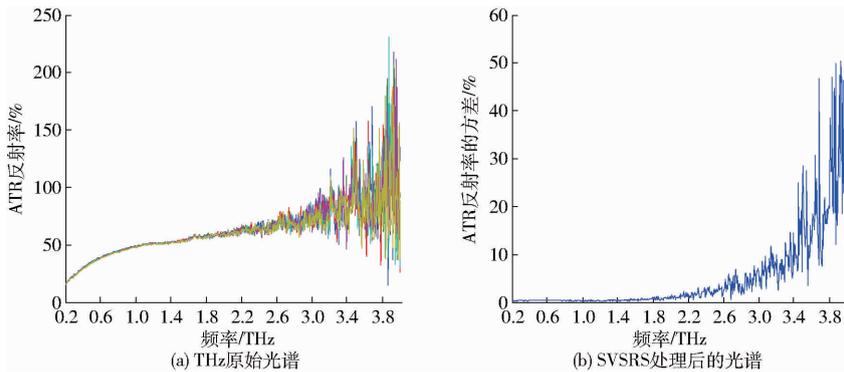


图 2 THz 光谱波段选择
Fig.2 Scope selection of THz spectra

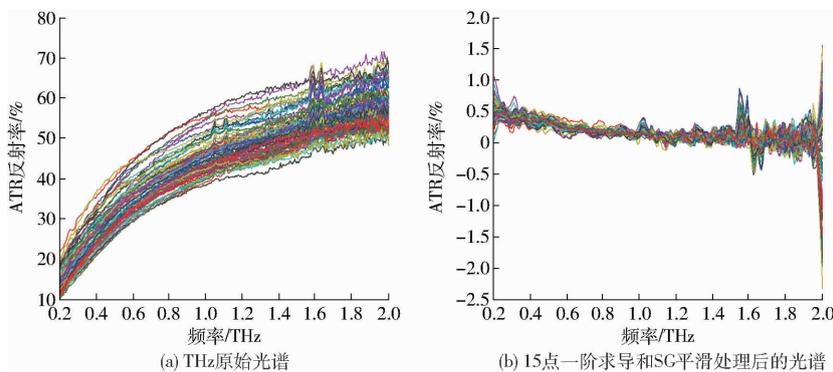


图 3 THz 光谱预处理
Fig.3 Preprocessing of THz spectra

本文采用一阶导数 (First order derivative, FD) 预处理光谱数据,一阶导数能够减少基线偏移、漂移和背景干扰造成的数据偏差,使得与新鲜度密切相关的光谱特性变得更为显著^[30-31]。由于导数计算会增加噪声,故导数预处理之后采用 Savitzky - Golay (SG) 多项式平滑光谱^[32]。在求导过程中,差分宽度选择十分重要:宽度过小,噪声会过大,影响所建模型的质量;宽度过大,平滑过度,会失去大量的细节信息^[33]。图 3b 为经过 15 点一阶求导和 SG 平滑后得到的一阶导数光谱图。

2.3 猪肉 K 值预测模型

由上文论述可知,猪肉腐败过程中会使 K 值相关的 ATP 关联产物的含量发生变化,而这些生物分子对 THz 波具有灵敏的光谱响应,THz 光谱能够反映出这些生物分子含量的变化。因此 THz 光谱数据与猪肉的新鲜度之间存在一种间接的关联性。本文使用线性算法——主成分回归 (Principal

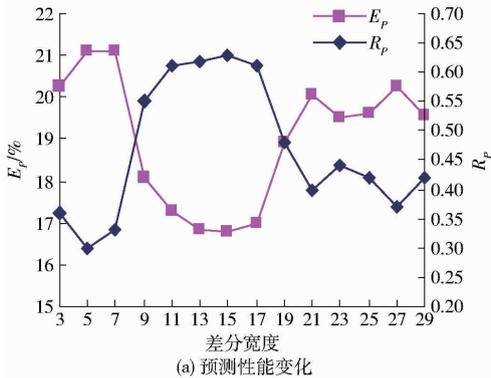
components regression, PCR) 和偏最小二乘回归 (Partial least squares regression, PLSR) 以及非线性算法——反向传播神经网络回归 (Back propagation artificial neural network, BP-ANN) 分别验证这种关联性,并试图找到一种 THz 光谱预测猪肉 K 值的数学模型。评价模型质量的指标有校正集相关系数 R_c 、校正集均方根误差 E_c 、预测集相关系数 R_p 和预测集均方根误差 E_p ^[34]。相关系数 R_c 和 R_p 越大, E_c 和 E_p 越小,则模型的预测能力越好。本文使用 Matlab R2009b (美国 Mathworks 公司) 软件对光谱数据进行计算与建模。

2.3.1 主成分回归 PCR 预测模型

本试验中的每一条光谱都含有 250 个波点,光谱的波点数远大于样本数,如果直接用于回归分析,会出现过拟合,降低模型的预测精度和稳定性。同时光谱波点的数据间存在较高的共线性和相关性,也会使得回归模型的结果产生失真。可以通过主成

分分析法(Principal component analysis, PCA)对光谱信息进行压缩,通过少数几个主成分的得分来近似反映原光谱数据,消除光谱数据点的信息冗余和相关性^[35]。

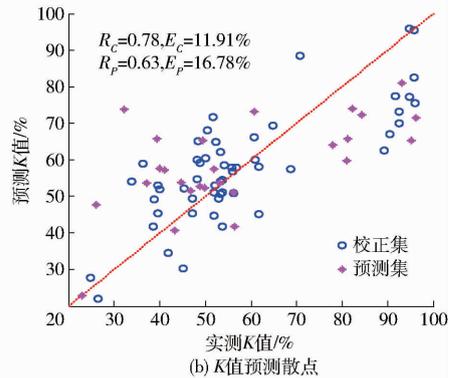
本文用 PCA 法将预处理后的光谱矩阵进行主成分分解,取累积贡献率达到 95% 的主成分集合作



(a) 预测性能变化

为预测模型的输入。根据预测模型达到最高 R_p 和最低 E_p 时选择光谱预处理的差分宽度。

模型计算表明当一阶差分宽度为 15 时,累积贡献率 95% 的主成分集合数为 26, PCR 的预测性能最佳 ($R_p = 0.63$, $E_p = 16.78\%$), 如图 4a 所示。图 4b 是 PCR 模型在此参数条件下的 K 值预测散点图。



(b) K值预测散点

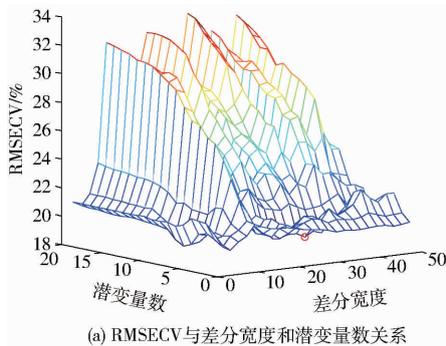
图4 PCR模型的预测结果

Fig. 4 Results of PCR model

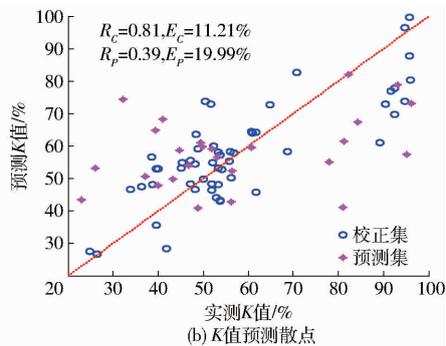
2.3.2 PLSR 预测模型

PLSR 不仅与 PCR 一样都对光谱矩阵进行主成分分解,还对参考变量(K 值)进行主成分分解,并且在迭代分解时考虑两者的线性相关性,迭代分解后的潜变量(Latent variable, LV)能够最大程度反映光谱矩阵的信息,并使得光谱矩阵和参考变量的相关性达到最大化。潜变量数采用留一交叉验证法选取,即选取交叉验证均方根误差(Root mean

square error of cross validation, RMSECV)值最小时的潜变量数^[36]。根据这一原则,考察预测模型在预处理差分宽度 3~47 范围内,潜变量数在 1~20 的范围内, RMSECV 的数值变化情况,如图 5a 所示。可以看出,预处理差分宽度为 31 且潜变量数是 5 时, RMSECV 数值最小,为 19.12%, PLSR 的预测性能最佳。图 5b 是 PLSR 模型在此参数条件下的 K 值预测散点图。



(a) RMSECV与差分宽度和潜变量数关系



(b) K值预测散点

图5 PLSR模型的预测结果

Fig. 5 Results of PLSR model

2.3.3 BP-ANN 预测模型

BP-ANN 能够模仿延伸人脑的认知功能探索并构建输入信号与输出信号之间的复杂联系。BP-ANN 一般使用多层前馈神经网络。本文使用的神经网络拓扑结构分为 3 层:输入层、单隐含层和输出层。为了降低神经网络训练的复杂度,采用 PCA 方法将预处理后的光谱矩阵进行主成分分解,取累积贡献率达到 95% 的主成分集合作为神经网络的输入,输出层为一个节点,即预测 K 值。单隐含层的节点数由经验公式得出^[37],即

$$m_h = \sqrt{m_i + m_o} + a \quad (3)$$

式中 m_h ——隐含层节点数

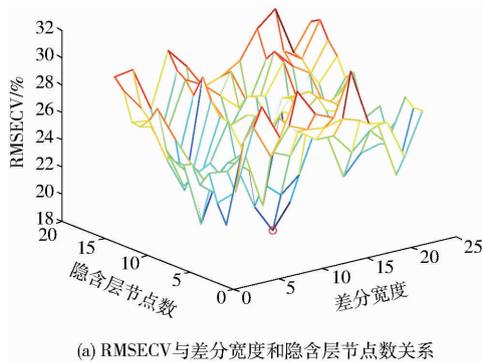
m_i ——输入层节点数

m_o ——输出层节点数

a ——1~10 范围内的常数

据此隐含层节点数范围选择为 4~17。训练神经网络前,输入的光谱矩阵被归一化至 -1~1 的范围内,实测 K 值被归一化至 0~1 的范围内。隐含层的传递函数是“logsig”(S 型对数函数),输出层的转移函数是“tansig”(双曲正切 S 型传递函数),BP 网

络的训练函数为 trainlm (Levenberg - Marquardt 训练函数)。因为隐含层的节点数会影响神经网络预测的性能,所以采用留一交叉验证法选取,即选取 RMSECV 值最小时的节点数^[38]。根据这一原则,考察预测模型在预处理差分宽度 3 ~ 25 范围内,隐含



层的节点数在 4 ~ 17 范围内, RMSECV 的数值变化情况,如图 6a 所示。可以看出,预处理差分宽度为 13 且隐含层节点数是 9 时, RMSECV 数值最小,为 18.1%, BP-ANN 模型的预测性能最佳。图 6b 是 BP-ANN 模型在此参数条件下的 K 值预测散点图。

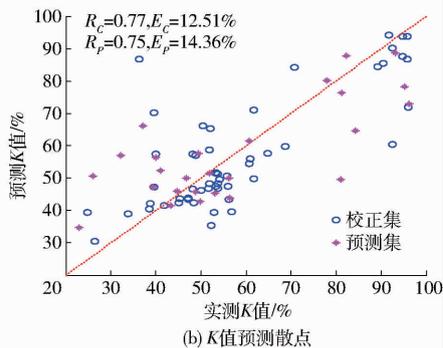


图 6 BP-ANN 模型的预测结果

Fig. 6 Results of BP-ANN model

2.4 THz 光谱预测模型的比较

表 3 系统比较 PCR、PLSR、BP-ANN 3 种 THz 光谱预测 K 值数学模型的性能,可以看出,非线性模型 BP-ANN 的预测性能明显优于线性模型 PCR 和 PLSR。其原因可以通过以下方面来解释:

表 3 3 种 K 值预测模型的回归结果比较

Tab. 3 Regression result comparison of K value for three models

模型	差分 宽度	校正集		预测集	
		R_c	$E_c/\%$	R_p	$E_p/\%$
PCR	15	0.78	11.91	0.63	16.78
PLSR	31	0.81	11.21	0.39	19.99
BP-ANN	13	0.77	12.51	0.75	14.36

(1)在线性模型中,PLSR 模型的预测结果劣于 PCR 模型的预测结果。可能的原因是,PLSR 模型在校正集的建模拟合过程中过多地考虑了光谱矩阵和参考变量的相关性,导致校正集建模出现了过拟合,所建模型在预测集中的预测性能出现了明显下降。

(2)非线性模型 BP-ANN 预测结果最优。可能的原因是, K 值由 ATP 的 6 种关联物含量的比值决定,这些分子物质的含量与 THz 光谱中的谱线数据是非线性关系,而且各分子物质在 THz 光谱中也是互相重叠的^[27]。所以非线性模型能够在建模过程中通过自学习和自调整方法拟合非线性关系,所建立的预测模型会比线性模型更优秀。

通过较优模型可以进一步推断,光谱数据预处理的差分宽度选择 13 (BP-ANN 模型) 或者 15 (PCR 模型) 是合适的,差分宽度过小或者过大都会降低模型的预测性能。

(3)非线性模型 BP-ANN 有进一步完善的空间。样品成分复杂,吸收光谱中未见有明显的吸收峰或者特征波段,可以设计更优算法,滤除与新鲜度无关的物质对 THz 光谱的影响,从复杂成分的 THz 光谱中提取与 K 值相关度更大的特征波段,研究出更适合 K 值和 THz 光谱的复杂非线性关系模型,进一步提高预测精度。

3 结束语

采用 ATR 全反射模式,在 0.2 ~ 2 THz 范围内获取冷鲜猪瘦肉表面的 THz 光谱数据,经一阶微分和 SG 平滑滤波处理后构建数学模型,快速无损检测猪肉 K 值,以评价猪肉新鲜度。3 种预测模型 PCR、PLSR、BP-ANN 的比较研究表明,相比线性 PCR、PLSR 模型,尽管非线性 BP-ANN 模型有进一步完善的空间,但能更好地拟合 THz 光谱数据和新鲜度 K 值之间的复杂非线性关系,最适合于 K 值预测,其预测相关系数达到 0.75,预测集均方根误差达到 14.36%。基于相同的 THz 检测原理,THz 光谱分析法还应能无损检测其他肉类(如鸡肉、牛肉、鱼肉等)的 K 值。此项研究为基于此方法开发设计便携式检测设备提供了理论基础。

参 考 文 献

- 1 中经网统计数据库. 居民家庭人均主要消费品消费量(肉类)[R]. 北京:中经网数据有限公司,2015.
- 2 孔保华,马丽珍. 肉品科学与技术[M]. 北京:中国轻工业出版社,2003.

- 3 彭彦昆,张雷蕾. 农畜产品品质安全高光谱无损检测技术进展和趋势[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 137-145. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130425&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.04.025.
PENG Y K, ZHANG L L. Advancement and trend of hyperspectral imaging technique for nondestructive detection of agro-product quality and safety[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 137-145. (in Chinese)
- 4 齐亮,赵婕,赵茂程. 冷鲜猪肉的新鲜度无损检测技术现状及 THz 检测技术展望[J]. 食品与机械, 2016, 32(9): 219-224.
QI L, ZHAO J, ZHAO M C. Status of nondestructive detection methods on chilled pork freshness and prospect of THz spectrum inspection technique[J]. Food & Machinery, 2016, 32(9): 219-224. (in Chinese)
- 5 CHUN J, MIN S, HONG G. Effects of high-pressure treatments on the redox state of porcine myoglobin and color stability of pork during cold storage[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(2): 588-597.
- 6 肖珂,段晓霞,高冠东. 基于图像特征的猪肉新鲜度无损检测方法[J]. 河北农业大学学报, 2012, 35(4): 111-113, 122.
XIAO K, DUAN X X, GAO G D. Nondestructive detection of pork freshness based on image features[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2012, 35(4): 111-113, 122. (in Chinese)
- 7 LI M, WANG H, SUN L, et al. Application of electronic nose for measuring total volatile basic nitrogen and total viable counts in packaged pork during refrigerated storage[J]. Journal of Food Science, 2016, 81(4): M906-M912.
- 8 TAO F F, PENG Y K. A nondestructive method for prediction of total viable count in pork meat by hyperspectral scattering imaging[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(1): 17-30.
- 9 HUANG L, ZHAO J, CHEN Q, et al. Nondestructive measurement of total volatile basic nitrogen (TVB-N) in pork meat by integrating near infrared spectroscopy, computer vision and electronic nose techniques[J]. Food Chemistry, 2014, 145: 228-236.
- 10 张雷蕾,李永玉,彭彦昆,等. 基于高光谱成像技术的猪肉新鲜度评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 254-259.
ZHANG L L, LI Y Y, PENG Y K, et al. Determination of pork freshness attributes by hyperspectral imaging technique[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(7): 254-259. (in Chinese)
- 11 QIU X, ITOH D, SATAKE T, et al. Microdevice with integrated multi-enzyme sensors for the measurement of pork freshness[J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2016, 235: 535-540.
- 12 LIAO Y, FAN Y, CHENG F. On-line prediction of pH values in fresh pork using visible/near-infrared spectroscopy with wavelet de-noising and variable selection methods[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 109(4): 668-675.
- 13 胡耀华,熊来怡,刘聪,等. 基于近红外光谱的生鲜猪肉 pH 检测及其品质安全判别[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(3): 121-126.
HU Y H, XIONG L Y, LIU C, et al. Detection for pH and quality security of fresh pork by near-infrared spectrometer technology[J]. Journal of China Agricultural University, 2012, 17(3): 121-126. (in Chinese)
- 14 钮伟民,皓小波,孙秀兰,等. 基于尸胺含量变化的猪肉新鲜度评价方法[J]. 食品与生物技术学报, 2011, 30(3): 359-362.
NIU W M, HAO X B, SUN X L, et al. Evaluation of freshness of pork based on the different of cadaverine[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2011, 30(3): 359-362. (in Chinese)
- 15 WANG Q, XIE Y F, ZHAO W J, et al. Rapid microchip-based FAIMS determination of trimethylamine, an indicator of pork deterioration[J]. Analytical Methods, 2014, 6(9): 2965-2972.
- 16 CHENG W W, SUN D W, PU H B, et al. Integration of spectral and textural data for enhancing hyperspectral prediction of K value in pork meat[J]. LWT—Food Science and Technology, 2016, 72: 322-329.
- 17 GIL L, BARAT J M, BAIGTS D, et al. Monitoring of physical-chemical and microbiological changes in fresh pork meat under cold storage by means of a potentiometric electronic tongue[J]. Food Chemistry, 2011, 126(3): 1261-1268.
- 18 MORA L, ALEIDA S, ARISTOY M, et al. Hydrophilic interaction chromatographic determination of adenosine triphosphate and its metabolites[J]. Food Chemistry, 2010, 123(4): 1282-1288.
- 19 汤水粉,罗方方,钱卓真,等. 鱼类贮藏期间鲜度指标 K 值变化及鲜度评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(12): 4107-4114.
TANG S F, LUO F F, QIAN Z Z, et al. Study on freshness of fishes during different storage stage by the freshness quality index (K value)[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2014, 5(12): 4107-4114. (in Chinese)
- 20 WANG X, ZHAO M, JU R, et al. Visualizing quantitatively the freshness of intact fresh pork using acousto-optical tunable filter-based visible/near-infrared spectral imagery[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2013, 99: 41-53.
- 21 李小昱,钟雄斌,刘善梅,等. 不同品种猪肉 pH 值高光谱检测的模型传递修正算法[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 216-222. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140935&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.035.
LI X Y, ZHONG X B, LIU S M, et al. Comparison of transfer and correctional methods for pork pH value detection of different varieties by hyperspectral imaging technique[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 216-222. (in Chinese)
- 22 张海云,彭彦昆,王伟,等. 生鲜猪肉主要品质参数无损在线检测系统[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 146-151.

- http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130426&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.04.026.
- ZHANG H Y, PENG Y K, WANG W, et al. Nondestructive real-time detection system for assessing main quality parameters of fresh pork[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 146–151. (in Chinese)
- 23 魏文松, 彭彦昆. 手持式生鲜肉品质参数无损检测装置研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 324–331, 339. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s050. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.050.
- WEI W S, PENG Y K. Research on hand-held device for nondestructive detection of meat quality parameters [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 324–331, 339. (in Chinese)
- 24 谢丽娟, 徐文道, 应义斌, 等. 太赫兹波谱无损检测技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 246–255. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130743&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.043.
- XIE L J, WU W D, YING Y B, et al. Advancement and trend of Terahertz spectroscopy technique for non-destructive detection [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 246–255. (in Chinese)
- 25 FERGUSON B, ZHANG X C. Materials for terahertz science and technology[J]. Nature Materials, 2002, 1(1): 26–33.
- 26 张希成, 许景周. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007.
- 27 SHEN Y C, UPADHYA P C, LINFIELD E H, et al. Temperature-dependent low-frequency vibrational spectra of purine and adenine[J]. Applied Physics Letters, 2003, 82(14): 2350–2352.
- 28 翁诗甫. 傅里叶变换红外光谱分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- 29 倪力军, 张立国. 基础化学计量学及其应用[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2011.
- 30 CHEN Y, XIE M Y, YAN Y, et al. Discrimination of *Ganoderma lucidum* according to geographical origin with near infrared diffuse reflectance spectroscopy and pattern recognition techniques[J]. Analytica Chimica Acta, 2008, 618(2): 121–130.
- 31 刘善梅, 李小昱, 钟雄斌, 等. 基于高光谱成像技术的生鲜猪肉含水率无损检测[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊1): 165–170, 164. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2013s130&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.030.
- LIU S M, LI X Y, ZHONG X B, et al. Non-destructive detection of water content in fresh pork based on hyperspectral imaging technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.1): 165–170, 164. (in Chinese)
- 32 周丽娜, 程树朝, 于海业, 等. 初期稻叶瘟病害的叶绿素荧光光谱分析[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 203–207. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170227. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.027.
- ZHOU L N, CHENG S C, YU H Y, et al. Chlorophyll fluorescence spectra analysis of early rice blast[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 203–207. (in Chinese)
- 33 赵杰文, 林颢. 食品、农产品检测中的数据处理和分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- 34 TAO F F, PENG Y K, GOMES C L, et al. A comparative study for improving prediction of total viable count in beef based on hyperspectral scattering characteristics[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 162: 38–47.
- 35 孙俊, 路心资, 张晓东, 等. 基于高光谱图像的红豆品种 GA–PNN 神经网络鉴别[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 215–221. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160628. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.028.
- SUN J, LU X Z, ZHANG X D, et al. Identification of red bean variety with probabilistic GA–PNN based on hyperspectral imaging[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 215–221. (in Chinese)
- 36 PANAGOU E Z, MOHAREB F R, ARGYRI A A, et al. A comparison of artificial neural networks and partial least squares modelling for the rapid detection of the microbial spoilage of beef fillets based on Fourier transform infrared spectral fingerprints [J]. Food Microbiology, 2011, 28(4): 782–790.
- 37 XU J F, XU J, LI S Z, et al. Transmission risks of schistosomiasis japonica: extraction from back-propagation artificial neural network and logistic regression model[J]. PLOS Neglected Tropical Diseases, 2013, 7(3): 1–11.
- 38 HUANG Q P, CHEN Q S, LI H H, et al. Non-destructively sensing pork's freshness indicator using near infrared multispectral imaging technique[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 154: 69–75.