

基于神经网络算法与太赫兹光谱检测技术的奶粉三聚氰胺含量测定

胡军, 徐振, 李茂鹏, 刘燕德*

华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西 南昌 330013

摘要 为探索不同光谱预处理方法对太赫兹 (THz) 光谱的影响, 采用平滑、多元散射校正、基线校正和归一化相以及多元散射校正和归一化结合等预处理方法。为优化模型、减少运算量, 采用主成分分析 (PCA) 对太赫兹光谱进行波段压缩, 以降低数据维数, 基于压缩后的数据分别建立反向传播神经网络 (BPNN) 和广义回归神经网络 (GRNN) 检测模型。实验结果表明: 经多元散射校正结合归一化校正处理后的 GRNN 模型效果最佳, 得到的预测相关系数为 0.9967, 预测均方根误差为 0.0050。本实验验证了 THz 光谱检测技术对奶粉中违禁添加剂三聚氰胺检测的可行性, 并建立了较优的掺杂三聚氰胺奶粉样品的 GRNN 检测模型。该研究对促进奶粉行业的健康发展具有较为重要的意义。

关键词 光谱学; 太赫兹光谱技术; 奶粉; 三聚氰胺; 广义回归神经网络; 主成分分析

中图分类号 O433.4; O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.223001

Determination of Melamine Content in Milk Powder Based on Neural Network Algorithm and Terahertz Spectrum Detection

Hu Jun, Xu Zhen, Li Maopeng, Liu Yande*

School of Mechatronics & Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 330013, China

Abstract To explore the influences of different spectral preprocessing methods on the terahertz (THz) spectrum, preprocessing methods such as smoothing, multivariate scattering correction, baseline correction and normalization, and combination of multiple scattering correction and normalization are used. In order to optimize the model and reduce the computation amount, principle component analysis is used to compress the THz spectrum to reduce data dimension. The backpropagation neural network (BPNN) and generalized regression neural network (GRNN) detection models are established based on the compressed data. Experimental results show that the effect of the GRNN model with multiple scattering correction and normalization correction is the best. The predicted correlation coefficient is 0.9967 and the predicted root mean square error is 0.0050. This experiment verifies the feasibility of the THz spectrum detection technology for the detection of the melamine in milk powder, and establishes a better GRNN detection model for melamine adulterated milk powder samples. This study is of great significance to promote the healthy development of milk powder industry.

Key words spectroscopy; terahertz spectroscopy; milk powder; melamine; generalized regression neural network; principle component analysis

OCIS codes 300.6495; 300.6170

收稿日期: 2020-03-13; **修回日期:** 2020-04-22; **录用日期:** 2020-04-28

基金项目: 国家 863 计划 (2012AA101906)、江西省优势科技创新团队建设计划 (20153BCB24002)、南方山地果园智能化
管理技术与装备协同创新中心项目 (赣教高字 [2014]60 号)、江西省教育厅科学技术研究青年项目 (GJJ190348)、江西省博士
研究生创新资金 (YC2019-B106)

* **E-mail:** jxliuyd@163.com

1 引言

食品安全与我们每个人的生活息息相关,不正确地使用食品添加剂或者使用违禁食品添加剂会对人体健康造成严重危害。三聚氰胺是一种化工产品,其含有较多氮元素,常被非法加入一些食品(如奶粉、糖果)中,使其呈现蛋白质含量高的假象,而食用这类食品会对人体健康造成极大伤害,因此国家大力打击这种违法行为^[1]。

目前,对奶粉的品质检测更多是借助于化学方法,国内外较常用的检测方法分为生物测定方法和理化分析法。其中,生物测定方法包括生物传感器法和免疫分析法,理化分析法包括液相色谱法和气相色谱法。这些方法都属于有损检测方法,检测成本高、操作复杂,无法满足奶粉质量检测对快速检测和低成本的要求^[2]。因此,有必要探索一种简便、快速、实时的奶粉质量安全检测方法。太赫兹波是频率介于 0.1~10 THz 范围内的电磁波,处于电磁波谱中毫米波和红外线之间,综合了电子学和光学的优势,有其独特特性,如安全性、透视性好以及高波谱分辨能力等,这些特性使得太赫兹光谱技术在农业、生物医学、航空航天等领域具有广阔的应用前景,使其受到世界各国的高度重视^[3]。

近年来,一些研究人员开始利用太赫兹光谱检测技术开展食品方面的。管爱红等^[4]利用太赫兹光谱技术对红薯淀粉中的添加剂明矾进行研究,验证了太赫兹时域光谱(THz-TDS)技术可以用于淀粉中明矾的定性判别和定量检测。夏焱等^[5]利用太赫兹光谱技术分别对增白剂和吊白块及其混合物进行检测,验证了太赫兹检测具有可行性。李斌等^[6]利用太赫兹光谱技术对桃的内部虫害进行研究,验证了太赫兹光谱技术在虫害检测方面的潜力。Ge 等^[7]利用太赫兹光谱技术获取了黄曲霉毒素 B1 在 0.4~1.6 THz 频率范围内的太赫兹光谱信息并且建立了回归预测模型,这极好地证明了太赫兹光谱技术对黄曲霉毒素 B1 检测的可行性。Huang 等^[8]利用近红外高光谱成像系统对奶粉中的三聚氰胺进行了检测,建立了快速定量分析奶粉中三聚氰胺的检测模型。李建蕊等^[9]利用太赫兹光谱技术验证了三聚氰胺在 1.98~2.24 THz 频率范围内具有吸收峰,并利用密度泛函理论对吸收峰进行了指认。黎重^[10]对三聚氰胺与奶粉比例不同的三个混合样本(三聚氰胺与奶粉的体积比为 1:1,1:7,1:20)进行检测,通过分析采集样本的太赫兹吸收系数,发现

高浓度的三聚氰胺可以被检测出,但低浓度的三聚氰胺还无法被检测出,并对奶粉中掺杂的三聚氰胺进行了初步的定性分析。

奶粉中添加三聚氰胺的问题已经引起社会的足够重视,目前也有一些研究人员利用太赫兹光谱技术对三聚氰胺进行吸收峰的指认,利用太赫兹光谱定量检测奶粉中的三聚氰胺还存在检测精度不高的问题,本文从算法的角度优化用于检测奶粉中三聚氰胺的模型。神经网络在逼近能力、学习速度等方面具有较大优势。因此,本文采用太赫兹光谱与神经网络相结合的方法对奶粉中掺杂的三聚氰胺进行了定量测定。分别建立基于反向传播神经网络(BPNN)^[11]和广义回归神经网络(GRNN)^[12-13]的检测模型,并探索较优的预测模型。

2 材料与方法

2.1 实验材料

本实验所用奶粉为国际品牌“味全”奶粉,购买于学校超市。三聚氰胺样品购买于阿拉丁试剂官网,其分析纯度 $\geq 99.7\%$ 。按照设计的三聚氰胺的质量浓度(0.04%~20%)配制样品。本次实验样品经过研磨、烘干、称量、混合、压片等步骤制备。具体制备流程如下:1)将三聚氰胺样品倒入玛瑙研钵中,将其研磨为直径约为 2 μm 的细粉,烘干 4~5 h 后将其放入干燥箱中待用;2)依次按照对应的质量浓度制备样本,并贴上标签;3)将配制好的样品放在漩涡混合器中,振荡 3 min 至充分混匀;4)采用压片机将固定质量的样品压制为直径约为 1.2 cm、厚度约为 1 mm 的样品;5)利用游标卡尺测量样品厚度并进行记录。

按照上述方法依次制备 44 组不同质量浓度梯度的奶粉和三聚氰胺的混合样品以及 2 组奶粉和三聚氰胺纯品。制备每组质量浓度梯度样品 4 个,共得到混合样品 176 个。采用 K-S(Kennard-Stone)算法将样品按照约 3:1 的比例划分为校正集和预测集,用于后续建模。表 1 为掺杂不同质量浓度的三聚氰胺的奶粉样品的建模集和预测集真实值分布情况。

2.2 光谱采集

本实验采用 Advantest(爱德万)公司生产的 TAS7500SU 太赫兹时域光谱仪进行检测,频谱测量范围设置为 0.01~5.0 THz,分辨率设置为 7.6 GHz,每点扫描 8096 次,获取平均光谱。将配制好的样品利用 TAS7500SU 太赫兹系统进行检

表1 掺杂不同质量浓度的三聚氰胺的奶粉样品的建模集和预测集真实值分布

Table 1 True value distribution of modeling and prediction datasets of melamine doped milk powder with different mass concentrations

| Dataset | Number of samples | Mass concentration / % | | | |
|------------|-------------------|------------------------|---------|-------|--------------------|
| | | Minimum | Maximum | Mean | Standard deviation |
| Total | 176 | 0.043 | 19.988 | 9.317 | 6.261 |
| Modeling | 132 | 0.043 | 19.988 | 9.397 | 6.311 |
| Prediction | 44 | 0.043 | 19.988 | 9.069 | 6.169 |

测,为减小样品配制过程、压片等对实验结果的影响,针对每个奶粉样品采集5条太赫兹光谱,并求出平均太赫兹光谱用于建立定量检测奶粉中三聚氰胺质量浓度的模型。

2.3 参数提取方法

采集太赫兹光谱时,通过背景测量和样品测量得到了时域参考谱和样品 THz 光谱。通过快速傅里叶变换(FFT)得到对应频域下的背景和样品的太赫兹光谱,分别表示为 $E_r(\omega)$ 和 $E_s(\omega)$,利用(1)式计算样品的 THz 吸光度谱^[14],并利用太赫兹吸光度 $A(\omega)$ 进行后续建模。 $A(\omega)$ 可表示为

$$A(\omega) = -\lg \left| \frac{E_s(\omega)}{E_r(\omega)} \right|^2. \quad (1)$$

2.4 算法原理

BPNN^[11]是一种多层的前馈神经网络,该网络的主要特点是信号向方传递、误差反向传播。在信号向前传递中,信息逐层传输,从输入层到达隐含层直至输出层,每一层的神经元只影响下一层神经元的状态,若输出层得不到预期输出,则转入反向传播,根据预测误差调整网络权值和阈值,从而使得预测的结果不断地逼近期望输出值。图1为BPNN的拓扑结构图。GRNN^[12-13]具有非常好的非线性映射能力、柔性网络结构以及较好的容错性和鲁棒性,即使在样本数据较少时也能取得较好的预测效果。GRNN具有输入层、模式层、求和层和输出层,其结构如图2所示。图中 S_{NT} 为模式层中第 i 个神经元与求和层中第 T 个分子求和神经元之间的连接权值。

输入层神经元的数目等于学习样本中输入向量的维数,模式层神经元数目等于学习样本的数目,各神经元对应不同样本:

$$P_i = \exp[-\|(x, x_i)\|^2 / (2\sigma^2)], \quad (2)$$

式中: P_i 为第 i 个神经元的输出; x 为网络输入; x_i 为第 i 个神经元对应的学习样本; σ^2 为高斯函数的宽度系数,通常用来模拟非线性光谱和样品的化学和物理性质之间的关系。在求和层中, S_D 为所有模

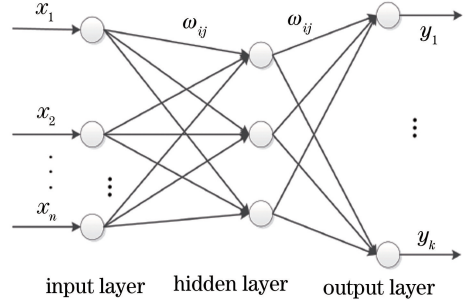


图1 BPNN的拓扑结构

Fig. 1 Topology structure of BPNN

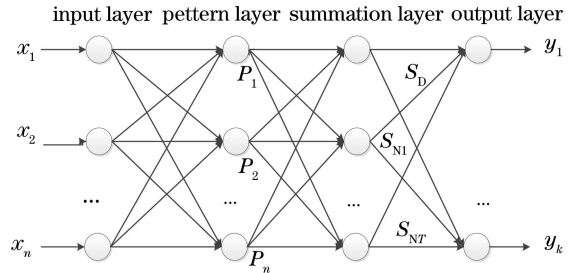


图2 GRNN结构图

Fig. 2 Architecture of GRNN

式神经元输出的算术和:

$$S_D = \sum_{i=1}^n P_i, \quad (3)$$

式中: n 为学习样本中输入向量的维数。输出层中的神经元的数目等于学习样本中输出向量的维数,各神经元将求和层的输出相除,神经元 j 的输出为

$$y_j = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_{ij} P_i}{S_D}, \quad (4)$$

式中: ω_{ij} 为模式层第 i 个神经元与求和层第 j 个神经元之间的权值。

一个较好的模型应该获得较高的相关系数 R 、较低的预测均方根误差(RMSEP)和检测限(LOD)值。为了提高 THz 谱的精度,需要对其进行进一步的研究。根据基于 THz 吸光度参数建立的真值与预测值拟合曲线的斜率和预测误差方差进行求解,计算出置信区间为 99.86% 的检测限(LOD)^[15]:

$$L_{OD} = \frac{3\sigma}{m}, \quad (5)$$

式中: σ 是预测浓度的标准误差; m 是拟合曲线的斜率。模型中RMSEP与 σ 值相等。

2.5 模型评价标准

本文先对采集的奶粉样品太赫兹光谱进行预处理,并通过偏最小二乘(PLS)模型对其预处理方法进行评价,选择最优的预处理方法。对经预处理之后的奶粉太赫兹光谱进行后续处理,分别建立BPNN和GRNN检测模型。通过比较建模集与预测集的相关系数(r_c 、 r_p)、RMSEC、RMSEP来评价模型。模型相关系数越高, RMSEP 越小,则模型的精度越高,且RMSEC与RMSEP越接近,模型稳健性越好。

3 实验结果与分析

3.1 纯奶粉和违禁添加剂样品的太赫兹光谱响应特性

太赫兹光谱包含了丰富的信息,如吸光度、吸收系数、消光系数、折射率等。图3为奶粉中不同质量浓度的三聚氰胺样品的太赫兹吸光度对比图,考虑到前端和后端存在较多的噪声干扰,为便于后期数据处理,截取1.0~3.0 THz频段的太赫兹光谱。纯品奶粉在1.43 THz的位置有一个较为明显的峰值,该峰值可能是由于奶粉内部组份的影响产生,随着太赫兹频率的增加,掺杂奶粉样品吸光度曲线缓慢上升。纯品三聚氰胺在2.03、2.26、2.64 THz位置有较强的吸收峰,并且随着三聚氰胺质量浓度的增大,吸收峰的强度逐渐增大,其原因可能是奶粉中

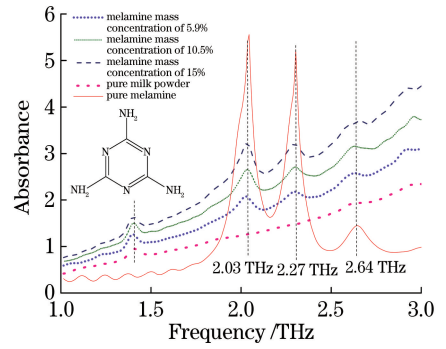


图3 奶粉中不同质量浓度三聚氰胺样品的太赫兹吸光度
Fig. 3 Terahertz absorbance of melamine adulterated milk powder samples with different mass concentrations

三聚氰胺的质量浓度增加,使得样品对太赫兹波谱的吸收更为强烈。

Baek等^[16]利用太赫兹光谱检测到食物中三聚氰胺在2.03、2.26、2.64 THz处存在较强的吸收峰,该论文数据与本文的实验结果的偏差也在频谱分辨精度以内。2.03 THz处的吸收峰是由三聚氰胺层内分子间的氢键交替伸缩所致,2.64 THz处的吸收峰是三聚氰胺层间分子的大 π 键堆积作用所致,2.26 THz处的吸收峰是由两种分子间的共同作用所致^[17]。图4为奶粉和三聚氰胺折射率光谱对比图以及混合样品折射率光谱对比图。其中图4(a)为纯样品太赫兹的折射率对比图,纯奶粉的折射率谱接近一条直线,纯三聚氰胺的折射率谱在2.26 THz位置处有转折点。图4(b)为掺杂不同质量浓度的三聚氰胺的奶粉样品的太赫兹折射率曲线图,折射率曲线在2.03 THz和2.26 THz的位置处波动,随着三聚氰胺质量浓度的增大,折射率整体增加。

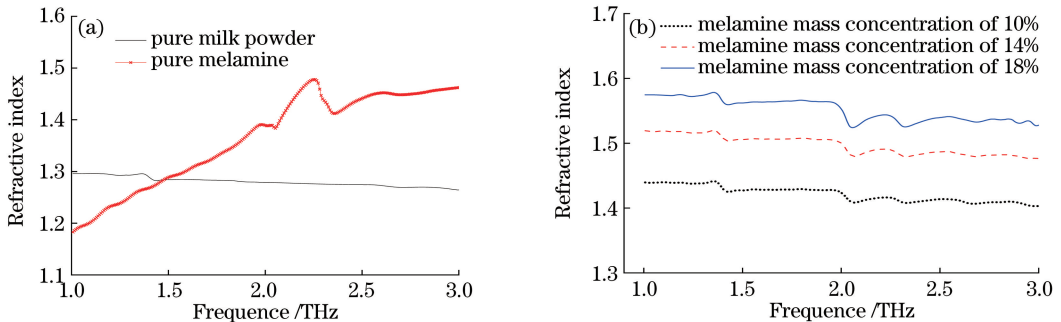


图4 纯奶粉和纯三聚氰胺的折射率光谱对比,以及混合样品的折射率光谱对比。(a)纯奶粉和纯三聚氰胺的折射率光谱对比;(b)混合样品的折射率光谱对比

Fig. 4 Refractive index spectra of pure milk powder and pure melamine, and refractive index spectra of mixed samples.

(a) Refractive index spectra of pure milk powder and pure melamine; (b) refractive index spectra of mixed samples

3.2 掺杂三聚氰胺的奶粉样品 THz 光谱的校正处理

通过适当的预处理减小实验过程中仪器振动、温度变化以及噪声等微小误差,以获得更好的建模效果。本文主要采用平滑(Savitzky-Golay)、多元散射校正(MSC)、基线校正(baseline correction)、归一化(normalization)以及多元散射校正与归一化相结合等方法进行校正处理。

对采集的太赫兹光谱信息进行校正处理之后,分别建立偏最小二乘模型,并对预处理效果进行评价。对掺杂三聚氰胺的奶粉的太赫兹吸光度进行不同预处理后建立 PLS 模型,参与建模的太赫兹光谱数据有 176 个,分别为校正集数据 132

表 2 对掺杂三聚氰胺的奶粉的太赫兹吸光度进行校正处理的结果

Table 2 Results of correction processing for THz absorbance of melamine doped milk powder

| Model | Preprocessing method | PC | Calibration | | Prediction | |
|-------|----------------------|----|-------------|--------|------------|--------|
| | | | r_c | RMSEC | r_p | RMSEP |
| PLS | None | 7 | 0.9881 | 0.0098 | 0.9752 | 0.0127 |
| | Savitzky-Golay | 7 | 0.9889 | 0.0095 | 0.9762 | 0.0124 |
| | MSC | 2 | 0.9901 | 0.0089 | 0.9814 | 0.0112 |
| | Baseline correction | 4 | 0.9797 | 0.0128 | 0.9593 | 0.0165 |
| | Normalization | 3 | 0.9897 | 0.0091 | 0.9813 | 0.0112 |
| | MSC+Normalization | 3 | 0.9912 | 0.0085 | 0.9842 | 0.0103 |

3.3 掺杂三聚氰胺奶粉样品的 THz 光谱模型的建立及预测

3.3.1 掺杂三聚氰胺奶粉样品的 THz 光谱主成分分析

主成分分析(PCA)^[18]是一种有效的降维方法,可以将原有变量进行转换,使得少数几个新的变量是原变量的线性组合,以尽可能地表达原变量数据特征而不丢失原有信息。PCA 把数据变换到一个新的坐标系中,使得任何数据投影的最大方差在第一坐标(第一主成分 P_1)上,第二大方差在第二坐标(第二主成分 P_2)上,按照类似的方法依次进行。转换后的新变量互相正交,消除了众多共存信息中相互重叠的部分和变量之间可能存在的多重共线性。

THz 谱包含在 1.0~3.0 THz 范围内的 263 个谱变量,有些变量可能包含不相关的回归信息。因此,采用 PCA 法对变量数据进行压缩。将原始数据导入到化学计量学软件 Unscrambler 中进行 PCA,主成分被压缩后,前 10 个主成分得分总和达到 99%以上,因此选择前面的 10 个主成分进行后续的数据处理,这 10 个变量之间彼此互不相关,将 263 维的变量投影成为 10 维的变量,但是尽可能地反映原来 263 个光谱变量所代表的信息。

个和预测集数据 44 个。通过比较建模集与预测集的相关系数(r_c 、 r_p)、RMSEC、RMSEP 来评价以上预处理的效果。表 2 为掺杂三聚氰胺奶粉的太赫兹吸光度经不同预处理后的 PLS 模型,可以看出多元散射校正和归一化相结合的预处理效果最好,此时 PLS 模型的建模集 r_c 为 0.9912,建模集 RMSEC 为 0.0085,预测集 r_p 为 0.9842,预测集 RMSEP 为 0.0103,其原因可能是:多元散射校正可以消除样品颗粒不均匀及颗粒大小对散射的影响,归一化则可以校正由微小光程差异引起的光谱变化,从而使得多元散射校正和归一化的结合可以达到最佳的预处理效果。表 2 中 PC 为主成分因子数。

3.3.2 掺杂三聚氰胺奶粉样品的 THz 光谱 BPNN 模型的建立

BPNN 具有三层神经元(输入层、隐含层和输出层),输入层和隐含层中的每个节点都连接到下一层中的每个节点,并使用与之相关的权重因子^[11]。在训练过程中,利用反向传播算法对这些权值进行修正。隐含层和输出层的传递函数分别为 Tansig 函数和 Purelin 函数,训练函数和性能参数分别为 Trainlm 和均方误差(MSE),训练次数为 200, MSE 为 0.001 是训练目标,学习速率为 0.1。设置 PCA 评分输入向量数为 1~10,隐含层层数为 1~10,进行循环测试,输入向量和隐含层的个数的优化结果如图 5 所示,结果显示:当采用 7 个 PCA 评分输入向量和 3 个隐含层时, RMSEP 最小, RMSEP 的值为 0.0060,得到了最佳的 BPNN 模型,最佳 BPNN 模型的 r_p 为 0.9951。

3.3.3 掺杂三聚氰胺奶粉样品的 THz 光谱 GRNN 模型的建立及预测

GRNN^[10-11]是由函数 newgrnn 在 Matlab 中生成的一种高度并行的径向基网络模型。径向基函数(RBF)的输入向量个数和扩展值(SPREAD)是影响 GRNN 模型性能的两个重要指标。选取不同主成

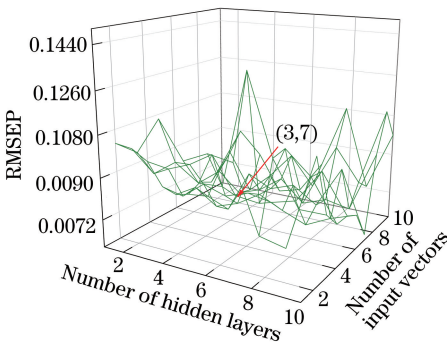


图5 BPNN中输入向量个数和隐含层数的优化结果
Fig. 5 Optimized results of number of input vectors and number of hidden layers for BPNN

分个数作为GRNN模型的输入向量数,考察不同输入维度的影响。图6为不同输入向量数下的GRNN模型预测精度比较。将前2,3,4,⋯,10个主成分分别作为输入,得到在主成分输入数为6时,GRNN模型的预测效果最好,此时模型的相关系数(r_p)为0.9967, RMSEP为0.0050。GRNN在逼近能力、学习速度方面具有较大的优势。GRNN模型中SPREAD越小,网络越逼近最小值;SPREAD越大,网络对样本的逼近过程就越平滑,但误差也会相应地增加。本文采用交叉验证方法训练GRNN,并通过循环寻找最佳的SPREAD,从而达到最好的预测效果。设置SPREAD的范围为0.01~1,间距设为0.01。图7为主成分因子数为6时不同扩展值的GRNN模型的预测精度比较,以6个PCA得分为输入向量,扩展值为0.21,得到最佳的GRNN模型。

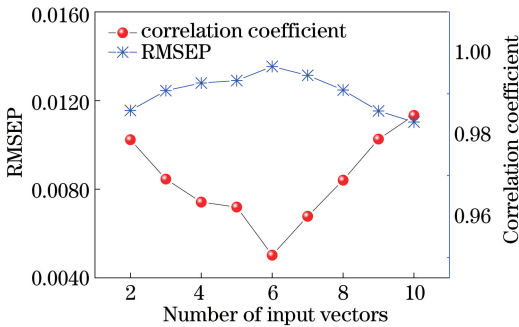


图6 不同输入向量数下的GRNN模型预测精度比较
Fig. 6 Predicted accuracy comparison of GRNN model with different numbers of input vectors

3.3.4 掺杂三聚氰胺奶粉样品的THz光谱在GRNN和BPNN模型下的对比

图8为混合样品的三聚氰胺质量浓度预测值与真值的拟合图。利用预测集中的44个样本对最佳

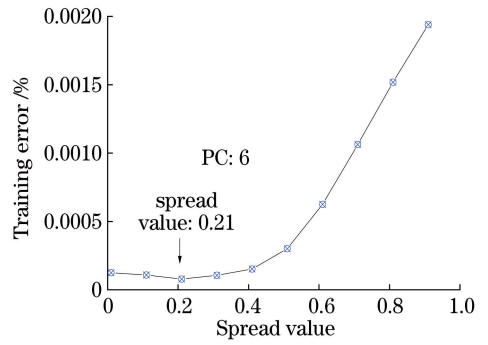


图7 不同扩展值下的GRNN模型预测精度比较
Fig. 7 Predicted accuracy comparison of GRNN model with different spread values

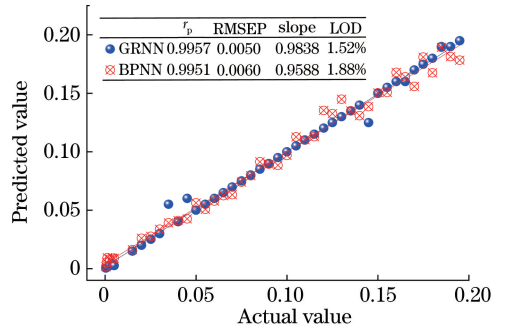


图8 BPNN和GRNN模型对三聚氰胺质量浓度的预测值
Fig. 8 Predicted results of BPNN and GRNN models for mass concentration of melamine

的GRNN和BPNN模型的实际预测能力进行评估。可以看出,GRNN模型的预测精度最高,预测相关系数 r_p 为0.9967, RMSEP为0.0050。

4 结 论

利用太赫兹光谱技术检测奶粉中的违禁添加剂三聚氰胺,利用太赫兹吸光度参数进行建模,经多元散射校正结合归一化校正处理的效果最好,建立的PLS模型的预测集 r_p 为0.9842, RMSEP为0.0103。主成分分析方法可以很好地降低太赫兹光谱数据的维数。对GRNN和BPNN模型进行对比,发现GRNN模型对奶粉中违禁添加剂三聚氰胺的检测效果更优。为了提高GRNN模型的预测能力,优化了RBF的输入向量个数和扩展值,可以发现:在以6个PCA得分为输入向量、扩展值为0.21时,得到最佳的GRNN模型,预测相关系数 r_p 为0.9967, RMSEP为0.0050。本实验验证了太赫兹光谱技术结合GRNN模型对掺杂三聚氰胺奶粉具有较好的检测效果,可以避免采用传统耗时、昂贵和费力的化学分析手段对奶粉进行检测。

参 考 文 献

- [1] Bilge G, Sezer B, Eseller K E, et al. Determination of whey adulteration in milk powder by using laser induced breakdown spectroscopy [J]. Food Chemistry, 2016, 212: 183-188.
- [2] Wang C, Li X, Peng T, et al. Latex bead and colloidal gold applied in a multiplex immunochromatographic assay for high-throughput detection of three classes of antibiotic residues in milk [J]. Food Control, 2017, 77: 1-7.
- [3] Li B, Du X Y, Liu Y D, et al. Detection research of seed potato starch in kudzu using terahertz time-domain spectroscopy [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(20): 203001.
李斌, 杜秀洋, 刘燕德, 等. 太赫兹时域光谱葛粉掺薯粉检测研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(20): 203001.
- [4] Guan A H, Li Z, Ge H Y. The qualitative and quantitative detection of potassium alum in sweet potato starch based on terahertz time-domain spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(1): 267-270.
管爱红, 李智, 葛宏义. 红薯淀粉中添加剂明矾的定性和定量太赫兹时域光谱技术检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(1): 267-270.
- [5] Xia Y, Du Y, Zhang H L, et al. The qualitative and quantitative detection of sodium formaldehyde sulfoxylate content in brightener by using THz-TDS technology[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(2): 103-106.
夏焱, 杜勇, 张慧丽, 等. 增白剂中吊白块含量的太赫兹光谱定性定量检测[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(2): 103-106.
- [6] Li B, Wang N, Zhang W L, et al. Preliminary research on insect damage detection in pecans using terahertz spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(5): 1196-1200.
李斌, WANG Ning, 张伟立, 等. 基于太赫兹光谱技术的山核桃内部虫害检测初步研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(5): 1196-1200.
- [7] Ge H Y, Jiang Y Y, Lian F Y, et al. Quantitative determination of aflatoxin B1 concentration in acetonitrile by chemometric methods using terahertz spectroscopy[J]. Food Chemistry, 2016, 209: 286-292.
- [8] Huang M, Kim M S, Delwiche S R, et al. Quantitative analysis of melamine in milk powders using near-infrared hyperspectral imaging and band ratio[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 181: 10-19.
- [9] Li J R, Li J S, Zhao X L. Study on rapid detection of melamine compositions by terahertz time-domain spectroscopy[J]. Journal of China Jiliang University, 2009, 20(2): 131-134.
李建蕊, 李九生, 赵晓丽. 太赫兹时域谱技术快速定性检测奶粉中的三聚氰胺[J]. 中国计量学院学报, 2009, 20(2): 131-134.
- [10] Li C. Research on detection technology of melamine in milk powder based on terahertz time-domain spectroscopy[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
黎重. 基于太赫兹时域光谱的奶粉中三聚氰胺的检测技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [11] Premalatha N, Valan Arasu A. Prediction of solar radiation for solar systems by using ANN models with different back propagation algorithms [J]. Journal of Applied Research and Technology, 2016, 14(3): 206-214.
- [12] Zhao H, Hou Q X, Hong Y M, et al. Determination of calcium carbonate and styrene-butadiene latex content in the coating layer of coated paper [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2014, 20(4): 1571-1576.
- [13] Lotfinejad M M, Hafezi R, Khanali M, et al. A comparative assessment of predicting daily solar radiation using bat neural network (BNN), generalized regression neural network (GRNN), and neuro-fuzzy (NF) system: a case study [J]. Energies, 2018, 11(5): 1188.
- [14] Chen T, Li Z, Yin X H, et al. Discrimination of genetically modified sugar beets based on terahertz spectroscopy [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2016, 153: 586-590.
- [15] Liu B, Zhou P, Liu X M, et al. Detection of pesticides in fruits by surface-enhanced Raman spectroscopy coupled with gold nanostructures [J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(3): 710-718.
- [16] Baek S H, Lim H B, Chun H S. Detection of melamine in foods using terahertz time-domain spectroscopy[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(24): 5403-5407.
- [17] Li M. Study on quality factors and improvement for terahertz time-domain spectroscopy [D]. Tianjin:

- Tianjin University, 2011.
- 李萌. 太赫兹时域光谱品质影响因素及改进研究 [D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [18] Hu J, Liu Y D, Ouyang A G, et al. Mid-infrared spectroscopy detection of methanol content in methanol gasoline based on CARS band screening[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(23): 233002.
- 胡军, 刘燕德, 欧阳爱国, 等. 基于 CARS 波段筛选的甲醇汽油中甲醇含量中红外光谱检测 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(23): 233002.