

doi: 10.12301/spxb202200816

文章编号:2095-6002(2023)06-0161-10

引用格式:刘翠玲, 闻世震, 孙晓荣, 等. 基于云计算的食品品质实时在线光谱检测系统实现[J]. 食品科学技术学报, 2023, 41(6):161-170.



LIU Cuiling, WEN Shizhen, SUN Xiaorong, et al. Real-time online spectral detection system for food quality based on cloud computing[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 41(6):161-170.

# 基于云计算的食品品质实时在线光谱检测系统实现

刘翠玲, 闻世震, 孙晓荣\*, 张善哲, 姜传智, 殷莺倩

(北京工商大学人工智能学院/食品安全大数据技术北京市重点实验室, 北京 100048)

**摘要:**为解决光谱检测技术中的模型维护成本高、扩展性不足和光谱资源共享性较差等问题,改善专用便携式光谱仪检测分析对象的局限性,将光谱数据采集和分析功能进行解耦,使用 Android 开发工具和 Java 语言,开发了以便携式光谱仪、手机终端和云服务器构成的光谱实时在线检测系统,基于云计算服务完成云端光谱模型的建立与分析。以小麦粉面筋定量分析为例,采用多元散射校正、竞争性自适应重加权采样法、偏最小二乘回归算法建立小麦粉面筋定量分析模型,测试 25 个小麦粉样本并返回分析结果,验证系统可靠性。结果表明,25 个小麦粉样本面筋含量误差范围在 0~0.7%,分析结果消耗时间平均为 7.09 s,误差范围和分析结果耗时均在可接受范围内,验证了基于云计算服务实现光谱实时在线检测分析是可行的。通过部署不同食品主要成分的定量分析模型至云端,系统可实现多种食品品质的实时在线检测分析,希望为多场景下食品品质快速无损检测提供技术参考。

**关键词:**食品品质;云计算;便携式;实时在线;小麦粉;面筋

**中图分类号:**TS207.3; TS211.7; TP319

**文献标志码:**A

目前,近红外光谱技术已广泛应用于食品、药品、农产品等领域的无损检测中。微型便携式近红外光谱仪因体积小、价格低等优点,逐渐在食品安全领域中得到普及和应用<sup>[1-3]</sup>。随着便携式光谱仪集成化程度的提高,该类产品的数据采集、处理和结果显示一键式操作等系统功能。虽然该类产品对特定物质有较高精度的采集和分析能力,但是现有产品存在设备成本高、模型可扩展性较差和适用场景单一的问题,不适用于多目标场景的食品品质实时在线检测和分析。

近年来,云计算及其服务在诸多领域得到了广泛应用<sup>[4-6]</sup>,尤其是云服务器使用成本降低,提高了各领域基于云计算服务的开发效率。云计算融合了

分布式计算、网格计算、虚拟化、网络存储等计算机网络技术的特点<sup>[7]</sup>,在移动计算方面有着显著优势。基于云计算的便捷、可扩展、廉价等优势,结合光谱分析技术,通过部署食品光谱模型到云计算中心,实现模型资源云端共享;同时云计算中心高性能服务器高效率的计算能力,为食品品质实时在线检测分析提供了服务支撑。

国内外基于近红外光谱技术的食品品质检测相关研究较多<sup>[8-10]</sup>,针对云计算与光谱检测技术的结合在国内外也有研究。李庆等<sup>[11]</sup>利用云端互联便携式近红外技术结合化学计量学方法对名贵药材西红花与其常见伪品和掺伪品进行了现场快速真伪鉴别及掺伪量的定量预测。王林惠等<sup>[12]</sup>设计了一套

收稿日期:2022-08-23

基金项目:北京市自然科学基金项目(4222043)。

Foundation: Natural Science Foundation of Beijing (4222043).

第一作者:刘翠玲,女,教授,博士,主要从事智能建模控制分析和食品安全检测等方面的研究。

\*通信作者:孙晓荣,女,教授,主要从事智能测量技术与数据处理、系统建模与仿真方法等方面的研究。

基于深度卷积神经网络的柑橘虫害实时检测系统,实现了柑橘虫害的快速准确识别。Muller-Maatsch等<sup>[13]</sup>提出了对每种食品或目标化合物,使用机器学习和深度学习策略的数据融合方法,对光谱数据进行云端分析。目前,云计算在光谱检测技术的应用研究主要是使用云端系统对单一对象检测分析,提高了检测分析的便捷性,但缺乏对云端光谱分析系统的设计结构和实现过程的整体描述,对于系统的模型扩展性和光谱资源共享功能关注较少。

基于云计算技术和光谱分析技术的优势,以食品品质多场景实时在线检测为目的,本研究拟构建以云计算服务为中心的光谱实时在线检测系统。以小麦面粉筋为例,建立定量分析模型并部署到云端,以手机终端作为数据传输媒介,完成光谱数据采集

上传和分析结果可视化,验证系统的可靠性。希望提供一种云端部署模型实现光谱实时在线分析方案,为多场景下食品品质快速无损检测提供平台和技术支撑。

## 1 光谱实时在线检测系统功能设计

### 1.1 系统架构

光谱实时在线检测系统是以模型复用和光谱数据共享为最终目的的开放式服务平台。通过系统中已经建立的模型,对实时采集的光谱数据进行快速分析,为现场无损快速检测提供有力支持。系统整体架构自下而上分别为设备层、客户端层和云服务层。系统架构如图1。

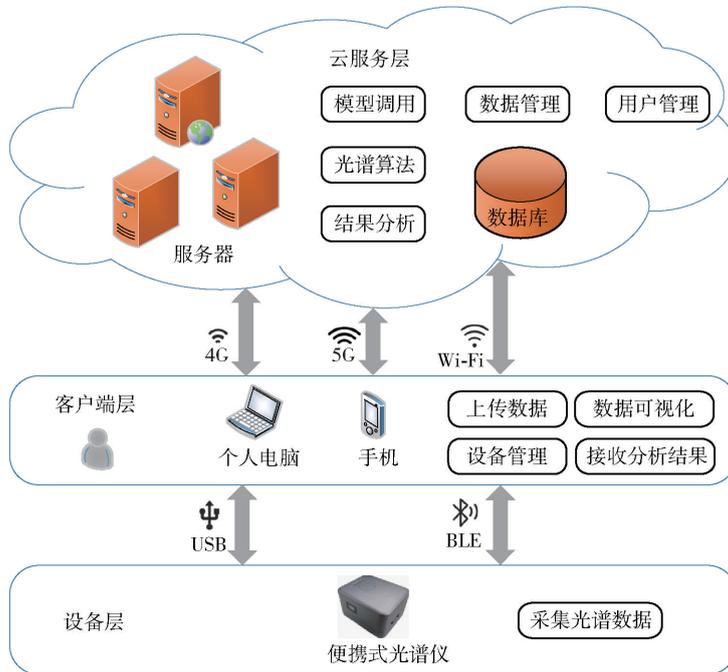


图1 光谱实时在线检测系统架构

Fig. 1 Architecture of spectral real-time online detection system

在设备层中,便携式光谱仪负责采集光谱数据,使用通用串行总线(universal serial bus, USB)或者低功耗蓝牙(blueetooth low energy, BLE)方式与客户端通信,由客户端进行管理控制。在客户端层中,移动设备作为数据传输媒介,通过无线网络与云服务器进行通信,实现光谱数据上传和接收光谱数据云端计算结果,而且还可完成本地光谱数据可视化和控制便携式光谱仪设备的功能。在云服务层,硬件系统由云服务器厂商提供,根据系统所需的运算能力和数据存储空间大小,从云服务器厂商获取云服

务器作为该系统的基础开发环境,利用模块化开发思想,将光谱算法和建模算法设计为应用编程接口(application programming interface, API),在主程序中组合调用即可完成光谱分析;同时云服务层还包含了数据存储和用户管理,云端部署的模型和参与云计算的光谱数据存放于云服务器的数据库中,根据用户注册身份给予对应的使用权限,管理员可对模型和光谱数据进行增删改查,普通用户可以查询、上传光谱数据和使用模型,光谱模型由管理员负责进行维护更新,保证了系统稳定性。

## 1.2 系统功能

现有的近红外光谱分析软件大多数是基于离线数据进行分析研究,较少有在线光谱获取和离线光谱分析的结合,进而难以实现实时在线分析,在一定程度上制约了现场快速检测的信息化发展。为了更加符合便携式光谱仪实际检测场景的需求,在现有便携式近红外光谱技术的基础上,增

加云服务器作为光谱数据分析系统载体,在云端实现光谱数据分析并返回分析结果。通过将分析功能封装并部署至云端,用户只需在手机终端控制便携式光谱仪采集数据并上传数据至云服务器进行分析处理,即可得到数据可视化的分析结果。系统的主要功能如图2。

光谱实时在线检测系统主要功能包括用户基本

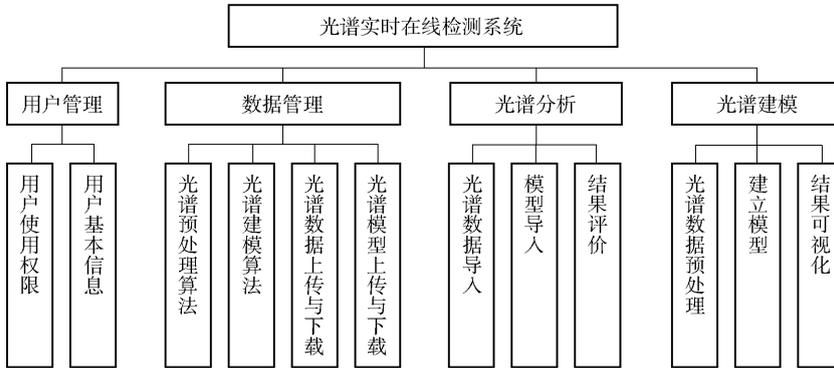


图2 光谱实时在线检测系统功能结构

Fig. 2 Functional structure of spectral real-time online detection system

信息和权限管理;常用的光谱预处理算法管理,如多元散射校正(multiplicative scatter correction, MSC)、标准正态变量变换(standard normal variable transformation, SNV)、Savitzky-Golay 卷积平滑(Savitzky-Golay smooth, S-G)等<sup>[14]</sup>;常用的建模算法管理,如主成分回归(principle component regression, PCR)、偏最小二乘回归(partial least squares regression, PLSR)、人工神经网络(artificial neural network, ANN)等<sup>[15]</sup>;光谱数据和光谱模型的上传与下载;光谱数据和模型导入,返回结果评价;光谱数据预处理、建立模型、结果可视化。

## 2 光谱实时在线检测系统实现

### 2.1 系统服务端开发

光谱实时在线检测系统的服务端由前端和后端两部分组成。前端系统主要用于用户与服务端交互,简化数据管理和使用。后端系统是光谱实时在线检测系统的核心,用于处理移动端和系统前端发来的请求。前端系统采用HTML、CSS和JavaScript编程语言编写管理界面,使用Vue前端框架实现系统的前后端分离。后端系统开发语言采用Java 8,使用Spring开发框架实现控制反转(inversion of control, IoC)和面向切面编程(aspect oriented pro-

gramming, AOP)技术,采用SpringMVC开发模式简化开发流程,降低系统的耦合性,便于对系统的功能扩展;使用Java的持久层框架MyBatis简化对输入输出数据的处理;使用Maven项目构建工具自动管理项目依赖包;服务器数据存储使用MySQL 5.7, Web容器采用Tomcat 8.0。光谱实时在线检测系统界面如图3。

系统主要有原始数据管理、数据分析管理和基础信息管理。原始数据管理模块用于存储实验样本的光谱数据,数据由管理员审核上传,普通用户只可查看和使用。数据分析管理模块负责对光谱数据进行处理,用户可在该模块界面选择需要进行分析的光谱数据、预处理方法和建模算法,在线分析光谱数据并给出可视化的分析结果。基础信息管理模块包括了用户权限、个人信息和上传的文件,由管理员负责更新和维护。

### 2.2 系统移动端开发

移动端系统基于第三方软件开发工具,在Android平台上开发手机终端应用程序。在Android Studio 4.2软件环境中开发光谱仪通信和网络数据传输服务代码,主要完成控制光谱仪数据采集、设置光谱仪采集参数、光谱仪数据的本地存储、光谱仪采集数据网络传输和解析光谱仪分析系统返回结果。该移动端系统的软件功能流程如图4。

序号	名称	开始时间	结束时间	状态	实验员	创建时间	操作
1	食用油-近红外	2023-05-22	2023-05-28	实验中		2023-05-22 14:28:49	查看 修改 结束实验
2	古船117份面粉—拉曼—2017.1.30	2023-04-05	2023-04-05	实验结束		2023-05-15 15:23:27	查看
3	古船117份面粉—拉曼—2017.1.30	2023-01-28	2023-01-31	实验结束		2023-04-10 15:10:56	查看
4	古船117份面粉—中红外—2017.1.30	2023-01-28	2023-01-31	实验中		2023-04-10 15:10:02	查看 修改 结束实验
5	古船117份面粉—近红外—2017.1.30	2023-01-28	2023-01-31	实验中		2023-04-10 15:09:13	查看 修改 结束实验
6	蜂王浆中红外光谱第一次实验	2023-04-14	2023-04-14	实验中		2023-03-12 22:22:27	查看 修改 结束实验

图3 光谱实时在线检测系统界面

Fig. 3 Interface of spectral real-time online detection system

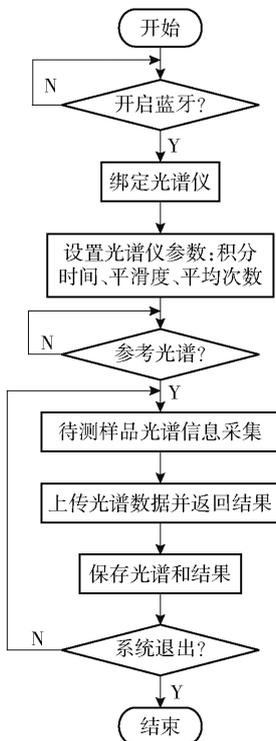


图4 移动端软件功能流程

Fig. 4 Flow chart of mobile terminal software function

移动端使用 JavaScript 对象表示法 (javascript object notation, JSON) 格式作为数据格式, 相比较传统的可扩展标记语言 (extensible markup language, XML) 数据格式, JSON 数据格式能直接与服务器端进行交互, 压缩数据大小, 降低网络的占用带宽。同时移动端采用异步通信模式, 降低应用程序的耦合性, 提升应用程序与服务器端的通信效率。

## 2.3 系统云计算服务实现

### 2.3.1 开发环境

系统的开发环境: Windows10 21H1, 内存 16GB, 处理器为 AMD Ryzen 7 5800H、阿里云云服务器 ECS(1 核 CPU, 2 GB 内存, 1M bps 带宽, 40 GB 存储空间), 服务器操作系统 CentOS 7.5。

### 2.3.2 实现方式

云计算服务主要在系统服务端实现, 包含控制模块、服务模块和数据通信模块, 系统云计算服务实现方式如图 5。控制模块用于处理用户按照超文本传输协议 (hypertext transfer protocol, HTTP) 发送的请求参数, 根据请求参数的内容, 将光谱数据传递给服务模块中对应的数据处理方法。服务模块是云计算服务的核心, 其包含不同种类物质定量分析的业务逻辑代码, 根据模型的多项表达式运算规则, 提取光谱数据中对应波长点的吸光度数据进行计算, 实现物质的定量分析, 同时将分析结果数据传递给数据通信模块。数据通信模块用于系统访问光谱模型资源, 建立与数据库的通信和打包数据功能, 通过将光谱数据的分析结果打包成 JSON 格式, 发送至手

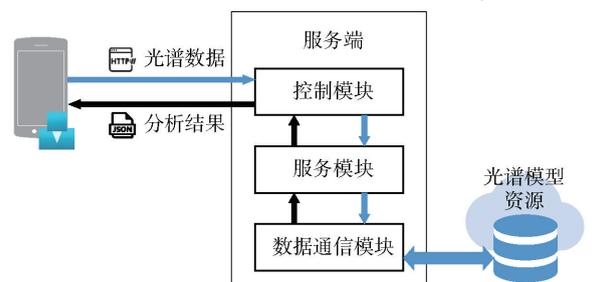


图5 系统云计算服务实现方式

Fig. 5 Implementation of system cloud computing services

机应用程序进行数据解析并可视化,实现系统的云计算服务。

### 2.3.3 云服务部署

云服务部署流程如图6,在获取阿里云ECS服务器后,登录阿里云服务器控制面板,使用ECS服务器账号配置并激活服务器;搭建JDK1.8+Tomcat+MySQL5.7环境,为后续Web项目的运行提供基础条件;使用FinalShell软件在本地建立与云服务器的SSH远程连接,然后使用FTP协议将本地的光谱实时在线检测系统的服务端项目打包上传至云服务器;通过云服务器控制面板配置服务器安全组规则,选择项目所需服务器开放的端口号;最后使用Linux命令运行项目文件,完成系统云服务的部署。

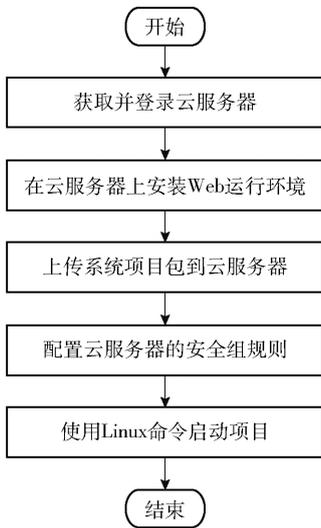


图6 云服务部署流程

Fig. 6 Flow chart of cloud service deployment

在部署过程中,项目未租用场地放置实体服务器,通过云服务厂商提供的控制面板有助于项目的快速部署,体现了云计算的存储计算资源虚拟化和成本低的特点。另外,云服务器作为云计算服务载体,以付费形式获得额外计算资源,做到了按需付费,为项目后续扩展提供了便利。

## 3 光谱分析与系统验证

### 3.1 材料与仪器

实验所用的小麦粉样本均来自北京古船面粉厂不同批次的面粉产品,共计125个。对每个小麦粉样本,按照GB/T 5506.2—2008《小麦和小麦粉 面筋含量 第2部分:仪器法测定湿面筋》,使用面筋仪测得小麦粉面团洗涤后的湿面筋含量;按照GB/T

5506.3—2008《小麦和小麦粉 面筋含量 第3部分:烘箱干燥法测定干面筋》,使用烘箱和干燥器对湿面筋进行干燥,得到小麦粉样本的干面筋含量。本研究中小麦粉样本的面筋含量以干面筋含量为标准,其数值由北京古船面粉厂按照国标方法测定提供。

NIR-M-R2型便携式近红外光谱仪,深圳谱研互联有限公司。

### 3.2 光谱数据采集

在室内自然状态下使用便携式近红外光谱仪采集小麦粉光谱数据。光谱仪参数设置为:光谱采集波长为900~1700 nm,积分时间100 ms,扫描次数6次,平滑宽度2.34 nm,曝光时间0.635 ms。采集光谱数据前,使用白板对光谱仪进行校正。采集时,室内温度31℃,湿度29%,将采集探头与透明袋装小麦粉样本的平整面接触,每个小麦粉样本采集一次。实验一共采集125组包含228个波长点的小麦粉样本吸光度数据,原始光谱数据如图7。由图7可见,在波长为1120、1300、1680 nm处有较为明显的吸收峰,其中1120 nm吸收峰对应C—H键的3倍频吸收带,1300 nm的吸收峰对应水分中的O—H吸收带,1680 nm的吸收峰对应蛋白质结构中的N—H吸收带。由于采集光谱数据的环境、样本表面差异等因素影响,光谱重叠现象较为明显,影响预测模型的准确性。

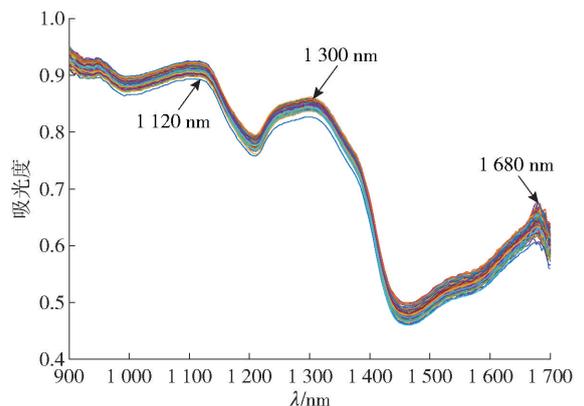


图7 小麦粉样本原始近红外光谱

Fig. 7 Raw NIR spectrum of a wheat flour sample

### 3.3 定量分析模型建立

#### 3.3.1 模型评价指标的确定

光谱分析模型的评价指标有:均方根误差(root mean square error, RMSE)、相关系数(correlation coefficient,  $R^2$ )以及相对分析误差(relative percent de-

viation, RPD)<sup>[16]</sup>。RMSE 越小模型效果越好; $R^2$  越接近于1,预测结果越好;RPD 大于2 表明模型具有良好的预测能力。

### 3.3.2 样本集划分

样本集中会存在差异性较小的样本,包含这些样本建立的校正模型不利于模型的扩展和维护。Kennard-Stone (K-S)算法<sup>[17]</sup>基于变量之间的欧氏距离,选择距离大的样本为校正集,剩余样本作为预测集,保证了校正集中的样本按照空间距离分布均匀。对采集得到的125 个小麦粉样本,按照4:1 比例划分校正集和预测集,划分出100 个校正集样本和25 个预测集样本。校正集和预测集的面筋含量统计结果如表1,校正集的最大值和最小值分别为36.2%、25.7%,预测集的最大值和最小值分别为31.8%、27.3%,校正集和预测集的平均值相差0.2%,表明样本集经K-S 算法划分后的数据分布合理,有助于提高模型的稳定性。

表1 校正集和预测集面筋含量统计结果

Tab.1 Gluten content statistics for calibration and prediction sets

样本集	数量	最大值/%	最小值/%	平均值/%
校正集	100	36.2	25.7	29.9
预测集	25	31.8	27.3	29.7

### 3.3.3 光谱预处理

为了减少近红外光因小麦粉样本散射水平不同带来的光谱差异,需要对原始光谱进行光谱预处理。采用多种预处理方法进行PLSR 建模,结果如表2。由表2 可知,使用MSC 预处理方法建立的模型效果较好,预测集的 $R^2$  达到了0.826 4, RMSE 达到了0.463 2, RPD 达到了2.162 1。MSC 通过把所有光谱数据的平均值作为理想光谱,修正光谱数据的基线平移和偏移现象,可以有效消除由于散射水平不同带来的光谱差异,从而增强光谱与数据之间的相关

表2 不同预处理方法下PLSR 模型的预测集结果

Tab.2 Results of prediction set of PLSR model under different preprocessing methods

预处理方法	RMSE	$R^2$	RPD
未处理	0.641 5	0.762 4	1.836 7
MSC	0.463 2	0.826 4	2.162 1
SNV	0.517 3	0.824 7	2.150 2
S-G	0.483 7	0.825 0	2.157 3

性<sup>[18]</sup>。经MSC 预处理后的光谱如图8,光谱重叠现象大幅减少,1 120、1 300、1 680 nm 处的波峰更为明显,有利于提高模型的准确性。

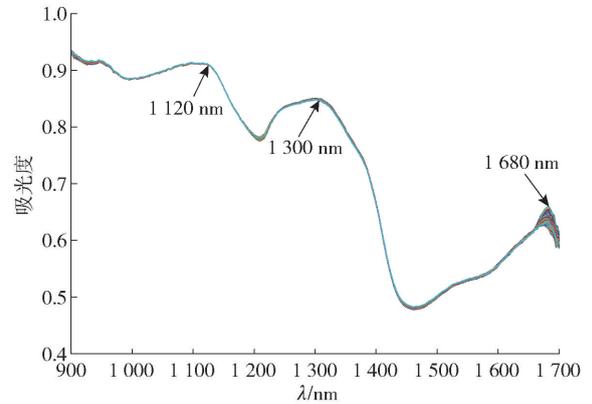


图8 小麦粉样本经MSC 预处理后的光谱

Fig.8 Spectra of wheat flour samples pretreated by MSC

### 3.3.4 波长筛选

在建立近红外分析模型时,光谱仪器噪声或外界环境因素变化使某些波段下的样本光谱信噪比较低,影响模型稳定性。利用波长筛选选择光谱数据的最优波长进行建模,可提高模型的预测能力和稳定性。使用多种特征波长筛选算法建立PLSR 模型,结果如表3。使用竞争性自适应重加权采样法<sup>[19]</sup> (competitive adaptive reweighted sampling, CARS)所建立PLSR 模型预测集的 $R^2$ 、RMSE 和 RPD 都优于无信息变量消除算法 (uninformative variables elimination, UVE)、连续投影算法 (successive projections algorithm, SPA) 建立的PLSR 模型。CARS 算法选取小麦粉面筋的特征波长如图9。由图9 可知,当交叉验证均方根误差 (root mean square error of cross validation, RMSECV) 逐渐减小时,表明光谱无用信息被剔除;当RMSECV 逐渐增大时,表明光谱中的有用信息被剔除。因此取50 次采样所建立的PLSR 模型中对应的最小RESECV 作为最优

表3 不同特征波长筛选算法PLSR 模型的预测集结果

Tab.3 Results of prediction set of PLSR model under different characteristic wavelength screening algorithms

预处理方法	特征波长数/个	RMSE	$R^2$	RPD
未处理	228	0.463 2	0.826 4	2.162 1
UVE	102	0.351 2	0.850 2	2.611 7
SPA	31	0.187 1	0.865 1	2.833 2
CARS	28	0.182 4	0.870 4	2.835 1

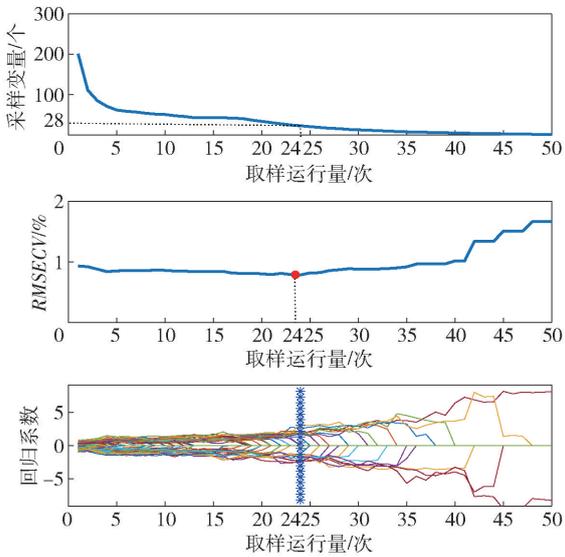
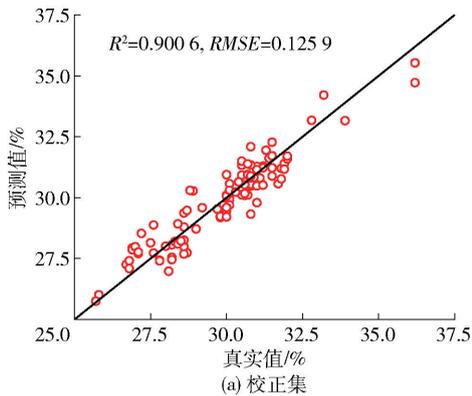
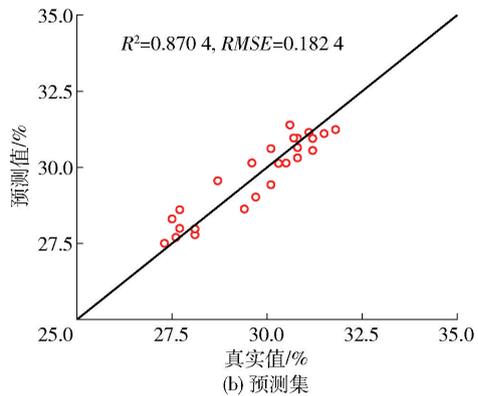


图9 基于CARS算法的小麦粉面筋特征波长选取结果

Fig.9 Selection results of characteristic wavelengths of gluten in wheat flour based on CARS algorithm



(a) 校正集



(b) 预测集

图10 小麦粉校正集和预测集面筋含量预测结果

Fig.10 Prediction results of gluten content of wheat flour gluten training set and test set

靠性,从北京古船面粉厂不同批次的面粉产品中随机选取与样本集无关的25个小麦粉测试样本,测试样本的面筋含量按照GB/T 5506.2—2008、GB/T 5506.3—2008进行测定,数值由北京古船面粉厂测定提供。

使用便携式光谱仪手机终端,设置光谱仪参数(采集波长为900~1700 nm,积分时间为100 ms,扫描次数为6次,平滑宽度为2.34 nm,曝光时间为0.635 ms),对测试样本进行光谱扫描,上传测得的光谱数据至云端处理,返回小麦粉面筋预测值和处理用时。系统对单个小麦粉样本的光谱数据分析结果如图11。

在相同网络环境下,使用光谱实时在线检测系统对25个小麦粉测试样本进行检测分析,系统测得

结果,在取样运行次数达到24次时,RMSECV最小。经过CARS算法进行特征波长提取,共选出28个最优波长。

### 3.3.5 模型建立

对于便携式近红外光谱仪所测得的小麦粉面筋光谱数据,使用MSC + CARS + PLSR算法建立定量分析模型。校正集的 $R^2$ 为0.9006,校正集的RMSE为0.1259,预测集的 $R^2$ 为0.8704,预测集的RMSE为0.1824,相对分析误差RPD为2.8351,说明模型对面筋含量有良好的预测能力。校正集和预测集的面筋含量真实值与预测值对比结果如图10。

### 3.4 系统测试

将基于MSC + CARS + PLSR算法建立的包含28个波长的小麦粉面筋定量分析模型以表达式形式写入服务端程序中,并重新打包上传至服务器完成模型部署。为了验证光谱实时在线检测系统的可

的25个小麦粉测试样本结果如图12。25个小麦粉样本的面筋含量预测值与真实值差值范围为0~0.7%,单个样本检测分析平均耗时7.09 s。结果表明,光谱实时在线检测系统预测分析小麦粉面筋含量较为准确且用时较少,验证了系统通过建立分析模型并部署模型至云端,完成实时在线分析是可行的。

## 4 结论

结合云计算技术和光谱分析技术,设计并实现了一个多场景食品品质光谱实时在线检测系统。该系统所使用的便携式光谱仪只需光谱数据采集模块,与集成化程度更高的专用光谱仪相比,能做到体



图 11 手机终端面筋含量分析结果

Fig. 11 Analysis results of gluten content in mobile phone terminals

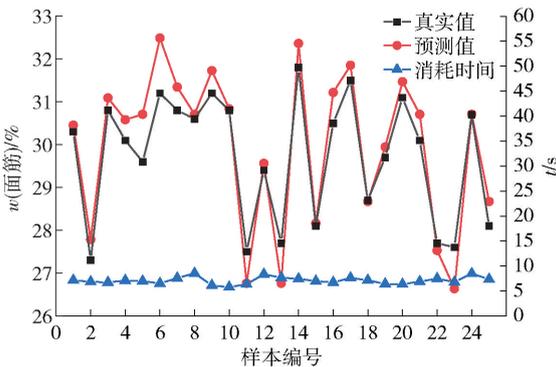


图 12 25 个小麦粉样本的面筋分析结果

Fig. 12 Gluten analysis results for 25 wheat flour samples

积更小,设备成本更低。使用手机终端将光谱数据上传云端并进行分析处理,不但提高了光谱检测的便捷性,同时还可将分析结果可视化。

1) 在云服务器中实现光谱数据分析和模型部署,通过在云端部署不同的分析模型,解决了模型扩展性较差的问题。

2) 光谱实时在线检测系统利用云计算高扩展性、使用便捷等优势,弥补了光谱分析扩展性、便捷性上的不足,保证了云端进行光谱分析的可靠性,同时使用云服务器搭建系统环境,降低了光谱模型资源的共享成本。

以小麦粉面筋定量分析验证系统的可靠性,结果表明,系统具有良好的准确性和较快的分析速度,能够满足光谱的实时在线检测分析。希望该系统可

为模型资源共享和光谱实时在线检测分析提供一种解决方案,同时为多场景食品品质的快速无损检测提供新的思路。系统分析结果与云端部署模型精度具有较高相关性,本研究所使用的模型准确率还有提升空间,因此后续的模型应持续优化,可采用增加样本量、使用人工神经网络建模等方法提高模型精度。

#### 参考文献:

- [1] 高升,王巧华,施行,等. 便携式红提葡萄多品质可见/近红外检测仪设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2):308-319.  
GAO S, WANG Q H, SHI X, et al. Design and experiment of portable red grape multi-quality visible/near-infrared detector[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2021, 52(2):308-319.
- [2] 刘亚超,李永玉,彭彦昆,等. 便携式大米多品质参数无损检测仪设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8):351-357.  
LIU Y C, LI Y Y, PENG Y K, et al. Design and experiment of portable rice multi-quality parameter non-destructive testing instrument[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2019, 50(8):351-357.
- [3] 王凡,赵春江,徐波,等. 便携式茶鲜叶品质光谱检测装置研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(24):273-280.  
WANG F, ZHAO C J, XU B, et al. Development of portable spectral detection device for fresh tea leaves quality[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2020, 36(24):273-280.
- [4] 周墨颂,董小社,陈衡,等. 一种云环境中的动态细粒度资源调度方法[J]. 软件学报, 2020, 31(12):3981-3999.  
ZHOU M S, DONG X S, CHEN H, et al. A dynamic fine-grained resource scheduling method in cloud environment[J]. Journal of Software, 2020, 31(12):3981-3999.
- [5] 周业茂,李忠金,葛季栋,等. 移动云计算中基于延时传输的多目标工作流调度[J]. 软件学报, 2018, 29(11):3306-3325.  
ZHOU Y M, LI Z J, GE J D, et al. Multi-objective workflow scheduling based on delayed transmission in mobile cloud computing[J]. Journal of Software, 2018, 29(11):3306-3325.
- [6] 周静,董守斌,唐德玉. 基于入侵肿瘤生长优化的云计算调度算法[J]. 计算机学报, 2018, 41(6):

- 1140 - 1155.
- ZHOU J, DONG S B, TANG D Y. Cloud computing scheduling algorithm based on invasive tumor growth optimization [J]. *Journal of Computers*, 2018, 41 (6): 1140 - 1155.
- [7] 崔勇, 宋健, 缪葱葱, 等. 移动云计算研究进展与趋势 [J]. *计算机学报*, 2017, 40(2): 273 - 295.
- CUI Y, SONG J, MIAO C C, et al. Research progress and trend of mobile cloud computing [J]. *Journal of Computer Science*, 2017, 40(2): 273 - 295.
- [8] 潘嘹, 董迪, 卢立新. 基于漫反射可见光谱无损检测生鲜牛肉和猪肉肌红蛋白 [J]. *食品科学技术学报*, 2020, 38(6): 103 - 110.
- PAN L, DONG D, LU L X. Non-destructive detection of fresh beef and pork myoglobin based on diffuse reflectance visible spectroscopy [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2020, 38(6): 103 - 110.
- [9] 孙潇鹏, 刘灿灿, 陆华忠, 等. 基于近红外透射光谱与机器视觉的蜜柚汁胞粒化分级检测 [J]. *食品科学技术学报*, 2021, 39(1): 37 - 45.
- SUN X P, LIU C C, LU H Z, et al. Grading detection of pomelo juice cell granulation based on near-infrared transmission spectroscopy and machine vision [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2021, 39(1): 37 - 45.
- [10] BORBA K R, AYKAS D P, MILANI M I, et al. Portable near infrared spectroscopy as a tool for fresh tomato quality control analysis in the field [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(7): 3209.
- [11] 李庆, 闫晓剑, 赵魁, 等. 基于云端-互联便携式近红外技术现场快检西红花真伪 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(10): 3029 - 3037.
- LI Q, YAN X J, ZHAO K, et al. On-site rapid detection of saffron authenticity based on cloud-interconnected portable near-infrared technology [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(10): 3029 - 3037.
- [12] 王林惠, 兰玉彬, 刘志壮, 等. 便携式柑橘虫害实时检测系统的研制与试验 [J]. *农业工程学报*, 2021, 37(9): 282 - 288.
- WANG L H, LAN Y B, LIU Z Z, et al. Development and experiment of a portable citrus pest real-time detection system [J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2021, 37(9): 282 - 288.
- [13] MULLER-MAATSCH J, BERTANI F R, MENCATTINI A, et al. The spectral treasure house of miniaturized instruments for food safety, quality and authenticity applications: a perspective [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 110: 841 - 848.
- [14] 褚小立, 陈瀑, 李敬岩, 等. 近红外光谱分析技术的最新进展与展望 [J]. *分析测试学报*, 2020, 39(10): 1181 - 1188.
- CHU X L, CHEN P, LI J Y, et al. The latest progress and prospect of near-infrared spectroscopy analysis technology [J]. *Journal of Analysis and Testing*, 2020, 39(10): 1181 - 1188.
- [15] 史云颖, 李敬岩, 褚小立. 多元校正模型传递方法的进展与应用 [J]. *分析化学*, 2019, 47(4): 479 - 487.
- SHI Y Y, LI J Y, CHU X L. The progress and application of multivariate calibration model transfer method [J]. *Analytical Chemistry*, 2019, 47(4): 479 - 487.
- [16] 高升, 王巧华. 基于可见/近红外透射光谱技术的红提糖度和含水率无损检测 [J]. *中国光学*, 2021, 14(3): 566 - 577.
- GAO S, WANG Q H. Non-destructive detection of sugar content and water content in red grapes based on visible/near-infrared transmission spectroscopy [J]. *China Optics*, 2021, 14(3): 566 - 577.
- [17] 卢洁, 田婧, 梁振华, 等. 近红外光谱法快速测定香菇总糖含量 [J]. *食品科学*, 2021, 42(12): 189 - 194.
- LU J, TIAN J, LIANG Z H, et al. Rapid determination of total sugar content in lentinus edodes by near infrared spectroscopy [J]. *Food Science*, 2021, 42(12): 189 - 194.
- [18] SILALAH D D, MIDI H, ARASAN J, et al. Robust generalized multiplicative scatter correction algorithm on pretreatment of near infrared spectral data [J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2018, 97: 55 - 65.
- [19] SONG X, DU G, LI Q, et al. Rapid spectral analysis of agro-products using an optimal strategy: dynamic backward interval PLS-competitive adaptive reweighted sampling [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2020, 412: 2795 - 2804.

# Real-Time Online Spectral Detection System for Food Quality Based on Cloud Computing

LIU Cuiling, WEN Shizhen, SUN Xiaorong\*, ZHANG Shanzhe, JIANG Chuanzhi, YIN Yingqian  
(*School of Artificial Intelligence/Beijing Key Laboratory of Big Data Technology for Food Safety,  
Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China*)

**Abstract:** In order to solve the problems of high cost of model maintenance, insufficient model scalability and poor sharing of spectral resources in spectral detection technology, and to improve the limitations of detection and analysis objects of dedicated portable spectrometers, a real-time online spectral detection system consisting of portable spectrometers, mobile terminals and cloud servers was developed using Android development tools and Java language by decoupling the spectral data collection and analysis functions. Based on cloud computing services, the establishment and analysis of cloud spectral models were completed. Taking the quantitative analysis of wheat flour gluten as an example, the quantitative analysis model of wheat flour gluten was established by using multiple scattering correction, competitive adaptive reweighted sampling method, and partial least squares regression algorithm. 25 wheat flour samples were tested and the analysis results were returned to verify the reliability of the system. The results showed that the error range of the gluten content of 25 wheat flour samples was 0–0.7%, and the average analysis time was 7.09 s. The error range of gluten content and the time consumption of analysis results were both within the acceptable range, which verified that it was feasible to realize real-time online detection and analysis of spectra based on cloud computing services. By deploying quantitative analysis models of the main components of different foods to the cloud, the system could realize real-time online detection and analysis of various food qualities, hoping to provide technical support for rapid and non-destructive testing of food quality in multiple scenarios.

**Keywords:** food quality; cloud computing; portable; real-time online; wheat flour; gluten

(责任编辑:叶红波)