

便携式火腿腐败变质实时预警系统研究

彭彦昆^{1,2} 赵仁宏^{1,2} 邹文龙^{1,2} 赵鑫龙^{1,2} 郭庆辉^{1,2} 庄齐斌^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 国家农产品加工技术装备研发分中心, 北京 100083)

摘要: 针对火腿、香肠等肉制品在生产、运输和销售过程中容易出现品质腐败以及货架期缩短的问题, 基于近红外光谱技术对火腿的品质腐败参数进行研究, 研发了一种具有自建模功能的便携式火腿品质腐败检测装置, 并基于物联网技术开发了火腿货架期预警系统。基于研发的检测装置, 采集了 74 块火腿样品的可见/近红外光谱, 在经过不同的预处理后, 分别建立了火腿颜色 (L^* 、 a^* 、 b^*)、pH 值、挥发性盐基氮含量和菌落总数 (TVC) 的偏最小二乘 (PLS) 预测模型。在此基础上, 利用竞争性自适应加权算法筛选特征变量, 建立简化的 PLS 模型, 各参数的预测模型相关系数分别为 0.931 7、0.936 9、0.957 8、0.955 4、0.928 5、0.986 2, 均方根误差分别为 0.353 0、0.252 9、0.096 1、0.035 4、0.372 4 mg/(100 g)、0.439 8 lgCFU/g。结果表明, 该装置可以用于火腿品质腐败参数的检测。同时研究了火腿储藏期间 TVC 生长规律, 使用 Modified Gompertz 方程对 TVC 的生长曲线进行拟合, 建立了 TVC 的生长动力学模型, 通过 TVC 的光谱预测模型和生长动力学模型建立了货架期的预测模型。选用阿里云服务器和 MySQL 数据库作为服务端的开发工具, 基于 TCP/IP 网络通信协议, 将装置的检测数据实时传输到服务器端, 进而保存到数据库中。最后将货架期的数据反馈至客户端, 通过对货架期的监控实现火腿腐败变质的实时预警。经过实验测试表明, 该系统可以用于火腿货架期的实时预警。

关键词: 火腿; 腐败预警; 便携式装备; 近红外光谱

中图分类号: S237

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2022)10-0396-09

OSID:



Portable Real-time Warning System for Ham Corruption Deterioration

PENG Yankun^{1,2} ZHAO Renhong^{1,2} ZOU Wenlong^{1,2} ZHAO Xinlong^{1,2} GOU Qinghui^{1,2} ZHUANG Qibin^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. National R&D Center for Agro-processing Equipment, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the problems that ham, sausage and other meat products are prone to quality spoilage and shortened shelf life in the process of production, transportation and sales, the quality spoilage parameters of ham were studied based on near-infrared spectroscopy, a ham quality and corruption portable detection device was developed with automatic modeling function, and a ham shelf-life early warning system was designed based on the Internet of Things technology. Based on the developed detection device, the visible/near-infrared spectra of 74 ham samples were collected. After different pretreatments, the ham color (L^* , a^* , b^*), pH value, and volatile base were established respectively. Partial least squares (PLS) prediction model for nitrogen (total volatile basic nitrogen, TVB-N) and total colony (total viable count, TVC). On this basis, a competitive adaptive weighted sampling (CARS) algorithm was used to screen feature variables, and a simplified PLS model was established. The root mean square errors were 0.353 0, 0.252 9, 0.096 1, 0.035 4, 0.372 4 mg/(100 g), and 0.439 8 lgCFU/g, respectively. The results showed that the device can be used for the detection of ham quality spoilage parameters. At the same time, the TVC growth law during ham storage was studied, the TVC growth curve was fitted by the modified Gompertz equation, and the TVC growth kinetic model was established. The shelf life was established by the TVC spectrum prediction model and growth kinetic model prediction model. Alibaba cloud server and MySQL database were selected as server-side development tools, and based on the TCP/IP network communication protocol, the detection data of the device was transmitted to the server-side in real time, and then saved in the database. Finally, the data

收稿日期: 2022-06-11 修回日期: 2022-08-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32172287)

作者简介: 彭彦昆(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事农产品无损检测技术与装备研究,E-mail: ypeng@cau.edu.cn

of shelf life was fed back to the client, and real-time early warning of ham spoilage can be realized by monitoring the shelf life. The experimental test showed that the system can be used for real-time early warning of ham shelf life.

Key words: ham; corruption warning; portable equipment; near-infrared spectroscopy

0 引言

我国是世界上产肉量最大的国家^[1]。随着经济水平的提高,肉制品逐渐成为市场中的热销食品^[2-4]。火腿作为一种常见的肉制品,深受广大消费者的喜爱。然而这种肉制品却属于易腐食品,品质容易受到很多因素的影响,尤其是受到腐败菌的污染导致腐败变质^[5-8],因此肉制品的新鲜度和货架期监控是把控肉制品质量安全的首要问题^[9]。目前市场上在火腿腐败变质检测方面同样存在很多弊端^[10-11],在检测过程上存在着操作复杂、检测速度慢、样品前处理繁琐、费时费力、无法进行现场即时检测导致数据分析滞后的问题,在检测设备上存在着低成本和高检测精度难以兼顾的矛盾,以及对检测后的数据无法系统化管理等问题,难以满足火腿生产、加工、销售等环节的品质监控需求。因此,为了解决这些问题,需要研发出多参数同时检测的小型便携设备,能够应用于火腿产业链上各环节的品质检测与监控,实现火腿的货架期预警。

可见/近红外光谱检测技术具有检测速度快、检测效率高、样品无需破坏以及无需前处理等优点,在肉制品品质检测方面具有良好的应用前景^[12-16]。

随着光学仪器和化学计量学方法的不断创新和改进,光谱检测技术得到了很快的发展,国内外很多学者或公司也将这一技术应用到实际生活中,研发出各种检测设备^[17-19]。然而这些研究对检测后的数据没有系统化的管理,缺少后续的数据挖掘分析,不能实现数据共享,没有对样品是否腐败以及剩余货架期进行预警。物联网技术是通过各种信息传感设备,将人工智能和通信技术融为一体,能够实现物与物之间的信息交换、智能化识别、监控和管理的一种网络技术^[20-21],近年来在精准农业、农产品检测方面有广泛应用。可以将物联网技术应用于火腿腐败变质参数检测,综合利用光谱技术和物联网技术的优点,在实现检测的基础上完成对火腿腐败变质的实时监控。

本文在前期的研究基础上,以光谱技术为核心,开发多功能一体化的检测软件,研制便携式火腿腐败变质预警装置,建立颜色(L^* 、 a^* 、 b^*)、pH 值、挥发性盐基氮(Total volatile basic nitrogen, TVB-N)含

量和菌落总数(Total viable count, TVC)的预测模型,并基于物联网技术搭建火腿货架期预警系统,实现对火腿腐败变质的实时预警监控。

1 检测装置软硬件设计

便携式火腿品质检测装置主要由软件系统和硬件系统两部分组成,硬件系统包括供电单元、光源单元、光谱采集单元、控制单元、散热单元和结构单元,软件系统通过编写的程序实现整个实验过程中的光谱校正、光谱采集、数据保存与传输等功能。

1.1 硬件设计

1.1.1 光谱采集单元设计

光谱采集单元由光谱仪和光纤两部分组成。其中光谱仪用来接收光照射到样品上所产生的信息并将这些信息传输至采集软件中进行后续计算,是整个检测装置中的核心部件,光谱仪的性能直接关系到装置的检测精度,因此对光谱仪的选型十分重要。考虑到检测指标较多,该装置根据光谱仪的光谱响应范围、光谱分辨率以及信噪比等参数选择了海洋光学公司(Ocean Optics)生产的 USB4000 型光纤光谱仪,该光谱仪光谱分辨率高,同时还具有体积小、无需外部能源等优点,适合用来研发便携式设备,光谱仪的具体参数如表 1 所示。

表 1 USB4000 型光谱仪具体参数	
Tab.1 Specific parameter information of USB4000 spectrometer	
参数	数值
尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	89.1×63.3×34.4
质量/g	190
波长范围/nm	350~1100
积分时间/ms	3.8~10000
信噪比	300
动态范围	1300
光栅常数/(g·mm ⁻¹)	600
狭缝宽度/μm	25
光学分辨率/nm	1.5~2.3
杂散光波长/nm	600(≤0.05%),435(≤0.10%)

1.1.2 控制与显示单元设计

为了使处理器能同时具有体积小、运行速度快的特点,选用迷你主机搭配液晶显示屏作为控制显示单元。其中处理器选用 WalkFish 公司的 M1K_J4125 型迷你主机,CPU 为 4 核,运行内存 8 GB,性能上满足要求,同时其尺寸仅有 135 mm×45 mm×

15 mm,质量仅有 85 g,轻简便携。显示屏选用 7 英寸的电容触摸屏,具有超高的分辨率,尺寸为 165 mm×124 mm×10 mm,质量为 380 g。主机中内置了 Windows 10 操作系统,可以直接运行 C++ 程序生成的可执行文件,无需配置环境。

1.1.3 光源单元设计

光源单元采用卤钨灯和环形光导的形式,使光纤能够从样品表面接收到更多的反射光,进而获得更加丰富的光谱信息。通过对卤钨灯光源的工作温度、寿命、光谱响应强度和响应范围等因素的考虑,对比了不同功率的卤钨灯的性能,最终选用了富士 FUJI EFN 12V75W 型卤钨灯。图 1 为光源的白参考测试结果,共采集了 20 条光谱,经测试,光谱的响应范围为 480~950 nm,最大光强达到了 55 000 cd,两者都达到了实验要求。

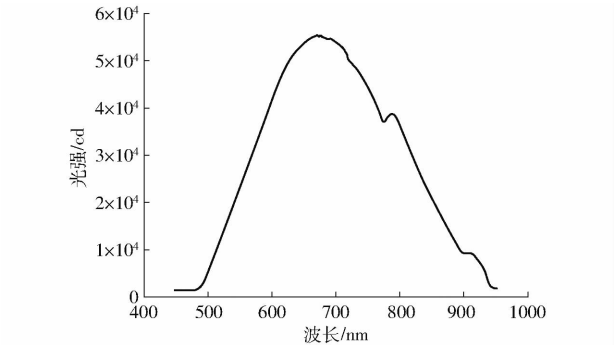


图 1 光源白参考测试结果
Fig. 1 Light source white reference test

1.1.4 装置结构设计

整机的结构设计包括对壳体 and 检测探头两部分的设计。壳体的合理设计不仅可以使内部零件有更合理的布局,减少不必要的空间,缩小设备体积,还可以起到保护支撑的作用。探头的合理设计可以提高检测的准确性,最大程度上提高设备的使用价值。在装置设计过程中首先要考虑提高检测准确性和装置便携性,从壳体的体积、内部零件的布局和探头检测距离方面出发进行设计。加工完成后的装置壳体尺寸为 280 mm×230 mm×120 mm,对内部零件进行了合理布置,并在壳体上增加了很多的通风口,当装置工作时可以增加空气流动,提高了散热能力。同时为使光纤可以接收到更强的反射光,针对探头的检测距离进行探头结构设计,装置的实物图如图 2 所示。

1.2 软件设计

1.2.1 界面设计

以 Visual Studio 2015 为开发平台,MFC 为开发框架,C++ 为开发编程语言,对检测软件进行编写。软件界面共分为 5 大区域,分别为光谱显示区、

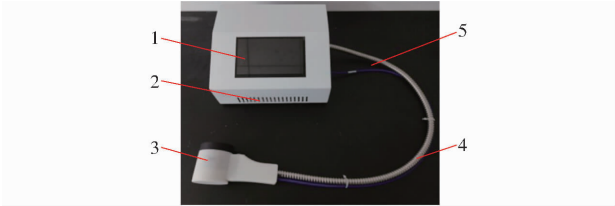


图 2 装置实物图
Fig. 2 Physical map of device

1. 控制显示单元 2. 散热通风口 3. 采集探头 4. 环形光导
5. 光纤

光谱仪参数设置区、控制按键区、参数预测值显示区以及数据传输区,其中参数预测值显示区又根据各参数对应的类别分为品质参数区和安全参数区。对 L^* 、 a^* 、 b^* 、pH 值、TVB-N 含量、TVC 等指标进行了进一步划分,使得界面显示更加直观,同时根据 TVB-N 含量和 TVC 两个指标判断样品的新鲜度、腐败情况以及剩余货架期并显示在界面上。另外,在界面上增加了基于物联网的数据传输区,通过服务器端的 IP 地址和开放的端口号进行连接,然后将检测数据传输到服务器端进行保存。图 3 为设计的软件界面。



图 3 检测软件界面
Fig. 3 Detection software interface

1.2.2 数据传输功能

由于多台设备同时检测时,出现不能协同工作的问题,导致数据分析滞后,因此,在软件中增加了数据传输功能,采用 TCP/IP 网络通信协议作为连接协议,通过 socket 编程对客户端和服务端进行软件开发^[22],图 4 为数据传输功能的开发流程。

1.2.3 自动建模功能

在检测软件中模型计算十分重要,需要将各参数的预测值准确计算出来,所以对前期实验数据建立的数学模型在精度和稳定性上有较高的要求。本文采用 C++ 和 Matlab 联合编程的思想,编写了具有自动建模功能的程序。首先用 Matlab 编写读取光谱数据、光谱预处理以及偏最小二乘(Partial least squares, PLS)回归建模的函数,并将该 Matlab 函数保存为 .M 文件,通过 Matlab 的 mcc 编译器将 .M 文件转换为程序调用时所需的 C++ 文件,然后将这些文件复制到 C++ 程序的项目下,同时对操作系统和程序的项目属性进行配置后即可进行调用,其

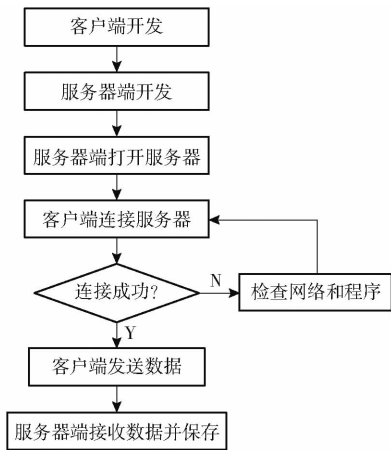


图 4 数据传输开发流程图

Fig. 4 Data transfer development process

流程如图 5 所示。通过 C++ 来调用 Matlab 函数文件来实现光谱预处理和建模^[23],并将建模系数保存在计算机中,图 6 为自动建模功能演示结果。

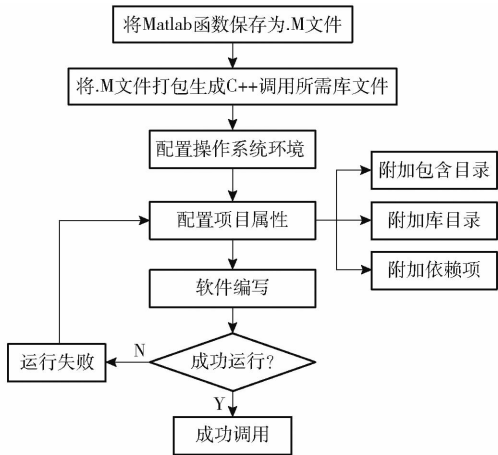


图 5 C++ 调用 Matlab 函数的流程图

Fig. 5 Flowchart of C++ calling Matlab function

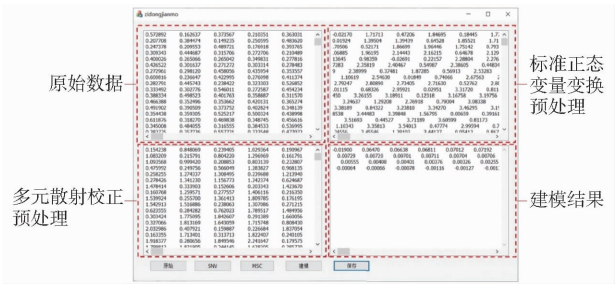


图 6 自动建模演示结果

Fig. 6 Automated modeling demonstration results

2 装置预测模型建立与验证

2.1 预测模型建立

为了实验样品的一致性,选取生产日期相同的火腿,用低温培养箱快速运回实验室。为了保证样品表面平整,用消过毒的手术刀将样品分割为大约 6 cm × 5 cm × 2.5 cm 的块状,将分割好的火腿片装入密封袋中,放入 4℃ 冰箱中冷藏。实验共制备了

74 个有效样品,为了获得不同程度腐败的火腿,每天随机取出 4 个样品进行实验,同时为减小实验误差,保证实验的环境温度、时间间隔尽量一致。利用所设计的装置采集火腿的可见光/近红外光谱数据,在采集光谱过程中尽量减少环境光与外部噪声的影响,确保每次采集光谱时光纤探头与样品表面的距离为 15 mm,从而减少测距对光谱采集的影响。图 7 为采集的光谱曲线,然后按照国家标准方法对颜色、pH 值、TVB-N 含量(质量比)、TVC 等品质安全指标进行理化实验^[24-26]。

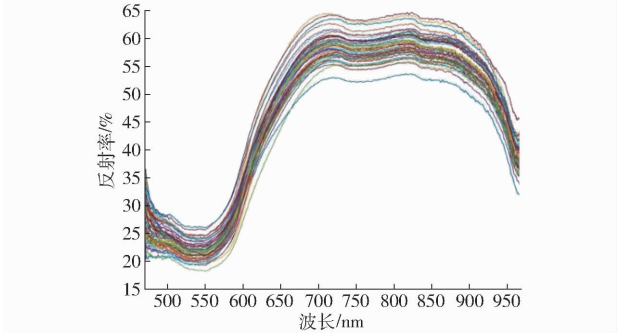


图 7 火腿样品光谱曲线

Fig. 7 Spectral curves of ham sample

对所获取的 74 个样品理化值进行统计分析,统计结果如表 2 所示,为了减小建模运算时间,提高模型精度,应使理化值均匀分布,同时校正集的理化值范围应该涵盖预测集的理化值范围。

表 2 理化数据统计结果

Tab. 2 Research data statistics results

理化指标	最大值	最小值	平均值	标准差
L^*	56.58	52.20	55.10	0.98
a^*	12.85	9.20	11.10	0.71
b^*	7.59	6.14	6.73	0.39
pH 值	6.75	6.13	6.41	0.10
TVB-N 含量/(mg · (100g) ⁻¹)	13.64	8.04	10.67	1.02
TVC/(lgCFU · g ⁻¹)	7.92	1.00	3.88	1.88

完成理化实验后,将光谱数据和理化数据相对应进行数据分析,由于火腿表面不够平滑,存在细小颗粒,导致采集原始光谱时受到光的表面散射和光程变化带来的影响,于是使用 MSC(多元散射校正)和 SNV(标准正态变量变换)两种预处理方式来校正光谱,在一定程度上消除固体颗粒大小、表面散射以及光程变化对光谱信号的影响。同时根据光谱-理化共生距离法(Sample set partitioning based on joint x-y distance, SPXY)来划分样品集,使校正集中样品各指标的理化值分布较大,增大样品间的差异性。通过 SPXY 算法将 74 个火腿样品按照 3:1 的比例进行划分,其中 56 个样品作为校正集用于建立偏最小二乘预测模型,建模结果如表 3 所示。

表 3 PLS 建模结果
Tab.3 PLS modeling results

指标	预处理方法	校正集		预测集	
		R_c	标准偏差	R_p	标准偏差
L^*	MSC	0.942 5	0.564 1	0.862 7	0.584 5
	SNV	0.944 0	0.566 8	0.887 2	0.618 1
a^*	MSC	0.919 7	0.259 1	0.879 5	0.377 9
	SNV	0.919 5	0.259 4	0.878 2	0.379 7
b^*	MSC	0.920 4	0.130 4	0.887 0	0.171 7
	SNV	0.921 8	0.139 3	0.877 3	0.182 1
pH 值	MSC	0.917 8	0.040 1	0.868 5	0.057 2
	SNV	0.919 8	0.039 6	0.864 9	0.057 6
TVB-N 含量	MSC	0.899 3	0.440 7	0.893 8	0.579 3
	SNV	0.899 2	0.441 0	0.895 0	0.480 2
TVC	MSC	0.964 8	0.527 7	0.956 0	0.742 7
	SNV	0.965 0	0.527 8	0.956 2	0.743 2

注:TVB-N 含量、TVC 标准偏差单位分别为 mg/(100 g)、lgCFU/g。

为了简化模型,提高模型精度,使用 CARS(竞争性自适应重加权)算法对光谱筛选特征变量,建立更加稳健的 PLS 模型。该方法是将每个波段看成一个单独的子集,通过指数衰减函数(EDF)和自适应重加权采样法(ARS)选择变量,使用蒙特卡罗采样法选择样品,然后利用交叉验证的方法计算交叉验证均方根误差,选取均方根误差最小的波段子集^[27]。图 8 显示了利用 CARS 算法对指标 L^* 的变量选择过程。由图可见,CARS 算法在筛选变量的过程中,随着采样次数的增加,被选择的变量数逐渐下降,交叉验证均方根误差先降低后逐渐升高。通过该算法对 L^* 、 a^* 、 b^* 、pH 值、TVB-N 含量、TVC 筛选出的变量数分别为 19、24、73、47、73、149。然后

基于筛选的特征变量对各指标建立简化的预测模型,模型的相关系数分别提升到 0.931 7、0.936 9、0.957 8、0.955 4、0.928 5、0.986 2,均方根误差分别下降到 0.353 0、0.252 9、0.096 1、0.035 4、0.372 4 mg/(100g)、0.439 8 lgCFU/g。

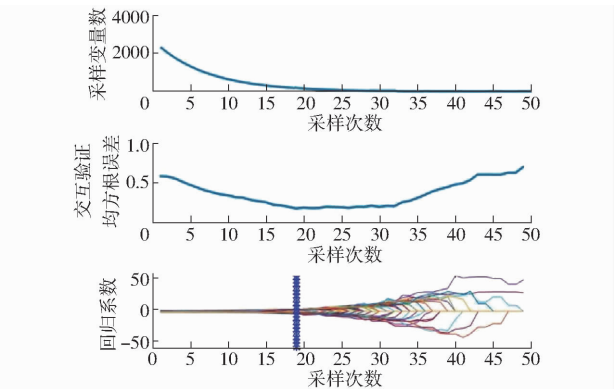


图 8 L^* 指标基于 CARS 算法变量筛选过程

Fig. 8 Process of screening variables using CARS for L^*

2.2 预测模型验证

为了进一步验证所开发的便携式检测装置的检测精度和模型的可靠性,另选取 40 个未参与建模的火腿样品,对所设计的便携式检测装置进行实验验证。实验预测结果散点图如图 9 所示。结果表明,该便携式检测装置在检测精度和稳定性上可以满足实时检测要求,具有较高的应用前景。

3 货架期预警系统开发

货架期是指食品在储藏时间内保持感官品质、营养品质和安全品质的时间长度^[28]。而造成火腿腐败的主要原因是微生物的生长,随着微生物的不

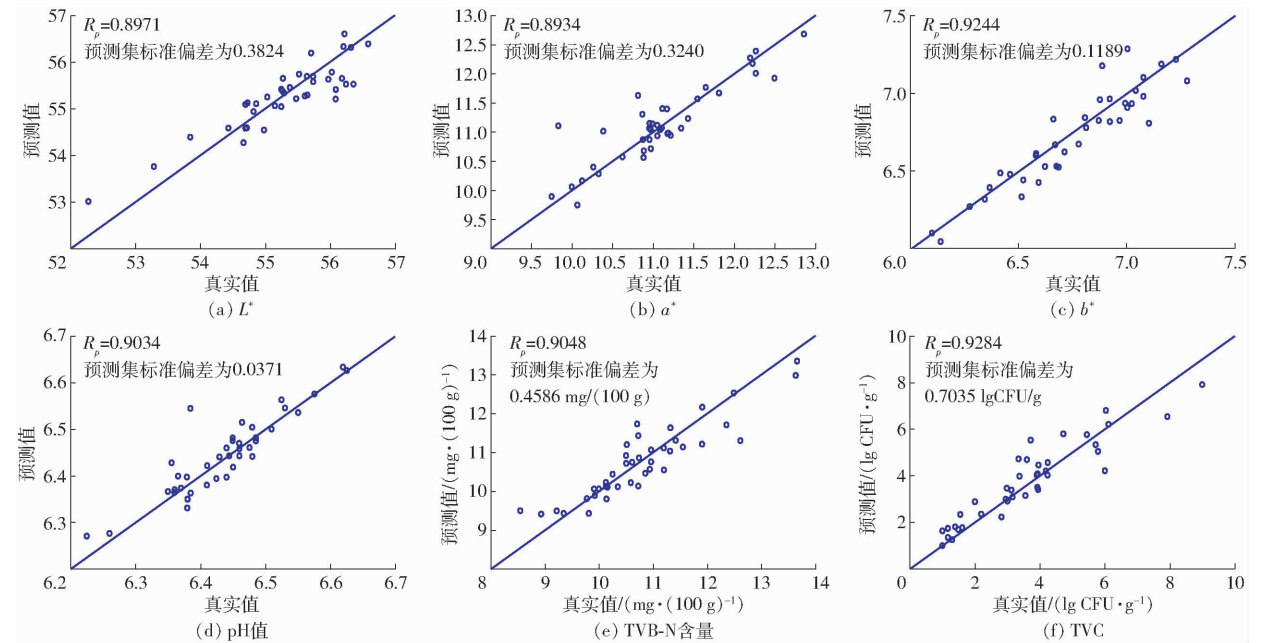


图 9 验证结果散点图

Fig. 9 Validation results scatter plots

断繁殖，其产生的代谢产物使得火腿发生变质^[29-30]。因此，需要了解菌落的生长规律，以此建立火腿的货架期模型，根据预测模型来判断货架期，实现实时预警。

3.1 菌落总数生长动力学模型

菌落在生长初期，由于需要适应环境，加上水分、空气和温度等条件的限制，生长缓慢。随着火腿储藏时间的增长，菌落体积变大，产生大量代谢物，繁殖速度呈对数上升。在菌落生长到一定阶段后，火腿中的营养物质减少，菌落的生存条件变差，此时菌落的生长速度下降，死亡数增加，菌落的繁殖数和死亡数趋于平衡。当火腿中的营养物质被消耗殆尽后，菌落的繁殖速度慢于死亡速度，此时菌落呈现出负增长趋势^[31]。本文根据课题组前期提出的 Modified Gompertz 方程^[32]，拟合菌落的生长曲线，建立火腿菌落总数的生长动力学模型，方程为

$$N(t) = N_0 + C \exp(-\exp(-B(t - M))) \quad (1)$$

式中 $N(t)$ —— t 时刻火腿菌落总数,lgCFU/g
 N_0 —— $t=0$ 时火腿的初始菌落总数,lgCFU/g
 C ——菌落总数最大值与初始菌落数的差值
 B —— $t=M$ 时菌落对应的生长速度
 M ——菌落数达到最大生长速度需要的时间,d

由于实验是每天随机选取 4 块火腿样品，所以将这 4 块样品的 TVC 进行平均作为每天的菌落数，然后根据储藏时间进行拟合，曲线拟合通过 Matlab 完成，如图 10 所示。

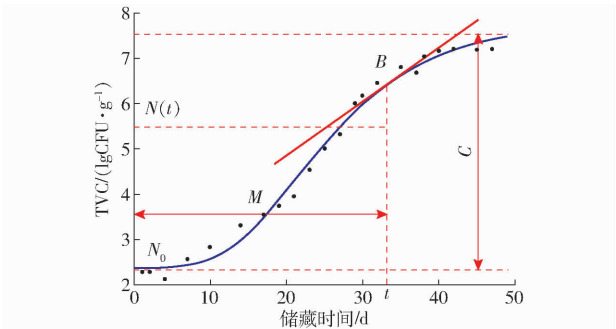


图 10 火腿菌落数生长动力学曲线

从图 10 中可以看出，火腿储藏时间内的菌落总数与 Modified Gompertz 方程拟合结果较好，说明火腿储藏时间内 TVC 的生长符合 Modified Gompertz 方程，拟合的决定系数为 0.973 8，均方根误差为 0.207 1 lgCFU/g。拟合得到的动力学模型为

$$N(t) = 2.389 + 5.392 \exp(-\exp(-0.1046(t - 21.49))) \quad (2)$$

3.2 货架期预测模型建立

由上文研究可知，火腿的 TVC 可以根据光谱法建立的预测模型计算出，所以将 TVC 代入式 (2) 即可预测出火腿的储藏时间 t ，公式为

$$t = 21.49 - \frac{1}{0.1046} \ln \left(-\ln \frac{N(t) - 2.389}{5.392} \right) \quad (3)$$

根据 GB 2726—2016《食品安全国家标准 熟肉制品》中的规定可知，当火腿的 TVC 超过 5 lgCFU/g 时，被认定为不可食用，故 TVC 为 5 lgCFU/g 时对应的 t 为最长储藏时间。将 $N(t) = 5 \lg \text{CUF/g}$ 代入到式 (3) 中得 $t = 24.56 \text{ d}$ ，即当火腿储藏 24 d 后 TVC 超出安全值，达到腐败状态，所以将 24 d 作为火腿的最长储藏时间，记为 t' 。火腿的 TVC、储藏时间 t 分别可以由 2.1 节的 TVC 预测模型和式 (3) 预测出，最长储藏时间已知，故货架期计算公式为

$$T = t' - t = 2.51 + \frac{1}{0.1046} \ln \left(-\ln \frac{N(t) - 2.389}{5.392} \right) \quad (4)$$

式中 T ——火腿剩余货架期,d

3.3 预警系统的主要功能

预警系统不仅需要呈现出每一次检测的结果，还需要将检测时间、样品品牌、检测地点等信息保存至数据库中，并且通过服务器开放其 IP 地址和端口将数据共享至网络，将样品的货架期情况及时反馈给操作人员，因此该系统的软件需求包括以下部分：无线传输协议和数据格式；服务器接收检测数据并将数据保存至数据库中；及时向客户端反馈样品的货架期数据。其中无线传输协议依然使用 TCP/IP 协议。在满足上述需求后开始设计预警系统，图 11 为预警系统的工作流程图。

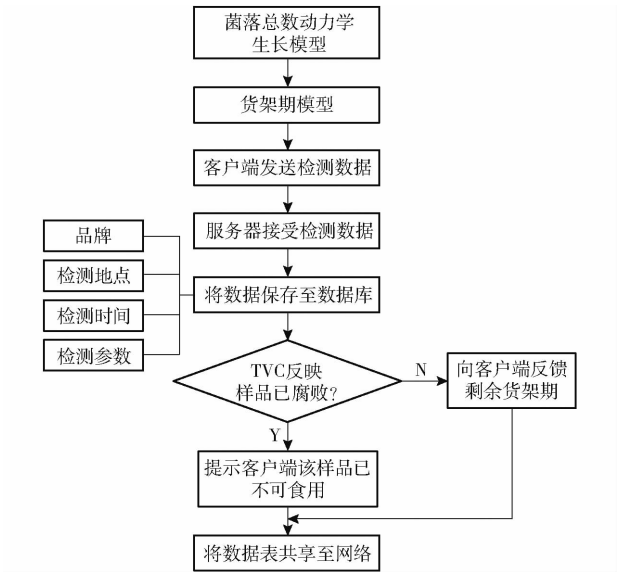


图 11 预警系统工作流程图

Fig. 11 Work flow chart of early warning system

3.4 软件设计与测试

本软件采用 MFC 框架,以阿里云服务器和 MySQL 数据库为开发终端,将本地连接的服务器端软件部署到阿里云服务器上,并对数据库功能进行开发。首先在目标服务器上安装 MySQL 数据库、配置系统环境,选择建立新的数据库或者选用已存在的数据库,然后在数据库中建立自己所需要的数据表来存放数据,最后在软件中编写数据库部分的代码,图 12 为软件界面。该软件将数据保存在 MySQL 数据库中,通过公开服务器的 IP 地址和端口号将数据共享至网络,并可以在本地查看数据,实现预警操作。

由于一直在计算机的命令提示符界面操作数据库比较繁琐,所以本文采用 navicat 软件连接数据库,然后对数据库中的数据进行系统管理。通过对 navicat 软件进行授权后,本地计算机只要输入服务器的 IP 地址、端口就可以直接连接服务器上的数据

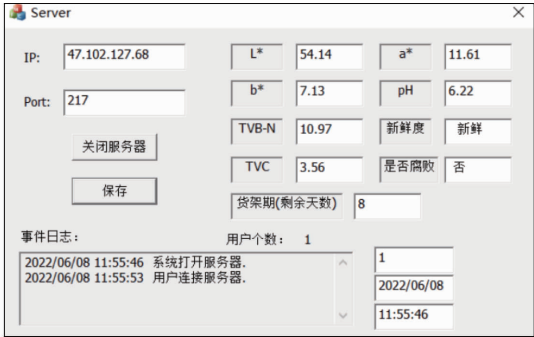


图 12 云端预警软件界面
Fig. 12 Cloud warning software interface

库,实现本地即可查看云端数据库中的数据。图 13 为某次实验的部分预警数据,从图中的数据表可以看出,该系统可以保存实验的检测地点、品牌、日期、时间以及各检测指标的数据,表中的货架期和是否腐败反映了火腿的可食用性,通过这些信息来进行实时预警。

地区	品牌	日期	时间	序号	L	a	b	pH	挥发性盐基氮 (mg每100g)	新鲜度	菌落总数 (lgCFU每g)	货架期 (剩余天数)	是否腐败
北京	双汇	2022-03-06	21:33:20	1	56.23	11.88	7.11	5.97	10.98	新鲜	5.15	0	是
北京	双汇	2022-03-06	21:33:20	2	55.77	12.28	8.03	7.01	11.45	新鲜	5.42	0	是
北京	双汇	2022-03-06	21:33:20	3	57.60	9.27	7.49	6.83	13.29	新鲜	3.20	11	否
北京	双汇	2022-03-06	21:33:20	4	53.12	11.25	6.95	6.33	9.80	新鲜	5.38	0	是
北京	双汇	2022-03-06	21:33:20	5	53.95	12.24	6.41	7.83	9.63	新鲜	5.23	0	是
北京	双汇	2022-03-06	21:33:20	6	54.78	9.90	7.86	7.33	11.15	新鲜	3.11	11	否
北京	双汇	2022-03-06	21:33:20	7	52.81	10.25	8.06	6.42	11.46	新鲜	3.13	11	否
北京	双汇	2022-03-06	21:33:20	8	55.84	12.29	7.93	7.19	12.78	新鲜	2.14	18	否
北京	双汇	2022-03-06	21:33:20	9	53.96	9.86	7.24	6.14	13.33	新鲜	3.22	9	否
北京	双汇	2022-03-06	21:33:20	10	53.28	11.80	6.97	6.37	10.37	新鲜	2.22	16	否
北京	双汇	2022-03-06	21:33:20	11	53.79	12.46	7.42	7.18	10.20	新鲜	4.12	4	否
北京	双汇	2022-03-06	21:33:20	12	56.82	10.81	7.29	6.95	12.20	新鲜	4.14	4	否
北京	双汇	2022-03-06	21:33:20	13	56.13	11.43	6.34	7.18	11.55	新鲜	2.13	18	否
北京	双汇	2022-03-06	21:33:20	14	54.25	9.32	6.33	7.13	12.10	新鲜	3.21	9	否
北京	双汇	2022-03-06	21:33:20	15	53.57	10.94	8.06	7.68	12.14	新鲜	2.20	16	否

图 13 数据监测预警结果
Fig. 13 Data monitoring and early warning results

4 结论

- (1)对装置硬件系统中的光源、控制、结构和散热等单元进行了选型和设计,着重考虑了光源的功率、处理器的性能、装置布局的合理性以及检测探头的结构设计。基于 MFC 开发框架,以 C++ 为开发编程语言,编写了检测软件。同时,基于 TCP/IP 协议增加了数据传输的功能,使得检测数据可以系统化管理,提高了数据分析的效率。另外,通过 C++ 和 Matlab 联合编程开发了自动建模程序,减少了前期数据分析的工作量。
- (2)对设计的装置进行了性能验证,主要验证了装置的光谱稳定性和数据传输的准确性。同时建立了

- 火腿 L^* 、 a^* 、 b^* 、pH 值、TVB-N 含量、TVC 各品质参数的定量预测模型,并另取 40 个火腿样品对建立的模型进行外部独立验证,其中 L^* 和 a^* 的预测相关系数达到 0.89,其余参数都达到了 0.9 以上,误差也控制在可接受范围内。通过测试验证表明便携式火腿品质检测装置可以用于火腿的多维品质参数同时检测。
- (3)通过对火腿货架期的研究,建立火腿储藏期间内的菌落总数生长动力学模型,并在此基础上结合 TVC 的预测模型建立了火腿的货架期模型。同时对货架期预警系统进行了需求分析和软件设计,将软件部署在阿里云服务器上,并安装了 MySQL 数据库,用来保存管理数据,通过对货架期的监控实现火腿品质腐败的实时预警。

参 考 文 献

[1] 梁新峰. 浅谈中国肉制品的发展与前景[J]. 科技与创新, 2021(23): 75-76,79.
LIANG Xinfeng. Talking about the development and prospect of Chinese meat products[J]. Science and Technology and Innovation, 2021(23): 75-76,79. (in Chinese)

[2] MCAFEE A J, MCSORLEY E M, CUSKELLY G J, et al. Red meat consumption: an overview of the risks and benefits[J]. Meat Science, 2010, 84(1): 1-13.

[3] 陈俏纯, 何志勇, 秦昉, 等. 肉制品加工过程风味和伴生危害物的生成及关联规律[J]. 食品安全质量检测学报, 2019,

- 10(15): 4848–4855.
- CHEN Qiaochun, HE Zhiyong, QIN Fang, et al. Formation and correlation of flavor and associated hazards in meat processing[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2019, 10(15): 4848–4855. (in Chinese)
- [4] 杨雪, 冯美琴, 孙健, 等. 淀粉、亚麻籽胶与贮藏温度对火腿肠品质影响的析因试验分析[J]. *食品科学*, 2017, 38(13): 1–6.
- YANG Xue, FENG Meiqin, SUN Jian, et al. Effects of starch, flaxseed gum and storage temperature on sausage quality evaluated by factorial design[J]. *Food Science*, 2017, 38(13): 1–6. (in Chinese)
- [5] 何立超, 李成梁, 马素敏, 等. 辐照对猪肉火腿肠风味与品质的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(9): 34–39.
- HE Lichao, LI Chengliang, MA Sumin, et al. Effect of irradiation on the flavor and color of pork sausages[J]. *Food Science*, 2017, 38(9): 34–39. (in Chinese)
- [6] SHAO L, CHEN S, WANG H, et al. Advances in understanding the predominance, phenotypes, and mechanisms of bacteria related to meat spoilage[J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2021, 118: 822–832.
- [7] IQBAL A, SUN D, ALLEN P. Prediction of moisture, color and pH in cooked, pre-sliced turkey hams by NIR hyperspectral imaging system[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 117(1): 42–51.
- [8] PEREIRA P F M, DE SOUSA PICCIANI P H, CALADO V, et al. Electrical gas sensors for meat freshness assessment and quality monitoring: a review[J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2021, 118: 36–44.
- [9] 庄齐斌, 郑晓春, 杨德勇, 等. 基于高光谱反射特性的猪肉新鲜度和腐败程度的对比分析[J]. *食品科学*, 2021, 42(16): 254–260.
- ZHUANG Qibin, ZHENG Xiaochun, YANG Deyong, et al. Comparative analysis of pork freshness and spoilage based on hyperspectral reflection characteristics[J]. *Food Science*, 2021, 42(16): 254–260. (in Chinese)
- [10] 袁琴琴, 刘文营. 肉及肉制品质量属性评价方法及其面临的问题[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(21): 7981–7991.
- YUAN Qinqin, LIU Wenying. Quality attribute evaluation method of meat and meat products and its problems[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2020, 11(21): 7981–7991. (in Chinese)
- [11] 刘登勇. 肉制品质量与安全研究新动态[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(16): 5524–5525.
- LIU Dengyong. Research trends on the quality and safety of meat products[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2020, 11(16): 5524–5525. (in Chinese)
- [12] 郭庆辉, 彭彦昆, 李永玉, 等. 肉品无损检测光学传感器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(增刊2): 484–490.
- GUO Qinghui, PENG Yankun, LI Yongyu, et al. Design and test of optical sensor for meat nondestructive testing[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(Supp.2): 484–490. (in Chinese)
- [13] DE MARCHI M, MANUELIAN C L, TON S, et al. Prediction of sodium content in commercial processed meat products using near infrared spectroscopy[J]. *Meat Science*, 2017, 125: 61–65.
- [14] 史智佳, 臧明伍, 吕玉, 等. 近红外光谱快速测定乳化香肠的化学成分[J]. *食品科学*, 2013, 34(18): 175–179.
- SHI Zhijia, ZANG Mingwu, LÜ Yu, et al. Rapid determination of chemical constituents in emulsion-type sausage by near-infrared diffuse reflectance spectroscopy[J]. *Food Science*, 2013, 34(18): 175–179. (in Chinese)
- [15] 王丽, 韩晓祥, 徐欢, 等. 近红外光谱法测定金华火腿生产过程中的品质参数[J]. *中国食品学报*, 2011, 11(7): 181–184.
- WANG Li, HAN Xiaoxiang, XU Huan, et al. Quality parameters detection of Jinhua ham during processing by FT–NIR spectroscopy[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2011, 11(7): 181–184. (in Chinese)
- [16] CAMPOS M I, MUSSONS M L, ANTOLIN G, et al. On-line prediction of sodium content in vacuum packed dry-cured ham slices by non-invasive near infrared spectroscopy[J]. *Meat Science*, 2017, 126: 29–35.
- [17] 孙宏伟, 彭彦昆, 林琬. 便携式生鲜猪肉多品质参数同时检测装置研发[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(20): 268–273.
- SUN Hongwei, PENG Yankun, LIN Wan. Development of a portable device for simultaneous detection on multi-quality attributes of fresh pork[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(20): 268–273. (in Chinese)
- [18] 王文秀, 彭彦昆, 孙宏伟, 等. 基于可见/近红外光谱生鲜肉多品质参数检测装置研发[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(23): 290–296.
- WANG Wenxiu, PENG Yankun, SUN Hongwei, et al. Development of simultaneous detection device for multi-quality parameters of meat based on Vis/NIR spectroscopy[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(23): 290–296. (in Chinese)
- [19] YAO X, CAI F, ZHU P, et al. Non-invasive and rapid pH monitoring for meat quality assessment using a low-cost portable hyperspectral scanner[J]. *Meat Science*, 2019, 152: 73–80.
- [20] 肖莉, 张焜毅, 张国权, 等. 城市流通蔬菜污染监测预警系统的设计和开发[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(3): 168–173.
- XIAO Li, ZHANG Kunyi, ZHANG Guoquan, et al. Design and development of the monitoring and warning system for urban circulating vegetable pollution[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(3): 168–173. (in Chinese)
- [21] 黎贞发, 王铁, 官志宏, 等. 基于物联网的日光温室低温灾害监测预警技术及应用[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(4): 229–236.
- LI Zhenfa, WANG Tie, GONG Zhihong, et al. Forewarning technology and application for monitoring low temperature disaster in solar greenhouses based on internet of things[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(4): 229–236. (in Chinese)

[22] 陈辉,陈虎,奚建清. 嵌入式系统 TCP/IP 协议性能测试与分析[J]. 计算机工程,2007(21):99-101.
CHEN Hui, CHEN Hu, XI Jianqing. Test and evaluation of TCP/IP performance for embedded systems[J]. Computer Engineering, 2007(21): 99-101. (in Chinese)

[23] 徐治. Visual C++调用 MATLAB 函数库的混合编程技术[J]. 软件,2015,36(2):55-58.
XU Zhi. The hybrid programming technique of calling MATLAB library functions from Visual C++[J]. SOFTWARE, 2015, 36(2): 55-58. (in Chinese)

[24] GB 5009.228—2016 食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定[S]. 2016.

[25] GB 4789.2—2016 食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定[S]. 2016.

[26] GB/T 9695.5—2008 肉与肉制品 pH 测定[S]. 2008.

[27] 王海龙,杨国国,张瑜,等. 竞争性自适应重加权算法和相关系数法提取特征波长检测番茄叶片真菌病害[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(7): 2115-2119.
WANG Hailong, YANG Guoguo, ZHANG Yu, et al. Detection of fungal disease on tomato leaves with competitive adaptive reweighted sampling and correlation analysis methods[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(7): 2115-2119. (in Chinese)

[28] 党晓燕,朱迎春,王凯丽,等. 不同贮藏温度下猪肉货架期预测模型建立[J]. 东北农业大学学报, 2016, 47(11): 76-84.
DANG Xiaoyan, ZHU Yingchun, WANG Kaili, et al. Establishment of shelf-life prediction model for pork at different storage temperatures[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2016, 47(11): 76-84. (in Chinese)

[29] 王晓君,张斌斌,夏杨毅,等. 解冻后兔肉待加工过程中理化指标与菌落总数的变化[J]. 食品科学, 2015, 36(23): 121-126.
WANG Xiaojun, ZHANG Binbin, XIA Yangyi, et al. Changes in physicochemical indicators and total viable count of frozen rabbit meat during pending process after thawing[J]. Food Science, 2015, 36(23): 121-126. (in Chinese)

[30] NIELSEN D S, JACOBSEN T, JESPERSEN L, et al. Occurrence and growth of yeasts in processed meat products-implications for potential spoilage[J]. Meat Science, 2008,80(3):919-926.

[31] 王小艺,陈谦,赵峙尧,等. 基于蒙特卡洛仿真的小麦仓储环节菌落总数风险评估方法[J]. 食品科学, 2020, 41(23): 166-171.
WANG Xiaoyi, CHEN Qian, ZHAO Zhiyao, et al. A risk assessment method for total bacterial count in wheat during storage based on Monte Carlo simulation[J]. Food Science, 2020, 41(23): 166-171. (in Chinese)

[32] 彭彦昆. 农畜产品品质安全光学无损快速检测技术[M]. 北京: 科学出版社, 2016.

(上接第 351 页)

[35] 郑健,殷李高,李欣怡,等. 沼液理化性质对土壤饱和导水率的影响[J]. 中国沼气, 2019, 37(4): 103-109.
ZHENG Jian, YIN Ligao, LI Xinyi, et al. Effect of physicochemical properties of biogas slurry on soil saturated hydraulic conductivity[J]. China Biogas, 2019, 37(4): 103-109. (in Chinese)

[36] 郑健,殷李高,冯正江,等. 沼液施用对设施土壤饱和导水率的影响[J]. 节水灌溉, 2019(4): 46-51, 55.
ZHENG Jian, YIN Ligao, FENG Zhengjiang, et al. Analysis of influence of saturated hydraulic conductivity of tomato root zone soil with biogas slurry application[J]. Water Saving Irrigation, 2019(4): 46-51, 55. (in Chinese)

[37] 郑健,殷李高,朱传远,等. 施用沼液对设施番茄生长与土壤生态环境的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 278-288.
ZHENG Jian, YIN Ligao, ZHU Chuanyuan, et al. Effects of digestate on tomato growth and soil ecological environment in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 278-288. (in Chinese)

[38] 许健,牛文全,李元,等. 生物炭对微润灌土壤水分运动的影响[J]. 节水灌溉, 2015(12): 64-68.
XU Jian, NIU Wenquan, LI Yuan, et al. Effects of biochar addition on soil water movement under moistube-irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2015(12): 64-68. (in Chinese)

[39] 谭艳红,郑健,贾生海,等. 沼液穴灌土壤水分运移的交汇入渗特征[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2016, 42(5): 573-578.
TAN Yanhong, ZHENG Jian, JIA Shenghai, et al. Interference infiltration characteristics of the soil water movement under the hole irrigation with biogas slurry[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2016, 42(5): 573-578. (in Chinese)