

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.038

鲟鱼无水低温保活的血糖传感信号监测方法

傅泽田^{1,2} 高乾钟³ 张永军³ 刘艳⁴ 张小栓^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学食品质量与安全北京实验室, 北京 100083;

3. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 4. 北京物资学院物流学院, 北京 101149)

摘要: 根据水产品无水低温保活运输监测需求, 设计了可植入式血糖传感器及信号处理电路, 以实时获取血糖传感信号, 信号经过软件滤波进行去噪和平滑处理后, 构建了血糖变化的时序预测模型; 以鲟鱼作为实验对象, 对所提出的方法进行了实验验证。结果表明: 所设计的可植入式血糖传感器能在鲟鱼体内对血糖信号进行稳定的采集, 传感器信号经过信号调理电路后输出拟合程度达到 0.960 8, 电路灵敏度为 27.047 mV/nA, 零点漂移量为 722.83 mV; 所构建的血糖信号自回归移动平均模型 (ARIMR) 预测值与真实值之间的平均绝对误差为 -0.014 mmol/L, 平均相对误差为 -0.117%, 预测精度和平滑度较其他模型具有优势。该信号监测方法对于提高水产品无水低温保活全程透明度和追溯性, 并推断水产品生命体及营养物质变化具有重要参考价值。

关键词: 无水低温保活; 可植入传感器; ARIMR; 信号处理

中图分类号: S981.1; TN402 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)01-0305-10

Monitoring Method and Verification of Sturgeon Glucose Sensing Signal at Waterless and Low Temperature Keeping Alive Transportation

FU Zetian^{1,2} GAO Qianzhong³ ZHANG Yongjun³ LIU Yan⁴ ZHANG Xiaoshuan^{1,2}

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

2. Beijing Laboratory for Food Quality and Safety, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

4. School of Logistics, Beijing Wuzi University, Beijing 101149, China)

Abstract: Waterless and low temperature keeping alive transportation is considered as a kind of promising technology to improve aquatic animals' survival and save the transport costs, and monitoring biological signal is useful to improve the transparency and traceability of transportation process. A monitoring method of glucose was presented, which consisted of three components: a signal conditioning circuit, a software digital filter and a prediction method. The signal conditioning circuit was responsible to sense glucose signal by the implantable glucose sensor and signal pretreatment by a hardware filters; the software digital filter can filter and smooth the amplified signal to provide reliable data for the dynamic character analysis. The time series method served to predict change of glucose. Sturgeons were selected as experimental objectives to validate the reliability of the method. The experiment result showed that the implanted glucose sensor can sense data accurately with sensitivity of 27.047 mV/nA, the zero drift of 722.83 mV and signal output fitting of 0.960 8 after signal conditioning circuit; the average absolute error between the predicted value by autoregressive integrated moving average model (ARIMR) and the real sensed value was -0.014 mmol/L, and the average relative error was -0.117%, which indicated that the ARIMR model had advantages in prediction accuracy and smoothness compared with other prediction models; the proposed monitoring method can be adopted as a reference value to monitor the change of glucose and obtain the change of biological nutrients during waterless keeping alive transportation of the aquatic product.

Key words: waterless and low temperature keeping alive transportation; implantable sensor; ARIMR; signal processing

收稿日期: 2017-04-15 修回日期: 2017-05-17

基金项目: 农业部公益性行业科研专项(201203017)和北京市科技新星计划项目 (XX2015B040)

作者简介: 傅泽田(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事农业系统工程与信息化研究, E-mail: fzt@cau.edu.cn

通信作者: 张小栓(1978—),男,教授,博士生导师,主要从事农业系统工程与信息化、冷链物流等研究, E-mail: zhxshuan@cau.edu.cn

0 引言

无水低温保活技术是通过梯度降温等方法,使水产品在其生态冰温区域处于半休眠或完全休眠状态,以降低新陈代谢,减少机械损伤,延长存活时间,达到长距离、大批量保活运输的目的^[1-3]。研究表明,在提高保活运输率的同时,水产品品质也会受到一定程度的损伤^[4-5]。

通过对水产品重要营养物质(如蛋白质、脂肪等)的检测,可以探究无水低温保活过程对水产品品质的影响。但是,这些指标从理论上难以直接测量,或者操作难度大、成本高。鱼类是水产品中重要的一部分,在面对外界刺激时鱼类产生的应激反应,加速体内的营养物质转化为葡萄糖,使血糖、乳酸及肝糖元保持一个动态平衡的过程^[4-8]。因此,血糖是动物中重要的供能物质,可直接反映鱼类的代谢状况。

从理论上分析,血糖监测方法采用生物传感器对血糖信号进行采集,经过滤波处理后获取血糖变化信息^[9-11]。生物血糖信号变化频率在0~40 Hz之间,忽略传感器自身采集精度,信号在传输过程中也极易受到干扰^[12-13]。在对无水低温保活过程中鱼类血糖进行监测时需要高精度、高稳定性的生物传感器,高质量的滤波过程和高效的数据处理方法。同时考虑到采样过程可能存在的影响其存活率等因素,可植入生物传感器设计方法有红外光谱方法、荧光检测法等。SHIN等^[14]利用测眼压的方法制作可植入传感器,利用生化方法制作可植入血糖传感器检测血糖变化较常用,获取的数据更准确且针对性更强,植入传感器主要问题在于易受生物体内其他组织液的影响,造成采集的信号不稳,甚至传感器损坏^[14-18];在传感信号传输过程中易受到电子元器件的噪声干扰,采用软硬件结合^[19-23]的滤波方式可以有效地还原原始信号;数据处理利用预测的方法^[24-25](如时间序列、曲线拟合、灰色模型、神经网络等)实现对数据采集和滤波过程效果的反向对照,获取系统稳定性的信息以及实现对血糖变化趋势的判断,为后续生物血糖控制提供参考。

本文以对低温适应性强、较高经济价值和科研价值的鲟鱼作为实验样本,进行无水低温保活实验,通过设计与开发可植入血糖传感器,提出一种监测鲟鱼血糖信号变化的方法,为水产品营养物质监测提供一种参考。

1 无水低温保活的血糖传感信号监测方法

1.1 血糖信号采集方法

为解决可植入传感器在生物体内精度受损、续

航能力受限甚至由生物体内其他组织导致其不能正常工作乃至损坏等问题^[14-18],设计了一种可植入血糖传感器,选择从鲟鱼眼部植入来测量活鱼眼球巩膜组织间液中的血糖变化,来减小以上问题带来的影响。

1.1.1 可植入血糖传感器设计

利用葡萄糖酶和葡萄糖之间的反应进行可植入传感器设计,如图1所示,传感器主要结构包括工作电极和参比电极。利用铂铱合金材料制作工作电极,在工作电极上覆盖一层葡萄糖氧化酶与血糖中葡萄糖进行氧化还原反应,产生的离子经过全氟磺酸高分子层到达工作电极上,在参比电极上不进行葡萄糖氧化酶进行覆盖,作为生物组织液变化的参考,参比电极与工作电极之间形成电势差,变化的电流经过导线传输到信号放大设备和天线,实现信号传输。该可植入血糖传感器的优点在于利用电化学反应无需进行供电;利用全氟磺酸高分子膜的离子选择性可以有效降低生物体内非正常生理应激带来的干扰;经过结构优化,传感器的长度约3 mm、直径1 mm,对于植入活鱼眼球巩膜组织间液内进行血糖信号采集是足够的。综上,该血糖传感器能够有效避免可植入传感器存在的问题。

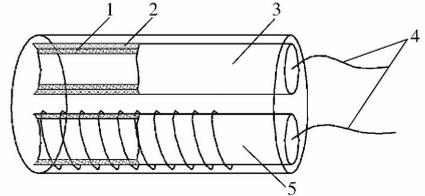


图1 可植入血糖传感器结构图

Fig.1 Structure diagram of implantable blood glucose sensor

1. 全氟磺酸 2. 葡萄糖氧化酶 3. 工作电极 4. 导线 5. 参比电极

1.1.2 血糖信号采集硬件设计

传感器采集到的血糖信号幅值和频率较低,易淹没在噪声中,不能直接进行数字化处理^[24],必须经过硬件整形、滤波来进行有效放大。为了达到更好的滤波和放大效果,本研究所设计的电路中采用了逐级放大、逐级滤波的方式,并使用低功耗芯片来提高硬件的续航能力,将滤波和放大过程集成为一个模块来缩小电路体积,提高电路的适应性(图2)。

1.1.3 血糖信号采集软件设计

由上述传感器和硬件滤波电路初步处理后的信号中仍存在传感器和电子元件带来的低频噪声和干扰。利用软件滤波来进行过滤与平滑。具体流程图如图3(图中 x_{k-R} 、 x_k 、 x_{k+R} 分别表示第 $k-R$ 、 k 、 $k+R$ 个采样信号点, $f(x_k)$ 表示Med函数提取出来的值,Med表示提取序列 $\{x_{k-R}, \dots, x_k, \dots, x_{k+R}\}$ 中间值)

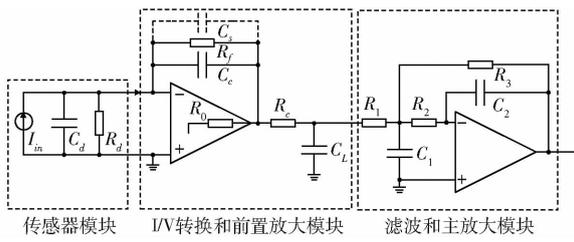


图 2 硬件滤波整形电路

Fig. 2 Hardware filter shaping circuit

所示。传感器和信号采集硬件采集到混合信号为

$$Y_t = Y_i + Y_x + Y_c \quad (1)$$

式中 Y_t ——混合信号

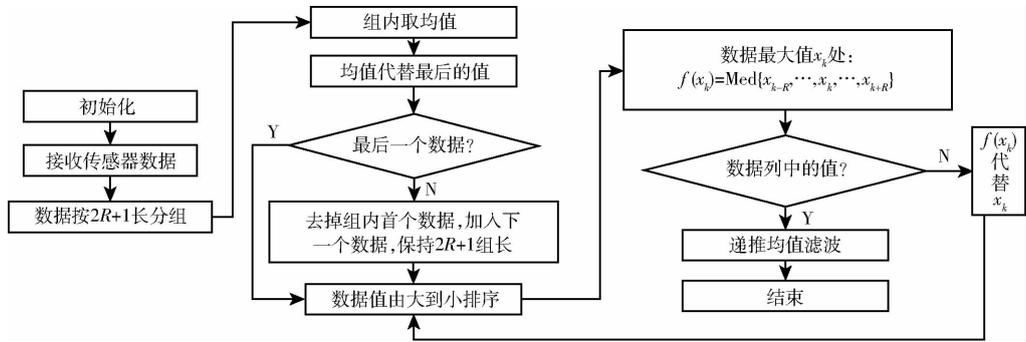


图 3 血糖信号软件滤波流程图

Fig. 3 Flow chart of blood glucose signal software filter

(3)最后利用递推均值法进行平滑处理。

1.2 血糖信号传输方法

无水低温保活血糖信号传输过程如图 4 所示。可植入传感器采集血糖的变化数据,通过传感器的天线将原始数据包传输到接收器,接收器将数据包经过硬件调理压缩后,利用 GPRS 模块对数据进行 TCP/IP 协议转换,再以 GPRS 数据包的形式发送至 GPRS 无线基站,并由基站经过 GPRS 服务支持节点 (SGSN) 和网关服务节点 (GGSN) 传输到 INTERNET,最后数据经过防火墙传输至数据监控终端,终端将利用时序法对数据进行预测模型构建。



图 4 血糖信号传输流程

Fig. 4 Blood glucose signal transmission process

1.3 血糖信号预测方法

由于血糖扩散过程的耗时和传感器的响应问题^[26],通过建立合适的预测模型可以获得未来血糖变化,方便及时做出决策,提高存活率。

常用的预测建模方法包括曲线拟合、灰色模型、神经网络及时序法等^[24-25]。考虑到时序法实现方便且处理效果明显^[27-28],本文采用时序法构建预测

Y_i ——血糖实际信号

Y_x ——鲟鱼应激与环境中产生的小信号

Y_c ——系统不稳定与环境突变带来的粗大误差信号

(1)首先利用递推均值滤波法提取出纯净的 Y_i 信号,即 $Y_i = Y_t - Y_x - Y_c$,将 $Y_x + Y_c$ 信号进行下一步滤波。

(2)然后利用中值滤波法对 $Y_x + Y_c$ 信号进行信号过滤得到 Y_x^* ,但 Y_x^* 信号中含有应激反应产生的信号,导致信号不平滑,所以必须进行下一步滤波进行平滑。

模型,并与其它预测模型进行对比。利用时序法构建血糖预测模型的流程如下(图 5):

(1)平稳化检验

平稳序列应具有以下特征:始终在一个常数值上下随机波动;波动强度随时间变化不大;没有明显的趋势性和周期性。

(2)数据平稳化

时间原始序列 $\{X_t, t=1, 2, \dots, n\}$ 表现为非平稳序列时,通过以 Cramer 理论为基础的差分法来进行序列平稳化。对 $k-1$ 阶差分序列再进行一次一阶差分的 k 阶差分为

$$\nabla^k X_t = \nabla^{k-1} X_t - \nabla^{k-1} X_{t-1} = \sum_{i=0}^k (-1)^i C_k^i \beta^i X_{t-i} \quad (2)$$

其中 $C_k^i = \frac{k!}{i!(k-i)!}$ $\beta^i X_t = X_{t-i}$

式中 β ——延迟算子

$\beta^i X_t$ —— i 阶延迟算子

$(1-\beta^k)X_t$ 定义为 k 步差分为间隔 k 期的两个序列值之差,即 $(1-\beta^k)X_t = \nabla_k X_t = X_t - X_{t-k}$ 。每次差分过后需要进行平稳性检验,避免原序列信息丢失。

(3)相关系数估计

相关系数估计包括自相关系数估计与偏相关系数估计。具体表现形式为:自相关系数随延迟期数 k 的增加突然降为零的周围小幅波动;随延迟期数 k

的增加迅速衰减在零的周围小幅波动。

(4) 模型构建

时序法提供4种模型构建方式,包括自回归模型(AR)、滑动平均模型(MR)、自回归滑动平均模型(ARMR)、求和自回归滑动平均模型(ARIMR)。各模型关系为:ARMR是AR和MR的“混合”,ARIMR是ARMR的推广模型,具体模型的选择需要

根据原始时间序列与差分后的时间序列特点进行选择,考虑的因素包括差分的阶数、时间序列的周期性和趋势性等。

(5) 确定模型参数与检验

根据模型公式确定模型参数,通过残差的白噪声检验和参数的显著性检验对模型做可靠性检验。

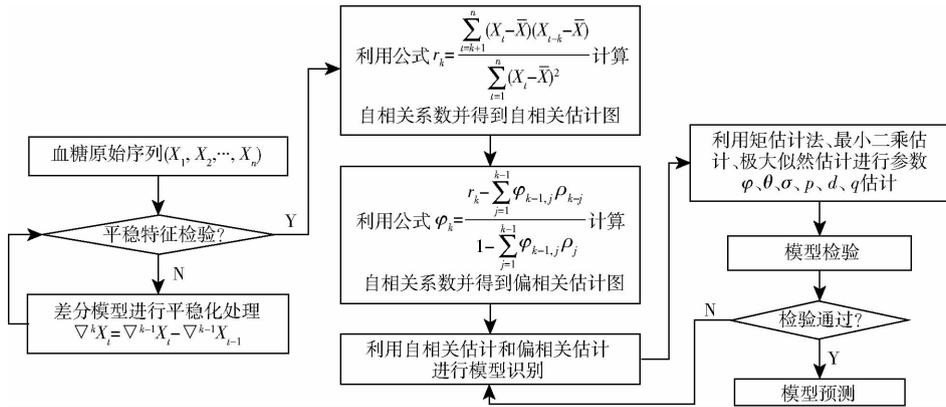


图5 血糖预测模型构建流程图

Fig.5 Flow chart of blood glucose prediction model construction

2 无水低温保活血糖传感信号监测平台搭建

2.1 血糖传感信号处理硬件整体描述

在无水低温保活技术下搭建图6所示的硬件验证血糖监测方法的可靠性。利用可植入血糖传感器采集鲟鱼眼球巩膜组织间液内血糖变化,将获得的有效电流信息以无线传输方式传出。用无线接收器接收传感器传输的电流信息,同时转变为实际电流进行输出,利用AD公司的放大器ADA4530和

LTC1150分别搭建放大与滤波模块。采用软件滤波方式进行信号的处理,整形后利用CC2530片上系统对信号储存发送。CC2530片上系统主动接收数据时消耗24 nA,同时支持IEEE 802.15.4和ZigBee等多种协议标准,芯片内部集成了2.4 GHz标准射频收发器,内嵌一个增强型8051单片机,具有256 KB系统可编程闪存。在数据传输时其通信模块不仅需要接收来自传感器放大整形后的血糖信号,还需要将数据进行分组压缩后通过GPRS模块传输。

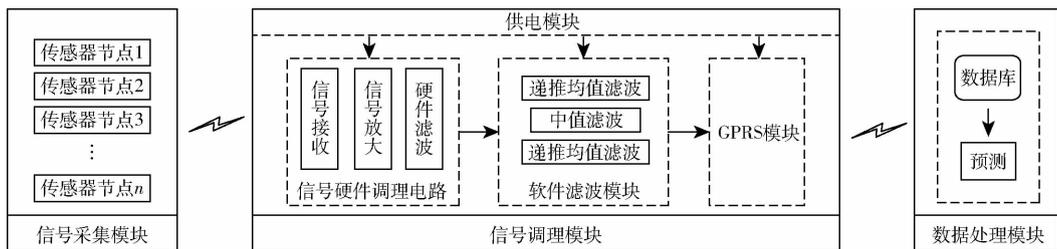


图6 鲟鱼血糖传感信号硬件设计

Fig.6 Hardware design of sturgeon blood sugar sensing signal

2.2 可植入式血糖传感器校准

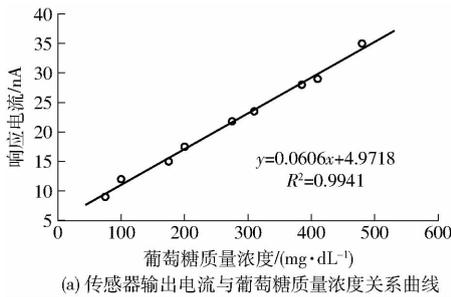
利用葡萄糖溶液对传感器做植入前的体外校准。称取20 g无水分析纯葡萄糖,利用干燥箱在105℃下将其干燥至质量恒定,后作为备用放入磨口瓶中。在室温(20℃)条件下,配2 L磷酸盐缓冲溶液(PBS溶液),并将其pH值调至7.4,使用烧杯取500 mL PBS溶液在水浴锅中保持恒温水浴加热,利用精密温度计监测其温度。经过2 h稳定期后放入已连接好的传感器和电路板做实验校准。参考离体血糖仪测量指导按浓度梯度逐次加入葡萄糖,等待

电路稳定后记录对应的响应电流。

2.3 实验方案

实验在国家农产品现代物流工程技术研究中心进行。从济南市水产市场获取新鲜鲟鱼,选择每尾全长(48.87 ± 4.25) cm,质量约750 g,发育良好,体格健壮,外部无损伤的鲟鱼进行驯化,首先通过驯化箱降温诱导鲟鱼进入休眠状态,以达到低温保活实验的目的。鲟鱼进入休眠的温度在2~4℃之间,故选取12尾状态良好的鲜活商品鲟鱼放入3℃的驯化水箱中驯化,驯化期间连续充氧,不投饵,驯化24 h后使所有

实验个体进入半休眠状态。对进入休眠状态的鲟鱼进行进一步的筛选。选择在驯化结束后依然存活,表面无损伤,对驯化过程有较好适应性的鲟鱼作为实验对象。将满足条件的 9 尾鲟鱼移至人工气候箱,将其按照体型分为 3 组,样本 1 组体型修长,样本 2 组体型圆满,样本 3 组体型肥硕,同时利用微创技术向活鱼眼球巩膜组织间液内植入已校准的血糖传感器,并与其他硬件设备建立连接,调节温控设备使箱内温度降至 3℃,相对湿度设为 94%~96% 之间,使其仍保持休眠状态。鱼类无水保活过程常设置在 24 h^[2-4],为验证方法可靠性进行 32 h 实验。传感器节点采集的时间间隔设置为 10 min,CC2530 通信模块每 1 h 发送一次数据。采用 3.7 V、30 000 mA·h 的锂电池对实验的硬件电路进行供电。

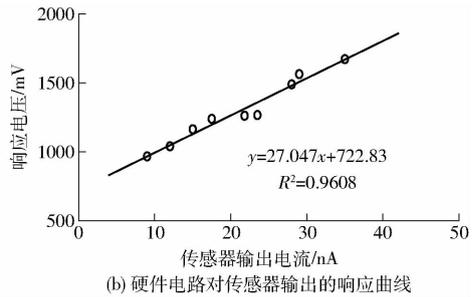


(a) 传感器输出电流与葡萄糖质量浓度关系曲线

3 结果分析与讨论

3.1 可植入血糖传感器校准结果分析

利用上述传感器校准办法,获得传感器输出电流与葡萄糖质量浓度关系曲线如图 7a 所示。从图中可以看出,传感器输出电流与葡萄糖质量浓度基本呈线性关系,拟合程度达到了 0.994 1,电流大小在 5~40 nA 之间,随血糖变化电流变化稳定,说明传感器对血糖能产生稳定响应。电路硬件对血糖信号处理效果如图 7b 所示。从图中可以看出,硬件电路对血糖传感器信号放大效果明显,对应输出拟合程度达到了 0.960 8,电路灵敏度为 27.047 mV/nA,零点漂移量为 722.83 mV,说明该硬件电路完全适用于血糖传感信号的放大。



(b) 硬件电路对传感器输出的响应曲线

图 7 可植入血糖传感器校准结果

Fig. 7 Implantable glucose sensor calibration results

3.2 传感器植入对鲟鱼保活率的影响分析

为了进一步说明该血糖传感器对鲟鱼血糖测量的适应性,将预实验与实际实验中鲟鱼的存活数量进行统计对比,如表 1 所示。表中的实验开始时是指从驯化结束且挑选到的合适样本移入人工气候箱的时间。可以看出,相同条件下保存 32 h 后进行理化指标检测的鲟鱼样本存活率与植入血糖传感器后进行血糖变化监测的鲟鱼样本存活率基本一致,这说明植入的传感器不会影响鲟鱼本身的保活率。

表 1 鲟鱼存活率统计

Tab. 1 Sturgeon survival statistics

	理化指标检测鲟鱼			血糖监测鲟鱼		
	开始时 条数	结束时 条数	存活 率/%	开始时 条数	结束时 条数	存活 率/%
预实验	3	2	67	4	2	50
实际实验	3	3	100	9	9	100
总数	6	5	83	13	11	84

3.3 鲟鱼血糖变化结果分析

根据设计的实验方案,获取的血糖数据经过组内取平均值后,绘制的变化曲线如图 8 所示。从图中观察到 3 组鲟鱼在无水保活过程中血糖变化趋势

基本一致,在前 8 h,鲟鱼体内血糖呈现快速下降趋势,原因可能是进入低温环境初期,鲟鱼消耗体内糖原转化为葡萄糖来抵御寒冷,随着时间的增加,血糖被消耗导致其持续降低;这与刘骁等^[4]的研究结果基本一致;同时无外界食物补充,鲟鱼对饥饿产生应激,降低代谢来满足身体的基本需要后,鲟鱼进入深度休眠状态,基本不消耗能量^[5];8 h 后,鲟鱼适应了低温环境,代谢能力有部分恢复,血糖浓度也有缓慢回升。其中样本 1 组中的鲟鱼血糖下降到最低点立刻呈现上升趋势,血糖变化明显,但样本 2、3 组中的血糖值变化就平缓些,应该是在样本 1 组中鲟鱼正常状态时生命力较强,代谢长期处于旺盛状态,使

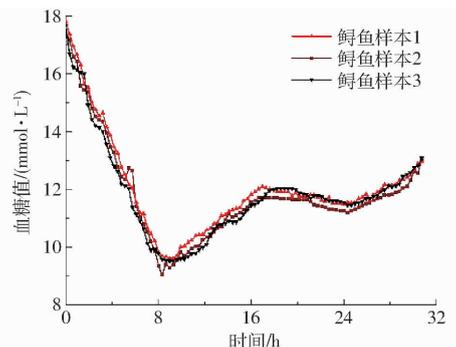


图 8 鲟鱼样本血糖变化曲线

Fig. 8 Curves of sturgeon sample glucose

其不能对环境变化有更好的适应性,而样本 2、3 组 鲟鱼适应性强,在 8 h 内的变化呈现较为平稳的现象。贾明亮^[29]在研究中指出鱼类受到低温胁迫时,血糖被大量消耗来抵抗环境的变化,但在逐渐适应环境后,体内会趋于新的稳态,并使血糖浓度上升,这与本结果总体变化基本一致。

3.4 鲟鱼血糖与营养物质相关性分析

在进行血糖传感器信号测试同时,取相同条件下的鲟鱼样本,进行了理化指标的测量。实验测量过程为每 8 h 进行一次,同时提取出相同时刻的血糖值,绘制关系如图 9 所示。可以看出,前 8 h 血糖值一直处于快速下降状态,这应是鱼类适应低温环境大量消耗血糖能量所致,但 8 h 后血糖开始上升,粗脂肪、肝糖元和蛋白质的含量处于下降状态,说明鲟鱼处于饥饿状态下,开始消耗体内储存的能量,之后血糖处于波动状态,但幅度不大,粗脂肪、肝糖元、蛋白质的质量分数一直下降,说明鲟鱼消耗体内储存能量保持血糖的动态平衡^[3]。

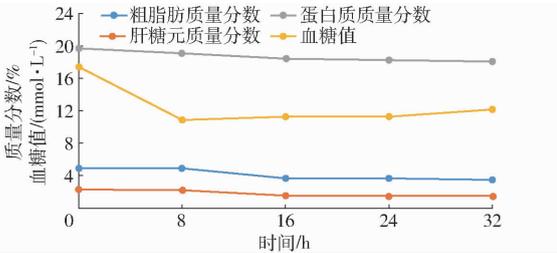


图 9 粗脂肪质量分数、肝糖元质量分数、蛋白质质量分数、血糖值曲线变化

Fig.9 Curves of crude fat, liver glycogen, protein and glucose

表 2 给出了粗脂肪质量分数、肝糖元质量分数、蛋白质质量分数、血糖值之间的相关性。可以看出,在无水保活过程中,血糖值与肝糖元质量分数、蛋白质质量分数的相关性都高于 0.5;粗脂肪质量分数的相关性可能与粗脂肪与血糖之间的转化过程难度较其他 2 种更高有关。

3.5 鲟鱼血糖传感信号预测模型构建

根据采集到的鲟鱼血糖变化数据,将其平均后的时间序列记为 $\{t_i, i = 1, 2, \dots, n\}$, t_i 表示传输的数据。

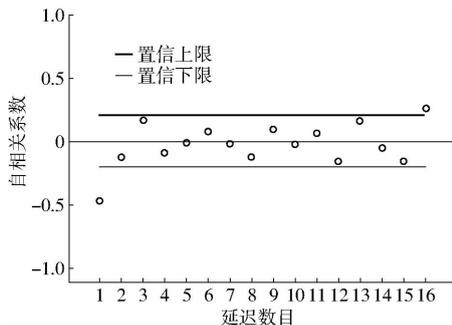


表 2 粗脂肪质量分数、肝糖元质量分数、蛋白质质量分数、血糖值相关系数

Tab.2 Correlation coefficient of crude fat, liver glycogen, protein and glucose

	粗脂肪质量分数	肝糖元质量分数	蛋白质质量分数	血糖值
粗脂肪质量分数	1			
肝糖元质量分数	0.997	1		
蛋白质质量分数	0.914	0.919	1	
血糖值	0.473	0.508	0.762	1

3.5.1 差分处理及相关系数估计

利用差分处理方法对序列处理如图 10 所示,二次差分后对应的相关系数分析如图 11 所示。

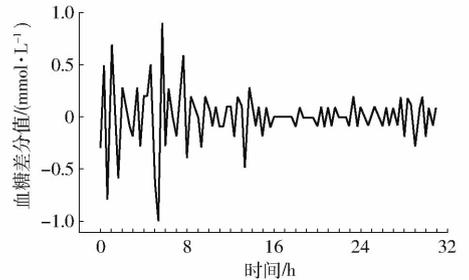


图 10 二次差分序列

Fig.10 Second difference sequence

3.5.2 模型识别

根据对 $\{\Delta t_i^2\}$ 的自相关系数和偏相关系数分析,其值都不存在严格的指数衰减或者含一定周期的振荡,含有拖尾的现象存在,由二阶差分后时序图分析中知道序列呈现典型的随机波动特征,宜采用 ARIMR 模型进行数据处理。

3.5.3 模型确定

ARIMR 模型的演算公式为

$$A(\beta)(1-\beta)^d X_t = B(\beta)\varepsilon_t \quad (3)$$

其中

$$A(\beta) = 1 - \sum_{i=1}^p a_i \beta^i$$

$$B(\beta) = 1 - \sum_{i=1}^q b_i \beta^i$$

式中 ε_t ——零均值白噪声

d ——差分的阶数

p ——自回归阶数

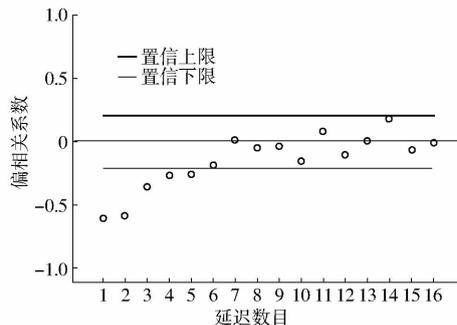


图 11 相关系数估计

Fig.11 Correlation coefficient estimation

q ——滑动平均阶数,取 2

a_i ——自回归系数 b_i ——滑动平均系数

根据上述分析,确定相应的 ARIMR 模型为 ARIMR(1,2,2),对序列 $\{\Delta t_i^2\}$ 进行拟合后,确定其他的参数后的模型为

$$\Delta t = 1.908\Delta t_{i-1} - 0.908\Delta t_{i-2} + \varepsilon_i - 1.817\varepsilon_{i-1} + 0.817\varepsilon_{i-2} \quad (4)$$

3.5.4 模型检验

为了进一步确定模型的有效性,对残差序列进行残差的白噪声检验和参数的显著性检验。结果如图 12 所示。自相关系数在 2 倍的标准差范围内,均未超过 95% 的置信度极限线,故可以认为残差序列是白噪声,即残差序列相互独立。

表 3 给出了每个参数的显著性检验(t 检验)结果,参数的检验值都小于 0.05,认为参数是显著的。综上,模型 ARIMR 是有效的。

3.5.5 模型对比分析

图 13 是 3 组鲟鱼样本分别利用曲线拟合、灰色模型、BP 神经网络以及 ARIMR 建立的预测图。整体看来,各模型基本可以预测鲟鱼血糖的变化趋势,

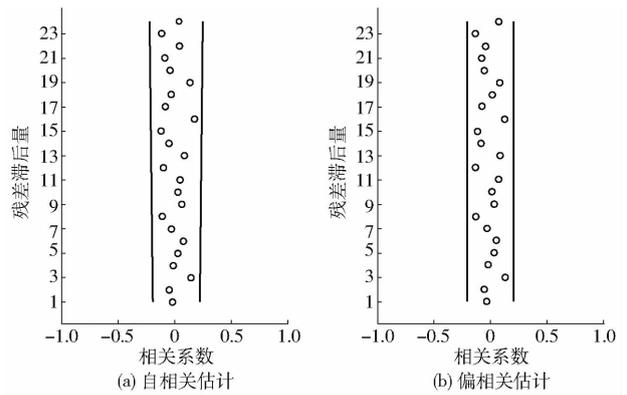


图 12 残差自相关估计与偏相关估计

Fig. 12 Residual autocorrelation estimation and partial correlation estimation

表 3 模型参数估计

Tab. 3 Model parameter estimation

	ARIMR 参数估计			
	估计值	标准误差	估计值与标准误差的比值	显著性
常数	0.036	0.013	2.769	0.007
自回归滞后 1 差分	0.908	0.376	2.415	0.018
滑动平均滞后 1	1.817	2.305	0.788	0.043
滑动平均滞后 2	-0.817	1.923	-0.425	0.167

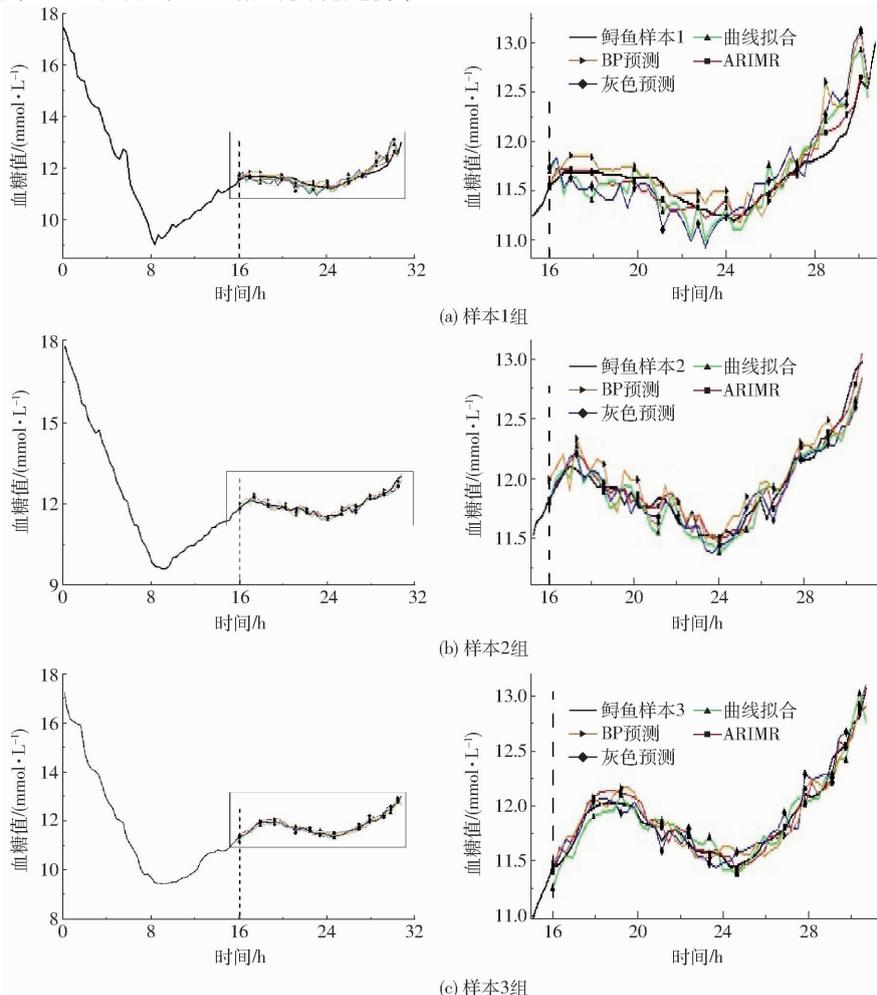


图 13 各鲟鱼样本组血糖预测曲线

Fig. 13 Predictive curves of blood glucose in each sturgeon sample group

但由于不同样本组的鲟鱼生命力不一样,采集到的数据波动也存在差异性,导致模型在数据的拟合程度和预测曲线的平滑度上差别较大。样本1组的预测中,各模型预测值与实际值拟合程度都低于2、3样本组,数据的波动较大,分析可能是样本组1中数据波动较样本组2、3大导致,在样本2组中原始数据波动较小,各模型的预测也更加平稳,拟合度也相对高。在对波动量的样本组预测时,ARIMR对无水保活环境带来的数据突变反应更快,模型预测结果与实际值更加接近,BP神经网络模型预测值偏离实际值程度较大,分析原因是BP神经网络的训练需要大量的训练数据作为基础,数据量越大模型的训练结果就越准确。说明原始数据的波动性和数量会对不同模型的预测效果产生不同的影响。

表4 模型平均绝对误差与平均相对误差

Tab.4 Model average absolute error and average relative error

模型	鲟鱼样本1组		鲟鱼样本2组		鲟鱼样本3组	
	平均绝对误差/ (mmol·L ⁻¹)	平均相对 误差/%	平均绝对误差/ (mmol·L ⁻¹)	平均相对 误差/%	平均绝对误差/ (mmol·L ⁻¹)	平均相对 误差/%
ARIMR	-0.033	-0.301	-0.001	-0.025	-0.009	-0.025
曲线拟合	-0.126	-1.095	-0.103	-0.895	-0.140	-1.226
灰色模型	-0.066	-0.589	-0.048	-0.416	-0.071	-0.621
BP神经网络	-0.060	-0.510	0.039	0.335	-0.046	-0.395

4 结论

(1)根据无水低温保活过程中鲟鱼保活要求与生理活动特点,采用可植入血糖传感器对鲟鱼眼球巩膜组织间液内血糖变化进行采集,并对该血糖传感器进行了测试实验。实验证明,该传感器能保持稳定,满足采集鲟鱼血糖信号变化的要求。

(2)鉴于可植入血糖传感器输出电流信号频率低、信号弱的特点,设计了可靠的信号调理,对信号进行整形和滤波。实验结果表明,处理后电路输出拟合

从表4各模型平均绝对误差与平均相对误差可以看出,ARIMR模型平均绝对误差最小,GM模型的平均绝对误差和相对误差都为最大。模型对比结果如下:模型预测值与实际值拟合程度由小到大依次为:ARIMR、曲线拟合、灰色模型、BP神经网络;模型预测平滑度由小到大依次为:曲线拟合、ARIMR、灰色模型、BP神经网络。

因此,从上述模型对比中发现ARIMR模型对于鲟鱼无水保活环境具有更好的预测效果,预测值与真实值之间的平均绝对误差为-0.014 mmol/L,平均相对误差为-0.117%;从表4发现,3组样本平均绝对误差分别是-0.033、-0.001、-0.009 mmol/L;平均相对误差为分别为-0.301%、-0.025%、-0.025%。

程度达到了0.9608,电路灵敏度为27.047 mV/nA,零点漂移量为722.83 mV,为处理鲟鱼无水低温保活过程血糖变化提供了可靠的数据来源。

(3)利用时序法建立了鲟鱼血糖信号预测模型,并与曲线拟合、灰色模型和BP神经网络的模型预测效果曲线图对比。结果表明,所构建的ARIMR模型对鲟鱼样本的预测值与真实值之间的平均绝对误差为-0.014 mmol/L,平均相对误差为-0.117%;平滑度也更具优势。通过可靠的预测模型获取的数据可以为鲟鱼无水低温保活过程分析环境变量的影响及控制提供参考。

参 考 文 献

- 1 SHEN Shuqi, WAN Yumei, SHEN Liang, et al. Effects of temperature, humidity and oxygen on keeping-alive without water of bay scallop *Argopecten irradians*[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2014, 29(5): 492-497.
- 2 刘骁,谢晶,黄硕琳. 鱼类保活运输的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2015(8): 255-260.
LIU Xiao, XIE Jing, HUANG Shuolin. Advances research of transportation to keep fish alive [J]. Food and Fermentation Industries, 2015(8): 255-260. (in Chinese)
- 3 米红波. 鲫鱼和中国对虾的无水保活及冰温保鲜技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
MI Hongbo. Study on the waterless preservation and controlled freezing-point storage of crucian carp and Chinese white shrimp[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- 4 刘骁,谢晶,杨茜,等. 无水保活条件下团头鲂生理应激及鱼肉品质的变化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 295-300.
LIU Xiao, XIE Jing, YANG Xi, et al. Change of physiological stress and flesh quality of *Megalobrychium amaamblycephala* during suitable waterless keep alive conditions[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(3): 295-300. (in Chinese)
- 5 何蓉,谢晶,苏辉,等. 不同温度对无水保活条件下的中华鳖肌肉营养成分及血液生化指标影响[J]. 食品科学, 2014,

- 35(6):194-199.
- HE Rong, XIE Jing, SU Hui, et al. Effect of temperature on muscle nutritional components and blood biochemical parameters of *Pelodiscus sinensis* alive without water[J]. Food Science,2014,35(6):194-199. (in Chinese)
- 6 MISHRA D B, ROY D, KUMAR V, et al. Effect of feeding different levels of Azollapinnata on blood biochemicals, hematology and immunocompetence traits of Chabro chicken[J]. Veterinary World,2016,9(2):192-198.
- 7 WU F, ZHU W H, LIU M M, et al. Effects of dietary vitamin A on growth performance, blood biochemical indices and body composition of juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) [J]. Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2016, 16(2):339-345.
- 8 ZHANG L Z, ZHU W, WANG Y, et al. Effects of dietary lipid levels on activities of digestive enzymes and blood biochemical parameters of *Siganus guttatus*[J]. Marine Fisheries,2014,36(2):170-176.
- 9 VADDIRAJU S, KASTELLORIZIOS M, LEGASSEY A, et al. Needle-implantable, wireless biosensor for continuous glucose monitoring [C]//2015 IEEE 12th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN),2015:1-5.
- 10 喻成侠. 面向人工胰脏的快速建模方法与血糖预测研究[D]. 杭州:浙江大学,2016.
YU Chengxia. Rapid modeling method for subcutaneous glucose concentration prediction for artificial artificial pancreas [D]. Hangzhou: Zhejiang University,2016. (in Chinese)
- 11 MAEDA E, KATAOKA M, HINO M, et al. Determination of human blood glucose levels using microchip electrophoresis[J]. Electrophoresis,2007,16(28):2927-2933.
- 12 赵瑞. 物联网中生物电信号采集终端的关键问题研究[D]. 天津:天津理工大学,2014.
ZHAO Rui. Research on biological signal acquisition terminal for internet of things [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology,2014. (in Chinese)
- 13 吕思潼,田润润,肖卫华. 基于 ARM 的动态血糖监测仪的设计[J]. 计算机测量与控制,2009,17(7):1454-1456.
LÜ Sitong, TIAN Runlan, XIAO Weihua. Design of dynamic glucose monitoring device based on ARM [J]. Computer Measurement & Control,2009,17(7):1454-1456. (in Chinese)
- 14 SHIN K S, JANGC I, KIM M J, et al. Development of novel implantable intraocular pressure sensors to enhance the performance in vivo tests[J]. Journal of Microelectro Mechanical Systems,2015,24(6):1896-1905.
- 15 DE H A, GETZLAFF S, GRICE D, et al. An NFC-enabled CMOS IC for a wireless fully implantable glucose sensor[J]. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics,2016,20(1):18-28.
- 16 BLACK R D. Recent advances in translational work on implantable sensors[J]. IEEE Sensors Journal,2011,12(11):3171-3182.
- 17 RENARD E. Implantable glucose sensors for diabetes monitoring[J]. Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies,2004,13(2):78-86.
- 18 YU B Z, LONG N, MOUSSY Y, et al. A long-term flexible minimally-invasive implantable glucose biosensor based on an epoxy-enhanced polyurethane membrane[J]. Biosensors & Bioelectronics,2006,12(21):2275-2282.
- 19 许永峰,贺玉成,周林. 血压脉搏振荡波的重重软件滤波提取算法[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(3):454-459.
XU Yongfeng, HE Yucheng, ZHOU Lin. Three-step software filtering algorithm for extracting blood pressure pulse shock wave [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation,2015,29(3):454-459. (in Chinese)
- 20 彭安杰,康显桂. 基于滤波残差多方向差分的中值滤波取证技术[J]. 计算机学报,2016,39(3):503-515.
PENG Anjie, KANG Xiangui. Median filtering forensics based on multi-directional difference of filtering residuals[J]. Chinese Journal of Computers,2016,39(3):503-515. (in Chinese)
- 21 DEPEREDA D, ROMERO-VIVO S, RICARTE B, et al. Real-time estimation of plasma insulin concentration from continuous glucose monitor measurements[J]. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering,2016,19(9):934-942.
- 22 刘明,水鹏朗. 基于功率中值和归一化采样协方差矩阵的自适应匹配滤波检测器[J]. 电子与信息学报,2015,37(6):1395-1401.
LIU Ming, SHUI Penglang. Adaptive matched filter detector based on power median and normalized sample covariance matrix [J]. Journal of Electronics & Information Technology,2015,37(6):1395-1401. (in Chinese)
- 23 BISWAS P, BHAUMIK S, PATIYAT I. Estimation of glucose and insulin concentration using nonlinear Gaussian filters[C]//1st IEEE International Conference on Control, Measurement and Instrumentation (CMI),2016:16-20.
- 24 张军. 灰色预测模型的改进及其应用[D]. 西安:西安理工大学,2008.
ZHANG Jun. Improvement of grey forecasting model and its application [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology,2008. (in Chinese)
- 25 栾培贤,肖建华,陈欣,等. 基于灰色模型和 ARMA 模型的猪瘟月新发生次数预测比较[J]. 农业工程学报,2011,27(12):223-226.
LUAN Peixian, XIAO Jianhua, CHEN Xin, et al. Comparison of grey model and ARMA model for predicting the number of monthly new outbreaks of CSF [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12):223-226. (in Chinese)
- 26 卫银银. 新型葡萄糖生物传感器的构筑、机理及应用研究[D]. 上海:华东师范大学,2011.
WEI Yinyin. Study on building, mechanism and application of glucose biosensor [D]. Shanghai: East China Normal University,

2011. (in Chinese)
- 27 陆军,张红涛,魏德云,等. 基于时间序列分析的雾滴叶面动态接触角预测与建模[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(2):80-86. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130216&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.016.
LU Jun, ZHANG Hongtao, WEI Deyu, et al. Dynamic contact angle forecasting and modeling for drop-leafinterface based on time series analysis[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(2):80-86. (in Chinese)
- 28 左志宇,毛罕平,张晓东,等. 基于时序分析法的温室温度预测模型[J]. 农业机械学报,2010,41(11):173-177,182.
ZUO Zhiyu, MAO Hanping, ZHANG Xiaodong, et al. Forecast model of greenhouse temperature based on time series method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(11):173-177,182. (in Chinese)
- 29 贾明亮. 低温胁迫对奥尼罗非鱼的生长、肌肉组成和血液生理生化指标的影响[D]. 湛江:广东海洋大学,2010.
- 30 何登菊,杨兴,姚俊杰,等. 低温保活运输对鲟鱼肌肉主要营养成分的影响[J]. 贵州农业科学,2010,38(6):157-158.
HE Dengju, YANG Xing, YAO Junjie, et al. Effect of low temperature transport on major nutritional components in muscle of acipensersturio[J]. Guizhou Agricultural Sciences,2010,38(6):157-158. (in Chinese)
- 31 赵进晓. 目标跟踪的曲线拟合预测模型及算法研究[D]. 上海:复旦大学,2013.
- 32 CRAVEN D, MCGINLEY B, KILMARTIN L, et al. Compressed sensing for bioelectric signals: a review[J]. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics,2015,19(2):529-540.
- 33 ZHANG F, CHEN S X, ZHANG H S, et al. Bioelectric signal detrending using smoothness prior approach[J]. Medical Engineering & Physics,2014,36(8):1007-1013.
- 34 WANG X Y, PANG G C. Amplification systems of weak interaction biosensors: applications and prospects[J]. Sensor Review, 2015,35(1):30-42.
- 35 DONG X Q, ZHANG D M, CHEN Y K, et al. Effects of antimicrobial peptides (AMPs) on blood biochemical parameters, antioxidase activity, and immune function in the common carp (*Cyprinus carpio*) [J]. Fish & Shellfish Immunology, 2015, 47(1): 429-434.
- 36 RIVERO C R, PUCHETA J A, BAUMGARTNER J S, et al. Short-series prediction with BEMA approach: application to short rainfall series[J]. IEEE Latin America Transactions,2016,14(8):3892-3899.
- 37 周雷刚,梁庭,高利聪. 红外传感器的微弱信号检测与处理[J]. 仪器技术与传感器,2014(12):5-6,21.
ZHOU L G, LIANG T, GAO L C. Weak signal detecting and processing of pyroelectric infrared sensor[J]. Instrument Technique and Sensor,2014(12):5-6,21. (in Chinese)