

鲟鱼片冷藏过程中品质变化规律与预测模型

王回忆 孔春丽 罗永康*

(中国农业大学 食品科学与营养工程学院,北京 100083)

摘要 测定冷藏条件下鲟鱼(*Acipenser sinensis*)片的感官分值、菌落总数的对数值($\lg[\text{菌落总数}/(\text{CFU}/\text{g})]$)、挥发性盐基氮的质量分数($w(\text{TVB-N})$)、鲜度指标(K)等品质指标,研究其品质变化规律,建立动力学和径向基神经网络组合模型。结果表明:随着贮藏时间的延长, $\lg[\text{菌落总数}/(\text{CFU}/\text{g})]$ 、 $w(\text{TVB-N})$ 、 K 均呈现明显的上升趋势,感官分值呈现下降趋势,各指标之间显著相关($P<0.05$)。动力学和径向基神经网络组合模型用于鲟鱼片冷藏过程中品质变化的预测,其预测值与试验值之间的相对误差的绝对值小于1%。组合模型充分利用了动力学模型的线性预测和径向基神经网络的非线性预测的优势,预测准确度较高。

关键词 鲟鱼;动力学模型;径向基神经网络;组合模型

中图分类号 S 984.1⁺1; TS 251 文章编号 1007-4333(2016)08-0098-07 文献标志码 A

Modeling quality changes in sturgeon (*Acipenser sinensis*) fillets during storage

WANG Hui-yi, KONG Chun-li, LUO Yong-kang*

(College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract To evaluate and predict the freshness of sturgeon (*Acipenser sinensis*) fillets during refrigerated storage, changes in quality [sensory assessment, logarithmic value of total aerobic counts ($\lg[\text{TAC}/(\text{CFU}/\text{g})]$), mass fraction of total volatile base nitrogen ($w(\text{TVB-N})$) and K value] were investigated and corresponding model for quality prediction were established. Results showed that $\lg[\text{TAC}/(\text{CFU}/\text{g})]$, $w(\text{TVB-N})$ and K value increased with the extension of refrigerated storage. There were high correlations among sensory assessment, $\lg[\text{TAC}/(\text{CFU}/\text{g})]$, $w(\text{TVB-N})$ and K value in all samples ($P<0.05$). The model combined with kinetic model and RBF neural network predicted changes of sensory assessment, $\lg[\text{TAC}/(\text{CFU}/\text{g})]$, K value and $w(\text{TVB-N})$ with the absolute value of relative error between predicted values and experimental values all within $\pm 1\%$. The model take advantages of both the Arrhenius model (for the linear part of prediction) and RBF neural network (to predict nonlinear part), which could significantly improves the accuracy of quality prediction of sturgeon fillets during refrigerated storage.

Keywords sturgeon; kinetic model; RBF neural network; combinatorial model

鲟鱼(*Acipenser sinensis*)属鲟形目、鲟科、鲟属的一种,为海栖性洄游鱼类,具有体形大、寿命长、生长快、病害少、适应性强、营养丰富、经济价值高等特点。我国是鲟鱼养殖大国,2013年淡水养殖鲟鱼产量64 652 t,同比上年增加9 468 t,占世界总量的80%以上^[1]。近年来,鲟鱼人工繁殖技术、苗种培育技术、不同模式成套养殖技术等系统研究日益成熟,

已经形成一套完整的鲟鱼养殖技术体系,工厂化养殖、网箱养殖、池塘养殖均能取得较好经济效益^[2]。随着养殖产业的不断发展,鲟鱼的加工和保鲜问题急需解决。国内外对鲟鱼加工方面的研究主要集中在其营养成分的分析^[3-4]和有效成分的提取^[5-6]等方面,关于鲟鱼加工及贮藏方面的研究未见报道。因此,开展鲟鱼贮藏过程中品质变化规律的研究,对鲟

收稿日期:2015-08-10

基金项目:北京市自然科学基金项目(6152017);国家自然科学基金项目(31471683)

第一作者:王回忆,硕士研究生,E-mail:hbmywhy@163.com

通讯作者:罗永康,教授,博士生导师,主要从事水产品贮藏与加工研究,E-mail:luoyongkang@263.net

鱼精深加工和科学贮藏具有重要意义。

动力学模型是水产品品质预测中最常用模型,但该模型对水产品低温贮藏后期的预测误差较大^[7-9]。径向基函数神经网络是一种高效的前馈人工神经网络,具有其他神经网络所不具有的最佳逼近性能和全局最优特性,并且结构简单,训练速度快。径向基函数神经网络被广泛应用于模式识别、非线性函数逼近等领域^[10],但在水产品品质预测中的应用尚未见报道。径向基神经网络应用于水产品品质预测可能为水产品生产加工流通过程提供更加有效的信息,有利于水产品品质的控制。

本研究拟对鲟鱼片冷藏条件下的感官分值、lg[菌落总数/(CFU/g)]、 ω (TVB-N)、K 等进行测定,探究鲟鱼片贮藏过程中品质变化规律,以期建立适于鲟鱼片 273~285 K 贮藏条件下的动力学模型与径向基神经网络相结合的品质预测模型。

1 材料与方 法

1.1 材料与预处理

鲜活鲟鱼,质量为 1.05 ± 0.05 kg,长 68.2 ± 5.0 cm,购于北京小月河农贸市场,活体运至试验室后击毙,去鳞、脏、头和尾,切成约 10 cm 长的鱼片,自来水清洗干净,沥水 5 min 后装入聚乙烯保鲜袋中,随机分为 4 组并分别贮藏于 273、277、281、285 K 温度条件下,其贮藏鱼片数分别为 33、30、27、24。每次试验从每组中随机选取 3 片鱼肉进行品质指标测定。

1.2 测定方法

1.2.1 感官评价

感官评价分为生鲜和水煮 2 种方式,生鲜鱼片以色泽、气味、组织、形态和肌肉弹性为检验指标,鱼块水煮后以气味、滋味和汤汁浑浊度为检验指标。各指标分为好、较好、一般、较差和差 5 个级别,对应感官分值为 5、4、3、2、1 分。以生鱼片和水煮鱼片共 7 项得分之和为鱼肉感官评定结果,35 分代表新鲜,15 分认定为腐败,评定人员由 10 人组成。具体参考朱思潮等^[11]的评价方法。

1.2.2 菌落总数的测定

参考 GB/T 4789.2—2010《食品卫生微生物学检验》操作。

1.2.3 挥发性盐基氮的测定

称取 10 g 绞碎的肉于烧杯中,加入蒸馏水 100 mL,电动搅拌机搅拌 30 min 后用中速滤纸过

滤,采用半微量蒸馏法^[12]进行测定。

1.2.4 K 值的测定

采用高效液相色谱法^[13]测定。

1.3 建模方法

1.3.1 动力学模型

食品在贮藏过程中,某些品质指标的变化可用反应速率方程描述^[14]:

$$-\frac{dC}{dt} = kC^n \quad (1)$$

式中: C 为品质指标; k 为速率常数; n 为反应级数; t 为贮藏时间。本研究采用 0、1、2 级来拟合鲟鱼片冷藏时的品质变化,以确定合适的反应级数。速率常数与温度的关系通常用阿伦尼乌斯方程表示^[15]:

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) \quad (2)$$

式中: k_0 为指前因子; E_A 为活化能, J/mol; T 为绝对温度, K; R 为气体常数, $8.3144 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。 k_0 和 E_A 都是与反应系统物质本性有关的经验常数。阿伦尼乌斯方程等式两边同时取对数,用 $\ln k$ 对热力学温度的倒数 ($1/T$) 进行线性拟合可以得到 k_0 和 E_A 的值。该方法建立的动力学模型可以外推出低温条件下的品质变化。

1.3.2 径向基神经网络

径向基神经网络是具有单隐层的 3 层前馈网络,包括输入层、隐藏层(径向基层)和输出层,它们之间通过权值和阈值进行连接。网络创建时将所有数据进行归一化处理为 $-1 \sim 1$ 。第 j 个隐藏层神经元的输出(Y_j)为:

$$Y_j = \exp\left[-\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n [\omega_{ji} - X_i]^2} \times \omega_{j0}\right]^2\right] = \exp\left[-0.8326^2 \times \left[\frac{\|\omega_{ji} - X_i\|}{C_i}\right]^2\right] \quad (3)$$

第 k 个输出神经元的输出(Y_k)为:

$$Y_k = \sum_{j=1}^N \omega_{kj} Y_j + \omega_{k0} = \sum_{j=1}^N \omega_{kj} \exp\left[-0.8326^2 \times \left[\frac{\|\omega_{ji} - X_i\|}{C_i}\right]^2\right] + \omega_{k0} \quad (4)$$

式中: X_i 为输入变量, N 为输出神经元的个数, n 为隐藏神经元的个数, ω_{kj} 为隐藏层到输出层神经元的权值, ω_{ji} 为输入层到隐藏层神经元的权值, $i, j = 0$ 时 ω_{kj} 和 ω_{ji} 即为阈值。 C_i 是径向基函数的分布密度,反映了输入对输出的响应宽度。本研究为达到最小的误差,选择了不同的分布密度(0.01、0.10、0.50、1.00、1.50、2.00)分别进行训练。随着训练的

进行,隐藏层神经元数将不断增加,直至均方误差接近于0或者达到最大神经元数时停止训练。

1.3.3 动力学模型与径向基神经网络的组合模型

将试验数据看成是由线性结构与非线性结构2部分。用动力学模型进行线性拟合,计算出相应的预测值和残差[残差=试验值-预测值],然后用径向基神经网络对残差进行非线性拟合。组合模型预测结果即为2模型预测结果之和。

1.4 模型验证

全部试验数据用于动力学模型的建立,并计算出相应残差。残差值用来建立径向基神经网络,随机选取70%用来建模、15%用来验证,15%用于测试。模型的拟合效果采用均方误差(MSE)、相关系数(R^2)进行评价。

$$MSE = \frac{\sum (y_{pre} - \bar{y}_{pre})^2}{n} \quad (5)$$

$$R^2 = \frac{SST - SSE}{SST} = 1 - \frac{\sum (y_{exp} - \hat{y})^2}{\sum (y_{exp} - \bar{y})^2} \quad (6)$$

式中: y_{exp} 为试验值, y_{pre} 为预测值, n 为试验数据点的个数,SST为试验值与其均值之差的平方和,SSE为预测值和试验值对应点的误差的平方和, \hat{y} 为预测值均值, \bar{y} 为试验值均值。MSE越小且 R^2 越大表明其拟合效果和拟合精度越理想。277 K条件下所有试验值、预测值、试验值与预测值之间的相对误差(R_e)用于直观的比较其预测效果,且当模型的相对误差小于10%认为其预测有效^[16]。

$$R_e = \frac{y_{pre} - y_{exp}}{y_{exp}} \times 100\% \quad (7)$$

1.5 统计分析方法

动力学分析的线性回归采用Excel 2013进行数据处理,而径向基神经网络的建立是在Matlab R2013b中完成。用SPSS 17.0软件进行方差分析,差异显著性水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与讨论

鱼体在微生物和自身内源酶的作用下容易发生感官、理化和微生物等方面的品质变化,导致其腐败变质^[17]。鲟鱼片冷藏过程中,lg[菌落总数/(CFU/g)]、挥发性盐基氮质量分数 w (TVB-N)、鲜度指标 K 均随贮藏时间延长呈现明显上升趋势,感官分值随贮藏时间延长逐渐降低,且各指标之间显著相关($P < 0.05$)(图1)。鲟鱼片感官分值的初值为35.00分,贮藏18 d(273 K)、10 d(277 K)、7 d

(281 K)、3 d(285 K)时分别降低为12.80、8.40、12.67和14.33分,低于不可接受分值(15.00分)(图1(a))。鲟鱼片的初始lg[菌落总数/(CFU/g)]为3.76,不同温度贮藏条件下的lg[菌落总数/(CFU/g)]都呈上升趋势($P < 0.05$),且上升速率随温度增加逐渐增大(图1(b))。鲟鱼片贮藏20 d(273 K)、6 d(277 K)、5 d(281 K)、3 d(285 K)时lg[菌落总数/(CFU/g)]分别达到7.99、7.27、7.00、7.88,超出了ICMSF^[18]提出的新鲜水产品lg[菌落总数/(CFU/g)]应低于7的限制。鲟鱼初始 w (TVB-N)为6.20 mg/100 g,随着贮藏时间的延长显著增加,且贮藏温度越高 w (TVB-N)上升越快。贮藏20 d(273 K)、10 d(277 K)、8 d(281 K)、5 d(285 K)时 w (TVB-N)分别达到23.33、25.01、19.60、20.72 mg/100 g(图1(c)),接近 w (TVB-N)的腐败标准(20 mg/100 g)^[19]。Saito等^[20]提出关于 K 作为鱼体鲜度指标的界定值,低于20%为一级鲜度,低于50%为二级鲜度,超过70%为腐败。273、277、281、285 K贮藏条件下的鲟鱼片能保持一级鲜度的时间分别为2、2、1、1 d,保持二级鲜度的时间分别为8、6、3、2 d,完全腐败的时间为14、8、6、4 d(图1(d))。

鲟鱼片不同贮藏温度下的品质变化动力学参数见表1,据不同温度条件下的 $R^2 > 0.9$ 且满足总和最大的原则,可知感官分值、lg[菌落总数/(CFU/g)]、 w (TVB-N)、 K 的变化分别符合0、1、2、0级动力学反应。将得到的反应速率常数代入阿伦尼乌斯方程进行线性拟合得到相应的活化能(E_A)和指前因子 K_0 。鲟鱼片的感官分值、lg[菌落总数/(CFU/g)]、 w (TVB-N)、 K 的活化能分别为:80 154.97、87 658.72、70 802.94、71 134.68 kJ/mol。指前因子分别为: -2.89×10^{15} 、 -2.25×10^{15} 、 -2.24×10^{11} 、 -1.77×10^{14} 。由此可以得到鲟鱼片冷藏过程中品质指标的动力学方程。

感官分值:

$$C - C_0 = -2.89 \times 10^{15} t \exp\left(\frac{-80154.97}{RT}\right) \quad (8)$$

lg(菌落总数/(CFU/g)):

$$\ln C - \ln C_0 = -2.25 \times 10^{15} t \exp\left(\frac{-87658.72}{RT}\right) \quad (9)$$

w (TVB-N):

$$\frac{1}{C_0} - \frac{1}{C} = -2.24 \times 10^{11} t \exp\left(\frac{-70802.94}{RT}\right) \quad (10)$$

K ：

$$C - C_0 = -1.77 \times 10^{14} t \exp\left(\frac{-71\ 134.68}{RT}\right) \quad (11)$$

式中： C 为鲟鱼片贮藏 t d 时的品质指标的值； C_0 为新鲜鲟鱼各品质指标的初始值； R 为摩尔气体常数， $8.314\ 4\ \text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

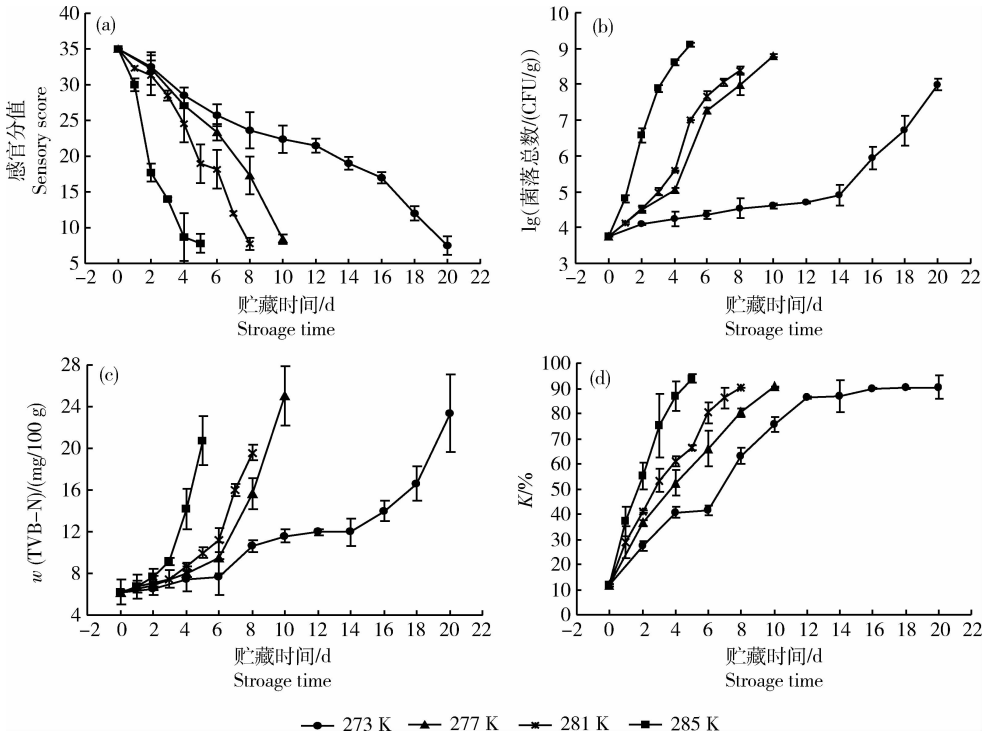


图 1 鲟鱼片冷藏过程中感官分值(a)、lg[菌落总数/(CFU/g)](b)、挥发性盐基氮质量分数 w (TVB-N)(c)和鲜度指标 K (d)的变化

Fig. 1 Changes in sensory scores (a), $\lg[\text{TAC}/(\text{CFU}/\text{g})]$ (b), w (TVB-N) (c) and K value (d) of sturgeon during storage

表 1 鲟鱼片不同贮藏温度贮藏条件下品质变化动力学模型参数

Table 1 Parameters of kinetics model of quality indicators in sturgeon at different temperatures

品质指标 Quality indicator	温度/K Temperature	0 级 Zero-order		1 级 First-order		2 级 Second-order		
		R^2	k	R^2	k	R^2	k	
		感官分值 Sensory scores		285	0.97	-1.23	0.87	-0.06
		281	0.97	-2.60	0.86	-0.13	0.74	0.01
		277	0.97	-3.43	0.89	-0.18	0.69	0.01
		273	0.93	-5.82	0.97	-0.33	0.71	0.00
lg(菌落总数/(CFU/g))		285	0.97	1.12	0.93	0.18	0.91	-0.01
		281	0.97	0.64	0.96	0.11	0.95	-0.02
		277	0.96	0.54	0.97	0.09	0.97	-0.02
		273	0.79	0.17	0.85	0.03	0.88	-0.03
w (TVB-N)		285	0.83	2.76	0.92	0.24	0.95	-0.02
		281	0.80	1.74	0.91	0.14	0.98	-0.01
		277	0.85	1.54	0.95	0.14	0.98	-0.01
		273	0.83	0.71	0.92	0.06	0.97	-0.01
K		285	0.97	16.60	0.82	0.38	0.54	0.00
		281	0.97	9.63	0.82	0.22	0.62	-0.01
		277	0.98	7.74	0.83	0.18	0.57	-0.01
		273	0.90	4.12	0.77	0.09	0.61	-0.01

鲟鱼片 277 K 贮藏条件下品质变化的试验值、动力学模型预测值以及二者之间的相对误差见表 2。动力学模型对感官分值(0~8 天)、菌落总数的对数值(0~4 天)、 ω (TVB-N) (0~6 天)的预测

效果较好,预测值和试验值之间的相对误差均低于 10%,此后贮藏过程中的预测相对误差大于 15%。动力学模型对 K 在整个贮藏过程中的预测相对误差大于 10%。

表 2 鲟鱼片 277 K 贮藏条件下品质变化试验值和动力学模型预测值

Table 2 Experimental and predicted values of kinetic model of indicators for sturgeon at 277 K

品质指标 Quality indicator		贮藏时间/d Storage time				
		2	4	6	8	10
感官分值 Sensory score	试验值	32.27	27.13	23.35	17.30	8.40
	预测值	30.56	26.13	21.69	17.25	12.82
	相对误差/%	-5.29	-3.70	-7.11	-0.27	52.58
lg[菌落总数/(CFU/g)]	试验值	4.50	5.03	7.27	7.99	8.80
	预测值	4.36	4.98	5.69	6.50	7.42
	相对误差/%	-3.06	-0.96	-21.75	-18.69	-15.69
ω (TVB-N)	试验值/(mg/100 g)	6.91	8.03	9.52	15.68	25.01
	预测值/(mg/100 g)	7.08	8.24	9.86	12.28	16.28
	相对误差/%	2.41	2.63	3.62	-21.66	-34.91
K	试验值/%	36.37	52.40	65.96	80.40	90.70
	预测值/%	25.18	38.84	52.50	66.16	79.82
	相对误差/%	-30.77	-25.88	-20.40	-17.71	-11.99

通过计算得出动力学模型预测值和试验值之间的残差,并将其作为径向基神经网络的输出值。通过对网络的训练,据不同的分布密度计算出对应的 MSE 和 R^2 (表 3),其均方误差最小为 0.000 6,且相

应的相关系数最大为 0.999 5,选定的径向基函数分布密度为 0.1,此时隐藏层神经元的个数为 30。此时完成了对径向基神经网络的创建,该网络是具有 $2 \times 30 \times 4$ 结构的三层前馈神经网络。

表 3 鲟鱼片不同分布密度下的
径向基神经网络参数

Table 3 MSE and R^2 of RBF-ANN with different spreads

分布密度 Spread	均方误差 MSE	相关系数 R^2
0.01	0.005 33	0.985 82
0.10	0.000 60	0.999 50
0.50	0.000 63	0.999 25
1.00	0.001 65	0.995 38
1.50	0.002 10	0.990 99
2.00	0.003 20	0.990 40

径向基神经网络创建后,应用于水产品冷藏条件下的品质变化的动力学预测残差的预测。动力学模型预测残差、径向基神经网络对残差的预测值及它们之间的相对误差(表 4),该模型对残差的预测的相对误差小于 10%,其预测效果较好。

组合模型的预测值是将动力学模型对品质指标的预测值与径向基神经网络对残差的预测值加和(表 5)。从预测结果看,组合模型对鲟鱼品质预测相对误差小于 1%,较单一动力学模型的预测效果好。从预测过程看,动力学模型用于线性部分的预测,而径向基神经网络用于非线性部分预测。通过对动力学模型和径向基神经网络的综合运用,发挥了这 2 种模型的长处,从而提高预测准确度。

表 4 鲟鱼片 277 K 贮藏条件下品质变化动力学模型的残差和神经网络对残差的预测值

Table 4 Absolute error of kinetic model and predicted values of radial basis function neural networks of indicators for sturgeon at 277 K

品质指标 Quality indicator		贮藏时间/d Storage time				
		2	4	6	8	10
感官分值 Sensory score	残差	1.71	1.00	1.66	0.05	-4.42
	残差预测值	1.71	1.00	1.66	0.05	-4.42
	相对误差/%	0.20	-0.33	0.00	7.36	0.07
lg[菌落总数/(CFU/g)]	残差	0.14	0.05	1.58	1.49	1.38
	残差预测值	0.14	0.05	1.58	1.49	1.38
	相对误差/%	1.70	3.48	-0.07	-0.23	-0.07
w (TVB-N)	残差	0.71	1.83	3.32	9.48	18.81
	残差预测值	0.71	1.83	3.32	9.48	18.81
	相对误差/%	0.07	0.06	0.05	0.02	0.01
K	残差	11.19	13.56	13.46	14.24	10.88
	残差预测值	11.19	13.56	13.46	14.24	10.88
	相对误差/%	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02

表 5 鲟鱼片 277 K 贮藏条件下品质变化试验值和组合模型的预测值

Table 5 Experimental and predicted values of combinatorial model of indicators for sturgeon at 277 K

品质指标 Quality indicator		贮藏时间/d Storage time				
		2	4	6	8	10
感官分值 Sensory score	试验值	32.27	27.13	23.35	17.30	8.40
	预测值	32.27	27.13	23.35	17.30	8.40
	相对误差/%	0.01	-0.01	0.00	0.02	-0.04
lg[菌落总数/(CFU/g)]	试验值	4.50	5.03	7.27	7.99	8.80
	预测值	4.50	5.03	7.27	7.99	8.80
	相对误差/%	0.05	0.03	-0.01	-0.04	-0.01
w (TVB-N)	试验值/(mg/100 g)	6.91	8.03	9.52	15.68	25.01
	预测值/(mg/100 g)	6.91	8.03	9.52	15.68	25.01
	相对误差/%	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01
K	试验值/%	36.37	52.40	65.96	80.40	90.70
	预测值/%	36.37	52.40	65.96	80.40	90.70
	相对误差/%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

3 结 论

鲟鱼片冷藏中感官分值、lg(菌落总数/(CFU/g))、 w (TVB-N)、K 随贮藏时间变化显著,各指标

之间显著相关($P < 0.05$)。感官分值、lg(菌落总数/(CFU/g))、 w (TVB-N)、K 分别符合 0、1、2、0 级动力学反应。单一动力学模型对贮藏前期的感官分值、lg(菌落总数/(CFU/g))、 w (TVB-N) 预测效

果较好,而对贮藏后期及 K 的预测出现较大偏差。径向神经网络对残差的预测效果较好,其相对误差低于 10%。组合模型充分发挥了动力学模型线性拟合和神经网络非线性拟合的优势,进一步提高了预测的准确度,将相对误差控制在 1% 以内。

参 考 文 献

- [1] 农业部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014
The Ministry of Agriculture Fishery and Fishery Administration. *China Fishery Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2014 (in Chinese)
- [2] 张润锋, 余翔, 万年春, 任华, 孙宏懋, 林亚秋, 蓝泽桥. 人工养殖鲟鱼生长与肌肉品质的研究进展[J]. 基因组学与应用生物学, 2014, 33(1): 215-221
Zhang R F, Yu X, Wan N C, Ren H, Sun H M, Lin Y Q, Lan Z Q. Review on growth and muscle quality of cultured sturgeons [J]. *Genomics and Applied Biology*, 2014, 33(1): 215-221 (in Chinese)
- [3] 柴毅, 孙丹丹, 危起伟. 1 龄人工养殖中华鲟含肉率及肌肉营养成分分析[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(18): 9549-9550, 9579
Chai Y, Sun D D, Wei Q W. Analysis on flesh rate and nutritive composition of musclein 1-year old artificially bred acipenser sinensis gray [J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2010, 38(18): 9549-9550, 9579 (in Chinese)
- [4] Song C, Zhuang P, Zhang L Z, Liu J, Luo G. Comparison of nutritive components in muscles between wild and farmed juveniles of Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) [J]. *Acta Zoologica Sinica*, 2007, 53(3): 502-510
- [5] 周叶, 赵婷, 冯伟伟, 李芸子, 但招陵, 刘治华, 仰榴青. 咔唑法测定中华鲟软骨中硫酸软骨素的含量[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(19): 11597-11598
Zhou Y, Zhao T, Feng W W, Li Y Z, Dan Z L, Liu Z H. Determination of the content of chondroitin sulfate from Chinese sturgeon cartilage by carbazole method [J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2011, 39(19): 11597-11598 (in Chinese)
- [6] 舒坤贤, 张继承, 袁帅, 谢永芳, 梁亦龙. 中华鲟硫酸软骨素提取工艺研究[J]. 食品工业科技, 2006, 27(3): 151-152, 155
Shu K X, Zhang J C, Yuan S, Xie Y F, Liang Y L. A method to extract chondroitin sulfate from the *Acipenser sinensis* gird cartilage was studied [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2006, 27(3): 151-152, 155 (in Chinese)
- [7] Bao Y L, Zhou Z Y, Lu H, Luo Y K, Shen H X. Modelling quality changes in Songpu mirror carp (*Cyprinus carpio*) fillets stored at chilled temperatures: Comparison between Arrhenius model and log-logistic model [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2013, 48(2): 387-393
- [8] Yao L, Luo Y K, Sun Y Y, Shen H X. Establishment of kinetic models based on electrical conductivity and freshness indicators for the forecasting of crucian carp (*Carassius carassius*) freshness [J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 107(2): 147-151
- [9] Liu X C, Jiang Y, Shen S, Luo Y K, Gao L. Comparison of Arrhenius model and artificial neuronal network for the quality prediction of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets during storage at different temperatures [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 60(1): 142-147
- [10] Moody J, Darken C J. *Fast Learning in Networks of Locally-Tuned Processing Units* [M]. Neural Computation, 1989
- [11] 朱思潮, 洪惠, 罗永康, 沈慧星, 余健. 冷藏条件下鲮鱼阻抗特性与鲜度的关系[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(2): 130-133
Zhu S C, Hong H, Luo Y K, Shen H X, Yu J. Effect of freshness of stored bighead carp (*Aristichthys nobilis*) on its impedance characteristics. *Journal of China Agricultural University*, 2012, 17(2): 130-133 (in Chinese)
- [12] 张丽娜, 罗永康, 李雪, 沈慧星. 草鱼鱼肉电导率与鲜度指标的相关性研究[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(4): 153-157
Zhang L N, Luo Y K, Li X, Shen H X. Research on relationship between electric conductivity and freshness indicators of grass carp [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(4): 153-157 (in Chinese)
- [13] Ryder J M. Determination of adenosine triphosphate and its breakdown products in fish muscle by high-performance liquid chromatography [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1985, 33(4): 678-680
- [14] Boekel M. Statistical aspects of kinetic modeling for food science problems [J]. *Journal of Food Science*, 1996, 61(3): 477-486
- [15] Ratkowsky D, Olley J, McMeekin T, Ball A. Relationship between temperature and growth rate of bacterial cultures [J]. *Journal of Bacteriology*, 1982, 149(1): 1-5
- [16] Kaymak-Ertekin F, Gedik A. Kinetic modelling of quality deterioration in onions during drying and storage [J]. *Journal of Food Engineering*, 2005, 68(4): 443-453
- [17] 张月美, 罗永康, 朱思潮, 包玉龙. 鱼体鲜度评价技术和方法的研究进展[J]. 中国渔业质量与标准, 2015, 5(3): 1-7
Zhang Y M, Luo Y K, Zhu S C, Bao Y L. Research progress on assessment techniques and methods for fish freshness [J]. *Chinese Fishery Quality and Standards*, 2015, 5(3): 1-7 (in Chinese)
- [18] ICMSF. *Sampling Plans for Fish and Shellfish* [M]. Toronto: University of Toronto Press, 1986
- [19] Kirk S, Sawyer R. *Pearson's Composition and Analysis of Foods* [M]. London: Longman Group Ltd, 1991
- [20] Saito T, Arai K, Matsuyoshi M. A new method for estimating the freshness of fish [J]. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, 1959, 24: 749-750