

基于自组织神经网络模型与质构特性的牛肉嫩度评定方法

王笑丹¹, 刘爱阳¹, 孙永海¹, 王莹², 韩云秀¹, 王洪美¹

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022; 2. 青岛农业大学食品科学与工程学院, 青岛 266109)

摘要: 为了实现对牛肉嫩度品质的快速无损检测和评价。该文选取 60 头牛的眼肌部位作为试验样本, 经在 75~80℃ 的水浴中加热并煮至肉的内部温度达到 70℃ 后取出, 冷却至室温 (20℃)。利用质构仪测得牛肉黏力、黏性、弹力、弹性长度、内聚性、弹性、胶着性和咀嚼性等质构特性参数, 并分析各参数与牛肉嫩度等级之间的相关性, 黏力和黏性与牛肉嫩度的相关性较低, 相关系数为 0.246 和 0.096; 弹力、弹性长度、内聚性、弹性、胶着性和咀嚼性与牛肉嫩度相关性较大, 且成负相关, 说明上述流变学参数值会随着牛肉嫩度等级的增大而下降, 相关系数为-0.92、-0.939、-0.771、-0.776、-0.815、-0.882。结合感官评定法构建 BP 网络模型、RBF 网络模型和自组织竞争神经网络模型, 用其预测牛肉嫩度等级, 3 种模型训练误差均为 1×10^{-6} 。另选取 20 头牛的背最长肌中间部位作为测试样本, 对 3 种网络模型进行比较分析。研究结果证明, 自组织竞争神经网络预测模型较为准确, 预测牛肉嫩度等级的准确率达到 90%, 说明此方法能够准确地对牛肉嫩度等级进行评定, 研究结果为未来牛肉嫩度评定方法提供参考。

关键词: 肉; 模型; 质构; 嫩度; 神经网络模型

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.036

中图分类号: TS251

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-18-0262-07

王笑丹, 刘爱阳, 孙永海, 王莹, 韩云秀, 王洪美. 基于自组织神经网络模型与质构特性的牛肉嫩度评定方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 262-268. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.036 <http://www.tcsae.org>
Wang Xiaodan, Liu Aiyang, Sun Yonghai, Wang Ying, Han Yunxiu, Wang Hongmei. Evaluation method of beef tenderness based on texture properties and self-organizing neural network model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(18): 262-268. (in Chinese with English abstract)
doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.036 <http://www.tcsae.org>

0 引言

牛肉含有丰富的蛋白质, 具有高蛋白、低脂肪、低胆固醇等特点, 尤其是氨基酸组成接近于人体需要, 并且受到人们的普遍欢迎。肉的嫩度评价是畜肉品质的一个重要方面, 它主要决定于肌肉组织各组分及肌肉内部的生物化学变化对各组分特性的改变。牛肉嫩度主要由肉中结缔组织含量、肌纤维的类型、肌浆蛋白含量及化学结构所决定。一般来说结缔组织含量愈低, 肌束中肌纤维数密度愈大, 肌纤维愈细, 肉质就愈细嫩^[1]。影响牛肉嫩度的因素很多, 包括牛肉本身的因素、屠宰前影响因素、屠宰后影响因素以及是否经过嫩化处理等^[2]。

目前, 国内外研究牛肉嫩度的评价方法主要有: 剪切力值法^[4]、多光谱图像纹理技术^[3,5]、机器视觉评价法^[6]、近红外光谱检测技术^[7]等。其中剪切力法, 即使用剪切仪检测牛肉嫩度, 这种方法对肉有破坏作用, 操作时间长, 不适合工厂在线生产中应用; 近红外光谱 (near infrared spectrum instrument, NIR) 及可见光下的机器视觉技术都被用于嫩度检测。然而, 据预测结果分析, 与实际结果存在较大差异, 处理速度也很缓慢; 高光谱技术最近成

为嫩度及肉品质检测的一个热点, 其结合检测样本的光谱与空间信息, 能获取较为全面的信息, 但其存在系统成本高、数据量大、处理时间长等缺点^[8]。

食品的质构特性是来源于食品结构的一组物理特性, 这些特性主要是通过触觉来感知, 与食品的形变、分解和在力作用下的流动有关, 可以由质量、时间和距离的作用来客观地衡量, 从而表明食品质构特性是很多感官感受到的综合信息。

本文利用质构仪对牛肉黏力、黏性、弹力、弹性长度、内聚性、弹性、胶着性和咀嚼性等质构特性参数进行测定, 并分析各参数与牛肉嫩度等级之间的相关性。构建基于 Matlab 的神经网络模型, 对牛肉嫩度等级进行客观、快速、准确的预测。

1 材料与方法

1.1 材料

试验牛 (吉林省长春市皓月清真肉业股份有限公司) 均为健康沃金黑牛, 体质量为 400~550 kg, 月龄为 30~36 月, 育肥 6 个月以上。屠宰前 24 h 禁食, 8 h 禁水; 按《牛肉等级标准》(NY/Y676-2003) 要求的操作规程屠宰, 屠宰后冷却 24 h, 取眼肌部位进行测定。

1.2 仪器与设备

CT3 质构分析仪 (美国 brookfield 公司), DH070A 干燥箱 (上海一恒科学仪器有限公司), 电子天平 (上海京诺埃尔电子设备有限公司, A1003—100 g/0.001 g),

收稿日期: 2015-07-01 修订日期: 2015-08-31

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (31101273); 国家自然科学基金面上项目 (31271861); 吉林省科技发展计划项目 (20140204035NY)。作者简介: 王笑丹, 女, 副教授。研究方向: 现代食品检测技术的研究与开发。长春 吉林大学生物与农业工程学院, 130022。Email: jxd@jlu.edu.cn

H 数显恒温水浴器（江苏金坛市金城国盛实验仪器厂）。

1.3 试验方法

1.3.1 样本制备

取 60 头试验牛眼肌部位作为试验样品，每个试验样品切成 21 小块（10 cm×10 cm×10 cm），试验样品不含肌间脂肪和结缔组织。

将样品在去离子水中洗净以去除表面污染物，分装入保鲜袋并封口，在 75-80℃的水浴中加热，待肉的内部

温度达到 70℃后取出，冷却至室温（20℃），每个样品准备 3 份以做平行试验^[8]。

1.3.2 感官评定

以感官评定法作为牛肉嫩度评定的验证方法^[9]，由经过培训的 20 位感官评定员组成，20 位感官评定员要求年龄在 20~25 岁之间且身体健康，无饥饿感和口渴感。每个感官评定员咀嚼的牛肉样品来自同一试验牛眼肌部位。按照表 1 给各样品打分，满分为 25 分。

表 1 牛肉嫩度感官评定表
Table 1 Table of sensory evaluation of beef tenderness

序号 Serial number	评定项目 Assessment items	评定标准 Evaluation criteria	牛肉样品感官评定分值 Sensory evaluation score of beef sample
1	是否容易被咬开	第一口咬开时所用的力度越大，分值越高	0~5 分
2	咬碎的难易程度	把肉嚼碎嚼烂所用的力度越大，分值越高	0~5 分
3	肉样品的粗糙程度	肉在口中和下咽时感觉越粗糙，分值越高	0~5 分
4	咀嚼后肉渣剩余多少	肉嚼碎后在口中的残留量越多越塞牙，分值越高	0~5 分
5	开始咀嚼到下咽时所需的时间	嚼碎后到下咽时所需的时间越长，分值越高	0~5 分

由表 1 得出牛肉样品感官评定总分。感官评定总分 <5 分，牛肉嫩度等级为 1，为级嫩；感官评定总分在 ≥5~10 分范围内，牛肉嫩度等级为 2，为稍嫩；感官评定总分在 ≥10~15 分范围内，牛肉嫩度等级为 3，为嫩；感官评定总分在 ≥15~20 分范围内，牛肉嫩度等级为 4，为稍老；感官评定总分 ≥20 分，牛肉嫩度等级为 5，为极老。由此得到每块牛肉样品嫩度等级。

1.3.3 仿真咀嚼装置

如果人直接对牛肉进行咀嚼，人为因素会对牛肉性质造成较大影响，所以该研究采取仿真咀嚼装置对牛肉进行仿真咀嚼。

本咀嚼装置产生上、下、左、右 4 个自由度的运动，这 4 个自由度分别由上、下颚完成。下颚由电机驱动，产生上、下运动；上颚通过曲柄滑块机构，同样由电机驱动，产生左、右运动，这样可避免 2 个连接机构之间产生影响。同时，选用转速 60~120 r/min，功率 36 W 的电机驱动，提供足够的咀嚼力与摩擦力。仿真磨齿及牙槽材料选择硬度高，不导电的亚克力板^[10]。

1.3.4 质构仪检测

将质构仪选择“TPA（texture profile analysis）”选项，设定触发点形变量为 0.02 N、测试速度为 0.06 cm/s。选择黏力、黏性、弹力、弹性长度、内聚性、弹性、胶着性和咀嚼性为测量指标。

选用二冲程循环质构剖面分析法，TA44 探头（圆柱直径为 4 mm），整个过程均保持该模式和保持时间-压力曲线。仪器参数设定如下：测前速度：2 mm/s；测试速度：5 mm/s；测后速度：5 mm/s；触发力：10 N；探头在样本中移动距离：7 mm；探头触碰样品后的保持时间：2 s。

将 21 块牛肉样本（取自同一试验牛眼肌部位）排列并标记，第 1 块牛肉咀嚼 1 次，第 2 块牛肉咀嚼 2 次，第 3 块咀嚼 3 次，以此类推，直至第 20 块牛肉咀嚼 20

次，在咀嚼完 20 次的时候，牛肉已经形成肉团可以吞咽，所以选择 20 次作为咀嚼结束次数，另外最后一块肉作为未咀嚼牛肉样本。每当仿真咀嚼装置按规定咀嚼次数咀嚼完一块牛肉样品，就立即将该牛肉样品进行质构仪的检测^[12]，并称其质量并记录，这样就可以得到牛肉在咀嚼过程中的质构变化过程。对 60 头试验牛眼肌进行质构检测，得到 60 组牛肉在咀嚼过程中黏力、黏性、弹力、弹性长度、内聚性、弹性、胶着性和咀嚼性的质构特性参数。

2 结果与分析

2.1 牛肉嫩度感官评定结果

对 60 组牛肉眼肌嫩度进行感官评定，每组肉样测 3 次取平均值，并根据分值求得牛肉嫩度等级^[13]，结果见表 3。

表 3 牛肉嫩度感官评定等级
Table 3 Beef tenderness grading by sensory evaluation

嫩度等级 Tenderness degree	样品数 Sample number
1	4
2	7
3	25
4	21
5	3

从表 3 可以看出，60 头试验牛中，嫩度为 1 级的有 4 头，嫩度为 2 级的有 7 头，嫩度为 5 级的有 3 头，其余都是嫩度为 3 级和 4 级。这说明，在试验过程中以及在市场上，极嫩和极老的牛比较少见，大多数的牛嫩度等级比较适中，具有很高的食用价值。

2.2 牛肉流变学特性参数检测结果分析

2.2.1 牛肉质构特性参数与牛肉嫩度相关性分析

将每类牛肉嫩度等级的牛肉样品的质构特性参数取

平均值^[14], 每类牛肉嫩度等级得到一组质构特性参数, 将牛肉嫩度等级与质构特性参数利用 SPSS Statistics 软件进行相关分析, 结果见表 4。

从表 4 得出, 牛肉的黏力和黏性与牛肉嫩度等级相关性较低; 弹力、弹性长度、内聚性、弹性、胶着性、

咀嚼性与牛肉嫩度的相关性较大, 且成负相关, 上述质构特性参数均随着牛肉嫩度等级的上升而减小。这种变化发生的原因是不同嫩度等级的牛肉肌原纤维蛋白的化学结构状态、肌肉纤维直径、结缔组织的含量及性质均不同^[15], 导致不同嫩度等级的牛肉质构参数产生差异。

表 4 牛肉质构特性参数与牛肉嫩度的相关系数
Table 4 Correlation coefficient of beef texture characteristic parameters and beef tenderness

	黏力 Viscous force	黏性 Stickiness	弹力 Elastic	弹性长度 Elastic force	内聚性 Cohesiveness	弹性 Resilience	胶着性 Gumminess	咀嚼性 Chewiness
牛肉嫩度 Beef tenderness	0.346	0.096	-0.920	-0.939	-0.771	-0.776	-0.815	-0.882

2.2.2 在仿真咀嚼过程中牛肉质构特性参数与牛肉嫩度结果分析

选择 60 头试验牛眼肌部位未咀嚼和咀嚼 20 次样品, 即未咀嚼和咀嚼结束时的质构特性参数数据, 利用 SPSS Statistics 软件求得均值与标准差, 结果如表 5。从表 5 可知, 在相同牛肉嫩度等级条件下, 牛肉质构特性参数会

随着咀嚼次数增加产生相应的变化。质构特性参数黏力、黏性、弹性长度、弹力、弹性、咀嚼性、胶着性、内聚性总体上随着咀嚼次数的增加而减少。

2.2.3 牛肉流变学特性参数与牛肉咀嚼次数变化

牛肉嫩度等级为 1、3、5 的质构特性参数随咀嚼次数的变化表 6~8。

表 5 咀嚼过程中各嫩度等级的牛肉质构参数变化
Table 5 Changes of texture parameters of beef during course of chewing

牛肉嫩度等级 Beef tender degree	黏力 Viscous force/N		黏性 Stickiness/(N·m ⁻²)		弹力 Elastic force/N		弹性长度 Length of elastic		内聚性 Cohesiveness		弹性 Springiness		胶着性 Gumminess		咀嚼性 Chewiness	
	未咀嚼	咀嚼 20 次	未咀嚼	咀嚼 20 次	未咀嚼	咀嚼 20 次	未咀嚼	咀嚼 20 次	未咀嚼	咀嚼 20 次	未咀嚼	咀嚼 20 次	未咀嚼	咀嚼 20 次	未咀嚼	咀嚼 20 次
1	0.12±0.00	0.08±0.00	0.02±0.03	0.02±0.00	0.25±0.01	0.15±0.00	6.80±0.02	5.50±0.07	0.36±0.03	0.36±0.01	2.47±0.05	1.89±0.10	2.10±0.14	0.32±0.01	6.53±0.09	0.79±0.05
2	0.10±0.00	0.11±0.05	0.08±0.00	0.08±0.00	0.24±0.02	0.13±0.00	6.68±0.07	5.17±0.05	0.33±0.01	0.36±0.01	2.32±0.16	2.22±0.16	2.18±0.78	0.22±0.06	6.30±0.05	0.57±0.05
3	0.07±0.00	0.04±0.00	0.11±0.00	0.06±0.01	0.22±0.01	0.12±0.02	6.40±0.12	4.97±0.06	0.30±0.01	0.28±0.08	2.11±0.07	1.98±0.18	2.19±0.05	0.14±0.01	6.29±0.14	0.42±0.18
4	0.05±0.00	0.05±0.00	0.13±0.00	0.04±0.00	0.20±0.00	0.13±0.01	6.29±0.09	5.04±0.08	0.25±0.00	0.23±0.02	2.09±0.14	2.00±0.52	2.50±0.02	0.18±0.01	5.30±0.02	0.41±0.13
5	0.05±0.00	0.05±0.00	0.09±0.01	0.03±0.01	0.20±0.07	0.04±0.01	5.87±0.09	3.50±0.12	0.15±0.07	0.14±0.07	2.02±0.16	1.48±0.04	3.01±0.07	0.07±0.02	15.67±0.70	0.30±0.11

表 6 牛肉嫩度等级为 1 时咀嚼过程中质构特性参数的变化
Table 6 Change of texture properties parameter during chewing process when beef tender degree is 1

咀嚼次数 Chewing times	黏力 Viscous force/N	黏性 Stickiness/(N·m ⁻²)	弹性长度 Length of elastic	弹力 Elastic force/N	弹性 Springiness	咀嚼性 Chewiness	胶着性 Gumminess	内聚性 Cohesiveness
0	0.26±0.05	0.25±0.07	12.45±0.93	0.36±0.21	8.32±7.89	6.50±1.64	1.99±1.02	0.28±0.14
2	0.16±0.03	0.10±0.03	9.48±4.30	0.22±0.04	8.21±7.15	3.30±1.79	1.09±0.52	0.35±0.18
4	0.10±0.07	0.10±0.00	9.36±0.89	0.22±0.00	8.05±7.56	3.00±1.31	0.89±0.21	0.40±0.00
6	0.10±0.03	0.10±0.00	8.94±3.11	0.17±0.06	3.21±2.19	2.40±1.41	0.36±0.10	0.44±0.12
8	0.10±0.00	0.05±0.01	8.86±4.38	0.10±0.05	2.59±1.01	0.70±0.50	0.34±0.12	0.48±0.19
10	0.07±0.05	0.05±0.00	8.76±3.59	0.15±0.08	2.07±0.12	0.45±0.23	0.23±0.20	0.48±0.02
12	0.07±0.04	0.05±0.00	7.72±6.03	0.14±0.00	2.30±1.48	0.45±0.07	0.20±0.00	0.48±0.02
14	0.05±0.00	—	7.46±5.27	0.13±0.03	2.62±1.09	0.20±0.11	0.13±0.12	0.48±0.22
16	0.05±0.01	—	6.89±4.77	0.08±0.03	2.14±0.26	0.30±0.10	0.13±0.04	0.51±0.12
18	0.05±0.00	0.05±0.01	5.79±3.21	0.06±0.01	1.95±0.74	0.35±0.21	0.10±0.01	0.62±0.06
20	0.05±0.00	0.05±0.00	4.41±3.53	0.05±0.02	1.98±1.00	0.20±0.00	0.15±0.10	0.65±0.09

表 7 牛肉嫩度等级为 3 时咀嚼过程中质构特性参数的变化
Table 7 Change of texture properties parameter during chewing process when beef tender degree is 3

咀嚼次数 Chewing times	黏力 Viscous force/N	黏性 Stickiness/(N·m ⁻²)	弹性长度 Length of the elastic	弹力 Elastic force/N	弹性 Springiness	咀嚼性 Chewiness	胶着性 Gumminess	内聚性 Cohesiveness
0	0.10±0.07	0.30±0.13	10.01±4.21	0.25±0.04	4.88±1.48	7.68±5.32	2.50±0.71	0.47±0.04
2	0.09±0.02	0.20±0.06	9.46±2.37	0.22±0.11	4.67±1.02	4.66±2.32	1.30±1.10	0.48±0.23
4	0.05±0.03	0.10±0.01	8.88±1.24	0.22±0.06	4.52±1.73	1.56±1.48	0.44±0.13	0.50±0.19
6	0.03±0.02	0.06±0.02	8.33±0.70	0.16±0.05	2.96±1.88	0.43±0.20	0.43±0.30	0.53±0.14
8	0.03±0.02	0.03±0.01	7.77±1.80	0.22±0.07	2.52±0.74	1.16±0.58	0.38±0.17	0.58±0.42
10	0.03±0.00	—	7.56±2.24	0.16±0.01	2.11±2.07	1.66±1.21	0.33±0.11	0.60±0.01
12	0.01±0.00	—	7.22±1.68	0.13±0.09	2.27±1.90	0.60±0.28	0.24±0.04	0.60±0.06
14	0.01±0.00	—	6.50±0.87	0.11±0.05	1.78±1.37	0.36±0.15	0.21±0.08	0.60±0.25
16	0.01±0.00	—	6.43±0.56	0.16±0.04	1.74±1.65	0.56±0.15	0.20±0.05	0.61±0.08
18	0.01±0.00	—	6.20±1.31	0.19±0.06	1.68±1.44	1.70±1.03	0.18±0.12	0.65±0.08
20	0.01±0.00	—	5.68±2.15	0.18±0.07	1.66±1.22	0.60±0.20	0.15±0.03	0.67±0.23

表 8 牛肉嫩度等级为 5 时咀嚼过程中质构特性参数的变化
Table 8 Change of texture properties parameter during chewing process when beef tender degree is 5

咀嚼次数 Chewing times	黏力 Viscous force/N	黏性 Stickiness/(N·m ⁻²)	弹性长度 Length of elastic	弹力 Elastic force/N	弹性 Springiness	咀嚼性 Chewiness	胶着性 Gumminess	内聚性 Cohesiveness
0	0.10±0.05	0.15±0.01	13.10±0.07	0.20±0.00	8.09±0.56	0.30±0.14	2.92±0.04	0.10±0.07
2	0.09±0.03	0.15±0.05	12.27±2.05	0.20±0.00	2.82±0.72	0.30±0.14	0.03±0.01	0.23±0.02
4	0.07±0.03	0.10±0.04	11.88±0.68	0.10±0.07	1.87±0.46	0.26±0.05	0.13±0.01	0.33±0.03
6	0.05±0.03	0.10±0.00	10.71±0.67	0.05±0.01	6.16±0.43	0.19±0.01	0.23±0.03	0.45±0.02
8	0.05±0.03	0.10±0.00	9.99±0.45	0.05±0.01	0.45±0.21	0.17±0.10	0.15±0.14	0.52±0.00
10	0.05±0.02	0.05±0.01	9.78±1.63	0.05±0.00	2.33±0.31	0.10±0.04	0.15±0.14	0.63±0.00
12	0.05±0.01	—	8.23±2.46	0.12±0.01	1.89±0.09	0.05±0.01	0.04±0.00	0.67±0.01
14	0.05±0.00	—	7.97±0.71	0.09±0.01	2.62±0.09	0.05±0.01	0.12±0.10	0.71±0.02
16	0.05±0.00	0.05±0.01	7.63±0.43	0.03±0.02	1.15±0.14	0.06±0.02	0.14±0.09	0.87±0.05
18	0.05±0.00	0.05±0.02	7.16±0.79	0.05±0.04	3.92±0.12	0.05±0.03	0.06±0.04	0.89±0.15
20	—	—	6.54±0.36	0.02±0.01	0.48±0.04	—	0.02±0.00	0.93±0.02

从表 6~8 可知，在牛肉嫩度等级相同时，黏力值在咀嚼后快速下降，而在咀嚼 4 次之后下降缓慢；黏性在经过咀嚼 2 次后，数值下降缓慢；弹性长度、弹力在咀嚼后均下降；而弹性在经过咀嚼 6 次后快速下降，这说明在经过 6 次咀嚼后，牛肉的复原及恢复能力减弱；咀嚼性在咀嚼 8 次后下降缓慢，说明牛肉在咀嚼 8 次后可以吞咽；在咀嚼过程中，牛肉胶着性数值下降，牛肉内聚性数值增高。

3 神经网络预测牛肉嫩度等级模型的构建与验证

以 40 头试验牛眼肌部位样品的质构特性参数及其对应的感官评定结果为训练样本，以其质构参数构建基于 Matlab 的 BP 网络模型、RBF 网络模型和自组织竞争神经网络模型^[16]，以 20 头试验牛眼肌部位样品的质构特性参数作为预测样本，选择最优神经网络模型对牛肉嫩度等级进行评定。

3.1 自组织竞争神经网络预测模型的构建

自组织神经网络（self organizing neural network）是无教师学习网络，它模拟人类根据过去经验自动适应无法预测的环境变化，因为没有教师信号，它通常利用竞争的原则进行网络的学习。它的学习过程是一个非监督的自组织过程，网络竞争层中各神经元竞争对输入层的响应机会，最后仅一个神经元成为竞争的胜利者，并对那些与获胜神经元有关的各连接权朝着更有利于它竞争的方

向调整，最后，获胜的神经元就表示对输入层的分类^[17]。自组织神经网络模型是由输入层和竞争层（即输出层）组成的多层树状网络结构模型^[18]。自组织神经网络参数设置为：输入层：8，输出层：5，训练样本：40，测试样本：20，允许误差： 1×10^{-6} 。利用 Matlab 构建自组织神经网络包括三步：①建立自组织神经网络②网络训练③网络仿真与输出。整个学习和分类过程如图 1 所示。

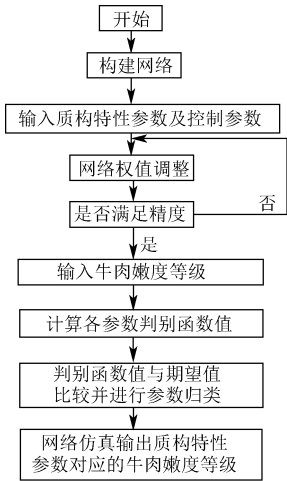


图 1 自组织神经网络模型分类流程图
Fig.1 Flow chart of self-organizing neural network model classification

3.2 BP 神经网络预测模型的构建

BP 神经网络^[19]是一种按误差逆传播算法训练的多层前馈网络,是应用最广泛的神经网络模型之一。BP 神经网络是由输入层、隐含层和输出层三部分组成^[20]。BP 网络参数设置为输入层:8;隐含层:17;输出层:5;最小训练速率:0.1;动态参数:0.7;Sigmoid 参数:0.9;允许误差:1×10⁻⁶;最大迭代次数:1000。

3.3 RBF 神经网络预测模型的构建

RBF 神经网络即径向基函数神经网络^[21],是一种性能良好的前向网络,可以任意精度逼近任意非线性函数,

具有全局逼近能力;在结构上具有输出—权值线性关系,分类能力好,训练方法快速易行,不存在局部最优问题。RBF 神经网络是一种具有三层结构的神经网络,即:输入层、隐含层和输出层^[22-23]。参数设置为输入层:8;隐含层:17;输出层:5;样本个数:60;允许误差:1×10⁻⁶;学习率:0.8;宽度参数:0.8;测试样本:20。

3.4 神经网络模型的验证

利用构建的 3 种神经网络模型随机评定另外 20 头牛肉眼肌部位嫩度,这 20 头牛肉样品的嫩度等级已由感官评定法评定,评定结果见表 9。

表 9 不同神经网络模型验证结果
Table 9 Verification result of different neural network model

编号 No.	牛肉嫩度等级评定 结果 Beef tenderness rating results	自组织竞争神经网络模型预测结果 Self-organizing competitive neural network model prediction results	自组织竞争神经网络模型判断结果 Judgment of self-organizing competitive neural network model	BP 神经网络模型 预测结果 BP neural network model prediction results	BP 神经网络模型 判断结果 Judgment of BP neural network model	RBF 神经网络模型 预测结果 RBF neural network model prediction results	RBF 神经网络模型 判断结果 Judgment of RBF neural network model
1	4	4	T	3	F	3	F
2	3	3	T	3	T	3	T
3	3	3	T	3	T	3	T
4	4	4	T	4	T	4	T
5	4	4	T	4	T	4	T
6	3	3	T	2	F	2	F
7	1	1	T	2	F	2	F
8	3	3	T	3	T	3	T
9	4	4	T	4	T	4	T
10	2	1	F	1	F	1	F
11	3	3	T	4	F	4	F
12	3	3	T	3	T	3	T
13	1	1	T	1	T	1	T
14	2	2	T	3	F	2	T
15	4	4	T	4	T	3	F
16	3	3	T	4	F	4	F
17	4	3	F	3	F	3	F
18	4	4	T	4	T	4	T
19	3	3	T	3	T	3	T
20	5	5	T	5	T	5	T
准确率/%		90		60		60	

注: T 为正确, F 为错误。
Note: T was ture, F was fault.

从表 9 得出,用自组织神经网络对牛肉嫩度等级进行训练与预测,10 号、17 号肉样预测错误,准确率为 90%。同时用 BP 网络对牛肉嫩度等级进行训练与预测,1 号、6 号、7 号、10 号、11 号、14 号、16 号、17 号肉样预测错误,准确率为 60%。用 RBF 网络进行预测,1 号、6 号、7 号、10 号、11 号、15 号、16 号、17 号肉样预测错误,准确率为 60%。可以得到,BP 网络、RBF 网络预测牛肉嫩度等级准确率均不如自组织神经网络的准确率高,所以选用自组织神经网络训练及预测牛肉嫩度等级。自组织神经网络作为一种无监督的神经网络模型,能在训练过程中对牛肉嫩度等级进行动态分类,快速简便,计算量小,并且自组织神经网络比 BP 神经网络、RBF 神经网络拥有更高的准确率,可以从一定程度上克服其他神经网络的缺点。

4 结 论

- 1) 牛肉部分质构特性参数值(如弹性长度、弹力、弹性、内聚性、胶着性)会随着牛肉嫩度等级的增大而下降。牛肉的黏力和黏性与牛肉嫩度等级相关性较小。质构特性参数黏力、黏性、弹性长度、弹力、弹性、咀嚼性、胶着性随着咀嚼次数的增加而降低,牛肉内聚性随着咀嚼次数增多而升高。
- 2) 应用自组织竞争神经网络模型对牛肉嫩度等级进行训练与预测,预测结果的准确率达到 90%,而 BP 网络、RBF 网络的准确率为 60%,均低于自组织竞争神经网络模型,故本研究选用自组织竞争神经网络模型对牛肉嫩度等级进行预测。

[参 考 文 献]

- [1] 周晓燕, 朱文政. 牛肉从加工至烹饪中嫩化工艺研究进展[J]. 食品研究与开发, 2011, 32(2): 175—178.
Zhou Xiaoyan, Zhu Wenzheng. Beef from processing to cooking process in tender technical study progress[J]. Food Research And Development, 2011, 32(2): 175—178. (in Chinese with English abstract)
- [2] 赵改名, 王艳玲, 田玮. 影响牛肉嫩度的因素及其机制[J]. 国外畜牧科技, 2000, 27(2): 35—40.
Zhao Gaiming, Wang Yanling, Tian Wei. Factors and Their Mechanism Influencing Beef Tenderness[J]. Foreign Animal Magazine, 2000, 27(2): 35—40. (in Chinese with English abstract)
- [3] 赵娟, 彭彦昆. 基于高光谱图像纹理特征的牛肉嫩度分布评价[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 279—286.
Zhao Juan, Peng Yankun. Distribution of beef tenderness grading based on texture features by hyperspectral image analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(7): 279—286. (in Chinese with English abstract)
- [4] 贾君. 优质牛肉组织结构及其仿生研究[D]. 吉林: 吉林大学生物与农业工程学院, 2006: 56—78.
Jia Jun. Research on Beef Texture of High Grade and Bionics[D]. Jilin: School of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, 2006: 56—78. (in Chinese with English abstract)
- [5] Sun X, Chen K J, Maddock-carlin K R, et al. Predicting beef tenderness using color and multispectral image texture features[J]. Meat Science, 2012, 92(4): 386—393.
- [6] 贾渊, 姬长英, 汤晓艳. 基于计算机视觉的牛肉分级技术综述[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 47—50.
Jia Yuan, Ji Changying, Tang Xiaoyan. Review of beef grading with computer vision[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(5): 47—50. (in Chinese with English abstract)
- [7] Elmasry G, Sun D W, Allen P. Near-infrared hyperspectral imaging for predicting colour, pH and tenderness of fresh beef[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 110(1): 127—140.
- [8] 王卫, 沈明霞, 彭增起, 等. 基于图像纹理特征的牛肉嫩度预测方法研究[J]. 食品科学, 2012, 33(15): 61—65.
Wang Wei, Shen Mingxia, Peng Zengqi, et al. Prediction of beef tenderness based on image texture features[J]. Food Science, 2012, 33(15): 61—65. (in Chinese with English abstract)
- [9] 孙哲浩, 赵谋明. 食品的质构特性与新产品开发[J]. 食品研究与开发, 2006, 27(2): 103—105.
Sun Zhehao, Zhao Mouming. Food texture and new product development[J]. Food research and development, 2006, 27(2): 103—105. (in Chinese with English abstract)
- [10] 孔保华, 马丽珍. 肉品科学与技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2003.
Kong Baohua, MA Lizhen. Meat science and technology[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2003.
- [11] 周光宏. 畜产品加工学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
Zhou Guanghong, Animal products processing[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2002.
- [12] 王笑丹, 孙永海, 樊向超, 等. 仿真技术检测牛肉嫩度方法研究[J]. 中国食品学报, 2012, 12(12): 185—190.
Wang Xiaodan, Sun Yonghai, Fan Xiangchao, et al. Method of simulation technique detecting beef tenderness[J]. Chinese Food Journal, 2012, 12(12): 185—190. (in Chinese with English abstract)
- [13] 刘兴余, 金邦荃, 詹巍, 等. 猪肉质构的仪器测定与感官评定之间的相关性分析[J]. 食品科学, 2007, 28(4): 245—247.
Liu Xingyu, Jin Bangquan, Zhan Wei, et al. Relationship analysis between instruments determination and sensory evaluation of pork texture[J]. Food Science, 2007, 28(4): 245—247. (in Chinese with English abstract)
- [14] 丁武, 寇莉萍, 张静, 等. 质构仪穿透法测定肉制品嫩度的研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 138—140.
Ding Wu, Kou Liping, Zhang Jing et al. Quantitative evaluation of meat tenderness by penetration method of Texture Analyzer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(10): 138—140. (in Chinese with English abstract)
- [15] 汤晓艳, 王敏, 钱永忠. 牛肉分级标准及分级技术发展概况综述[J]. 食品科学, 2011, 32(19): 188—193.
Tang Xianyan, Wang Min, Qian Yongzhong. An overview of standards and techniques for beef grading[J]. Food Science, 2011, 32(19): 188—193. (in Chinese with English abstract)
- [16] 孙芳, 吴民, 李培龙, 等. 简述评价牛肉品质的指标和测定方法[J]. 畜产品与安全, 2010(18): 34—36.
Sun Fang, Wu Min, Li Peilong, et al. Brief introduction and evaluation for the index and Method for determination of beef quality[J]. Livestock Products and Safety, 2010(18): 34—36. (in Chinese with English abstract)
- [17] Wheeler T L, Savell J W, Cross H R, et al. Effect of postmortem treatments on the tenderness of meat from Hereford, Brahman and Brahman-cross beef cattle[J]. Journal of Animal Science, 2006, 68(11): 56—58.
- [18] 汪海波, 张海臣, 段雪丽. 基于 MATLAB 的自组织竞争神经网络聚类研究[J]. 邢台职业技术学院学报, 2005(1): 45—47.
Wang Haibo, Zhang Haichen, Duan Xueli. Self organizing competitive neural network clustering research based on MATLAB[J]. Journal of Xingtai Vocational and Technical College, 2005(1): 45—47. (in Chinese with English abstract)
- [19] 思科技产品研发中心. MATLAB 6.5 辅助神经网络分析与设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 165—190.
R & D Center for technology products. Analysis and design of MATLAB 6.5 assistant neural network[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2004, 165—190.
- [20] 贾渊, 姬长英, 罗霞, 等. 用基于遗传算法的 BP 神经网络识别牛肉肌肉与脂肪[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 216—219.
Jia Yuan, Ji Changying, Luo Xia, et al. Classifying beef muscle and fat pixels using BP-GA neural network[J].

- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(11): 216–219. (in Chinese with English abstract)
- [21] 李聪. 基于 BP 神经网络的股票指数期货价格预测[D]. 青岛: 青岛大学, 2012: 1–47.
- Li Cong. Stock Index Futures Price Forecast Based on BP Neural Network[D]. Qingdao: Qingdao University, 2012: 1–47. (in Chinese with English abstract)
- [22] Paul W, Paul G, Glen F, et al. Maize kernel hardness classification by near infrared (NIR) hyperspectral imaging and multivariate data analysis[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2009, 653(2): 121–130.
- [23] 卫敏, 余乐安. 具有最优学习率的 RBF 神经网络及其应用[J]. *管理科学学报*, 2012, 15(4): 50–57.
- Wei Min, Yu Lean. A RBF neural network with optimum learning rates and its application[J]. *Journal of management science*, 2012, 15(4): 50–57. (in Chinese with English abstract)

Evaluation method of beef tenderness based on texture properties and self-organizing neural network model

Wang Xiaodan¹, Liu Aiyang¹, Sun Yonghai¹, Wang Ying², Han Yunxiu¹, Wang Hongmei¹

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;

2. College of Food Science and Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract: Tenderness is one of the important assessment indices of beef quality. Traditional assessment methods, such as the sensory evaluation method and the Warner-Bratzler shear force method, have artificial error at different degrees. One steak from the mid-region of each longissimus dorsi (LD) was collected from each of 60 cattle as the testing sample. The age of cattle (400–550 kg) was from 30 to 36 months, and the cattle were fattened for more than 6 months on the same farm. After starving for 24 h, the live cattle were weighed, showered, stunned, killed, and letting blood for 56 min. After electrical stimulation, the 4 limbs and head of each animal were cut off, and the body of cattle was split into halves, cooled at 4°C for 24 h, and then the carcasses were divided. The LDs were weighed, placed into plastic bags individually, vacuum-sealed, packed on ice, and transported to the laboratory. Each steak was cut into 10 cm×10 cm×10 cm samples, but the intermuscular fat and connective tissues were deleted. The samples were rinsed in water to remove surface contamination, then placed into plastic bags individually in a 75–80°C water bath, and cooked for 15 min after the internal temperature of meat reached 70°C. Then the samples were cooled to room temperature (20°C). The 20 evaluators were healthy and dentally tidy adults with the age from 20 to 25 years old, without thirst or hunger. Each evaluator chewed the samples from each steak. After cooking, the samples within an LD were divided into 3 groups so as to run the experiments in triplicate. The samples freshly chewed for 0–20 times were measured using a Brookfield CT3 texture analyzer (Brookfield Engineering Laboratories, INC. Middleboro, Massachusetts, USA). With a two-cycle texture profile analysis (TPA) model and a TA44 probe (cylinder diameter = 4 mm), the size of testing surface of each sample was 10 mm × 10 mm × 10 mm. A Hold Time-pressure and keeping model was used throughout. The instrument settings were: pre-test speed of 2 mm/s, test speed of 5 mm/s, posttest speed of 5 mm/s, trigger force of 10 g, distance of probe movement on the sample of 7 mm, and hold time after downward movement of the probe of 2 s. For those samples, viscous force, stickiness, elastic force, elastic length, cohesiveness, resilience, gumminess, chewiness and other texture properties were measured using the texture analyzer. The correlations were analyzed between the parameters and beef tenderness level. The main texture properties decreased with the increase of beef tenderness grade, and the texture properties value also showed a downward trend with chewing more times. Combined with the sensory evaluation method, the BP (back propagation) network model, the RBF (radical basis function) network model and the self-organizing competition network model were built, and all the training errors were 1×10^{-6} . Another steak from the mid-region of each LD collected from each of 20 cattle was selected as verification sample. Then the 3 network models were compared, and the self-organizing competition network model was the most accurate model with an accuracy rate of 90%, which showed that this method can accurately assess the level of beef tenderness.

Key words: meats; models; texture; tenderness; neural network model