

基于 BP 人工神经网络算法的苹果制干适宜性评价

张彪, 刘璇, 毕金峰, 吴昕烨, 金鑫, 李旋, 李潇

(中国农业科学院农产品加工研究所/农业农村部农产品加工重点实验室, 北京 100193)

摘要: 【目的】建立苹果原料制干适宜性评价模型, 实现基于苹果原料指标预测干制品品质的目标, 为苹果制干专用化原料的筛选提供方法依据, 为明确苹果干制品品质形成的基础物质提供数据支持。【方法】以来自 7 个不同主产区的 21 个主栽品种, 共 34 份苹果鲜果样本为研究对象, 运用多种数据处理方法建立苹果脆片品质综合评价模型与苹果原料制干适宜性评价模型。(1) 利用压差闪蒸干燥方法制备 34 份苹果鲜果的脆片样本, 测定苹果脆片 17 项品质指标, 采用因子分析进行降维并筛选得到苹果脆片品质评价核心指标, 运用层次分析法得到脆片核心指标权重值, 构建脆片品质综合评价模型并计算得到脆片综合评价得分。(2) 测定 34 份苹果鲜果样本 22 项品质指标, 与脆片核心指标进行相关性分析并筛选出与脆片品质相关的果实特征指标。选用 29 个样本以果实特征指标为输入, 对应脆片综合评价得分为输出, 利用误差反向传播 (Error Back Propagation, BP) 神经网络算法构建学习模型; 其余 5 个样本为验证样本, 评价学习模型的预测准确性。变换 3 组学习样本构建 3 个学习模型, 对比 3 个模型的预测准确性, 验证建模方法的合理性与稳定性。【结果】苹果脆片 L^* 值、脆度、膨化度、可滴定酸含量、可溶性糖含量和粗蛋白含量被确定为不同样本脆片品质综合评价的核心指标, 构建的苹果脆片品质综合评价模型为 $Y_{\text{综合得分}} = L^* \text{值} \times 0.3724 + \text{脆度} \times 0.2665 + \text{膨化度} \times 0.1583 + \text{可滴定酸含量} \times 0.0890 + \text{可溶性糖含量} \times 0.0569 + \text{粗蛋白含量} \times 0.0569$ 。34 个苹果鲜果样本制得的脆片综合得分范围为 0.2069—0.7933, 存在较大差异, 得分排名前 3 的苹果样本为‘辽宁华红’‘辽宁华金’和‘山东烟富 6 号’, 排名最后的苹果样本为‘陕西秦冠’。基于脆片核心指标与苹果果实品质指标相关性分析结果, 筛选出苹果果实的果形指数、果肉 a^* 值、pH、可滴定酸含量、Vc 含量、果核比例、粗蛋白含量、果肉 b^* 值、密度、可溶性固形物含量、粗纤维含量、总糖含量 12 项指标作为果实制干适宜性评价的特征指标。以果实特征指标值为输入层, 对应苹果脆片综合评分为输出层, 建立 BP 神经网络学习模型, 可实现苹果原料制干适宜性的定量预测。该方法建立的学习模型有较高的预测准确性与稳定性, 变换学习样本得到的 3 个学习模型的预测值与实际值相对误差均不超过 10%, 实际值与模型预测值线性拟合后决定系数 R^2 均大于 0.95。【结论】苹果制干适宜性可由果实的果形指数、果肉 a^* 值、pH、可滴定酸含量、Vc 含量、果核比例、粗蛋白含量、果肉 b^* 值、密度、可溶性固形物含量、粗纤维含量、总糖含量 12 项指标进行评价, 建立的适宜性评价模型可实现基于苹果原料指标定量预测其制干适宜性。

关键词: 苹果; 脆片; 干制; 适宜性评价; BP 神经网络

Suitability Evaluation of Apple for Chips-Processing Based on BP Artificial Neural Network

ZHANG Biao, LIU Xuan, BI JinFeng, WU XinYe, JIN Xin, LI Xuan, LI Xiao

(Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193)

Abstract: 【Objective】The aim of the paper was to establish suitability evaluation model for apple chips-processing from

收稿日期: 2018-05-29; 接受日期: 2018-09-18

基金项目: “十三五”国家重点研发计划 (2016YFD0400201-4)

联系方式: 张彪, E-mail: 15829685595@163.com. 通信作者刘璇, E-mail: liuxuancaas@126.com

different cultivars and to achieve the quality prediction of apple chips based on raw material indicators. 【Method】 34 fresh apple samples of 21 apple varieties from 7 major growing regions were selected as research objects. Factor analysis (FA) and analytic hierarchy process (AHP) were used to establish comprehensive quality evaluation model for chips, and Error Back Propagation (BP) artificial neural network was used to establish chips-processing suitability evaluation model for apple fruits. (1) Chips were prepared by instant controlled pressure drop (DIC, French for détente instantannée contrôlée, also known as explosion puffing) and 17 indicators were measured. The core indexes of chips were selected by FA and correlation analysis. The weights of the core indexes were determined by AHP, and then the comprehensive quality evaluation scores of chips were calculated. (2) 22 indicators of 34 fruit samples with different cultivars and regions were measured. Then the characteristic indicators of apple fruits related to chip qualities were screened out by correlation analysis between data groups of apple fruit indicators and chip core indexes. Learning model with input of fruit characteristic indicators and output of chip comprehensive evaluation scores was established by database of 29 apple samples. 5 apple samples were chosen as test samples to verify the prediction accuracy of the learning model. Modified leaning models from different sample groups were compared by prediction accuracy, which could be the evidence to evaluate rationality and stability for application of BP neural network in the present research. 【Result】 The results showed that L^* value, brittleness, puffing degree, titratable acid, soluble sugar and crude protein of apple chip were determined as the core indexes which the weights were 0.3724, 0.2665, 0.1583, 0.0890, 0.0569 and 0.0569, respectively. The comprehensive quality scores of chips from 34 apple samples ranged from 0.2069 to 0.7933, indicating significant variation. The top 3 apple samples with high scores were Liaoning Huahong, Liaoning Huajin and Shandong Yanfu 6, and the final ranking for Shanxi Qinguan. Correlation analysis was performed between core indexes of chips and quality indicators of apple raw materials to achieve characteristic indicators of apple fruits, including the fruit shape index, a^* value (pulp), pH value, titratable acid content, Vc content, proportion of core, protein content, b^* value (pulp), density, soluble solids content, crude fiber content and total sugar content. Therefore, learning models were established with input layer of the characteristic indicators value of fruit and output layer of the comprehensive quality score of apple chip, which could predict the comprehensive quality of apple chips from indicators of raw materials. Moreover, the model showed high prediction accuracy. The relative errors between the predicted and actual values of the three learning models groups did not exceed 10%, and the coefficients of determination R^2 of linear fitting were higher than 0.95. 【Conclusion】 Suitability evaluation of apple fruit for chips-processing could be evaluated by fruit shape index, a^* value (pulp), pH value, titratable acid content, Vc content, proportion of core, protein content, b^* value (pulp), density, soluble solids content, crude fiber content and total sugar content. The established model could be used to quantitatively predict apple fruit suitability for chips-processing based on the indicators of raw fruits.

Key words: apple; chips; dehydration; suitability evaluation; BP neural network

0 引言

【研究意义】苹果是中国产量最大的果品，至2016年，中国苹果产量和产值分别达到 4.39×10^7 t 和 2 000 亿元，占中国水果产量的 15.5%、农林产值的 4.7%^[1]。中国苹果加工产业发展迅猛，产品消费量年均增长 8.5%。目前浓缩汁已经成为苹果最主要的加工品和出口产品，但加工能力已趋于饱和^[2]。苹果脆片作为一种新型的休闲食品，可以补充苹果加工产业的空白，具有较好的发展前景。构建苹果原料制干适宜性评价模型不仅可以指导企业对苹果品种进行制干专用化筛选，还有利于明确苹果干制品品质形成的物质基础。【前人研究进展】果品原料品质是生产优质加工品的基础，因此，对于原料加工适宜性评价尤为重要。近年来，针对多种果蔬原料加工适宜性评价的研究已有许多报道。焦艺等^[3]采集了北京地区 7 个蟠

桃品种，制汁后测定多项指标，采用层次分析法赋予桃汁核心指标权重后得到 7 个品种蟠桃汁品质得分。郭春苗等^[4]测定了新疆 36 个品种绿色葡萄果实多项指标，采用灰色关联分析法筛选出 10 个适宜加工葡萄干的品种。沈月等^[5]收集了我国 20 个青辣椒主栽品种，分析了 20 余项果实指标差异，结合层次分析法与灰色关联度分析法得到了 20 个青辣椒品种鲜切加工适宜性排序。国外学者在研究原料加工适宜性方面偏重对制品的营养成分分析及感官评价。AĞÇAM 等^[6]测定了 3 个柑橘品种的多种营养指标，分析了其制汁适宜性。LAMUREANU 等^[7]收集了 11 个品种的桃原料，加工成桃泥后进行感官评价，对 11 个品种加工桃泥适宜性进行排序并分析影响桃泥口感的关键指标。FUJIWARA 等^[8]对不同成熟阶段日本梨果实制得的干果进行感官评价后排序，并测定相关果实指标，明确了日本梨适宜制干的成熟期。上述研究对不同果蔬品

种的原料品质或制品品质进行分析，仅可以评价所研究品种加工适宜性，无法预测未知样品的加工性能。原料加工适宜性评价应关联原料指标与制品品质，实现基于原料指标预测制品品质的目标，目前国内已有一些学者对此进行了初步的探索。聂继云等^[9]对苹果果汁品质指标与原料指标进行相关性分析，筛选出果实特征指标，运用判别分析对 122 个苹果品种制汁适宜性进行简单分类。张小燕等^[10]收集了 74 个品种的马铃薯原料，采用逐步回归分析的方法关联原料指标与制品品质，实现了基于马铃薯原料指标定量预测薯片综合品质，预测值与真实值的相关系数为 0.502。【本研究切入点】目前，对果蔬原料加工适宜性评价研究多集中在对原料品质或制品品质的单一评价，缺少基于原料指标预测加工制品品质的方法。现有的少数关联方法多利用线性模型定性或定量关联原料特性与制品品质，存在制品品质评价不合理、原料特征指标筛选不全面、模型关联性差等问题，预测准确率较低。

【拟解决的关键问题】利用因子分析筛选出脆片核心评价指标后，通过层次分析法确定脆片核心指标权重，

进而得到脆片样本的综合得分并以此作为苹果原料制干适宜性得分；为明确对脆片综合品质起主要作用的原料指标，本研究测定 34 个鲜果样本 22 项指标，与脆片核心指标进行相关性分析，筛选出与脆片核心指标显著相关的原料特征指标；为实现基于苹果果实指标客观、准确地预测脆片品质的目的，本研究以果实特征指标为输入，对应脆片综合评价得分为输出，利用 BP 神经网络算法构建学习模型，可客观、定量、准确地预测苹果原料制干适宜性。

1 材料与方法

试验于 2016 年 10 月至 2017 年 5 月在中国农业科学院农产品加工研究所进行。

1.1 试验原料

本研究中 34 个苹果样本均为主产区主栽品种，样品名称及采样地点、时间见表 1。苹果于 9 成熟时采摘，每个品种采集 3 株果树，每株从树冠中部外围随机采集 40 个果实。取样果实大小均一、无病虫害与机械损伤。果实采摘后于 4℃冷库贮藏备用。

表 1 苹果原料名称及采收地点、时间
Table 1 Names and collect place and time of apples

序号 No.	名称 Name	产地 Collect place	采收日期 Collect time	序号 No.	名称 Name	产地 Collect place	采收日期 Collect time
1	华红 Huahong	辽宁葫芦岛 Huludao, Liaoning	2016.10.15	18	新红星 Starkrimson	山东泰安 Taian, Shandong	2016.10.14
2	华金 Huajin	辽宁葫芦岛 Huludao, Liaoning	2016.10.15	19	金冠 Golden Delicious	山东淄博 Zibo, Shandong	2016.10.23
3	秋锦 Qiujin	辽宁葫芦岛 Huludao, Liaoning	2016.10.15	20	红星 Starking	山东淄博 Zibo, Shandong	2016.10.23
4	华月 Huayue	辽宁葫芦岛 Huludao, Liaoning	2016.10.15	21	富士 Fuji	山东淄博 Zibo, Shandong	2016.10.23
5	寒富 Hanfu	辽宁葫芦岛 Huludao, Liaoning	2016.10.15	22	红将军 Hongjiangjun	山东淄博 Zibo, Shandong	2016.10.23
6	乔纳金 Jonagold	辽宁葫芦岛 Huludao, Liaoning	2016.10.15	23	国光 Ralls	山东淄博 Zibo, Shandong	2016.10.23
7	长富 2 号 Changfu 2	辽宁葫芦岛 Huludao, Liaoning	2016.10.15	24	富士 Fuji	山东栖霞 Qixia, Shandong	2016.10.12
8	金冠 Golden Delicious	辽宁葫芦岛 Huludao, Liaoning	2016.10.15	25	烟富 6 号 Yanfu 6	山东青岛 Qingdao, Shandong	2016.10.11
9	新红星 Starkrimson	辽宁葫芦岛 Huludao, Liaoning	2016.10.15	26	富士 Fuji	甘肃平波 Pingbo, Gansu	2016.11.07
10	华富 Huafu	辽宁葫芦岛 Huludao, Liaoning	2016.10.15	27	金冠 Golden Delicious	甘肃平波 Pingbo, Gansu	2016.11.07
11	青苹 Granny Smith	陕西咸阳 Xianyang, Shaanxi	2016.10.22	28	花牛 Huanui	甘肃平波 Pingbo, Gansu	2016.11.07
12	瑞阳 Ruiyang	陕西咸阳 Xianyang, Shaanxi	2016.10.22	29	秦冠 Qinguan	甘肃平波 Pingbo, Gansu	2016.11.07
13	秦冠 Qinguan	陕西咸阳 Xianyang, Shaanxi	2016.10.22	30	半坡秦冠 Banpo Qinguan	山西运城 Yuncheng, Shanxi	2016.10.28
14	秦红 Qinhong	陕西咸阳 Xianyang, Shaanxi	2016.10.22	31	坡顶富士 Poding Fuji	山西运城 Yuncheng, Shanxi	2016.10.28
15	长密欧 Changmiou	陕西咸阳 Xianyang, Shaanxi	2016.10.22	32	半坡富士 Banpo Fuji	山西运城 Yuncheng, Shanxi	2016.10.28
16	富士 Fuji	陕西咸阳 Xianyang, Shaanxi	2016.10.22	33	富士 Fuji	河北 Hebei	2016.11.03
17	金冠 Golden Delicious	山东泰安 Taian, Shandong	2016.10.14	34	富士 Fuji	新疆 Xinjiang	2016.11.07

1.2 主要仪器与设备

DHG-9123A 型电热恒温鼓风箱(上海精宏设备有限公司)、QDPH1021 型果蔬变温压差膨化干燥设备(天津市勤德新材料科技有限公司)、FA-200 型切片机(广东南海市德丰电热设备厂)、Volscan Prodilr VSP 3000045 型食品体积自动测定仪(英国 Stable Micro System 公司)、D25LT 型色差仪(美国 Hunterlab 公司)、TA.XT 2i/50 型物性分析仪(英国 Stable Micro System 公司)、UV-1800 型紫外分光光度计(日本岛津公司)、WZB 45 数显折光仪(上海精密科学仪器有限公司)。

1.3 苹果脆片制备

苹果原料—清洗—去梗、去核、去皮—切片—预干燥—均湿—压差闪蒸干燥—成品。脆片于室温条件下(温度为 22—26℃, 湿度为 40%—60%)干燥器内贮藏备用, 待测定完脆片物理指标后, 打粉, 过 40 目筛, 装袋后冻存于-40℃冰箱, 以测定脆片化学指标。

脆片制备的工艺参数为:

(1) 切片: 切片厚度为 5 mm;

(2) 预干燥(热风干燥): 温度为 70℃, 烘至苹果片含水量约为 30%;

(3) 均湿: 预干燥后样品装于自封袋中于 4℃冰箱中均湿 12 h;

(4) 压差闪蒸干燥: 样品在温度为 95℃的膨化罐中停滞 10 min, 在压差为 0.09 MPa 的条件下闪蒸 1 次, 真空干燥温度为 60℃, 真空干燥时间为 3 h。

1.4 苹果果实和脆片品质指标测定方法

(1) 鲜果质量与体积: 鲜果质量与体积分别使用电子天平与食品体积自动测定仪测定, 单位分别为‘g’与‘cm³’。每个品种随机取 10 个果实, 分别测定取平均值。

(2) 鲜果密度: 鲜果密度为质量与体积的比值, 单位为 g·cm⁻³。

(3) 鲜果果形指数: 鲜果果形指数为果实纵径与横径的比值, 其中果实纵径与横径由游标卡尺测得。每个品种随机取 10 个果实, 分别测定后取平均值。

(4) 鲜果果核比例: 鲜果果核比例为果实最大横切面处果核直径与果实直径的比值, 其中果核直径与果实直径由游标卡尺测得。每个品种随机取 10 个果实, 分别测定后取平均值。

(5) 鲜果 pH: 鲜果打浆后使用 pH 计测得。每个品种随机取 3 个果实, 分别测定后取平均值。

(6) 颜色^[11]: 颜色采用色差仪(国际照明委员会(Commission Internationale de L'Eclairage, CIE)测色系统)测定。结果以 L^* 、 a^* 、 b^* 数值表示。

(7) 硬度、脆度^[12]: 采用英国 Stable Micro System 公司生产的 Ta.XT2i/50 型物性分析仪。参数设置如下: 探头为 0.25S 型, 测试距离为 3 mm, 刺入深度为 4 mm, 测试前 1 mm·s⁻¹, 测试中 1 mm·s⁻¹, 测试后 2 mm·s⁻¹, 触发力 10 N。产品断裂时所需的最大应力为该样品的硬度值, 数值越大表示硬度越大, 单位为 g; 探头与样品接触至样品断裂时探头行进距离为该样品的脆度值, 值越小代表产品越脆, 单位为 mm。每个品种随机取 5 片, 每片测两次, 分别测定后取平均值。

(8) 可滴定酸^[13]: 可滴定酸含量的测定参照 GB/T 12456—2008《食品中总酸的测定》。

(9) 可溶性固形物^[14]: 可溶性固形物含量的测定参照 NY/T 2637—2014《水果和蔬菜可溶性固形物含量的测定 折射仪法》。

(10) 含水率^[15]: 含水率的测定参照 GB 5009.3—2010《食品中水分的测定》。

(11) 粗纤维、蛋白质^[16-17]: 粗纤维、蛋白质的测定分别参照 GB/T 5009.10—2003《植物类食品中粗纤维的测定》和 GB 5009.5—2016《食品中蛋白质的测定》。

(12) V_C ^[18]: V_C 含量的测定参照 GB 5009.86—2016《食品安全国家标准食品中抗坏血酸的测定》(第一法)。

(13) 还原糖与总糖^[19]: 还原糖与总糖含量的测定参照斐林试剂法。

(14) 总酚含量^[20]: 总酚含量的测定参照福林酚法。

(15) 果胶含量^[21]: 果胶含量的测定参照 NY/T 2016—2011《水果及其制品中果胶含量的测定 分光光度法》。

(16) 可溶性糖含量^[22]: 可溶性糖含量的测定参照 NY/T 2742—2015《水果及制品可溶性糖的测定 3,5-二硝基水杨酸比色法》。

(17) 糖酸比: 糖酸比为可溶性糖与可滴定酸的比值。

(18) 脆片复水比^[23]: 称量苹果脆片质量, 记作 m_1 , 室温下按 1:50 (m:v) 加蒸馏水, 浸泡 30 min 后取出, 沥干, 称重, 记为 m_2 。复水比按公式计算。平行复水比 = $\frac{m_2}{m_1}$, 测定 3 次, 取平均值。

(19) 脆片出品率^[24]: 每个品种鲜果切片后随机选出 9 片进行编号, 分别称量其质量记作 m_1 , 称量后的苹果片进行变温压差干燥制成苹果脆片, 电子天平分别测定其质量记作 m_2 , 出品率按公式 (出品率 = $\frac{m_2}{m_1}$) 计算, 结果取平均值。

(20) 脆片膨化度^[25]: 每个品种鲜果切片后随机选出 5 片进行编号, 压差闪蒸前的厚度记作 H_1 , 压差闪蒸后的厚度记作 H_2 , 膨化度按公式计算, 膨化度 = $\frac{H_2}{H_1}$, 取平均值。

1.5 建模思路

原料加工适宜性评价实质上是基于原料的多指标对制品综合品质的评价, 即多个描述不同方面且量纲不同的原料指标转化为无量纲的相对评价价值, 并且综合这些评价价值对制品综合品质做出定性或定量评价的方法^[26]。因此, 对苹果原料进行制干适宜性评价, 要解决的主要问题为评价脆片综合品质, 筛选与脆片品质相关的原料特征指标, 构建原料特征指标与脆片综合品质关联模型。为评价脆片综合品质, 本研究测定 34 个脆片样本 17 项品质指标, 利用因子分析筛选出核心指标, 运用层次分析法确定核心指标权重, 建立脆片品质综合评价模型, 进而得到脆片综合得分; 为筛选原料特征指标, 测定 34 个苹果鲜果样本 22 项指标, 将其与脆片核心指标进行相关性分析, 筛选出显著相关的原料指标作为特征指标; 为构建原料特征指标与脆片综合品质关联模型, 本研究选用 29 个苹果样本采用 BP 神经网络算法构建学习模型, 其中输入层为果实特征指标, 输出层为脆片品质综合得分, 剩余 5 个样本为验证样本, 评价学习模型的预测准确性。为优化建模样本同时验证建模方法的稳定性, 变换 3 组学习样本 (29 个) 构建 3 个学习模型, 对比三个模型的预测准确性。若预测准确率均在合理范围内, 则说明该建模方法合理、稳定。

1.6 数据分析方法

采用 SPSS 22.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 软件进行描述性分析、主成分分析、相关性分析, 采用 RapidMiner 7.5 软件进行 BP 神经网络建模。

2 结果

2.1 苹果果实和脆片品质指标水平分析

34 个品种苹果果实样本 22 项指标测定值如表 2 所示, 果实及脆片样本品质指标均值、变幅、标准差、

变异系数如表 3 所示。对于不同苹果果实样本, 22 项品质指标变异程度不同, 变异范围为 2.85%—122.83% (绝对值)。其中密度、果形指数、果肉 L^* 值、果肉 b^* 值、pH 和含水率 5 项指标的变异系数均小于 10%, 说明离散程度较小; 其余 17 项指标变异系数均较大, 说明不同苹果果实样本品质指标差异较大, 果皮 a^* 值和果肉 a^* 值两项指标变异系数分别高达 100.12% 和 122.83%, 数据离散程度大, 各个样本间指标测定值差异大。不同果实样本果皮 a^* 值差异大与试验选用果皮颜色有接近全红 (如红星) 和全绿 (如青苹) 的品种有关, 果肉 a^* 值差异大则与不同果实样本褐变速率不同有关。

对于不同苹果脆片样本, 17 项品质指标变异范围为 7.03%—51.58%。其中, 脆片 L^* 值、 b^* 值、可溶性固形物含量、可溶性糖含量和膨化度 5 项指标的离散程度小, 变异系数均小于 10%; 其余 12 项品质指标变异系数均较大, 数据离散程度大, 说明采用压差闪蒸制得的苹果脆片品质由于品种和产地不同存在较大差异。

2.2 苹果脆片核心指标的筛选

对脆片 17 项指标进行因子分析, 结果见表 4。由表 4 可知, 前 6 个因子的特征值大于 1, 累计方差贡献率为 77.402%。因子 1 主要综合了可滴定酸和糖酸比的信息, 两者表现出极显著相关性 ($R=-0.849$), 且可滴定酸的权重值更高, 因此筛选可滴定酸作为因子 1 的代表性指标。因子 2 主要综合了 b^* 值、脆度和总酚的信息, 其中脆度与总酚含量显著相关 ($R=0.426$), 与 b^* 值极显著相关 ($R=-0.472$), 且脆度是衡量苹果脆片加工品质的重要感官指标, 因此筛选脆度作为因子 2 的代表性指标。因子 4 主要综合了 L^* 值、 a^* 值的信息, L^* 值代表明暗程度, a^* 值代表红绿程度, 均体现脆片色泽品质, 并表现出极显著相关性 ($R=-0.865$), 此处筛选权重值较高的 L^* 值作为因子 4 的代表性指标。同时, 因子 3、因子 5 和因子 6 中膨化度、可溶性糖和粗蛋白的权重值明显高于其他指标, 因此分别筛选膨化度、可溶性糖和粗蛋白作为因子 3、因子 5 和因子 6 的代表性指标。综上, 17 项品质指标中筛选出可滴定酸、脆度、膨化度、 L^* 值、可溶性糖和粗蛋白作为不同品种脆片品质评价的核心指标。

2.3 苹果脆片综合品质评价模型的建立

根据筛选得到的 6 项核心指标对脆片综合品质的重要程度, 采用 1—9 标度法建立 Y—P 判断矩阵 (表 5),

表 3 苹果果实和脆片品质指标水平分析

Table 3 Analysis of apple fruit and chips quality indexes

指标		均值	变幅	标准差	变异系数
Index		Mean	Range	Standard deviation	CV (%)
果实 Fruit	X ₁ 质量 Weight (g)	217.64	102.33—330.28	47.48	21.82
	X ₂ 体积 Volume (cm ³)	265.85	120.00—395.00	57.33	21.57
	X ₃ 密度 Density (g·cm ⁻³)	0.82	0.77—0.86	0.03	3.42
	X ₄ 果形指数 Shape index	0.89	0.80—0.96	0.04	4.30
	X ₅ 果核比例 Proportion of core	0.27	0.19—0.34	0.04	13.75
	X ₆ L*值（皮） L* value (peel)	43.93	27.24—60.9	7.09	16.14
	X ₇ a*值（皮） a* value (peel)	8.18	-9.74—18.36	8.19	100.12
	X ₈ b*值（皮） b* value (peel)	14.84	6.48—24.96	4.46	30.05
	X ₉ L*值（肉） L* value (pulp)	64.79	60.69—68.51	1.85	2.85
	X ₁₀ a*值（肉） a* value (pulp)	-1.18	-4.87—1.31	1.45	122.83
	X ₁₁ b*值（肉） b* value (pulp)	20.85	14.24—23.42	1.61	7.71
	X ₁₂ 果皮硬度 Hardness of peel (g)	8.01	4.98—12.48	1.53	19.11
	X ₁₃ 果肉硬度 Hardness of pulp (g)	2.46	1.44—3.24	0.46	18.72
	X ₁₄ pH	3.72	2.96—4.51	0.29	7.68
	X ₁₅ 可滴定酸 Titratable acid (%)	0.31	0.15—0.66	0.10	34.22
	X ₁₆ 可溶性固形物 Soluble solid (%)	12.76	9.30—15.50	1.46	11.45
	X ₁₇ 含水率 Moisture	0.86	0.82—0.90	0.02	2.14
	X ₁₈ 粗纤维 Crude fiber (%)	1.11	0.80—1.85	0.23	20.73
	X ₁₉ 粗蛋白 Crude protein (%)	0.32	0.15—0.58	0.08	25.19
	X ₂₀ V _C (mg/100 g)	2.46	0.80—7.60	1.33	54.16
	X ₂₁ 还原糖 Reducing sugar (%)	8.85	6.80—11.10	1.21	13.71
	X ₂₂ 总糖 Total sugar (%)	11.30	8.20—14.70	1.84	16.32
脆片 Chips	L*值 L* value	69.96	58.93—84.79	6.51	9.31
	a*值 a* value	12.82	5.51—18.70	2.88	22.46
	b*值 b* value	31.57	24.50—37.81	2.87	9.09
	硬度 Hardness (g)	10.56	6.38—23.93	3.29	31.16
	脆度 Crispness (mm)	0.95	0.50—2.41	0.44	46.32
	可溶性固形物 Soluble solid (%)	83.17	68.00—95.00	6.87	8.26
	可滴定酸 Titratable acid (%)	1.28	0.54—2.93	0.49	38.28
	总酚 Total phenol (mg·g ⁻¹)	6.03	0.60—16.07	3.11	51.58
	果胶 Pectin (g·kg ⁻¹)	24.40	14.54—42.58	5.81	23.81
	可溶性糖 Soluble sugar (%)	73.26	58.68—85.12	6.04	8.24
	糖酸比 Sugar-acid ratio	65.50	26.57—151.31	26.07	39.80
	粗蛋白 Crude protein (%)	1.95	0.54—4.25	0.78	40.00
	粗纤维 Crude fat (%)	4.34	2.92—6.36	0.75	17.28
	复水比 Rehydration ratio	3.48	2.57—4.80	0.52	14.94
	出品率 Output ratio (%)	14.32	10.14—18.65	2.08	14.53
	水分含量 Moisture (%)	6.30	2.94—8.70	1.64	26.03
	膨化度 Puffing degree	1.28	1.10—1.42	0.09	7.03

表 4 脆片指标旋转成分矩阵

Table 4 Rotating component matrix of chips indexes

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
<i>L</i> *值 <i>L</i> * value	0.005	0.071	0.025	0.977	0.023	0.070
<i>a</i> *值 <i>a</i> * value	0.090	0.290	0.012	-0.915	0.031	-0.033
<i>b</i> *值 <i>b</i> * value	0.111	0.783	-0.222	-0.064	0.023	-0.191
硬度 Hardness	0.665	-0.396	-0.188	0.005	0.256	0.034
脆度 Crispness	0.045	-0.738	-0.368	-0.033	0.191	0.170
可溶性固形物 Soluble solid	0.031	0.308	-0.658	0.202	0.424	-0.161
可滴定酸 Titratable acid	0.947	0.031	0.070	-0.030	0.077	0.053
总酚 Total phenol	-0.315	0.729	0.022	-0.223	0.049	0.059
果胶 Pectin	0.644	-0.120	-0.006	0.110	-0.252	0.143
可溶性糖 Soluble sugar	-0.234	0.027	0.060	-0.017	0.835	-0.055
糖酸比 Sugar-acid ratio	-0.904	0.044	-0.025	0.128	0.231	0.030
粗蛋白 Crude protein	0.069	-0.347	0.084	0.030	-0.040	0.814
粗纤维 Crude fiber	-0.092	0.210	0.192	-0.020	-0.676	0.396
复水比 Rehydration ratio	-0.100	0.184	0.651	-0.147	-0.017	0.432
出品率 Output ratio	-0.106	-0.032	-0.072	-0.142	0.438	-0.725
水分含量 Moisture	0.203	-0.153	-0.326	-0.007	0.180	0.142
膨化度 Puffing degree	0.107	0.115	0.896	0.165	0.078	-0.007
特征值 Eigen value (λ)	3.453	3.009	2.351	1.737	1.580	1.028
累计方差贡献率	20.313	38.016	51.844	62.061	71.356	77.402
Cumulative variance contribution (%)						

PC1—PC6 分别表示第 1 至第 6 个主因子 PC1-PC6 represent the first to the sixth main factors, respectively

表 5 判断矩阵 Y—P

Table 5 Judgment matrix Y-P

Y	P1	P2	P3	P4	P5	P6	权重 Weight
P1	1	2	3	4	5	5	0.3724
P2	1/2	1	3	3	4	4	0.2665
P3	1/3	1/3	1	3	3	3	0.1583
P4	1/4	1/3	1/3	1	2	2	0.0890
P5	1/5	1/4	1/3	1/2	1	1	0.0569
P6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	1	0.0569

Y 代表脆片综合品质，P 代表脆片核心指标，P1—P6 分别表示脆片的 *L**值、脆度、膨化度、可滴定酸、可溶性糖和粗蛋白

Y represents the comprehensive quality of chips and P represents the core indexes of chips. P1-P6 represent the *L** value, crispness, puffing degree, titratable acid, soluble sugar and crude protein of chips, respectively

计算其一致性比率（consistency ratio，CR）为 0.03，小于 0.1，认为判断矩阵一致性可接受。对矩阵特征向量归一化处理后得到脆片核心指标 *L**值、脆度、膨化度、可滴定酸、可溶性糖和粗蛋白的权重分别为 0.3724、0.2665、0.1583、0.0890、0.0569 和 0.0569，因此，苹果脆片品质综合评价模型可表示为 $Y = 0.3724L^* + 0.2665C + 0.1583P + 0.0890TA + 0.0569S + 0.0569P$

$=L^*值 \times 0.3724 + 脆度 \times 0.2665 + 膨化度 \times 0.1583 + 可滴定酸含量 \times 0.0890 + 可溶性糖含量 \times 0.0569 + 粗蛋白含量 \times 0.0569$ 。

由于脆片核心指标量纲不同，为消除量纲的影响，计算脆片品质综合得分时需对 6 项核心指标进行标准化处理。其中脆度值越大脆片脆度越小，因此作为负

向指标（成本型指标）；其余核心指标值越大脆片品质越好，因此均为正向指标（效益型指标）。各指标计算公式如下：

成本型指标=
$$\frac{\max X_{ij} - X_{ij}}{\max X_{ij} - \min X_{ij}}$$

效益性指标=
$$\frac{X_{ij} - \min X_{ij}}{\max X_{ij} - \min X_{ij}}$$

表 6 脆片综合品质排序与得分

Table 6 Rank and score of the comprehensive quality of chips

名称	排名	得分	名称	排名	得分
Name	Rank	Score	Name	Rank	Score
辽宁华红 Liaoning Huahong	1	0.7933	河北富士 Hebei Fuji	18	0.5051
辽宁华金 Liaoning Huajin	2	0.7408	山西半坡秦冠 Shanxi Banpo Qinguan	19	0.5021
山东烟富 6 号 Shandong Yanfu 6	3	0.7285	山东新红星 Shandong Starkrimson	20	0.4981
陕西青苹 Shaanxi Granny Smith	4	0.7018	甘肃花牛 Gansu Huaniu	21	0.4952
陕西瑞阳 Shaanxi Ruiyang	5	0.7010	辽宁秋锦 Liaoning Qiujin	22	0.4844
山西半坡富士 Shanxi Banpo Fuji	6	0.6816	山东红星 Shandong Starking	23	0.4601
辽宁华月 Liaoning Huayue	7	0.6713	辽宁新红星 Liaoning Starkrimson	24	0.4537
辽宁金冠 Liaoning Golden Delicious	8	0.6681	辽宁寒富 Liaoning Hanfu	25	0.4507
辽宁乔纳金 Liaoning Jonagold	9	0.6528	甘肃富士 Gansu Fuji	26	0.4482
山东富士（淄博）Shandong Fuji (Zibo)	10	0.6403	辽宁华富 Liaoning Huaifu	27	0.4327
新疆富士 Xinjiang Fuji	11	0.6190	甘肃秦冠 Gansu Qinguan	28	0.4071
甘肃金冠 Gansu Golden Delicious	12	0.6055	陕西秦红 Shaanxi Qinhong	29	0.3871
山东金冠（泰安）Shandong Golden Delicious (Taian)	13	0.5870	山东富士（栖霞）Shandong Fuji (Qixia)	30	0.3709
陕西长密欧 Shaanxi Changmiou	14	0.5679	山东金冠（淄博）Shandong Golden Delicious (Zibo)	31	0.3526
陕西富士 Shaanxi Fuji	15	0.5259	山东国光 Shandong Ralls	32	0.3524
山东红将军 Shandong Hongjiangjun	16	0.5069	辽宁长富 2 号 Liaoning Changfu 2	33	0.3281
山西坡顶富士 Shanxi Poding Fuji	17	0.5059	陕西秦冠 Shanxi Qinguan	34	0.2069

2.4 苹果制干适宜性评价模型的构建

对苹果脆片核心指标与苹果果实品质指标进行相关性分析，结果如表 7 所示。由表 7 可知，脆片 L^* 值与果实可滴定酸含量和 pH 极显著相关，与果肉 a^* 值、果形指数和 V_C 含量显著相关；脆片脆度与果核比例和粗蛋白含量显著相关；脆片膨化度与各项果实指标无显著相关性，可能与其变异系数小，各品种间测量值差异不大有关；脆片可滴定酸含量与果实果核比例和果肉 b^* 值极显著相关；脆片可溶性糖含量与果实密度极显著相关，与果实可溶性固形物含量、粗纤维含量显著相关；脆片粗蛋白含量与果实总糖含量显著相关。综上可以得到果形指数、果肉 a^* 值、pH、可滴定酸含量、 V_C 含量、果核比例、粗蛋白含量、果肉

其中 X_{ij} 指第 i 个样本第 j 个指标的原始测定值。

根据构建的苹果脆片品质综合评价模型，计算 34 个苹果脆片样本品质综合得分，并对其进行排名，结果见表 6。由表 6 可知，34 个苹果脆片样本综合得分范围为 0.2069—0.7933，差异较大，品质排名前 3 的苹果品种为‘辽宁华红’‘辽宁华金’和‘山东烟富 6 号’，品质排名最后的为‘陕西秦冠’。

b^* 值、密度、可溶性固形物含量、粗纤维含量、总糖含量 12 项指标可作为与苹果脆片综合品质相关的果实特征指标。

通过训练样本建立映射关系用于预测研究是人工神经网络的重要用途之一^[27]。34 个苹果样本中筛选出 29 个样本作为学习样本进行神经网络学习模型构建，剩余 5 个样本作为预测样本验证模型准确性，其中 BP 神经网络学习模型结构如图 1 所示。由图 1 可知，该模型包含输入层、隐含层和输出层 3 层，其中模型输入为苹果果实果形指数、果肉 a^* 值、pH 等 12 项果实特征指标值，因此有 12 个神经元。模型输出为苹果果实对应的脆片综合得分，因此输出层神经元有 1 个。隐含层神经元在 BP 神经网络中扮演特征检

验算子的角色，起到决定性作用，一般按经验公式估算节点数^[28]，本研究中模型最优隐含层数由RapidMiner软件自动生成，层数为8个。其余各训练参数选择如下：最大循环次数1 000，学习率0.3，动量因子0.2，误差值0.01。

本研究从34个苹果样本中随机筛选29个样本建立学习模型，剩余5个样本进行制干适宜性得分预测。为评价模型预测准确性及建模方法稳定性，变换29个学习样本构建了3个学习模型，其预测结果如表8所示。由表8可知，3个学习模型共15个验证样本脆片预测得分与实际得分相对误差均小于10%，最小相对误差仅为0.62%，说明BP神经网络模型预测效果较好。将脆片实际得分与神经网络预测得分进行回归分析，以脆片实际得分作为横坐标，模型预测值作为纵坐标进行线性拟合，3组预测结果的决定系数 R^2 分别为0.9536、0.9822、0.9676（图2），预测值与

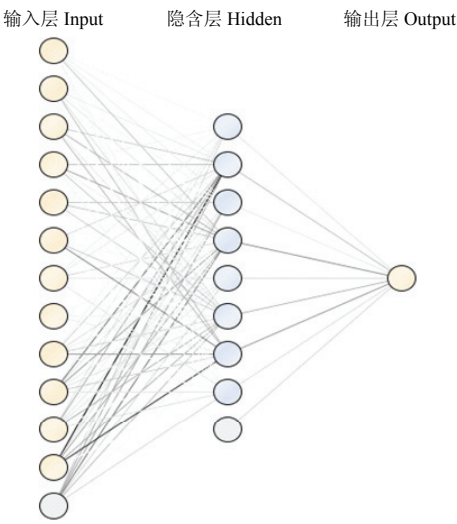


图 1 BP 神经网络结构图
Fig. 1 Structure diagram of BP neural network

表 7 原料指标与脆片核心指标相关性分析

Table 7 Analysis of correlation between indicators of raw material and core indexes of chips

	<i>L</i> *值 <i>L</i> * Value	脆度 Crispness	膨化度 Puffing degree	可滴定酸 Titratable acid	可溶性糖 Soluble sugar	粗蛋白 Crude protein
质量 Weight	-0.005	-0.186	0.013	0.139	0.191	-0.054
体积 Volume	-0.003	-0.187	-0.005	0.184	0.115	-0.010
密度 Density	-0.053	-0.013	0.115	-0.266	0.450**	-0.334
果形指数 Shape index	0.390*	-0.272	0.136	0.006	-0.268	-0.005
果核比例 Proportion of core	-0.082	-0.365*	0.183	-0.572**	0.232	-0.295
<i>L</i> *值（皮） <i>L</i> * value (peel)	0.239	-0.005	0.198	0.003	-0.200	-0.041
<i>a</i> *值（皮） <i>a</i> * value (peel)	-0.273	-0.071	-0.194	-0.238	0.285	-0.252
<i>b</i> *值（皮） <i>b</i> *value (peel)	0.293	0.024	0.181	0.090	-0.271	0.034
<i>L</i> *值（肉） <i>L</i> * value (pulp)	0.305	0.101	0.117	0.210	-0.189	0.076
<i>a</i> *值（肉） <i>a</i> * value (pulp)	-0.428*	-0.080	-0.142	-0.317	0.160	-0.155
<i>b</i> *值（肉） <i>b</i> * value (pulp)	-0.177	0.033	-0.107	-0.521**	-0.160	-0.007
果皮硬度 Hardness of peel	-0.319	-0.034	-0.020	-0.098	0.180	-0.097
果肉硬度 Hardness of pulp	-0.191	0.019	-0.105	-0.147	0.267	-0.284
pH	-0.527**	0.314	-0.229	-0.167	-0.046	0.010
可滴定酸 Titratable acid	0.554**	-0.192	0.235	0.089	-0.134	0.111
可溶性固形物 Soluble solid	0.148	-0.024	0.089	-0.102	0.347*	-0.336
含水率 Moisture	-0.068	-0.239	0.109	0.249	-0.259	0.192
粗纤维 Crude fiber	-0.212	0.073	-0.044	-0.267	0.347*	-0.057
粗蛋白 Crude protein	0.185	0.352*	-0.143	0.247	-0.109	-0.056
V _C	0.361*	0.115	0.284	0.234	0.006	0.007
还原糖 Reducing sugar	-0.145	-0.036	0.054	-0.051	0.204	-0.180
总糖 Total sugar	0.022	-0.085	0.220	0.178	0.176	-0.363*

表 8 基于 BP 神经网络算法苹果制干适宜性得分预测结果

Table 8 Prediction result of chips-processing suitability evaluation model based on BP neural network

学习模型	验证样本	实际得分	预测得分	相对误差
Learning model	Validation sample	Actual score	Predicted score	Relative error (%)
1	辽宁金冠 Liaoning Golden Delicious	0.6681	0.6590	-1.35
	陕西富士 Shaanxi Fuji	0.5259	0.4808	-8.58
	山西坡顶富士 Shanxi Poding Fuji	0.5059	0.5235	3.48
	甘肃秦冠 Gansu Qinguan	0.4071	0.4146	1.84
	山东金冠（淄博） Zibo Golden Delicious	0.3526	0.3761	6.68
2	陕西瑞洋 Shaanxi Ruiyang	0.7010	0.7480	6.71
	山东金冠（泰安） Taian Golden Delicious	0.5870	0.5906	0.62
	甘肃秦冠 Gansu Qinguan	0.4071	0.4146	1.84
	山西半坡秦冠 Shanxi Banpo Qinguan	0.5021	0.5513	9.78
	山东金冠（淄博） Zibo Golden Delicious	0.3526	0.3761	6.68
3	辽宁华月 Liaoning Huayue	0.6713	0.6885	2.57
	山东国光（淄博） Zibo Ralls	0.5069	0.5149	1.58
	甘肃金冠 Gansu Golden Delicious	0.6055	0.6291	3.89
	陕西秦红 Shaanxi Qin hong	0.3871	0.3608	-6.80
	辽宁新红星 Liaoning Starkrimson	0.4537	0.4959	9.30

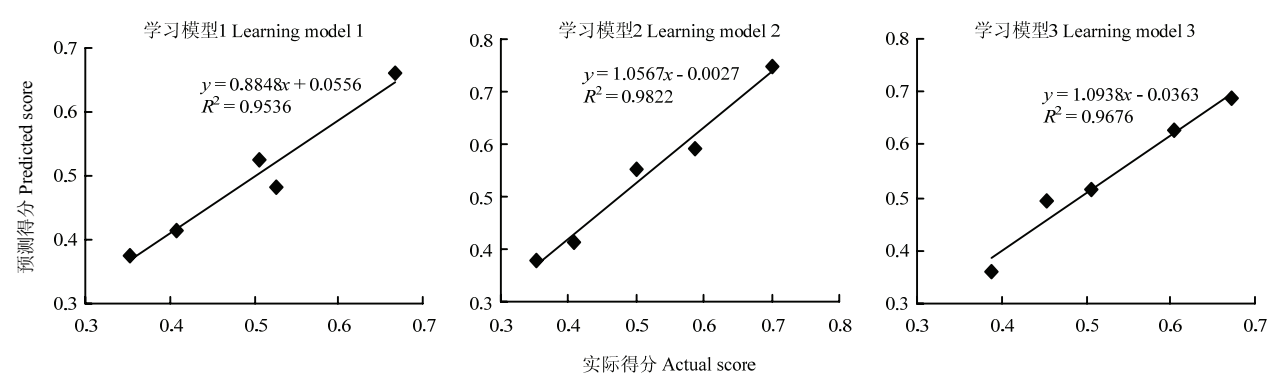


图 2 苹果制干适宜性模型稳定性验证

Fig. 2 Stability verification of chips-processing suitability evaluation model

实际值相符程度均较高，证明神经网络模型能够较准确、稳定地评价苹果原料是否适宜脆片加工。不同苹果样本构建的学习模型预测效果存在较大差异，说明用于建立学习模型的样本数量仍较少，变换少量学习样本对预测效果产生较大影响。同时，学习模型所需的样本应具有典型性与代表性，部分苹果样本与其他样本差异较大也可能对预测效果产生较大影响。

3 讨论

3.1 建模苹果样本筛选及样本容量问题

本研究展开之前课题组已对兴城资源圃部分苹果

品种进行指标测定，并进行脆片品质评价，在此基础上筛选出本研究所用试验原料。筛选原则为：一是属于苹果主产区代表性品种，二是品种间品质差异大。选取主产区主栽苹果品种有利于提高苹果制干适宜性评价模型的适用性；筛选品质差异大的品种则有利于定位影响脆片品质的果实指标，提高模型预测准确性。从模型整体预测效果来看，各样本预测偏差均在合理范围内，说明本模型选取的建模样本较为合理。从模型稳定性及适用性方面考虑，本研究建模样本的选取仍可进一步优化：首先可增加建模的总样本量，提高样本预测的容错率，从而减小变换学习样本对预测效

果产生的影响;其次可进一步提高建模样本的全面性,如增加主产区中、早熟样本采集,提高建模样本的适用性。模型建立应尽量有足够大的样本容量,同时在建模样本的选取上应有针对性、代表性、广泛性,当模型预测准确性高且稳定时,可更好地应用于多品种苹果原料制干适宜性预测。

3.2 苹果脆片品质综合评价模型构建与果实特征指标筛选问题

为得到果实制干适宜性评分,即脆片品质综合评价得分,本研究采用层次分析法构建了苹果脆片综合品质评价模型。层次分析法不仅可以解决传统最优优化评价方法无法量化综合品质的问题,还可以改善客观品质指标无法完全代表人体感官的不足。但层次分析法作为一种主观赋权法,也存在一些缺点:指标过多时易造成判断混乱,定性成分多、主观性强,对判断矩阵的合理性考虑不足等^[29]。为减小指标过多对判断的影响,本研究首先运用因子分析对脆片 17 项品质指标进行降维,筛选出 L^* 值、脆度、膨化度、可滴定酸、可溶性糖和粗蛋白作为核心指标,基本涵盖了脆片色泽、质构和口味等品质,可以比较全面地反映脆片综合品质。在核心指标标度问题上,本研究仅从消费者角度出发按照脆片色泽、质构、口感、营养由高到低重要程度对脆片核心指标进行重要性标度,所得出的核心指标权重值缺乏一定的说服力。为降低模型的主观性影响,在后续的研究中需要结合有关专家经验进行标度,同时应将多个专家的评价结果进行综合以使判断矩阵更加合理。

明确与脆片综合品质相关的原料特征指标是保证模型预测准确率的基础。苹果果实感官、理化、加工等指标众多,全部用做评价指标显然不现实,需从中选取对脆片品质起主要作用的特征指标。在苹果果实特征指标的筛选上,本研究将 6 项脆片核心指标与苹果原料 22 项品质指标进行相关性分析,筛选出果形指数、果肉 a^* 值、pH、可滴定酸含量、 V_C 含量、果核比例、蛋白质、果肉 b^* 值、密度、可溶性固形物含量、粗纤维含量、总糖含量共 12 个显著相关的原料指标,为避免信息遗漏影响预测结果准确性,保留以上所有指标作为与苹果脆片综合品质相关的果实特征指标。由预测结果来看,上述苹果果实特征指标可以较好地反映脆片综合品质。本研究目前所测定的果实指标多为基础指标,后续试验可补充单体类物质如糖单体、酚单体、酸单体、氨基酸,酶,果胶等特征指标进行模型关联以提高准确率,同时也可根据该模型更好地

定位脆片品质形成相关的基础物质。

3.3 关于 BP 神经网络模型在苹果制干适宜性评价中的应用问题

BP 人工神经网络是一种按误差逆传播算法训练的多层前馈网络^[30],是目前应用最广泛的神经网络模型之一。其模型拓扑结构包括输入层、隐含层和输出层,运算方式是一个权重参数不断调整以达到期望值的过程。与灰色关联、层次分析法、线性回归等传统适宜性评价方法相比,BP 人工神经网络无需经验公式与数学模型,在客观定量地寻求变量间复杂的非线性对应关系的同时有较高的准确性。近年来,BP 神经网络模型在食品工业领域的应用日渐增多,包括识别、分类与分级、加工过程仿真与控制、单一指标值预测等^[31],取得了较好的效果,但在食品品质综合评价特别是品质综合得分预测方面的研究较少,在加工适宜性评价应用方面更是未见报道。从本研究模型的预测结果来看,综合得分预测值与实际值相对误差小,预测精度高,说明输入层与输出层的选取较为合理,可较好地实现基于苹果原料指标预测干制品品质。

本研究讨论了一种基于 BP 人工神经网络算法的苹果制干适宜性评价方法,取得了较好的效果,但仍有许多需要优化与改进的地方。从方法应用方面考虑,在未来的工作中,一方面要提高模型预测准确性与稳定性,优化该评价方法;另一方面可以与软件结合,形成实用型苹果制干适宜性预测工具。从理论层面考虑,通过 BP 神经网络模型关联原料与制品品质,在提高预测准确性的基础上可以逐步锁定影响脆片品质的关键性原料指标甚至关键性物质,可为果蔬制品品质形成的物质基础研究提供方法支持,但神经网络作为一种输入、输出的黑匣子无法以直观的公式等形式表现处理过程,也是未来工作需要克服的难点。

4 结论

不同品种苹果制干适宜性可由原料果形指数、果肉 a^* 值、pH、可滴定酸含量、 V_C 含量、果核比例、粗蛋白含量、果肉 b^* 值、密度、可溶性固形物含量、粗纤维含量、总糖含量共 12 个指标进行评价。本研究利用 BP 人工神经网络建立的苹果果实制干适宜性评价模型预测准确性高,可实现基于苹果原料指标定量预测脆片品质。

References

- [1] 中华人民共和国国家统计局数据库. [2018-3-24]. <http://www.stats.gov>

- gov.cn/
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China.
[2018-3-24]. <http://www.stats.gov.cn/>
- [2] 宋哲, 王宏, 里程辉, 于年文, 张秀美, 李宏建. 我国苹果产业存在的主要问题、发展趋势及解决办法. *江苏农业科学*, 2016, 44(9): 4-8. doi: 10.15889/j.issn.1002-1302.2016.09.002.
SONG Z, WANG H, LI C H, YU N W, ZHANG X M, LI H J. The main problems, development trends and solutions of apple industry in China. *Agricultural Sciences of Jiangsu*, 2016, 44(9): 4-8. doi: 10.15889/j.issn.1002-1302.2016.09.002. (in Chinese)
- [3] 焦艺, 刘璇, 毕金峰, 吴昕烨, 周沫, 曾目成. 蟠桃品种用于加工鲜榨汁的适宜性评价. *食品科学*, 2015, 36(1): 41-45. doi: 10.7506/spkx1002-6630-201501008.
JIAO Y, LIU X, BI J F, WU X Y, ZHOU M, ZENG M C. Suitability evaluation of flat peach cultivars for fresh juice-processing. *Food Science*, 2015, 36(1): 41-45. doi: 10.7506/spkx1002-6630-201501008. (in Chinese)
- [4] 郭春苗, 周晓明, 张雯, 樊丁宇, 谢辉, 闰鹏, 卢春生. 不同葡萄品种加工绿葡萄干的适宜性分析. *食品科学*, 2012, 33(19): 62-66.
GUO C M, ZHOU X M, ZHANG W, FAN D Y, XIE H, RUN P, LU C S. Suitability analysis of different grape varieties for preparing green raisins. *Food Science*, 2012, 33(19): 62-66. (in Chinese)
- [5] 沈月, 高美须, 杨丽, 赵鑫, 陈雪, 王志东, 李淑荣, 王丽. 中国主栽青辣椒品种鲜切加工适宜性评价. *农业工程学报*, 2016, 32(s2): 359-368. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.z2.051.
SHEN Y, GAO M X, YANG L, ZHAO X, CHEN X, WANG Z D, LI S R, WANG L. Suitability analysis of fresh-cut vegetable processing for twenty main green capsicum cultivars in China. *Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(s2): 359-368. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.z2.051. (in Chinese)
- [6] AGCAM E, AKYILDIZ A. A study on the quality criteria of some mandarin varieties and their suitability for juice processing. *Journal of Food Processing*, 2014, 2014(12): 1-8. doi: 10.1155/2014/982721.
- [7] LAMUREANU G, ALEXE C, VINTILA M. Suitability for processing as puree of some fruit varieties of peach group. *Journal of Horticulture Forestry & Biotechnology*, 2014, 18(3): 51-57.
- [8] FUJIWARA T, KUBO T. Suitability of unripe Japanese pear for semi-dried fruit processing. *Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi*, 2017, 64(11): 533-541. doi: 10.3136/nskkk.64.533.
- [9] 聂继云, 毋永龙, 李海飞, 王昆, 李静, 李志霞, 徐国锋. 苹果品种用于加工鲜榨汁的适宜性评价. *农业工程学报*, 2013, 29(17): 271-278. doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.17.035.
NIE J Y, WU Y L, LI H F, WANG K, LI J, LI Z X, XU G F. Suitability evaluation of apple cultivars for fresh juice-processing. *Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(17): 271-278. doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.17.035. (in Chinese)
- [10] 张小燕, 赵凤敏, 兴丽, 刘威, 杨延辰, 杨炳南. 不同马铃薯品种用于加工油炸薯片的适宜性. *农业工程学报*, 2013, 29(8): 276-283. doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.08.033.
ZHANG X Y, ZHAO F M, XING L, LIU W, YANG Y C, YANG B N. Suitability evaluation of potato varieties used for chips processing. *Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(8): 276-283. doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.08.033. (in Chinese)
- [11] ONSKIZOGLU P, BAHCECI K S, ACAR M J. Clarification and the concentration of apple juice using membrane processes: A comparative quality assessment. *Journal of Membrane Science*, 2010, 352(1/2): 160-165. doi: 10.1016/j.memsci.2010.02.004.
- [12] YI J Y, ZHOU L Y, BI J F, WANG P, LIU X, WU X Y. Influence of number of puffing times on physicochemical, color, texture, and microstructure of explosion puffing dried apple chips. *Drying Technology*, 2015, 34(7): 773-782. doi: 10.1080/07373937.2015.1076838.
- [13] 龚玲娣, 徐清渠. GB/T 12456-2008 食品中总酸的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
GONG L D, XU Q Q. GB/T 12456-2008 Determination of total acid in foods [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008. (in Chinese)
- [14] 聂继云, 李静, 徐国锋, 李海飞, 毋永龙, 李志霞, 闫震, 匡立学. NY/T 2637-2014 水果和蔬菜可溶性固形物含量的测定折射仪法[S]. 北京: 中国农业出版社, 2014.
NIE J Y, LI J, XU G F, LI H F, WU Y L, LI Z X, YAN Z, KUANG L X. NY/T 2637-2014 Refractometric method for determination of total soluble solids in fruits and vegetables [S]. Beijing: China Agriculture Press, 2014. (in Chinese)
- [15] GB 5009.3-2016 食品中水分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
GB 5009.3-2016 Determination of moisture in foods [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. (in Chinese)
- [16] 卫生部食品卫生监督检验所. GB/T 5009.10-2003 植物类食品中粗纤维的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
Ministry of Health Food Hygiene Supervision and Inspection Institute. GB/T 5009.10-2003 Determination of crude fiber in vegetable foods [S]. Beijing: Standards Press of China, 2013. (in Chinese)
- [17] GB 5009.5-2016 食品中蛋白质的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
GB 5009.5-2016 Determination of protein in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. (in Chinese)

- [18] GB 5009.86-2016 食品安全国家标准食品中抗坏血酸的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- GB 5009.86-2016 Determination of Ascorbic Acid in Foods [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. (in Chinese)
- [19] SU H K, CHOI Y J, LEE H, LEE S H, AHN J B, NOH B S, MIN S H. Physicochemical properties of jujube powder from air, vacuum, and freeze drying and their correlations. *Applied Biological Chemistry*, 2012, 55(2): 271-279. doi: 10.1007/s13765-012-1039-3.
- [20] ABID M, JABBAR S, WU T, HASHIM M M, HU B, LEI S C, ZHANG X, ZENG X X. Effect of ultrasound on different quality parameters of apple juice. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2013, 20(5): 1182-1187. doi: 10.1016/j.ultsonch.2013.02.010.
- [21] 方金豹, 庞荣丽, 何为华, 李君, 吴斯洋, 郭琳琳, 俞宏. NY / T 2016-2011 水果及其制品中果胶含量的测定—分光光度法[S]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- FANG J B, PANG R L, HE W H, LI J, WU S Y, GUO L L, YU H. NY/T 2016-2011 Determination of pectin content in fruits and derived products—Spectrophotometry method [S]. Beijing: China Agriculture Press, 2011. (in Chinese)
- [22] 聂继云, 李志霞, 匡立学, 李静, 李海飞, 徐国锋, 闫震. NY / T 2742-2015 水果及制品可溶性糖的测定—3,5-二硝基水杨酸比色法. 北京: 中国农业出版社, 2015.
- NIE J Y, LI Z X, KUANG L X, LI J, LI H F, XU G F, YAN Z. NY/T 2742-2015 Determination of soluble sugars in fruits and derived products-3,5-dinitrosalicylic acid colorimetry. Beijing: China Agriculture Press, 2015. (in Chinese)
- [23] 龙映均, 刘四新, 余敏华, 陈桃, 李从发. 椰纤果热风干燥工艺优化研究. 食品与机械, 2011, 27(4): 146-148, 162. doi: 10.3969/j.issn.1003-5788.2011.04.043.
- LONG Y J, LIU S X, YU M H, CHEN T, LI C F. Optimization of the hot-air drying processing condition of nata. *Science and Technology of Food Industry*, 2011, 27(4): 146-148, 162. doi: 10.3969/j.issn.1003-5788.2011.04.043. (in Chinese)
- [24] 王沛, 毕金峰, 白沙沙, 公丽艳, 王轩. 不同原料品种的苹果脆片品质评价及其相关性分析. 食品与机械, 2012, 28(2): 9-10. doi: 10.3969/j.issn.1003-5788.2012.02.003.
- WANG P, BI J F, BAI S S, GONG L Y, WANG X. Determination of quality evaluation and correlation analysis of varieties apple chips. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 28(2): 9-10. doi:10.3969/j.issn.1003-5788.2012.02.003. (in Chinese)
- [25] 毕金峰, 王雪媛, 周林燕, 吴昕烨, 高琨, 吕健, 彭健. 脉动压差闪蒸处理对苹果片水分散失特性及品质影响. 农业工程学报, 2016, 32(2): 376-382. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.z2.053.
- BI J F, WANG X Y, ZHOU L Y, WU X Y, GAO K, LV J, PENG J. Effect of instant controlled pressure drop drying on water loss and quality in apple slices. *Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(2): 376-382. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.z2.053. (in Chinese)
- [26] 孙修东, 李宗斌, 陈富民. 基于神经网络的多指标综合评价方法研究. 郑州轻工业学院学报(自然科学版), 2003, 18(2): 11-14. doi:10.3969/j.issn.1004-1478.2003.02.003.
- SUN X D, LI Z B, CHEN F M. Research on multiple attribute synthetical evaluation methods based on artificial neural network. *Journal of Zhengzhou Institute of light Industry (Natural Science Edition)*, 2003, 18(2): 11-14. doi: 10.3969/j.issn.1004-1478.2003.02.003. (in Chinese)
- [27] 刘俊威, 吕惠进. 人工神经网络在水质预测中的应用研究. 长江科学院院报, 2012, 29(9): 95-97. doi: 10.3969/j.issn.1001-5485.2012.09.022.
- LIU J W, LV H J. Artificial Neural Network applied in water quality prediction. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2012, 29(9): 95-97. doi: 10.3969/j.issn.1001-5485.2012.09.022. (in Chinese)
- [28] 潘玉成, 叶乃兴, 潘玉华, 赵仕宇. 人工神经网络在坦洋工夫红茶感官品质评定中的应用研究. 茶叶科学, 2015(5): 465-472. doi: 10.3969/j.issn.1000-369X.2015.05.013.
- PAN Y C, YE N X, PAN Y H, ZHAO S Y. Application research of Artificial Neural Network in sensory quality evaluation of TanYang GongFu black tea. *Journal of Tea Science*, 2015(5): 465-472. doi: 10.3969/j.issn.1000-369X.2015.05.013. (in Chinese)
- [29] 吴殿廷, 李东方. 层次分析法的不足及其改进的途径. 北京师范大学学报(自然科学版), 2004, 40(2): 264-268. doi: 10.3321/j.issn.0476-0301.2004.02.025.
- WU D T, LI D F. Shortcomings of Analytical hierarchy process and the pain to Improve the method. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition)*, 2004, 40(2): 264-268. doi: 10.3321/j.issn.0476-0301.2004.02.025. (in Chinese)
- [30] XIA M, FANG J, TANG Y, WANG Z. Dynamic depression control of chaotic neural networks for associative memory. *Neurocomputing*, 2010, 73(4/6): 776-783. doi: 10.1016/j.neucom.2009.10.015.
- [31] FUNES E, ALLOUCHE Y, BELTRAN G, JIMENEZ A. A Review: Artificial Neural Networks as tool for control food industry process. *Journal of Sensor Technology*, 2015, 5(1): 28.

(责任编辑 赵伶俐)