

统计分析方法在食品品质评价中的应用

姜雪^{1,2}, 刘楠¹, 孙永¹, 牟伟丽³, 周德庆^{1*}

(1. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛 266071; 2. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306;
3. 山东汇洋集团, 蓬莱 265600)

摘要: 统计分析作为一种新兴的数据处理方法, 在工业和农业等方面得到了广泛的应用和研究。该方法具有方便快捷、科学可靠、全面系统等优点, 满足了食品品质评价分析客观、可靠、科学等要求。因此, 统计分析的方法正在被越来越多地应用到食品中优质品种的筛选和相关品质指标的评价等领域, 并取得了显著的成效。本文对食品品质评价的概念及意义进行了简要阐述, 介绍了主成分分析法、灰色关联度分析法、聚类分析法、层次分析法、模糊综合评判法、人工神经网络法、因子分析法以及合理-满意度和多维价值理论法等统计分析方法在食品品质评价中的应用, 分析了各方法的特点和适用范围, 并对食品品质评价方法的发展趋势进行了展望。

关键词: 食品品质评价; 统计分析方法; 品质预测

Application of statistical analysis methods in food quality evaluation

JIANG Xue^{1,2}, LIU Nan¹, SUN Yong¹, MU Wei-Li³, ZHOU De-Qing^{1*}

(1. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;
2. College of Food Science & Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
3. Shandong Huiyang Group, Penglai 265600, China)

ABSTRACT: As a new method of data processing, statistical analysis has been widely used and studied in industry, agriculture and so on. With the characteristics of being convenient, quick, scientific, reliable, comprehensive and systematic, statistical analysis can meet the requirements of the food quality assessment, such as objectivity, reliability and scientificity. Therefore statistical analysis is being increasingly applied in the area of screening of high quality varieties of food and related evaluation of quality indexes, and has obtained the remarkable results. The concept of food quality evaluation and its significance were briefly expounded in this paper, then the applications of principal components analysis (PCA), grey system connection method (GSCM), cluster analysis (CA), analytic hierarchy process (AHP), fuzzy comprehensive evaluation (FCE), artificial neural network (ANN), factor analysis (FA), reasonable satisfaction (RS) and multi-value theory (MVT) were introduced. The characteristics and applicable scopes of the methods were also analyzed, and then the development trends of food quality evaluation methods were prospected.

KEY WORDS: food quality evaluation; statistical analysis method; quality prediction

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(2016HY-ZD0801)、烟台市高端人才引进“双百计划”项目(XY-04-18-01)

Fund: Supported by Special Scientific Research Funds for Central Non-profit Institutes, Chinese Academy of Fishery Sciences (2016HY-ZD0801) and Yantai ‘Double Hundred Talent Plan’ (XY-04-18-01)

*通讯作者: 周德庆, 研究员, 主要研究方向为水产资源加工利用与质量安全。E-mail: zhouqd@ysfri.ac.cn

*Corresponding author: ZHOU De-Qing, Researcher, Yellow Sea Fishery Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, No.106, Nanjing Road, Qingdao 266071, China. E-mail: zhouqd@ysfri.ac.cn

1 引言

食品是由多种成分组成的复杂体系,因此食品品质由多种因素复合作用所决定,导致食品品质的评价指标复杂且主次难分,不利于科学客观地评价食品的优质程度。食品品质评价是指采用科学方法,对食品的外在特征和内在特征进行系统分析,并与特定的标准比较,进而对食品品质作出评价。食品品质评价包括主观评价和客观评价,前者主要是指感官评价,即评价主体对被测对象给予的感官刺激进行分析和评定;后者主要是根据仪器对被测对象的科学测定,对结果进行科学的分析,对其品质进行评价。随着生活水平的提高,人们对食品品质的评价标准日益提升,传统的品质评价方法已不能满足当今食品品质评价的需求,且多为单一指标的评价,存在片面性,缺少理论数据的支撑。因此,进一步推进新型品质评价方法的应用,构建科学的评价体系显得尤为重要。

近年来,随着科学技术的进步,一些科学、客观、快速的分析仪器和分析方法得以迅速发展,尤其是统计分析技术在食品品质评价的应用,不仅弥补了感官评价主观性强、可比性差等不足之处,而且为食品品质评价提供了理论依据,简化了评价程序,便于综合评价食品多项指标,使评价结果具有准确性和科学性。目前运用较为广泛的统计分析方法主要有主成分分析法、灰色关联度分析法、聚类分析法、层次分析法、模糊综合评判法、神经网络法、因子分析法以及合理-满意度和多维价值理论法等。当产品品质受多个因素影响且不利于给出合理客观的解释时,可以采用主成分分析法,例如食品或烟草专用品种的筛选、质量评价等;当一个变量被多个变量同时影响时,可以采用因子分析法,例如农作物的抗性鉴定、烟草的资源选优等;聚类分析法则根据数据的特征,对样品进行相对同质的分类,例如根据啤酒的酒精成分、烟草的加工方式将其分类等。本文针对不同的统计分析方法及其应用的范例进行综述,以期对统计分析方法在食品品质评价中的应用提供参考。

2 统计分析方法的应用

2.1 主成分分析法

主成分分析法(principal components analysis, PCA)又称主分量分析法,是常用的多变量统计分析方法之一,采用数据降维技术,化繁为简,从多个变量中筛选出具有代表性的几个独立的新的综合变量,进而寻求变量间的线性关系。目前已广泛应用于果蔬、发酵食品等加工专用品种的筛选、质量评价等研究领域。

主成分分析可将原有多组具有一定相关性的变量,重新组合成一组新的、相互无关的综合指标来代替原有变

量。白沙沙等^[1]通过主成分分析将苹果的12个品质指标综合为3个主成分,实现了以最少的成分尽可能多地体现原变量的信息。主成分分析还可根据主成分得分差异对各份资源作出适当评价;王沛等^[2]通过对不同苹果脆皮的主成分进行分析,得到其主成分综合得分并对其排序,进而得出各品种的优劣程度,避免了将个别品质性状优良类型淘汰,为食品优良品种的筛选和品质评价提供一定的理论依据。主成分的特征根和贡献率是选择主成分的依据;姜晓青等^[3]对13种菜用大豆的10项主要理化指标进行主成分分析,提取的4种主成分的贡献率达89.33%。主成分分析与感官评价结果高度一致,说明主成分分析能避免人为赋予权重造成的影响,客观地确定各指标的权重,为多指标多品种样品的综合评价提供了一种客观、可行的方法。

当评价指标较多且不利于做出合理的评价时,可以采用主成分分析法,当主成分的累计贡献率达到较高比例时,可用这些主成分对其进行分析。主成分分析法的劣势在于所需要的数据较多,计算工作量大,并要求原始数据必须有一定的规律,符合一定的理论分布^[4]。另外,主成分的解释其含义一般多少带点模糊性,不如原始变量的含义那么清楚,同时当所提取的主成分中有一个主成分无法解释时,主成分分析就失去了意义。

2.2 灰色关联度分析法

灰色关联度分析法(grey system connection method, GSCM)是一种针对目标性状进行综合描述并量化评估的方法^[5],其中关联度是参考数列和比较数列间关联性的量度,其大小代表了各品种的优劣性,值越大,性状越优,反之越劣。值得注意的是,如果参考数列与比较数列单位不同,在关联分析前必须进行无量纲化处理。

关联度包括等权关联度和加权关联度,将各性状在同等条件下进行计算,即可得到等权关联度;加权关联度则是由于反映品种优劣的各性状指标的重要性不尽相同,因而需要赋予不同性状不同的权重系数,对此进行计算即可得到各品种的加权关联度。王轩等^[6]应用灰色关联度分析法对9个不同产地红富士苹果的8个品质指标进行研究,表明,加权关联度的排序比等权关联度的排序更接近果实品质的实际情况。陈连珠等^[7]采用此法对黄秋葵的10个主要农艺性状进行排序,其结果表明综合性状的加权关联度排序更符合田间观测结果。因此,灰色关联度分析法可以应用于新品种选育及其推广种植等领域。

若评价过程中某些指标的发展趋势相似或相异,则可采用灰色关联度法进行分析。灰色关联度分析法能较为全面、客观地评价每个品种的优劣性,有效克服了方差分析或回归分析等统计方法因仅考虑单一因素而忽略某些综合因素表现较好的品种的弊端,使评价结果更具可靠性和实际意义。

2.3 聚类分析法

聚类分析(cluster analysis, CA)是一种根据研究对象或指标的诸多特性, 将其分为相对同质的群组的统计分析技术, 是依据样品品质特性的相似程度将其聚合在一起, 相似度大的优先聚合, 最终按照类别的综合性质将多个品种聚合, 进而完成聚类分析的过程^[8]。

在解决实际问题过程中, 依据单因素分类不足以全面综合地描述多样本对象的类别, 往往要考虑多方面因素将其进行分类, 聚类分析则可以很好地解决这一问题。韩斯等^[9]对主栽蓝莓品种聚类分析的研究表明, 聚类分析能够简单处理大量冗长的数据, 确保定量分析结果的精度较高。焦扬等^[10]通过对李品种的聚类分析结果表明, 聚类分析对具有亲本关系的李品种的划分基本正确, 可以认为其聚类结果是有效的, 经与其他研究者的研究结果类比, 发现其结论基本一致。这说明聚类分析法不仅能处理量大数据, 还可以观察到不同品种之间的相似程度, 对品种谱系的研究具有一定指导意义。

2.4 层次分析法

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)是美国运筹学家匹茨堡大学教授萨蒂于 20 世纪 70 年代初提出的一种层次权重决策分析方法^[11]。层次分析是根据各评价因子对评价指标影响的重要程度, 通过计算得到不同评价指标的权重, 将定性与定量相结合的一种分析方法。层次分析法一般包括 4 个步骤: 建立递阶层次结构、构造两两比较判断矩阵、解判断矩阵并进行一致性检验以及计算各指标的权重^[12]。国内外已有将 AHP 应用于品质评价方面的研究, 并取得了理想的结果。

刘璇等^[13]利用层次分析法对 20 个晚熟原料品种苹果脆片的 7 个品质指标(亮度参数、黄蓝参数、膨化度、脆度、产出率、糖酸比和粗蛋白)进行了综合评价, 期望筛选出品质较好的品种, 分析过程注重定性与定量相结合, 通过计算出不同评价指标的权重, 从而得到苹果脆片品质情况的综合得分, 为建立苹果脆片品质评价体系提供了参考依据。刘长虹等^[14]选取市售馒头作为感官评价对象, 采用层次分析法进行权重分配, 构建了馒头模糊综合评判模型, 以综合值 H 的大小来判断馒头的等级和品质的优劣, 从而得出科学、全面的馒头感官评价方法。Kavurmaci 等^[15]采用层次分析法对土耳其某地区地下水的分布进行分析, 所得研究成果对地下水如何应用于饮用和灌溉具有重要指导意义。

层次分析法将多目标复杂问题系统化、层次化, 使原问题在简单层次的基础上条理化、科学化, 避免了人为主观判断导致的偏差, 使评价结果更具科学性、客观性, 在目标(因素)结构复杂而且缺乏必要的情况下尤为实用, 是常用的一种系统分析方法, 其在食品工业的广泛应用必

将推动我国食品工业的更快发展。

2.5 模糊综合评判法

模糊综合评判法(fuzzy comprehensive evaluation, FCE)是以模糊数学为基础, 对某一体系中多因素的制约关系进行数学化的抽象, 将模糊性定量化, 用于解决不确定性问题的一种有效方法。目前多用于食品感官评价、食品营养等领域^[16-21]。

伍亚华等^[22]在层次分析法制定各因素权重的基础上, 综合考察了宣木瓜果脯感官品质的影响因素, 构建了宣木瓜果脯感官质量的模糊综合评判模型, 更准确地显示了宣木瓜果脯的感官品质, 使评判结果更为科学和有效, 结果表明模糊综合评判法使品质评价趋于数学化、定量化、系统化, 可减少人为主观因素的影响, 有利于做出全面、客观、可靠的评价, 使评判结果更具有科学性和有效性。

2.6 神经网络法

神经网络(neural network)是从结构上模仿生物神经网络的一种分类算法。在神经网络模型中, 分类知识被隐式地存储在连接的权值上, 使用迭代算法确定权值向量。当网络输出判别正确时, 权值向量保持不变, 否则进行增加或降低的调整^[22]。神经网络模型对非线性函数具有最佳逼近和全局最优性能, 非常适用非线性模型构建, 能很好地解决线性回归存在较大误差这一问题^[23]。

Yu 等^[24]在利用电子鼻对不同等级绿茶品质的判别研究中, 将 PCA 提取到的不同等级绿茶的特征信息作为神经网络输入, 使训练集和测试集对于茶叶等级的正确识别率分别达到了 100% 和 88%。在神经网络模型中, 径向基函数(radial basis function, RBF)神经网络具有计算量小、学习速度快、不易陷入局部极小等诸多优点^[25-29], 为非线性系统辨识与模型提供了一种有效的手段。

王新安等^[30]根据人工神经网络(artificial neural networks, ANN)建模原理, 采用径向基函数神经网络模型, 利用 72 个红鳍东方鲀样本的表型数据, 通过最近邻聚类算法, 构建了基于径向基函数神经网络的红鳍东方鲀体质量预测模型, 并采用线性回归检验法对所构建模型的可信度进行检验, 为利用表型性状预估红鳍东方鲀体质量提供参考资料。

误差逆传播(back propagation, BP)神经网络模型非线性映射关系对变量处理效果优于多元回归模型的线性关系, 因此其在函数逼近和模型估算等方面应用十分活跃。杨占魁等^[31]基于鱼苗体重特征与长度、宽度的关系, 建立了遗传 BP 神经网络鱼苗体重估算模型, 为半滑舌鲷体重估算提供了理论依据。

2.7 因子分析法

因子分析(factor analysis, FA)是一种利用降维思想从多个变量中提取共性因子的统计分析方法, 即将本质相同

的指标归入一个因子,使变量数目减少,最后根据各因子的得分情况进行综合评价。目前,因子分析在农作物的品质评价、抗性鉴定、遗传演化分析中被广泛使用^[32-34],同时在诸多品种如砂梨、设施桃、龙眼、冬枣、猕猴桃和枸杞等^[35-40]资源的选优上也得到广泛应用。

因子分析通过数据降维对原始信息进行压缩,并使各共性因子之间互不相关但又能反映各因子的信息。因此,当多个变量同时影响一个变量时,可采用因子分析法降低其分析难度。冯会丽等^[41]通过因子分析将灰枣品质指标数据简化,提取出3个相对独立的共性因子,进而对灰枣果实进行品质比较和优中选优。由于提取出的共性因子有实际意义,能较全面地把握品种的综合性状,所以使品质评价的分析结果更加客观、合理。因子分析的缺点则在于其只能进行综合性评价,并且对数据的数据量和成分也有要求。

2.8 合理-满意度和多维价值理论法

所谓“合理-满意度”(reasonable satisfaction),是指品种所表现出来的特性满足人们需要的程度。食品品质评价多采用合理-满意度和多维价值理论(multi-value theory)相结合的综合评价方法对其进行评价。目前多用于对果实的品质筛选,如芒果^[42]、桃^[43]、猕猴桃、葡萄柚和菠萝等。吴亚楠等^[44]采用“合理-满意度”和多维价值理论法对黄金果猕猴桃的部分指标进行综合分析,得出适合推广的黄金果猕猴桃品种,说明该法适用于对果实品质的筛选。李华等^[45]则运用合理-满意度和多维价值理论复合评价方法对13种沙果品质进行综合评价,结果表明天平南王沙果总满意度最高,但就单因素满意度而言,有些指标值很低如单果质量,也就是说优良品种也存在着某些不足,针对这

一问题,可通过利用其优异的性状,将其作为优良的育种资源,进而避免仅仅因为品种的综合满意度低而使种质资源流失的情况发生。

在所搜集的量化数据较为全面的条件下,合理-满意度和多维价值理论相结合的评价模式能在一定程度上全面、真实地反映食品的优质程度,便于筛选优质的种质资源,并为实际生产提供科学的理论依据。不同统计分析方法的特点及适用范围见表1。

3 食品品质评价方法的发展趋势

随着人们对食品品质的要求越来越高,单一的统计分析方法已不能满足品质评价的需求。目前,食品品质评价方法趋势主要分为两方面:一是多种评价方法相结合,评价方法各有利弊,将不同方法综合应用能够扬长避短,充分发挥各方法的优势,使其评价结果更具科学性和可靠性;二是利用评价模型对食品品质进行预测,评价模型不仅能与实际紧密联系,具有较强的通用性和推广性,而且模型的算法新颖、计算方便,为品质评价提供了一定的理论依据。

3.1 多种评价方法相结合

近年来,主成分分析法与聚类分析相结合、因子分析与聚类分析相结合等综合性评价分析方法在食品品质评价方面成为热点。有学者采用主成分分析和聚类分析相结合的综合分析法对荔枝、菜用大豆、枸杞和苹果的品质进行综合评价,为相关品质评价指标体系的简化提供了可能^[46-50]。综合性评价分析方法的应用,使食品品质评价更具科学性和可靠性,有利于推动食品科学的发展。

表1 不同统计分析方法的特点及适用范围
Table 1 Characteristics and application scopes of different statistical analysis methods

方法	特点	适用范围
主成分分析	通过降维减少变量个数;要求原始数据有一定规律,符合一定的理论分布	评价指标较多且不利于做出合理的评价
灰色关联度分析	针对目标性状进行综合描述并量化评估	评价过程中某些指标的发展趋势相似或相异
聚类分析	依据是样品品质特性的相似程度;能清晰地描述数据,简便快捷	样品量较小,且需要考虑多方面因素将样品分类
层次分析法	建立递阶层次结构、构造两两比较判断矩阵、解判断矩阵并进行一致性检验、计算各指标的权重	目标(因素)结构复杂且缺乏必要的数据
模糊综合评判法	以模糊数学为基础,将模糊性量化	用于解决不确定性问题
神经网络法	对非线性函数具有最佳逼近和全局最优性能,能很好地解决线性回归存在较大误差的问题	非线性模型构建
因子分析	利用降维思想从多个变量中提取共性因子;只能用于综合性评价	多个变量同时影响一个变量
合理-满意度和多维价值理论法	前提是所搜集的量化数据较为全面	多用于对果实的品质筛选

3.2 利用评价模型对食品品质进行预测

产品品质的控制与预测对食品的生产具有重要的意义, 不少研究表明, 评价模型在食品品质预测方面的应用取得了满意的效果。曾祥燕等^[51]基于 PCA 和 BP 神经网络建立了葡萄酒评价模型并进行预测。任亦贺等^[52]使用主成分分析、遗传算法和神经网络建立啤酒感官评价模型, 该模型对 50 种啤酒的感官得分进行预测, 预测最大相对误差为 16.08%, 经过对感官评价的分析, 最大相对误差小于 20% 认为可信。结果表明, 该方法能有效预测啤酒感官评价。王昕等^[53]以主成分分析为基础建立了汉中红茶的汤色滋味评价模型, 并将其计算结果与感官评价结果进行比较, 该评价模型是可行的, 减少了主观判断造成的误差, 使分析结果更具客观性。

4 结 论

统计分析方法的应用为食品品质评价提供了更为科学客观的评价方法, 进一步推进了智能感官分析技术在食品领域的发展。但是, 目前统计分析方法的应用范围较为局限, 多应用于果品品质的综合评价。所以将不同分析技术方法相结合, 不断探索新的分析技术方法, 从而建立一套较为科学、准确、合理的食品品质评价方法, 对于高质量食品的开发、食品质量安全的控制、食品市场新领域的开拓具有重要的指导意义。

参考文献

- [1] 白沙沙, 毕金峰, 王沛, 等. 不同品种苹果果实品质分析[J]. 食品科学, 2012, 33(17): 68–72.
Bai SS, Pei JF, Gong LY, *et al.* Fruit quality analysis of different apple varieties [J]. Food Sci, 2012, 33(17): 68–72.
- [2] 王沛, 刘璇, 毕金峰, 等. 基于主成分分析的中早熟苹果脆片品质评价[J]. 中国食品学报, 2012, 12(6): 204–211.
Wang P, Liu X, Bi JF, *et al.* Quality evaluation of mid-early maturity apple chips based on principal component analysis [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2012, 12(6): 204–211.
- [3] 姜晓青, 宋江峰, 李大婧, 等. 主成分分析法综合评价速冻菜用大豆籽粒的品质[J]. 现代食品科技, 2013, 29(8): 2020–2024.
Jiang XQ, Song JF, Ling DJ, *et al.* Quality evaluation of frozen vegetable soybean based on principal component analysis [J]. Mod Food Sci Technol, 2013, 29(8): 2020–2024.
- [4] Electronic nose combined with PCA and ANN [C]. International Conference on Electrical Engineering/electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2014: 1–4.
- [5] Li X, Wang W. Estimation of apple storage quality properties with mechanical property based on grey system theory [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2005, 21(2): 1–6.
- [6] 王轩, 毕金峰, 刘璇, 等. 不同产地红富士苹果品质的灰色关联度分析[J]. 食品科学, 2013, 34(23): 88–91.
Wang X, Bi JF, Liu X, *et al.* Application of grey correlation analysis for evaluating the overall quality of Fuji apples from different growing areas [J]. Food Sci, 2013, 34(23): 88–91.
- [7] 陈连珠, 肖日升, 林道元, 等. 基于灰色关联分析的黄秋葵品种综合评估[J]. 南方农业学报, 2016, 47(3): 419–423.
Chen LZ, Xiao RS, Lin DY, *et al.* The comprehensive assessment of okra varieties based on grey system connection method [J]. J Southern Agric, 2016, 47(3): 419–423.
- [8] Novák V, Perfilieva I, Antonín Dvo. Insight into fuzzy modeling [M]. Colorado: Wiley Press, 2016.
- [9] 韩斯, 孟宪军, 汪艳群, 等. 不同品种蓝莓品质特性及聚类分析[J]. 食品科学, 2015, 36(6): 140–144.
Han S, Meng XJ, Wang YQ, *et al.* Quality properties and cluster analysis of different blueberry cultivars [J]. Food Sci, 2015, 36(6): 140–144.
- [10] 焦扬, 葛慧玲. 聚类分析在季品种谱系分析中的应用[J]. 东北农业大学学报, 2011, 42(5): 72–76.
Jiao Y, Ge HL. Cluster analysis used in plum parentage research [J]. J Northeast Agric Univ, 2011, 42(5): 72–76.
- [11] 谢国娥, 金睿, 王常青. 基于 AHP 的农产品国际竞争力的影响因素及对策研究[J]. 华东理工大学学报(社会科学版), 2011, 26(2): 40–47.
Xie GE, Jin R, Wang CQ. Study of the influencing factors on trade competitive of China's agriculture products and its countermeasures [J]. J East China Univ Sci Technol (Soc Sci Ed), 2011, 26(2): 40–47.
- [12] Golden BL, Wasil EA, Harker PT. The Analytic Hierarchy Process [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2013.
- [13] 刘璇, 王沛, 毕金峰, 等. 基于层次分析法的晚熟品种苹果脆片品质评价[J]. 食品与机械, 2012, 28(5): 46–50.
Liu X, Wang P, Bi JF, *et al.* Quality evaluation of late maturity apple chips based on analytic hierarchy process [J]. Food Mach, 2012, 28(5): 46–50.
- [14] 刘长虹, 张煌, 李志建. 基于层次分析法的馒头感官模糊综合评判[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2013, 34(4): 22–26.
Liu CH, Zhang H, Li ZJ. Sensory evaluation of steamed bread base on ahp and comprehensive fuzzy evaluation [J]. J Henan Univ Technol (Nat Sci Ed), 2013, 34(4): 22–26.
- [15] Kavurmaci M, Üstün AK. Assessment of groundwater quality using DEA and AHP: a case study in the Sereflikochisar region in Turkey [J]. Environ Monit Assess, 2016, 188(4): 1–13.
- [16] Singh KP, Mishra A, Mishra HN. Fuzzy analysis of sensory attributes of bread prepared from millet-based composite flours [J]. LWT-Food Sci Technol, 2012, 48(2): 276–282.
- [17] 杨应军, 高海燕, 欧阳一菲, 等. 模糊综合评判法在方便面感官分析中的应用[J]. 食品科学, 2009, 30(7): 25–28.
Yang YJ, Gao HY, Ouyang YF, *et al.* Application of fuzzy integrated evaluation method with M(, +) operator to analyze sensory quality of instant noodle [J]. Food Sci, 2009, 30(7): 25–28.
- [18] 夏玉红, 钟耕. 模糊综合评判法在食用植物油感官评价中的应用[J]. 中国油脂, 2009, 34(8): 72–74.
Xia Y, Zhong G. Application of fuzzy comprehensive evaluation in oil sensory analysis [J]. China Oils Fats, 2009, 34(8): 72–74.
- [19] 周显青, 杨兰兰, 张玉荣, 等. 模糊综合评判法在稻米食味品质感官评价中的应用[J]. 粮油加工, 2008, (2): 88–91.
Zhou XQ, Yang LL, Zhang YL, *et al.* Fuzzy comprehensive evaluation method in the application of sensory evaluation of rice eating quality [J]. Cereals Oils Process, 2008, (2): 88–91.

- [20] 赵志华, 岳田利, 王燕妮, 等. 基于模糊综合评判苹果酒感官评价的研究[J]. 酿酒科技, 2006, 27(9): 27–29.
Zhao ZH, Yue TL, Wang YN, *et al.* Study on sensory evaluation of cider based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. Liquor-Mak Sci Technol, 2006, 27(9): 27–29.
- [21] 王军锋, 周显青, 张玉荣, 等. 基于模糊数学的苦瓜饮料矫味及感官评定[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2012, 33(4): 45–48.
Wang JF, Zhou XQ, Zhang YR, *et al.* Flavor correction and sensory assessment of bitter gourd beverage based on fuzzy mathematics [J]. J Henan Univ Technol (Nat Sci Ed), 2012, 33(4): 45–48.
- [22] 伍亚华, 姜绍通, 许晖, 等. 基于层次分析法的宣木瓜果脯感官质量模糊综合评判研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(12): 159–162.
Wu YH, Jiang ST, Xu H, *et al.* Study on sensory evaluation of preserved *Chaenomeles speciosa* S.Nakai based on AHP and fuzzy comprehensive evaluation [J]. Sci Technol Food Ind, 2012, 33(12): 159–162.
- [23] Sun J. Learning algorithm and hidden node selection scheme for local coupled feedforward neural network classifier [J]. Neurocomputing, 2012, 79(3): 158–163.
- [24] Yu H, Wang J, Yao C, *et al.* Quality grade identification of green tea using E-nose by CA and ANN [J]. LWT-Food Sci Technol, 2008, 41(7): 1268–1273.
- [25] Borah S, Hines EL, Leeson MS, *et al.* Neural network based electronic nose for classification of tea aroma [J]. Sens Instrum Food Qual Saf, 2008, 2(1): 7–14.
- [26] Topuz A. Predicting moisture content of agricultural products using artificial neural networks [J]. Adv Eng Software, 2010, 41(3): 464–470.
- [27] Du KL, Swamy MNS. Neural networks and statistical learning-radial basis function networks [M]. London: Springer-Verlag Press, 2014.
- [28] Muhmann MD. Radial basis functions: Theory and implementations [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [29] Jamshidi AA, Gear CW, Kevrekidis IG. Time varying radial basis functions [J]. J Comput Appl Math, 2014, 266(2): 61–72.
- [30] 王新安, 马爱军, 赵艳飞, 等. 基于径向基函数(RBF)神经网络的红鳍东方鲀体质量预测[J]. 水产学报, 2015, 39(12): 1799–1806.
Wang XA, Ma AJ, Zhao YF, *et al.* Prediction of *Takifugu rubripes* weight based on radial basis function neural network [J]. J Fish China, 2015, 39(12): 1799–1806.
- [31] 杨占魁, 任东, 孙传恒, 等. 基于遗传 BP 神经网络的半滑舌蟈体重估算模型优化研究[J]. 渔业现代化, 2015, 42(6): 20–25.
Yang ZK, Ren D, Sun CH, *et al.* Research on optimization of *Cynoglossus semilaevis* weight estimation model based on genetic algorithm and BP neural network [J]. Fish Moderniz, 2015, 42(6): 20–25.
- [32] 樊保国, 李登科. 制干枣品种品质性状的因子分析与综合评价[J]. 植物遗传资源学报, 2011, (5): 716–720.
Fan BG, Li DK. Factor analysis and comprehensive assessment on quality characters of dry-jujube cultivars [J]. J Plant Genetic Res, 2011, (5): 716–720.
- [33] 聂继云, 毋永龙, 李海飞, 等. 苹果鲜榨汁品质评价体系构建[J]. 中国农业科学, 2013, 46(8): 1657–1667.
Nie JY, Wu YL, Li HF, *et al.* Evaluation system established for fresh apple juice quality [J]. Sci Agric Sin, 2013, 46(8): 1657–1667.
- [34] 于建军, 郭玮, 毕庆文, 等. 烤烟主要化学成分因子分析和综合评价[J]. 浙江农业学报, 2010, 22(2): 244–248.
Yu JJ, Guo W, Bi QW, *et al.* Factor analysis and comprehensive evaluation of main chemical components in flue-cured tobacco [J]. Acta Agric Zhejiangensis, 2010, 22(2): 244–248.
- [35] 聂继云, 李志霞, 李海飞, 等. 苹果理化品质评价指标研究[J]. 中国农业科学, 2012, 45(14): 2895–2903.
Nie JY, Li ZX, Li HF, *et al.* Evaluation indices for apple physicochemical quality [J]. Sci Agric Sin, 2012, 45(14): 2895–2903.
- [36] 董星光, 田路明, 曹玉芬, 等. 我国南方砂梨主产区主栽品种果实品质因子分析及综合评价[J]. 果树学报, 2014, (5): 815–822.
Dong XG, Tian LM, Cao YF, *et al.* Factor analysis and comprehensive evaluation of fruit quality in cultivars of *Pyrus pyrifolia* (Burm. f.) Nakai from South China [J]. J Fruit Sci, 2014, (5): 815–822.
- [37] 徐臣善, 高东升. 基于主成分分析的设施桃果实品质综合评价[J]. 食品工业科技, 2014, 35(23): 84–88.
Xu CS, Gao DS. Comprehensive evaluation on fruit quality of peach cultivars in greenhouse based on principal component analysis [J]. Sci Technol Food Ind, 2014, 35(23): 84–88.
- [38] 韩冬梅, 吴振先, 杨武, 等. 龙眼果实品质评价理化指标体系的构建[J]. 植物遗传资源学报, 2015, 16(3): 503–511.
Han DM, Wu ZX, Yang W, *et al.* Establishment of an evaluation system for longan fruit storage quality based on the physicochemical indices [J]. J South China Agric Univ, 2015, 16(3): 503–511.
- [39] 马庆华, 李永红, 梁丽松, 等. 冬枣优良单株果实品质的因子分析与综合评价[J]. 中国农业科学, 2010, 43(12): 2491–2499.
Ma QH, Li YH, Liang LS, *et al.* Factor analysis and synthetical evaluation of the fruit quality of dongzao advanced selections [J]. Sci Agric Sin, 2010, 43(12): 2491–2499.
- [40] 刘科鹏, 黄春辉, 冷建华, 等. ‘金魁’猕猴桃果实品质的主成分分析与综合评价[J]. 果树学报, 2012, (5): 867–871.
Liu KP, Huang CH, Leng JH, *et al.* Principal component analysis and comprehensive evaluation of the fruit quality of ‘Jinkui’ kiwifruit [J]. J Fruit Sci, 2012, (5): 867–871.
- [41] 冯会丽, 吴正保, 史彦江, 等. 基于因子分析的灰枣优良无性系果实品质评价[J]. 食品科学, 2016, 37(9): 77–81.
Feng HL, Wu ZB, Shi YJ, *et al.* Fruit quality evaluation of superior clones of *Zizyphus jujuba* cv. Huizao based on factor analysis [J]. Food Sci, 2016, 37(9): 77–81.
- [42] 辛明, 张娥珍, 何全光, 等. 芒果果实品质评价因子的选择[J]. 南方农业学报, 2014, 45(10): 1818–1824.
Xin M, Zhang EZ, He QG, *et al.* Selection of evaluation factors for mango fruit quality [J]. J Southern Agric, 2014, 45(10): 1818–1824.
- [43] 张海英, 韩涛, 王有年, 等. 桃果实品质评价因子的选择[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8): 235–239.
Zhang HY, Han T, Wang YN, *et al.* Selection of factors for evaluating peach (*Prunus persica*) fruit quality [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2006, 22(8): 235–239.
- [44] 吴亚楠, 刘婷, 刘惠民, 等. 运用多维价值理论评价引种黄金猕猴桃果实品质[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(12): 111–113.
Wu YN, Liu T, Liu HM, *et al.* Evaluation on fruit quality of introduced cultivars of Kiwi fruit with the multi-value theory [J]. J Anhui Agric Sci, 2016, 44(12): 111–113.
- [45] 李华, 赵进红, 张继亮, 等. 不同品种沙果果实品质评价[J]. 林业科技开发, 2012, 26(6): 36–39.

- Li H, Zhao JH, Zhang JL, *et al.* An analysis and evaluation on fruit quality in different varieties of *Mulus asiatica* Nakai [J]. *China Forestry Sci Technol*, 2012, 26(6): 36–39.
- [46] 符勇, 陶菲, 郜海燕, 等. 荔枝干品质评价指标体系的建立[J]. *中国食品学报*, 2013, 13(1): 158–164.
- Fu Y, Tao F, Gao HY, *et al.* Establishment of quality evaluation index system for dehydrated litchi [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2013, 13(1): 158–164.
- [47] 宋江峰, 刘春泉, 姜晓青, 等. 基于主成分与聚类分析的菜用大豆品质综合评价[J]. *食品科学*, 2015, 36(13): 12–17.
- Song JF, Liu CQ, Jiang XQ, *et al.* Comprehensive evaluation of vegetable soybean quality by principal component analysis and cluster analysis [J]. *Food Sci*, 2015, 36(13): 12–17.
- [48] 王益民, 张珂, 许飞华, 等. 不同品种枸杞子营养成分分析及评价[J]. *食品科学*, 2014, 35(1): 34–38.
- Wang YM, Zhang K, Xu FH, *et al.* Chemical analysis and nutritional evaluation of different varieties of Goji berries (*Lycium barbarum* L.) [J]. *Food Sci*, 2014, 35(1): 34–38.
- [49] 潘学军, 张文娥, 李琴琴, 等. 核桃感官和营养品质的主成分及聚类分析[J]. *食品科学*, 2013, 34(8): 195–198.
- Pan XJ, Zhang WE, Li QQ, *et al.* Principal component analysis and cluster analysis of sensory and nutritional quality of walnut [J]. *Food Sci*, 2013, 34(8): 195–198.
- [50] 公丽艳, 孟宪军, 刘乃侨, 等. 基于主成分与聚类分析的苹果加工品质评价[J]. *农业工程学报*, 2014, (13): 276–285.
- Gong L, Meng XJ, Liu N, *et al.* Evaluation of apple quality based on principal component and hierarchical cluster analysis [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2014, 30(13): 276–285.
- [51] 曾祥燕, 赵良忠, 孙文兵, 等. 基于 PCA 和 BP 神经网络的葡萄酒品质预测模型[J]. *食品与机械*, 2014, (1): 40–44.
- Zeng XY, Zhao LZ, Sun WB, *et al.* Prediction model of quality of wine on principal component analysis and BP neural networks [J]. *Food Mach*, 2014, (1): 40–44.
- [52] 任亦贺, 骆学雷, 丰水平, 等. 基于主成分分析、遗传算法和神经网络对啤酒感官评价预测的研究[J]. *中国酿造*, 2010, (2): 50–53.
- Ren YH, Luo XL, Feng SP, *et al.* Prediction of beer sensory evaluation based on principal component analysis, genetic algorithm and artificial neural network [J]. *China Brew*, 2010, (2): 50–53.
- [53] 王昕, 李新生, 韩豪, 等. 基于主成分分析法的汉中工夫红茶汤色滋味评价模型构建[J]. *中国茶叶*, 2016, (2): 19–21.
- Wang X, Li XS, Han H, *et al.* Evaluation model of shang taste of Hanzhong black tea on principal component analysis(PCA) [J]. *China Tea*, 2016, (2): 19–21.

(责任编辑: 姚 菲)

作者简介



姜 雪, 硕士, 主要研究方向为海洋功能性食品。
E-mail: jianglvxuezi@126.com

周德庆, 研究员, 主要研究方向为水产资源加工利用与质量安全。
E-mail: zhouqd@ysfri.ac.cn