

电子舌与真实味觉评价的差异性研究进展

Research progress of difference between electronic tongue and real taste evaluation

王兴亚^{1,2}

庞广昌^{1,2}

李 阳^{1,2}

WANG Xing-ya^{1,2} PANG Guang-chang^{1,2} LI Yang^{1,2}

(1. 天津市食品生物技术重点实验室, 天津 300134; 2. 天津商业大学生物技术与食品科学学院, 天津 300134)

(1. Tianjin Key Laboratory of Food Biotechnology, Tianjin 300134, China; 2. College of Biotechnology and Food Science, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

摘要:电子舌作为研究液体样品味觉信息的新型分析检测设备,近年来已经在食品领域得到了较为广泛的应用。文章介绍电子舌技术的基本原理,与真实味觉评价方法的异同点,相关设备研究应用现状,以期为开发商业化应用的电子舌设备提供新的思路。

关键词:电子舌;传感器;味觉机制

Abstract: Electronic tongue is a new analysis and detection equipment to study liquid sample information, in recent years, which has been more widely used in food industry. This paper introduces the basic principles of electronic tongue technology, similarities and differences with real evaluation methods of taste, status of equipment and its application in the food field, in order to propose new ideas for the development of electronic tongue equipment.

Keywords: electronic tongue; sensors; taste mechanism

味道是食品感官评定中的重要指标。从古代的“神农尝百草”到如今经过特殊训练的品评专家对食品味道的评价,人类的味觉系统在其中都起着决定性的作用。然而,味觉的感官评价却存在着一些不足之处^[1],如味道鉴别人员的培训需要较长的时间和大量资金的投入;评判的结果容易受到个人主观因素的影响;连续品评一段时间后,会出现疲倦现象;对较小差别的味道辨识能力较差;对不确定安全性的样品不能用于口尝评价等。随着现代分析及人工智能技术的发展,催生了一种灵敏度高、测定时间短,并且适合于在复杂样品中连续评价整体味觉信息的设备——电子舌。经过近 30 年的发展,部分电子舌设备已经面世,也有一些产品还处在研发测试中。基于不同理论开发的电子舌设备,其读取味觉信

息的方式与真实的味觉感受机制不尽相同,文章拟以此为出发点,对电子舌的评价方法与真实味觉感受的差异性进行探讨。希望通过对味觉形成机制研究的不断深入和电子、计算机等学科的发展,能够使电子舌性能得到优化。

1 电子舌的结构及其原理

电子舌是利用交互感应的多传感器阵列读取液体样本的特征性响应信号,收集的信号经计算机处理和模式识别分析后,以样品整体品质信息作为输出的设备^[2]。由其定义可以看出,电子舌主要由三部分组成:传感器阵列、信号采集模块和模式识别系统。

传感器阵列由不同材质或不同修饰方法的多个传感器构成,传感器之间存在交互敏感性,即一个传感器能够感受多个物质,同一物质可以被不同的传感器感受到;信号采集模块能够收集传感器阵列信息,并将其以电信号的形式储存在计算机中;模式识别系统以数学算法为手段,模拟人脑的运算方式,分析、处理收集到的信号,并将其转化为样品整体特征属性^[3]。模式识别的主要方法有主成分分析、聚类分析、人工神经网络分析和混沌识别等方法^[4]。

电子舌输出的不是液体中一类或者几类物质的定性和定量结果,它反映的是液体的整体特性^[5]。最早的电子舌设备是由模仿味觉识别机制的传感器阵列组成,在食品领域用于风味的研究,后来更多的电子舌被开发用于食品的分类鉴定。广义的电子舌不仅是作为液体样品味觉属性的测定设备,它还被应用于其它的领域,如在烟草行业中对卷烟质量进行评价^[6],在环境领域对水的软硬度、重金属离子含量进行评价^[7],在液体样本中对微生物污染进行评价^[8],在医学领域用于对体液的分析等^[9]。

2 电子舌的类型及性能

味觉传感器是电子舌的关键组成部件,根据传感器原理可将其区分为电位型电子舌、伏安型电子舌、阻抗谱型电子

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:31371773)

作者简介:王兴亚(1989—),男,天津商业大学在读硕士研究生。

E-mail: tjcuwangxingya@126.com

通讯作者:庞广昌

收稿日期:2015-08-28

舌、光学型电子舌和声波型电子舌等；电子舌由于修饰方法和响应原理的不同，其性能和检测样品的种类等之间也存在一定的差异^{[10] 17-18}。

2.1 电位型电子舌

Toko^[11]研制了第一台以非特定传感器方法分析液体整体信息的电位型多传感器系统。传感器阵列由多个修饰不同敏感膜的传感器组成，在不施加电压的情况下，不同味觉物质与敏感膜作用后，膜两侧的电势发生变化，电势差值即反映液体中味觉物质的强度和性质。电位型电子舌具有操作系统简便、数据采集量少、易于获得溶液整体品质信息的特点，不足之处是对弱或非电解质不敏感，响应的稳定性和可逆性不佳^{[10] 26}。目前，商业化的 TS-5000Z 和 ASTREE 电子舌就属于电位型电子舌，但商品化的制造方法仍未标准化。

2.2 伏安型电子舌

Winquist 等^[12]以未经修饰的不同贵金属电极作为交互敏感阵列，对其施加常规大幅脉冲电压，收集电流响应信号，得到液体样品的整体信息。张夏宾等^[13]则以多频脉冲电压作为激发信号，惰性金属裸电极作为传感器，研制了电子舌设备——智舌，目前该模型机已经面世。伏安型电子舌具有电极无需修饰，信息采集量大，操作简便等特点，不足之处是一般只适合于氧化还原性物质的测定，系统对单一成分选择性不强，结构复杂，有冗余信息^{[10] 30}。

2.3 阻抗谱型电子舌

Riul 等^[14]研发的阻抗谱型传感器是以金电极为基础电极，表面包被导电聚合物薄膜，通过测量阻抗谱的变化识别液体信息。阻抗谱型电子舌灵敏度高，能够将不同成分物质很好地区分；不足之处是对仪器要求较高，电极需要修饰，且修饰要求较高，检测时间长，稳定性、重现性较难保持^{[10] 33-34}。

2.4 光学型电子舌

王平^[15]研究的光寻址型电子舌是以半导体的内光电效应为设计基础，当光源照射到半导体表面，传感器器件的绝缘层与被测液体之间的电位的变化引发电流改变，该电流的变化反映液体对传感器膜的作用。光寻址型电子舌具有灵敏度高、重现性好、结构简单和易于集成等优点；不足之处是该传感器只能检测某些特定组分^{[10] 34-35}。

2.5 声波型电子舌

Sehra 等^[16]研发的声波型电子舌，利用修饰电极与液体样品间的压电效应产生水平弹性波的物理信号，通过学习和比对，测定味觉信息。声波型传感器具有重复性强、稳定性高、系统简单、使用寿命长等特点，但只是通过质量变化反映液体物理性质，灵敏度上有所不足^{[10] 34}。

3 电子舌与真实味觉的差异性

3.1 哺乳动物的味觉感受机制

舌是口腔中感受味道的主要器官^[17]。味觉物质与舌表面的味蕾结合后，与味蕾细胞上的受体或离子通道作用，激发细胞内的信号过程，促使细胞释放神经递质，引起神经冲

动，传递到脑的味觉中枢，完成味道的识别。一般认为，哺乳动物的味觉包括酸、甜、苦、咸、鲜五类（中国传统的五味则为酸、甜、苦、辣、咸）。

味蕾由 50~150 个味觉细胞组成，味觉细胞共分为 I、II、III、IV 4 种类型^[18]。I 型细胞表达咸味的受体和离子通道，与咸味感受有关；II 型细胞表达甜、鲜、苦味受体，且每个细胞只能表达一种味觉的受体，与甜、鲜、苦味的感受有关；III 型细胞则表达酸味觉的受体和离子通道，与酸的味觉感受有关。每个味蕾都能对 5 种味道进行识别^[19]，而对于某种味觉的敏感性则取决于该类细胞数量在味蕾细胞总数中占的比例；IV 型细胞为基底细胞，分化成 I、II、III 型细胞。

味觉信息的编码有两种模型^[20]，即专线传输模型和交叉纤维模型。专线传输模型认为感受每种味觉的细胞分别与传递各自味道的神经纤维连接，不同味觉信号最终传递到脑作进一步的分析；交叉纤维模型认为味觉信息在由细胞转入到神经纤维前就已经进行了编码，编码后的信息通过公共的神经传递，相当于在还没有到达大脑之前就已经确定了味道。

3.2 电子舌检测方法与真实味觉感受的比较

电子舌的设计思想源于味觉的感受机制^[21]。传感器阵列相当于舌头，单独的不同材质或修饰的传感器相当于味蕾，信号采集系统相当于传递神经，而模式识别算法则相当于大脑对味觉信息的处理。虽然电子舌被认为是食品味觉检测的设备，但是电子舌所描述的特征和生物系统的味觉并非完全相同的概念，与生物味觉机制的比较研究有助于为设备研发者打开新的思路。

3.2.1 检测样品的比较 目前，电子舌在食品领域的应用主要分为定性和定量分析两个方面。定性分析是指根据样品差异性实现不同样品的辨别、区分，或者是根据样品间差异性的大小对样品的等级和种类进行识别，如电子舌对饮料^[22-23]、橄榄油^[24]、酒类^[25]和新鲜度^[26]的区分；定量分析则是将电子舌测定结果与感官评价专员给出的结果进行比较判断，通过对应关系，得到相应的定量预测模型，得到的是一类成分的总的量或程度的信息，如电子舌对样品味觉感受差异的评价、制药工业中对苦味掩盖及掩盖效果的评价^[27]等。专业人员对于味觉的感官评定主要以液体为主，但固体样品同样适用，因为通过咀嚼过程，固体样品可以被唾液稀释和分解，起初没有味道的物质也可能被重新赋予味道，比如吃完馒头后会有甜的感觉。感官评价中的味觉方法只限于待测组份已知或者确定无毒、无害的样品的评价，而且这种评价只限于味觉信息。

3.2.2 传感电极和味蕾的比较 电子舌所用的传感电极分为修饰和不修饰两种。修饰电极以一种电极作为基底电极，应用物理或者化学合成的方法在电极表面修饰不同材料的敏感膜，敏感膜具有非专一性和弱选择性，对待测液中无机物、有机物、离子或非离子性组分具有交叉敏感特性，不同的修饰膜对同一物质敏感度也不相同，传感电极对呈味物质的敏感性普遍高于人类味觉测定的极限。ASTREE 电子舌对不同味觉物质的检测限见表 1。

表 1 ASTREE 电子舌传感阵列及检测限^[22]

Table 1 ASTREE electronic tongue sensor array and detection limit

mol/L

基本味觉	呈味物质	人类感受阈值	传感器类型及响应值						
			ZZ	BA	BB	CA	JA	HA	JB
酸味	盐酸	1.6×10^{-4}	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-7}
咸味	氯化钠	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-5}
甜味	蔗糖	6.5×10^{-4}	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}
苦味	咖啡因	5.0×10^{-4}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}
鲜味	谷氨酸钠	5.0×10^{-4}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}

非修饰电极则一般选用金属或者半导体作为传感电极，电极对氧化还原性物质具有很好的测定能力，而对其它物质分辨力较差，这是由于氧化还原发生在不同金属表面产生的信号差异导致的^{[10] 30-32}。非修饰方法设计的传感器阵列能够重复利用且使用寿命较长，但其通用性则不理想。

味蕾是味觉的终端感受器，它由不同类型的细胞构成。每个味蕾中含有感受 5 种味觉的细胞的比例不同，使得舌面不同区域对五味感受阈值上存在差别，味蕾之间也存在交叉反应性。修饰有脂质材料的传感电极，曾经被认为是与味觉识别模式相同，但随着研究的深入，科学家们发现，味觉的识别是由于细胞膜上的受体蛋白与呈味物质结合引起的，细胞膜的脂质成分并不是介导味觉识别的主要因素^[28]。狭义的味觉传感器应该是根据味觉识别原理设计的，即通过提取或外源表达味觉受体^[29]，并将其直接修饰在电极表面或者置于脂质膜上，当呈味分子与受体结合后引起膜电位的改变，作为输入信号，或者是以表达不同味觉受体的细胞分别固定在传感器表面识别味觉分子^[30]。然而，这种味觉传感器的设计思路存在着两个问题：① 受体表达、提取和细胞的培养都是耗费时间和金钱且相当繁琐的；② 固定后的受体或者细胞的活性保持是困难的，这使得传感器的使用次数和寿命受到限制^[31]。然而，这种思想设计的味觉传感器具有通用性，即不同属性的呈味分子与味觉受体的结合都能引起信号的变化并最终引起信号的改变；该传感器还能够对呈味物质进行定量测定^[32]。

3.2.3 信号传递过程的比较 传感电极之间具有低选择性和交互敏感性，每个电极感受到的信号都是多种物质累加的结果。一支电极无法区分自身感受到的味道。呈味分子与味觉受体，使得味觉细胞兴奋，产生神经递质，引起神经兴奋。

如前文所述，味觉的编码模式目前有两种模型假设：专线传输模型和交叉纤维模型。很明显的是，电子舌每根电极上的信号变化是作为总体传递的，而不是传感电极内部将五味信息分别与信号采集器相连；也不是已经将不同物质产生的信息变化按类型做了区分。进一步推测可知，电子舌采集的信息是模糊的，而味觉系统传递的信息则是清晰的：专线传输模型代表了每种味觉信息通过各自味觉对应的神经传入脑，人有五味，则入脑的味觉神经就有酸、甜、苦、咸和鲜五条；而交叉纤维模型，酸、甜、苦、咸和鲜则相当于 5 个“单位”，每个味觉细胞产生信号强度 M 或 N ，感受到味道的味

觉细胞个数分别为 X 、 Y 等，所有的信息汇聚到一条味觉神经，则该神经中游走着 X 个 M 倍的鲜、 Y 个 N 倍的甜等信号，最终汇聚到大脑。

3.2.4 模式识别和大脑分析的比较 模式识别是利用数学方法让计算机对复杂的信息进行分类处理，在错误率最低的情况下，使识别结果尽可能接近实际^[33]。人工味觉系统模式识别方法主要采用了统计模式识别方法（如主成分分析、聚类分析、判别分析等）、人工神经网络模式识别方法（如 BP 神经网络、RBF 神经网络等）、模糊识别方法等。多样的模式识别方法，使科研工作者对电子舌感受的信息更容易分析，找到不同样本间的差异性。如果与预先存储在计算机中的味觉特征图谱比对，还能得到不同味觉信息的分析结果。但模式识别方法的多样性也带来了一个问题：对于同一信号，不同模式识别方法分析的结果是不同的，而且并不存在一种普遍适用于任何模式识别问题的模式识别方法或者技术。通常情况下，为了最大程度的区分样品间的不同点，往往人为地选择分辨效果好的模式识别方法，如 Chen Quansheng 等^[34]使用 ASTREE 电子舌对 4 个等级的绿茶进行鉴定，发现人工神经网络法比 K-最邻近法分析结果更好，采用该方法能成功区分茶叶等级。回归到电子舌对味觉组分的识别结果，仪器反映的酸、甜、苦等是分别以强度作为输出的，不同模式识别方法分析的结果也存在差别。用来比对的味觉特征图谱是通过数位感官评定专家的评定结果建立的，这也使得不同图谱的代表性因为评定人的差异而存在差别，因此又需要对国内外的数据库进行选择。

人所能感受到的味道是复合型味道，这与电子舌所做的酸、甜、苦等味觉强度评价并不相同。大脑是人类味觉信息的处理终端，在此，品尝到的味觉信号被加以分析。大脑对于信息的运算及其处理模式是基于复杂网络模型的，具有大的聚类系数和小的特征路径长度的特征^[35-36]。每个人对同一味觉物质的喜恶性、感受强度和敏感性是不同的，这与胎儿时期从母体获得的味觉信息和后天的饮食习惯产生的适应性有关。因此，为了达到客观评价的效果，应该选择对评判样品没有长期接触或适应的人员作为评价专员，这正是选择没有饮酒习惯人员做品酒师的原因^[37]。

对于单一组分样品，品尝到的味道能够客观反映该物质味觉信息；对于复杂样品的测定，很难对样品的某种单一味觉作出判断。即使作出判断，也很可能是被“欺骗”后的结果。如食用 0.4 mol/L 具有变味作用的神秘果素后，再品尝

0.02 mol/L 的柠檬酸,得到的是相当于 0.3 mol/L 蔗糖的甜度感受,这是味觉的变调效应^[38];含有 0.02%谷氨酸钠的 1%氯化钠溶液和含有 0.02%的肌苷酸钠溶液单独品尝,都呈现碱味;而当两种溶液等比例混合后则能感到强烈的鲜味,这就是味觉的相乘效应^[39]。除此以外,味觉还存在相消效应、对比效应、疲劳效应等现象。

4 电子舌技术的现实问题

电子舌评价方法具有使用简单、响应速度快、灵敏度高、安全性好、能连续测定、结果客观等优点,有较好的应用前景。但是,电子舌设备要想完全取代人舌对食品的判别还需要进一步的研究^{[10] 45}。这表现在人舌感受味觉信息的复杂机制难以模拟;没有通用的电子舌,需要根据待测样品特征选取,大部分的研究还仅是以具体的应用实例来证明电子舌产品可以辨别和定量,研究多停留在实验室阶段,实际应用意义不大。

实际测试中,传感器的稳定性和重现性容易受到多种因素的影响,这在仪器的使用说明中也有体现,精密度和准确性需要经过多次进样实现;在对试验结果的处理上,不同算法得到的判别结果有差异性,需要根据经验判别哪个传感器响应的是某种味觉信号,容易产生“人造结果”,数据不能盲目应用,需要结合数据库比对和志愿者品尝鉴定,相关的技术方法标准至今还未出现;一些电子舌设备已经超越了替代生物味觉的范畴,成为了应用于多个领域“无所不能”的神器,而偏离了设计的初衷。

5 结论与展望

通过对电子舌设备和真实味觉的比较,不难发现:电子舌与真实味觉之间互有所长,但不能完全取代味觉的感官评定,对其研究还需要进一步的深入。虽然电子舌能够快速、简单无损的检测未知液体的整体属性,并且市场上已经有一些电子舌设备销售,但其相关的技术方法标准还未出现,稳定性、重现性还有待完善,仪器多停留在实验室研究阶段,对参加市场假冒伪劣产品打假工作、解决企业产品生产中的在线质量监控等现实问题的解决还存在一定的差距。相信随着传感器技术、人工智能技术、计算机技术等高新技术的不断发展和完善,电子舌设备在未来的食品分析领域将有着更广泛的应用空间。

参考文献

[1] 蒋丽施. 电子舌在食品感官品评中的应用[J]. 肉类研究, 2011(2): 49-52.

[2] 黄赣辉, 邓少平. 人工智能味觉系统: 概念、结构与方法[J]. 化学进展, 2006, 18(4): 494-500.

[3] 王莉, 惠延波, 王瞧, 等. 电子舌系统结构及其检测技术的应用研究进展[J]. 河南工业大学学报: 自然科学版, 2012, 33(3): 85-90.

[4] 王茹, 田师一. 模式识别技术在电子舌中的应用与发展[J]. 食品科技, 2009(2): 108-112.

[5] Gupta H, Sharma A, Kumar S, et al. E-tongue: a tool for taste evaluation[J]. Recent Patents on Drug Delivery & Formulation,

2010, 4(1): 82-89.

[6] 顾永波, 肖作兵, 刘强, 等. 基于电子舌技术的卷烟主流烟气味觉识别[J]. 烟草科技, 2011(8): 48-51.

[7] Men Hong, Zou Shao-fang, Li Yi, et al. A novel electronic tongue combined MLAPS with stripping voltammetry for environmental detection[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2005, 110(2): 350-357.

[8] Söderström C, Winquist F, Krantz-Rülcker C. Recognition of six microbial species with an electronic tongue[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2003, 89(3): 248-255.

[9] 胡卫军, 许改霞, 王平. 电子鼻和电子舌在航天医学检测中的应用[J]. 国外医学: 生物医学工程分册, 2005, 28(4): 213-217.

[10] 刘森. 智能人工味觉分析方法在几种食品质量检验中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.

[11] Toko K. Taste detection[J]. Sensor and Actuators B, 2000, 64(1): 2.

[12] Winquist F, Wide P, Lundström I. An electronic tongue based on voltammetry[J]. Analytica Chimica Acta, 1997, 357(1): 21-31.

[13] 张夏宾, 王晓萍, 田师一, 等. 新型伏安型多频脉冲电子舌及其应用[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2008, 42(10): 1 706-1 709.

[14] Riul Jr A, Taylor D M, Mills C A, et al. Langmuir and Langmuir-Blodgett (LB) films of 4-dicyanomethylene, 4H-cyclopenta[2, 1-b, 3, 4-b'] dithiophene[J]. Thin Solid Films, 2000, 366(1): 249-254.

[15] 王平. 人工嗅觉与人工味觉[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1-20.

[16] Sehra G, Cole M, Gardner J W. Miniature taste sensing system based on dual SH-SAW sensor device: an electronic tongue[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2004, 103(1): 233-239.

[17] Chaudhari N, Roper S D. The cell biology of taste[J]. The Journal of Cell Biology, 2010, 190(3): 285-296.

[18] 王兴亚, 庞广昌. 哺乳动物味觉感受机制研究进展[J]. 四川动物, 2014, 33(5): 785-791.

[19] Yarmolinsky D A, Zuker C S, Ryba N J P. Common sense about taste: from mammals to insects[J]. Cell, 2009, 139(2): 234-244.

[20] Chandrashekar J, Hoon M A, Ryba N J P, et al. The receptors and cells for mammalian taste[J]. Nature, 2006, 444(7 117): 288-294.

[21] 谈国风, 张根华, 沈宗根. 电子舌在乳制品质量控制中的应用[J]. 食品科技, 2011, 36(2): 280-284.

[22] 关为, 田呈瑞, 陈卫军, 等. 电子舌在绿茶饮料区分辨识中的应用[J]. 食品工业科技, 2012, 33(13): 56-59.

[23] 陈全胜, 江水泉, 王新宇. 基于电子舌技术和模式识别方法的茶叶质量等级评判[J]. 食品与机械, 2008(1): 124-126.

[24] Dias L G, Fernandes A, Veloso A C A, et al. Single-cultivar extra virgin olive oil classification using a potentiometric electronic tongue[J]. Food Chemistry, 2014, 160: 321-329.

[25] 王俊, 姚聪. 基于电子舌技术的葡萄酒分类识别研究[J]. 传感技术学报, 2009(8): 1 088-1 093.

[22] Hasan T. Suitable drying model for infrared drying of carrot [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(3): 610-619.

[23] Thanit S, Sakamon D, Poomjai S, et al. Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 92(1): 100-106.

[24] Kamon P, Naret M, Somchart S, et al. Modeling of combined far-infrared radiation and air drying of a ring shaped-pineapple with/without shrinkage[J]. Food and Bioproducts Processing, 2012, 90(2): 155-164.

[25] Sun Ji-min, Hu Xiao, Zhao Guo-zhong, et al. Characteristics of thin-layer infrared drying of apple pomace with and without hot Air pre-drying[J]. Food Science and Technology International, 2007, 13(2): 91-97.

[26] Pan Zhong-li, Connie Shih, Tara H McHugh, et al. Study of banana dehydration using sequential infrared radiation heating and freeze-drying [J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41(10): 1 944-1 951.

[27] 吴本刚. 胡萝卜催化式红外干法杀青—红外热风顺序联合干燥技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2014: 11.

[28] Deng Yun, Wang Yue-gang, Yun Jin, et al. Thermal behavior, microstructure and protein quality of squid fillets dried by far-infrared assisted heat pump drying [J]. Food Control, 2014, 36(1): 102-110.

[29] 王俊. 远红外干燥机内物料传热传质的计算分析[J]. 农业机械学报, 1999, 30(4): 36-38.

[30] 张丽丽, 王相友, 遇龙, 等. 茄子红外辐射干燥特性及色泽变化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊 2): 291-296.

[31] 曾目成, 毕金峰, 陈芹芹, 等. 猕猴桃切片中短波红外干燥特性及动力学模型 [J]. 现代食品科技, 2014, 30(1): 153-159, 199.

[32] 曾目成, 毕金峰, 陈芹芹, 等. 基于 Weibull 分布函数对猕猴桃切片中短波红外干燥过程模拟及应用[J]. 现代食品科技, 2014, 30(6): 146-151, 201.

[33] 徐凤英. 荔枝真空红外热辐射干燥传热传质机理研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2007: 1.

[34] 林亚玲. 红外杀青脱水苹果片传热传质模拟与装置研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2006: 3.

[35] 王新蕾, 赵洪杰, 张学东. 3亩水泥地, 晒70万斤小麦? [N]. 大众日报, 2014-07-26(01).

[36] 叶为标. 谷物干燥方法的研究[J]. 粮食加工, 2009, 34(1): 69-71.

[37] Ragab Khir, Pan Zhong-li, Adel Salim, et al. Moisture diffusivity of rough rice under infrared radiation drying[J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 44(4): 1 126-1 132.

[38] Pan Zhong-li, Ragab Khir, Larry D Godfrey, et al. Feasibility of simultaneous rough rice drying and disinfestations by infrared radiation heating and rice milling quality[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 84(3): 469-479.

[39] 潘忠礼, Atungulu G G, 马海乐. 食品和农产品干燥的一种有效方法—红外加热法[J]. 干燥技术与设备, 2013, 11(1): 61-66.

[40] Soojin J, Joseph I. Selective far infrared heating system-design and evaluation. I[J]. Drying Technology, 2003, 21(1): 51-67.

[41] Afzal T M, Abe T. Simulation of moisture changes in barley during far infrared radiation drying[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 26(2): 137-145.

[42] 汪喜波. 红外辐射与对流联合干燥的理论分析及试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2003: 55-56.

[43] 董宏宇. 谷物干燥的红外辐射陶瓷材料及红外干燥机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008: 60-64.

[44] 王相友, 操瑞兵, 孙传祝. 红外加热技术在农业物料加工中的应用[J]. 农业机械学报, 2007, 38(7): 177-182.

[45] 夏朝勇, 朱文学, 张仲欣, 等. 红外对流组合干燥稻谷试验[J]. 农业机械学报, 2006, 37(8): 235-238.

[46] 孙传祝, 王相友. 红外玉米穗干燥机设计[J]. 农机化研究, 2014, 36(3): 137-140.

[47] 朱文学, 张仲欣, 刘建学, 等. 玉米红外吸收光谱试验研究[J]. 干燥技术与设备, 2004, 2(4): 16-19.

(上接第 216 页)

[26] 易宇文, 范文教, 贾洪峰, 等. 基于电子舌的微冻鲢鱼新鲜度识别研究[J]. 食品与机械, 2014, 30(2): 142-145.

[27] 李学林, 李慧玲, 刘瑞新, 等. 电子舌用于药物掩味效果评价的研究[J]. 世界科学技术: 中医药现代化, 2013, 15(7): 1 532-1 537.

[28] 陈大志, 叶春, 李萍. 味觉受体分子机制[J]. 生命的化学, 2010(8): 810-814.

[29] Navratilova I, Pancera M, Wyatt R T, et al. A biosensor-based approach toward purification and crystallization of G protein-coupled receptors[J]. Analytical Biochemistry, 2006, 353(2): 278-283.

[30] Wu Chun-sheng, Du Li-ping, Wang Di, et al. A novel surface acoustic wave-based biosensor for highly sensitive functional assays of olfactory receptors[J]. Biochemical and biophysical research communications, 2011, 407(1): 18-22.

[31] Wang Ping, Xu Gai-xia, Qin Li-feng, et al. Cell-based biosensors and its application in biomedicine[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2005, 108(1): 576-584.

[32] 张宇斌. 基于仿生膜的谷氨酸受体电化学学生物传感技术研究[D]. 福州: 福州大学, 2006: 82-84.

[33] 边肇琪, 张学工. 模式识别[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2000: 1-2.

[34] Chen Quan-sheng, Zhao Jie-wen, Vittayapadung Saritporn. Identification of the green tea grade level using electronic tongue and pattern recognition[J]. Food Research International, 2008, 41(5): 500-504.

[35] 薛绍伟. 不同状态下脑功能网络特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013: 4-5.

[36] Park H J, Friston K. Structural and functional brain networks: from connections to cognition [J]. Science, 2013, 342(6 158): 579.

[37] 苏灿. 品酒师其实不饮酒[J]. 新前程, 2008(11): 36-38.

[38] 卢圣楼, 刘红, 贾桂云. 神秘果功能成分及开发利用研究[J]. 食品与机械, 2013, 29(5): 256-260.

[39] 冯妍. 谈谈食品味觉的各种现象[J]. 食品科技, 1996(1): 8-9.