

美味的化学奥秘 ——奇妙的美拉德反应

李厚金*, 肖华*, 黎懿漳, 余静怡, 洪凯楠, 陈六平, 朱芳

中山大学化学学院, 广州 510006

摘要: 美食的制作过程本质上是复杂的化学反应, 其中最著名的是美拉德反应, 它是食品色泽、风味的来源。本实验对复杂的美拉德反应体系和实验研究方法进行了创新性至简化设计, 以常见氨基酸、蛋白质与糖为原料, 开发了在家用微波炉就能完成的简单、安全、易于操作的美拉德反应, 产物具有不同的怡人特征风味, 并通过紫外-可见光谱、气质联用分析技术解析了风味产物的结构, 建立美味与化学成分之间的本质关联。同时, 将美拉德反应应用于厨房里的的美食制作, 现场烹饪出色、香、味、营养俱佳的菜肴。由简至繁、由浅入深、层层递进的科普实验设计, 适合于社会各层次人群。本科普实验普及化学知识, 解密美味之源, 探索美味化学, 使人们懂得制作并享受健康美食, 热爱生活; 也充分展现化学的神奇与魅力, 有助于激发社会公众对化学的兴趣与热爱。

关键词: 美拉德反应; 氨基酸; 蛋白质; 糖; 美食; 科普

中图分类号: G64; O6

The Chemical Mysteries of Delicacy: The Excellent Maillard Reaction

Houjin Li *, Hua Xiao *, Yizhang Li, Jingyi Yu, Kainan Hong, Liuping Chen, Fang Zhu

School of Chemistry, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China.

Abstract: The Maillard reaction, which is the main source of food color and flavor, is one of the most recognized chemical reactions in cooking. The simplified experimental methods of the complex Maillard reaction were innovatively designed using common amino acids, proteins, and sugars as raw materials. These reactions were easily preformed in a household microwave oven. The flavor products were analyzed by ultraviolet-visible (UV-Vis) spectroscopy and gas chromatography-mass spectroscopy (GC-MS) to evaluate the fundamental relationship between flavor and chemical components. Moreover, delicious and nutritious cuisines can be cooked in the kitchen facilitated by the Maillard reaction mechanism. This study explored the chemical mysteries of delicacy, and demonstrated the magic and charm of chemistry. It is rich in content, diverse in forms, and suitable to popularize chemical knowledge in society.

Key Words: Maillard reaction; Amino acid; Protein; Sugar; Delicacy; Popularization of science

1 引言

民以食为天。饮食文化历史悠久, 博大精深。色泽红亮的红烧肉、柔嫩多汁的煎牛排、酥脆松软的烤面包……数不尽的美食佳肴, 它们色泽迷人、馥郁芳香、口感鲜美, 令人唇齿留香, 心旷神怡。美好生活离不开一日三餐, 美食制作也成为每个公民的一项必备技能。近日, 教育部正式印发《义务教育课程方案》, 并发布《义务教育劳动课程标准(2022年版)》。据了解, 劳动课程共设置十

收稿: 2022-09-30; 录用: 2022-11-29; 网络发表: 2022-12-19

*通讯作者, Emails: ceslhj@mail.sysu.edu.cn (李厚金); xiaoh73@mail.sysu.edu.cn (肖华)

基金资助: 广东省本科高校教学质量与教学改革工程建设项目; 广东省高等教育教学改革项目; 中山大学本科教学质量工程项目

个任务群,“烹饪与营养”作为其中一个任务,要求学生们在1至9年级学习中分阶段学会烹饪,从择菜、洗菜,到使用简单的烹饪器具,用蒸、煮方法加工食材,再到能独立制作3至4道菜,在学习与实践过程中了解科学膳食与身体健康的密切关系,增进对中华饮食文化的了解^[1]。

如何利用简单的食材制作出色、香、味俱全,营养又健康的美食呢?这不仅是普通民众亘古不变的追求,也是科学家们一直在探索的科学问题。美食的制作过程本质上是复杂的化学反应,其中最著名的是美拉德反应(Maillard reaction)。美拉德反应对食品风味、色泽和营养有重要影响,同时与生命体的生理和病理过程密切相关,是国际研究热点^[2]。温度、时间、浓度、含水量、pH、盐度均对反应有影响^[3]。文献报道的反应条件大多比较复杂,需要在专业的化学实验室中才能完成。

本实验创新设计了由简至繁、由浅入深、层层递进的美拉德反应,旨在向社会公众揭开这一复杂反应的神秘面纱,展示实验室与生活中色、香、味俱全的美拉德反应,并解析其风味来源,探索美味的化学奥秘。传播生活中的化学知识,展示化学的神奇与魅力,激发公众对化学的兴趣与热爱,提升科学素养。

2 实验部分

2.1 实验原理

1912年,法国化学家Louis-Camille Maillard发现并报道甘氨酸和葡萄糖混合加热产生褐色物质^[4]。1953年,美国化学家John E. Hodge为了纪念这一开创性研究工作,将其命名为美拉德反应(Maillard reaction),并且首次阐述了反应机理^[5]。美拉德反应是非酶促褐变反应,是羰基和氨基化合物之间发生的一系列氧化、环化、脱水、缩合等反应^[6]。美拉德反应机理分为初期、中期和末期三个阶段(图1)^[7,8]。

以葡萄糖和氨基化合物反应为例,初期阶段葡萄糖与氨基酸发生缩合反应,生成N-糖基化合物,经重排产生Amadori重排产物。

中期阶段主要为Amadori重排产物的降解反应和氨基酸的Strecker降解反应。根据反应条件不同,Amadori重排产物能发生1,2-和2,3-烯醇化,1,2-烯醇化生成3-脱氧糖酮,经脱水、脱氨和环化形成糠醛及其衍生物,2,3-烯醇化生成1-脱氧糖酮,经脱氨后生成活泼的二羰基化合物和还原酮类^[9];另外,1-脱氧糖酮和少量3-脱氧糖酮能与体系中的氨基酸作用,发生Strecker降解,生成醛类、吡嗪类等风味物质^[10];此外,反应产生的二羰基化合物能够与体系中的氨基酸反应生成晚期糖基化产物(AGEs)^[11]。

末期阶段反应复杂,反应机理尚不明确。中期生成的众多活性中间体经过脱水、分解、环化、聚合等一系列反应,形成类黑精、更高级的不饱和醛和各种衍生的挥发性化合物^[12]。

美拉德反应产物中的低分子量化合物和类黑精等物质具有抗氧化、抗过敏、抗突变、抑菌、保护心血管等多种功能特性^[13];但是,晚期糖基化产物AGEs被证明与人类衰老、糖尿病、慢性肾衰竭、阿尔兹海默症等有很大关系^[14]。因此,深入研究美拉德反应机理及产物特性,对于促进人体健康具有重要意义。

2.2 试剂或材料

实验试剂包括18种氨基酸:甘氨酸、L-丙氨酸、L-丝氨酸、L-缬氨酸、L-苏氨酸、L-亮氨酸、L-异亮氨酸、L-天冬氨酸、L-谷氨酸、L-赖氨酸、L-精氨酸、L-脯氨酸、L-组氨酸、DL-蛋氨酸、L-半胱氨酸、L-苯丙氨酸、L-酪氨酸、L-色氨酸,分析纯;6种糖:D-葡萄糖、D-果糖、D-核糖、D-木糖、乳糖、蔗糖,分析纯;二氯甲烷,色谱纯;以上试剂均购于上海麦克林生化科技有限公司。全脂奶粉(安佳)购于京东商城。

2.3 仪器

实验所用主要仪器见表1。

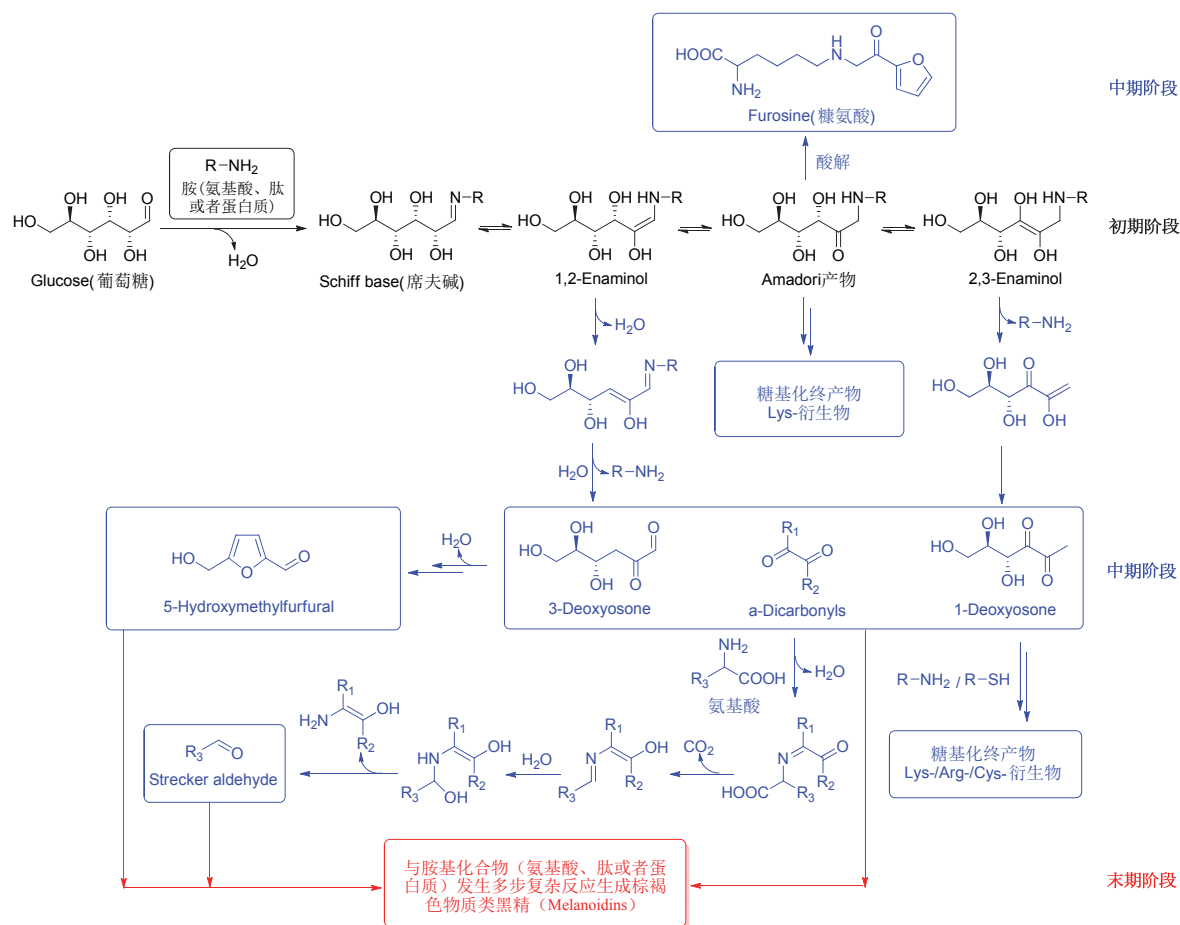


图1 美拉德反应机理(以葡萄糖与胺的反应为例)

表1 实验所用仪器和设备

仪器名称	型号	生产厂家
微波炉	M1-L201B	广东美的厨房电器制造有限公司
超声波清洗机	KQ2200	昆山市超声仪器有限公司
电子分析天平	BSA224S-CW	德国赛多利斯
紫外-可见分光光度计	PerkinElmer UV750	美国PE公司
气相色谱-质谱联用仪	8860-5977B	安捷伦科技有限公司

2.4 表征方法

2.4.1 紫外-可见分光光度计表征

以纯二氯甲烷溶剂作为对照, 建立基线, 扫描波长范围为250–550 nm, 表征美拉德反应中间产物的形成情况。

2.4.2 气相色谱-质谱联用测试

气相色谱条件: 色谱柱HP-5MS (30 m $\times$ 0.25 mm, 0.25 μ m); 载气为高纯He, 载气流速1.0 mL $\cdot$ min $^{-1}$; 进样口温度260 $^{\circ}$ C, 进样量1 μ L, 不分流进样; 程序升温, 50 $^{\circ}$ C保持2 min, 以6 $^{\circ}$ C $\cdot$ min $^{-1}$ 速度升温至120 $^{\circ}$ C, 再以10 $^{\circ}$ C $\cdot$ min $^{-1}$ 升温至280 $^{\circ}$ C保持10 min。

质谱条件：电离方式EI，电离能量70 eV，离子源温度230 °C，四极杆温度150 °C；质量扫描范围30–450 amu；溶剂延迟3 min。

2.5 实验步骤/方法/现象

2.5.1 反应条件探索及优化

在美拉德反应中期阶段开始形成风味物质，其风味类型与反应速率主要取决于反应物(氨基酸与糖)结构、反应时间、温度、浓度、水分含量、pH、盐离子种类及其浓度等^[15–17]。文献报道的反应大多在溶剂中进行，条件比较复杂，需要在专业的化学实验室中才能完成^[3]。

本实验对实验方法进行创新性简化，在家用微波炉中进行美拉德反应，并对反应条件进行摸索优化。

单一的葡萄糖和单一的氨基酸自身无法进行美拉德反应，两者混合后滴加适量水即可在微波炉中进行美拉德反应，产生褐色物质，并且产生特征香味。例如，D-葡萄糖+水、L-脯氨酸+水，均不反应；D-葡萄糖+L-脯氨酸+水发生反应(图2a)。奶粉+水、奶粉+D-葡萄糖，几乎不反应；奶粉+D-葡萄糖+水反应现象明显(图2b)。尽管奶粉中含有乳糖，但是在微波反应条件下奶粉中的蛋白质与乳糖的美拉德反应并不明显，只有在额外添加还原糖和水的体系中，才可进行美拉德反应，产生橙色物质，并伴随有浓郁的烤奶香味。

我们考察了含水量大小对反应的影响，以L-异亮氨酸+D-葡萄糖为例，在微波功率700 W，反应时间50 s条件下，含水量(质量百分比)依次设置为2.5%、5%、10%、15%、25%、30%、50%、65%、80%。发现当体系含水量为15%–35%时，氨基酸和糖的美拉德反应较为充分，含水量较低或较高均会减缓其反应速率，甚至不发生反应(图2c)。这一优化的含水比例同样适用于其他组合的反应。

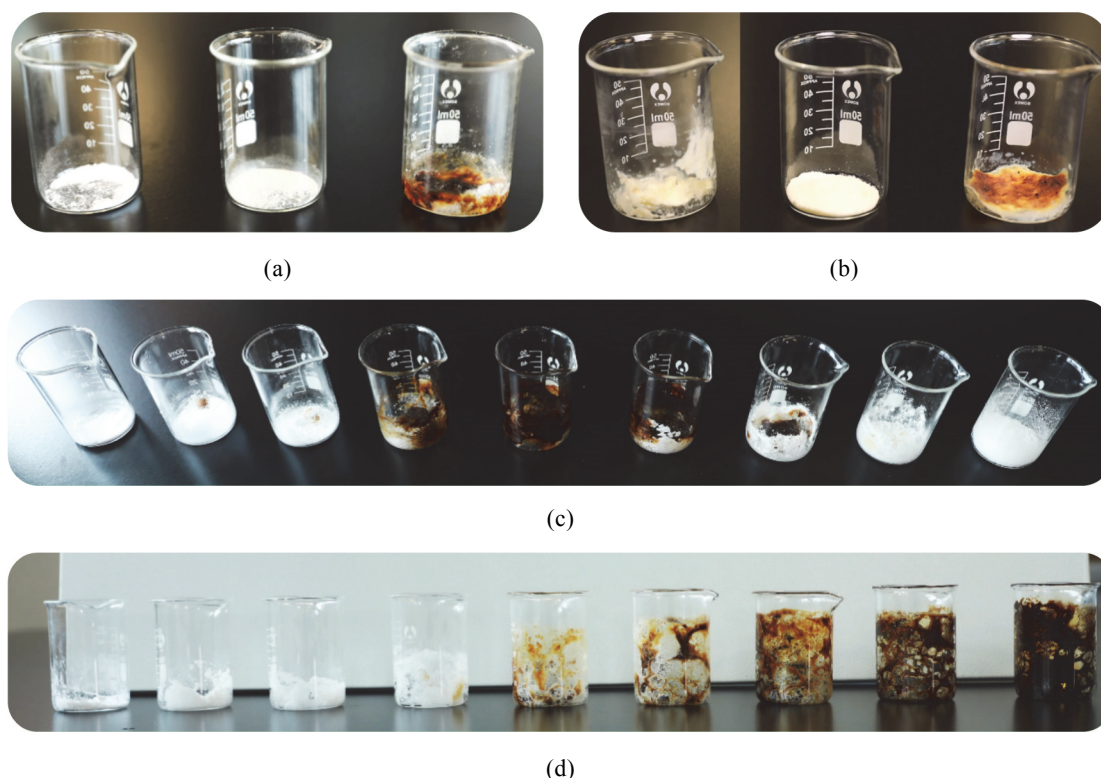


图2 美拉德反应条件的探索及优化

- (a) 依次为D-葡萄糖+水、L-脯氨酸+水、D-葡萄糖+L-脯氨酸+水；(b) 依次为奶粉+水、奶粉+D-葡萄糖、奶粉+D-葡萄糖+水；(c) L-异亮氨酸+D-葡萄糖，含水量依次为2.5%、5%、10%、15%、25%、30%、50%、65%、80%；
(d) L-苯丙氨酸+D-葡萄糖，反应时间依次为10 s、20 s、30 s、40 s、50 s、60 s、70 s、80 s、90 s

反应时长也非常重要。考察了L-苯丙氨酸+D-葡萄糖、含水量20%、微波功率700 W条件下,不同反应时间的反应结果,结果显示,当反应时间为20–90 s时,均可进行美拉德反应,且随着反应时间延长,体系中褐色物质逐渐增多,最佳反应时长为60 s(图2d)。

通过一系列实验进行探索与优化,获得最佳的实验条件为:微波功率700 W,反应时间20–90 s,体系含水量15%–35%。

2.5.2 实验步骤

本实验采用18种氨基酸和全脂奶粉作为氨基供体,6种糖作为羰基供体,在家用微波炉中进行美拉德反应。具体实验操作如下:

按照摩尔比1:1称取0.003 mol的氨基酸和糖放置于研钵中,研磨混匀后将其转移至50 mL干净的小烧杯中,滴加适量(15%–35%)自来水,用刮铲搅拌均匀,在烧杯上覆盖一层保鲜膜,放入微波炉中,700 W进行反应,根据反应物变色程度调控其反应时间,识别并记录产物香味特征。

待小烧杯冷至室温后,量取3 mL色谱纯的二氯甲烷,倒入小烧杯,盖上保鲜膜,在超声下萃取20 s,萃取物过滤除去杂质,即得到相应的美拉德反应产物萃取液,样品进行紫外-可见光谱和气质联用分析,鉴定产物结构。

另外,在单一氨基酸与糖反应的基础上,进行多种氨基酸与单一糖、多种糖的反应,以及全脂奶粉与单一糖的反应,具体实验操作同上。

2.6 实验结果与讨论

2.6.1 氨基酸与糖的美拉德反应

2.6.1.1 反应条件与产物香气特征

不同氨基酸和不同糖反应,其反应时间与产物香气特征均有不同(表2)。

表2 单一氨基酸与糖的美拉德反应条件(加热时间 t ,单位s)及产物香气特征

氨基酸	香气特征/ t					
	D-葡萄糖	D-果糖	D-木糖	D-核糖	乳糖	蔗糖
L-苯丙氨酸	花香/60	花香/60	花香/25	花香/20	花香/90	花香/60
DL-蛋氨酸	烤肉香/50	烤肉香/30	烤肉香/40	烤肉香/20	烤肉香/80	烤肉香/40
L-谷氨酸	巧克力香/50	甜香/40	巧克力香/50	巧克力香/30	奶甜香/90	甜香/40
L-半胱氨酸	爆米花香/40	爆米花香/30	爆米花香/25	爆米花香/25	爆米花香/50	爆米花香/40
L-赖氨酸	芋头香/20	玉米味/20	玉米味/20	甜香/20	玉米味/60	玉米味/20
L-酪氨酸	玫瑰花香/50	花香/50	花香/50	花香/50	浓郁花香/90	花香/60
L-缬氨酸	苦味、药草香/50	药草香/30	药草香/30	油炸食品香/30	药草香/90	草香/40
L-亮氨酸	苔香、炸物味/50	炸物味/50	炸物味/50	烧烤味/50	烧烤味/90	炸物味/50
L-异亮氨酸	甜酸味/50	甜酸味/50	甜酸味/50	甜酸味/50	甜酸味/90	甜酸味/50
L-色氨酸	烟熏香/50	烟熏香/50	烟熏香/50	烟熏香/40	烟熏香/90	烟熏香/80
L-精氨酸	烤面包香/30	烤面包香/20	甜香/20	甜香/20	甜香/30	烤面包香/40
L-脯氨酸	烤面包香/20	甜香/20	甜香/20	甜香/20	焦甜香/30	甜香/40
L-组氨酸	甜香/40	烤面包香/30	甜香/30	烤肉香/30	甜香/60	烤面包香/60
甘氨酸	甜香/30	甜香/30	烤甜香/20	杏仁香、药香/20	甜香/30	烤焦糖香/30
L-丝氨酸	烤甜香/20	烤甜香/30	烤甜香/20	烤甜香/20	烤甜香/40	烤甜香/60
L-苏氨酸	烤甜香/40	烤甜香/30	烤甜香/20	杏仁香/20	烤甜香/90	烤焦糖香/30
L-丙氨酸	烤甜香/30	烤甜香/30	烤甜香/20	烤甜香/20	烤甜香/90	烤焦糖香/60
L-天冬氨酸	烤甜香/50	烤甜香/50	烤甜香/40	烤甜香/20	烤甜香/90	烤甜香/60

糖对反应时间有影响。就反应活性而言, 醛糖>酮糖, 五碳糖>六碳糖, 单糖>双糖。核糖和木糖作为五碳糖, 其反应活性高于葡萄糖和果糖等六碳糖; 乳糖作为还原性二糖, 反应活性较弱; 蔗糖属于非还原性二糖, 本身不参与美拉德反应, 由于其在高温下可以水解成葡萄糖和果糖, 因此可以进行美拉德反应。

氨基酸种类对美拉德反应中间产物香气特征影响较大, 而糖的类型对其影响不大。L-苯丙氨酸与糖反应产生浓郁的花香, DL-蛋氨酸与糖反应产生烤肉香, L-谷氨酸与糖反应产生巧克力味, L-半胱氨酸与糖反应产生爆米花香, L-赖氨酸与糖反应的产物具有玉米香等。甜香香型在反应产物中比较普遍, 例如: L-精氨酸、L-脯氨酸、L-组氨酸、甘氨酸、L-丝氨酸、L-苏氨酸、L-丙氨酸、L-天冬氨酸等。

此外, 采用多种氨基酸与单一糖或多种糖进行美拉德反应, 有助于探索更为丰富的香气特征。例如: L-苯丙氨酸+L-赖氨酸+D-葡萄糖的美拉德反应可以产生浓郁的芋香味; L-半胱氨酸+甘氨酸+D-木糖的美拉德反应可以产生烤肉香等。

2.6.1.2 紫外-可见光谱分析结果

美拉德反应中期阶段产生的小分子芳香化合物, 如呋喃、吡喃、糠醛、吡咯、吡啶类等及其衍生物, 可采用紫外-可见分光光度计对反应产物进行表征。

我们对所有反应的萃取物进行了紫外-可见光谱分析, 图3列出了L-苯丙氨酸、DL-蛋氨酸、L-半胱氨酸和L-赖氨酸分别和6种糖进行美拉德反应的紫外-可见光谱图, 其产物均在270–294 nm间出现强的紫外吸收峰, 在氨基酸+糖未经反应直接用二氯甲烷萃取得到的对照样中没有该吸收峰, 说明美拉德中间产物已生成^[18]。

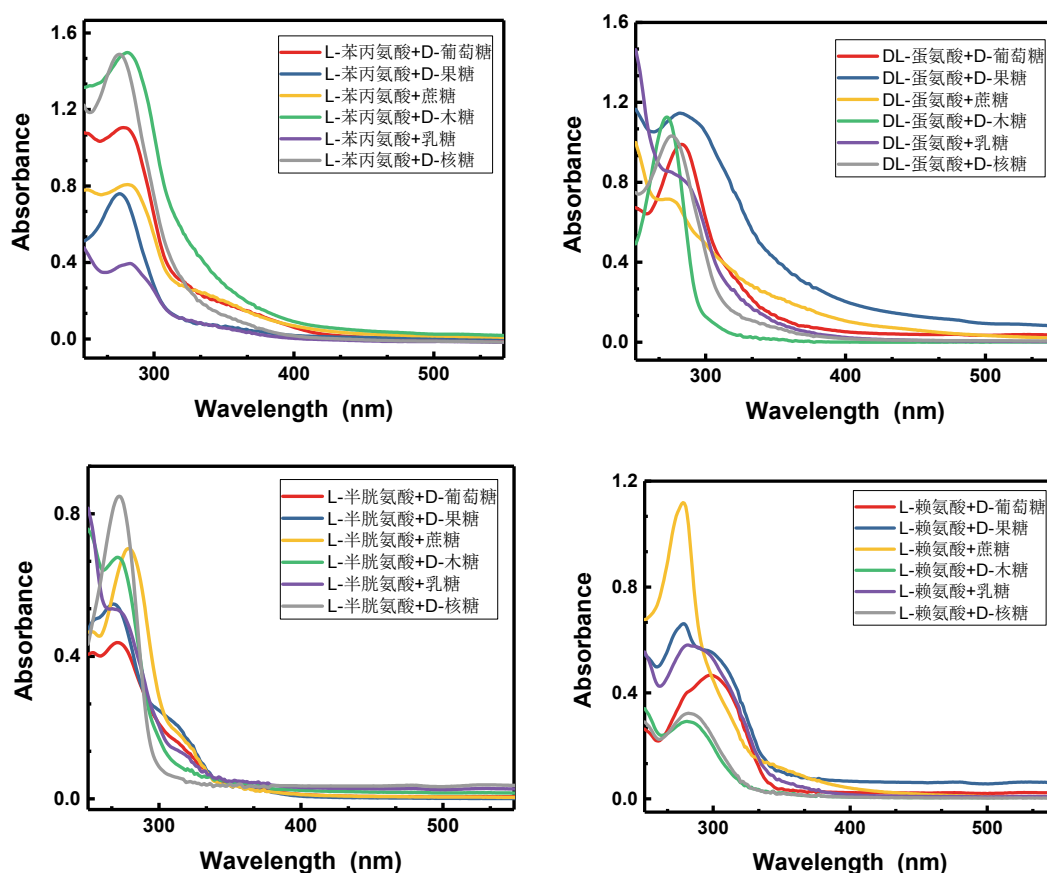


图3 4种氨基酸与糖的美拉德反应产物的紫外-可见光谱图

电子版为彩图

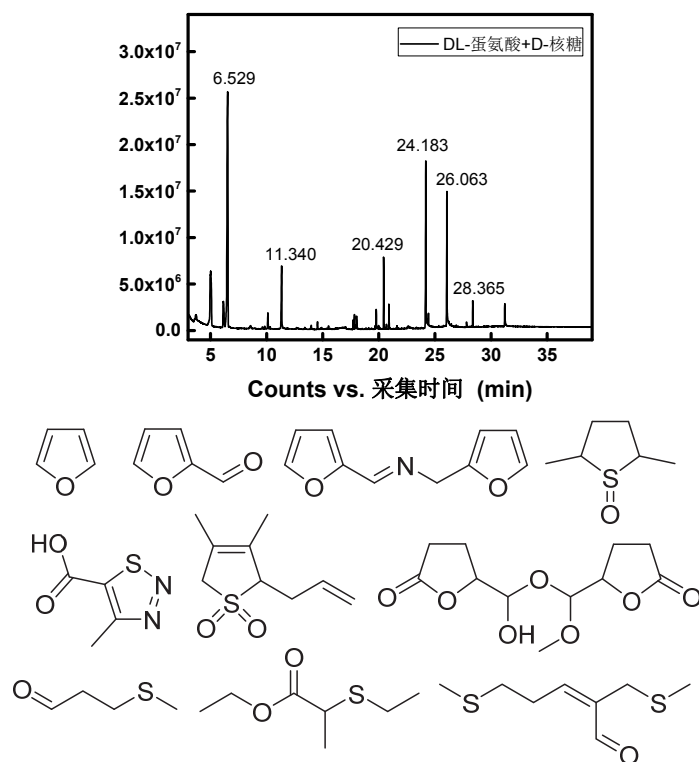


图6 DL-蛋氨酸与D-核糖的美拉德反应产物GC-MS分析图(上)与产物结构式(下)

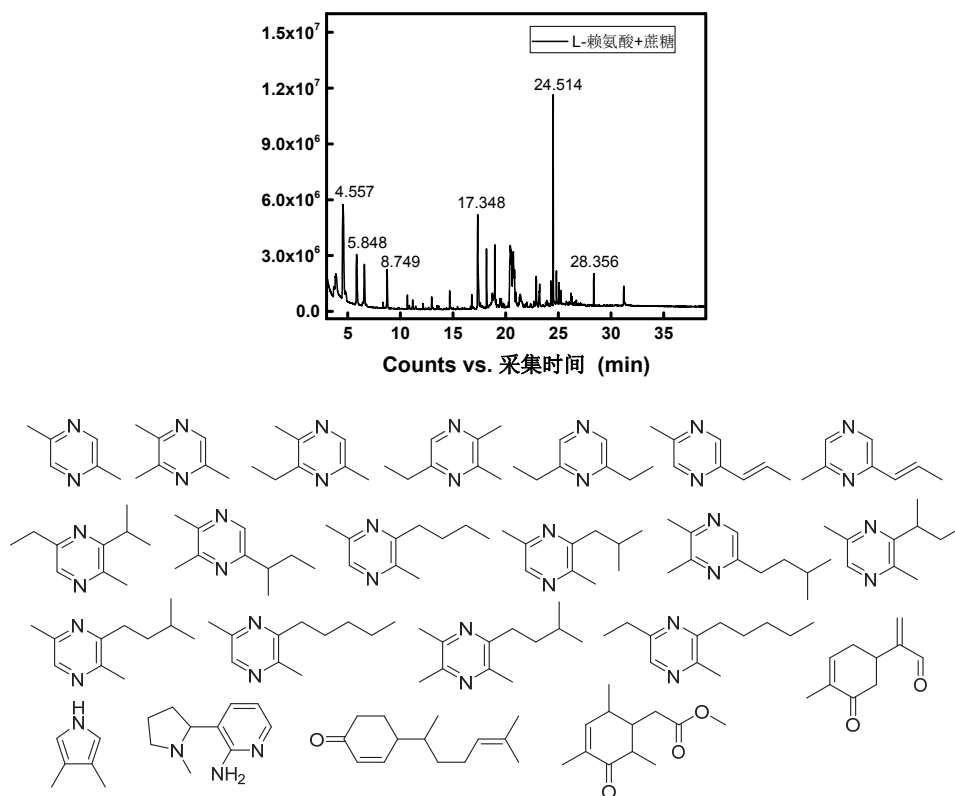


图7 L-赖氨酸与蔗糖的美拉德反应产物GC-MS分析图(上)与产物结构式(下)

2.6.2 蛋白质与糖的美拉德反应

蛋白质是多个氨基酸经过氨基和羧基的脱水缩合构成的生物大分子，由于赖氨酸、精氨酸均具有末端氨基，因此，蛋白质分子链上也存在游离的氨基，在适当的条件下能够进行美拉德反应，蛋白质与葡萄糖进行美拉德反应的机理如图8所示，反应的中期阶段同样能够生成系列芳香小分子化合物^[15]。

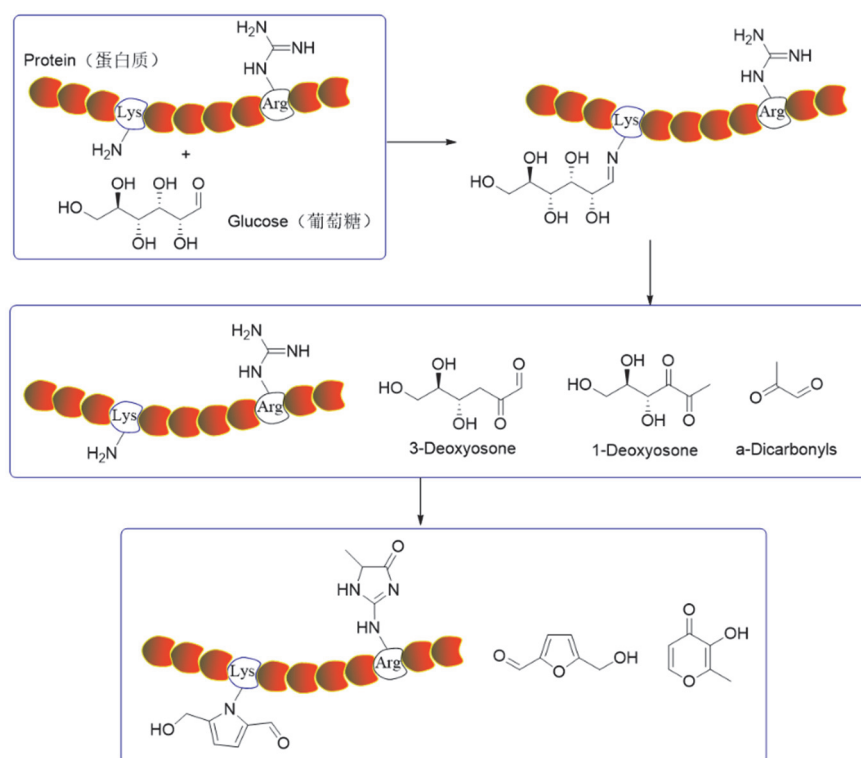


图8 蛋白质与葡萄糖的美拉德反应机理

全脂奶粉中的蛋白质主要为乳蛋白和酪蛋白，乳蛋白的赖氨酸残基具有很高的美拉德反应活性。本实验选用全脂奶粉和6种糖进行反应，通过紫外-可见光谱和气相色谱-质谱联用仪对其反应产物进行表征(图9)。

从图9a的紫外-可见光谱图中可见在270–294 nm区间出现强的吸收峰，证明奶粉与糖的美拉德反应中间产物已生成。图9b和9c奶粉与D-葡萄糖反应的气相色谱-质谱总离子流色谱图和产物结构图可得其反应产物主要为含氧杂环化合物、含硫化合物和烯酮类化合物。

2.6.3 厨房里的美拉德反应

中华饮食文化源远流长，博大精深。红烧肉、煎牛排、洋葱炒肉等，这些都是著名的大众菜肴，这些菜肴的制作过程中都有美拉德反应。

例如，红烧肉，色泽金黄，肥而不腻，口感微甜，入口酥软即化，深受广大人民群众喜爱。烹饪红烧肉，其材料主要有：五花肉、油、糖、生抽、盐、葱、姜、八角、花椒、桂皮、料酒，这些佐料能够与肉中蛋白质和氨基酸等成分产生复杂的化学反应。红烧肉的色主要是焦糖化反应，就是糖、油、水，高温融合变色，俗称炒糖色。猪肉蛋白、氨基酸与糖发生美拉德反应，是红烧肉香味的重要来源。如东坡先生诗词所言“净洗铛，少著水，柴头罨烟焰不起。待他自熟莫催他，火候足时他自美”，只要把控烹饪温度、控制水分含量、通过一定时间的烹制即可做出色、香、味俱佳的红烧肉。

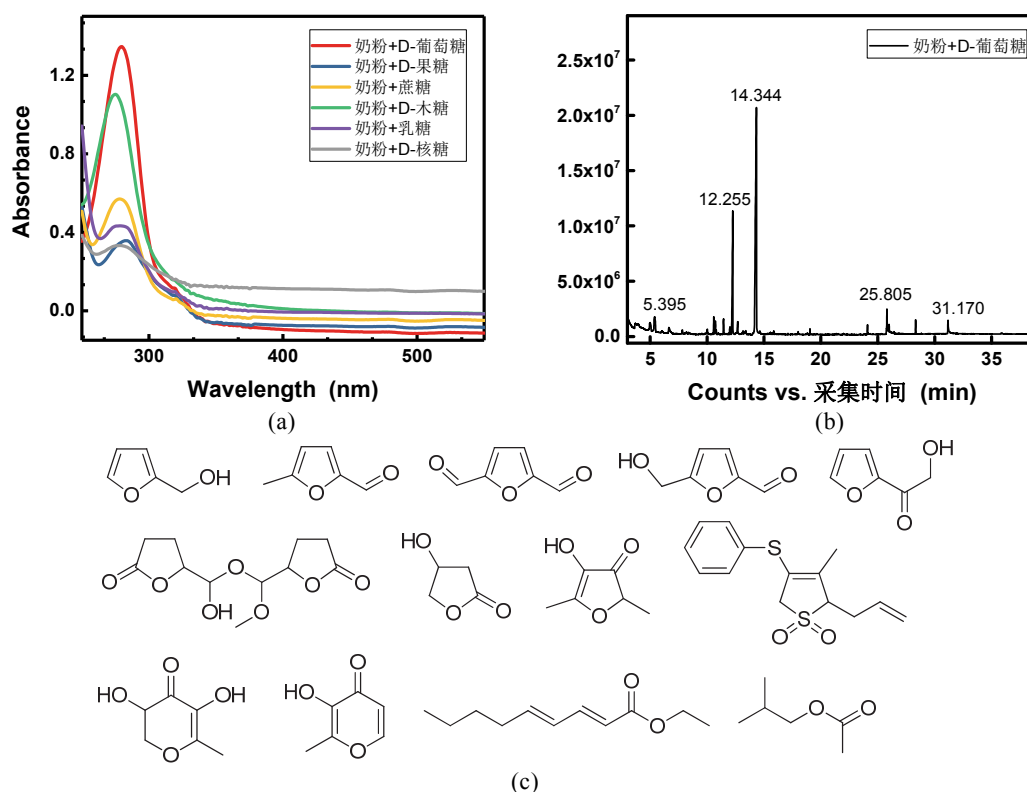


图9 奶粉与糖的美拉德反应产物表征

(a) 奶粉和6种糖反应产物的紫外-可见光谱图；(b) 奶粉和D-葡萄糖反应产物的GC-MS分析图；
(c) 奶粉和D-葡萄糖反应产物的结构式

为了回归科普实验的初衷，用化学原理和知识解释生活现象。我们走进厨房，用最简单的食材，利用美拉德反应，烹饪出红烧肉、煎牛排和洋葱炒肉这些著名的大众菜肴(图10)。

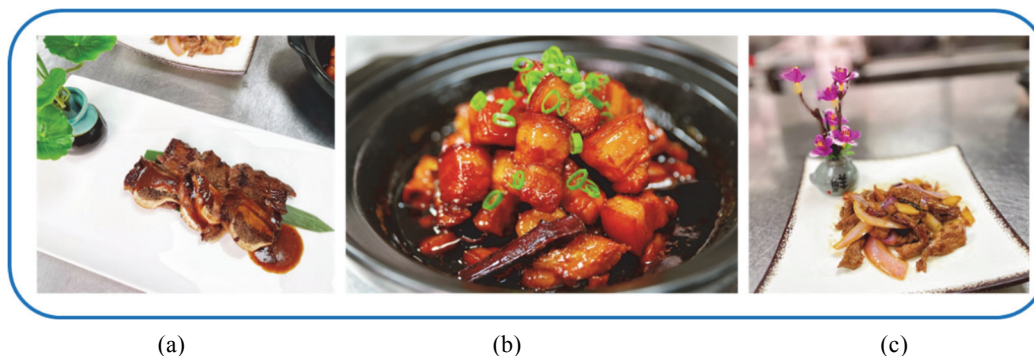


图10 通过美拉德反应烹制的美食

(a) 煎牛排；(b) 红烧肉；(c) 洋葱炒肉

对红烧肉中的美拉德反应产物进行提取与分析。夹取3块新鲜烹制的红烧肉，压碎后用二氯甲烷萃取2次，每次5 mL，合并萃取液，进行紫外-可见光谱和气质联用分析(图11)。由紫外-可见光谱可得在272 nm处有最大吸收峰，证明美拉德反应中期阶段小分子中间体的生成。气相色谱-质谱分析其主要成分有呋喃类、吡喃类、嘧啶类、噻唑类、硫醚类、芳香族类和烯酮类，这些美拉德反应中间产物是红烧肉特殊风味的重要来源。

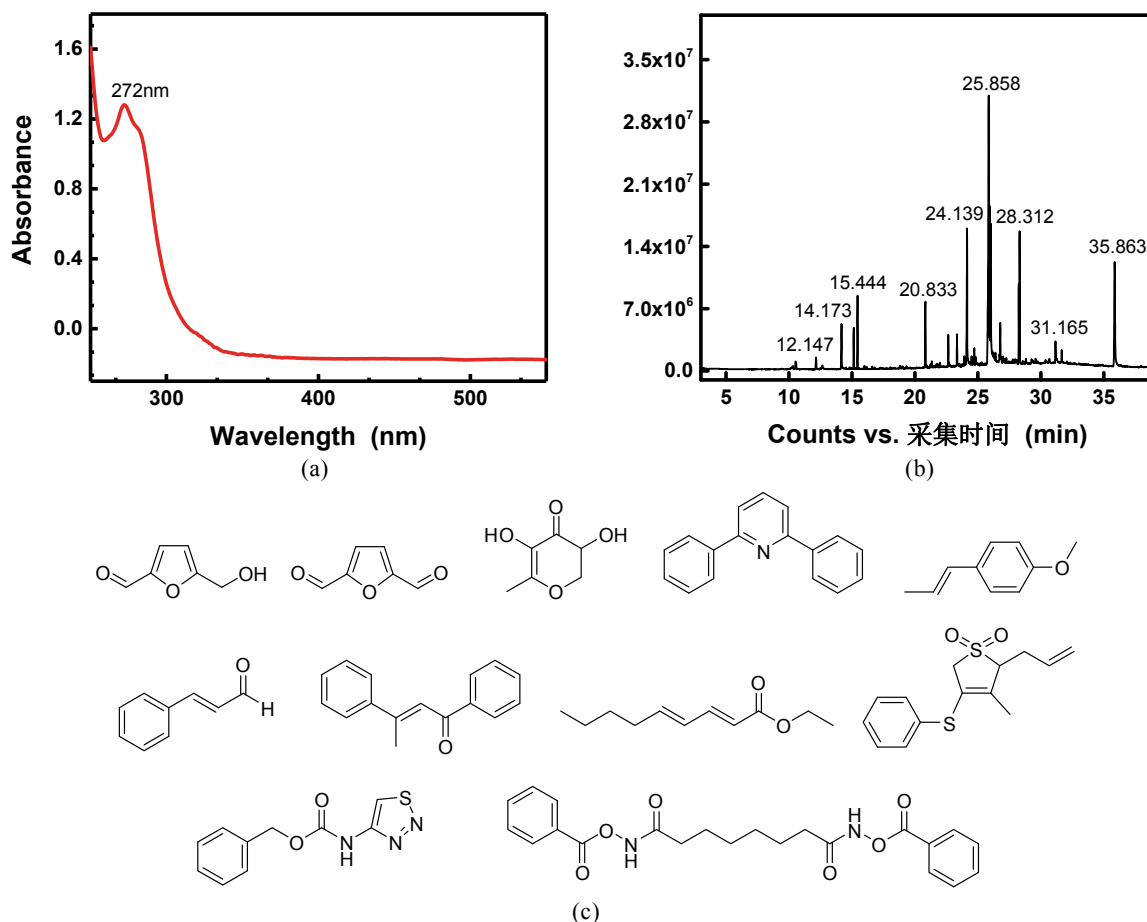


图11 红烧肉的美拉德反应产物表征

(a) 红烧肉提取产物的紫外-可见光谱图; (b) 红烧肉提取产物的GC-MS分析图; (c) 红烧肉提取产物的结构式

3 科普展示和互动方案

本科普内容适合各层次人群，眼观色、鼻闻香、口尝味，体验效果好。对于大、中、小学生，可以理论讲座和实验相结合，作为劳动课程中的“烹饪与营养”教学内容，有条件的学校还可开展风味成分的鉴定，拓宽学生知识面，提高对复杂反应进行分析的能力(图12)。

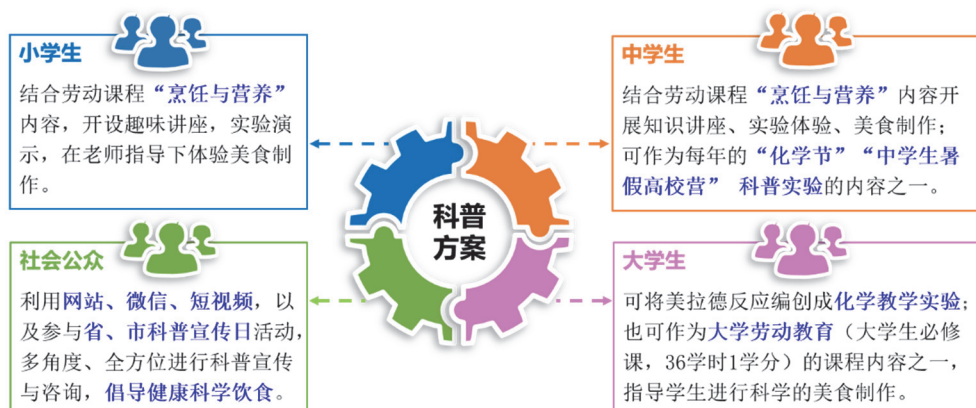


图12 科普展示与互动方案图示

小学生缺乏化学知识, 主要以激发、培养其探究未知世界的兴趣为主。习近平总书记说过“好奇心是人的天性, 对科学兴趣的引导和培养要从娃娃抓起”。美拉德反应实验以演示实验或者在老师的指导下完成为主, 可以事先将不同的糖和氨基酸分别称好装入样品瓶, 让学生自己来选取相应的原料进行反应, 闻香识“美食”, 让自己成为一名优秀的“调香师”。

有一定化学基础的中学生, 要让他们感到“生活处处皆化学”“化学从生活中来, 又回到生活中去”, 除了让学生掌握美食的烹制技巧, 还要引导学生掌握其背后的化学基本原理, 热爱化学, 并有志于今后选取化学作为自己的专业。

对于大学生, 要了解美拉德反应的研究内容、研究方法, 以及未来发展方向, 要侧重于培养学生的实验探究能力, 提高化学学科核心素养。

对于社会公众, 很多已有制作美食的经验和心得, 但背后的原理未必清楚。可以通过现场科普宣传、咨询, 网络科普作品展播, 传播美食烹调过程中的化学原理, 用科学知识解释生活经验, 同时提供合理建议, 指导并提高烹饪技艺。将化学与美食、营养、健康、快乐联系起来, 使社会公众明白化学使我们的生活更美好。

本科普实验时长4–8 h, 具体时长和内容可以根据科普对象和需求进行组合设计。

4 结语

本实验对复杂的美拉德反应体系和实验研究方法进行了创新性至简化设计, 以常见氨基酸、蛋白质与糖为原料, 开发了在家用微波炉里能完成的简单、安全、易于操作的美拉德反应, 产物具有不同的怡人特征风味, 并通过紫外-可见光谱、气质联用分析技术解析了风味产物的结构, 建立美味与化学成分之间的本质关联。同时, 将美拉德反应应用于厨房里的的美食制作, 现场烹饪出色、香、味、营养俱佳的菜肴。

本科普实验普及化学知识, 解密美味之源。贴近生活的实验内容, 由简至繁、由浅入深、层层递进的科普实验设计, 适合于社会各层次人群。近年来, 已在多个中学开展过与本实验相关的科普讲座与实验活动, 深受好评。

5 特点/特色/创新性声明

(1) 氨基酸、蛋白质、糖以及常见食材, 价格低廉, 反应条件简单, 普通居家环境均可实现。实验过程绿色环保、产物无毒害, 实验结果稳定性、重现性好。制作的美食可享用, 不浪费。

(2) 美食制作是每个人的一项必备技能, 本科普内容适合各层次人群, 普及需求大、传播渠道广。眼观色、鼻闻香、口尝味, 体验效果好。

(3) 传播食品化学知识, 用科技演绎生活智慧。探索美味的化学奥秘, 使人们懂得制作并享受健康美食, 热爱生活。本实验展示了化学的神奇与魅力, 有助于激发社会公众对化学的兴趣与热爱。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国教育部: 义务教育劳动课程标准(2022年版). [2022-06-21].
<http://www.moe.gov.cn/srcsite/A26/s8001/202204/W020220420582367012450.pdf>
- [2] Aljahdali, N.; Carbonero, F. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2019**, *59* (3), 474.
- [3] Geng, J. T.; Takahashi, K.; Kaido, T.; Kasukawa, M.; Okazaki, E.; Osako, K. *Food Chem.* **2019**, *283*, 324.
- [4] Maillard, L. C. *R. Acad. Sci.* **1912**, *154*, 66.
- [5] Hodge, J. E. *J. Agric. Food Chem.* **1953**, *1* (15), 928.
- [6] Nooshkam, M.; Varidi, M.; Bashash, M. *Food Chem.* **2019**, *275*, 644.
- [7] Sun, A.; Wu, W.; Soladoye, O. P.; Aluko, R. E.; Bak, K. H.; Fu, Y.; Zhang, Y. H. *Food Res. Int.* **2022**, *151*, 110823.

-
- [8] Poojary, M. M.; Lund, M. N. *Annu. Rev. Food Sci. Technol.* **2022**, *13*, 35.
- [9] Smuda, M.; Glomb, M. A. *J. Agric. Food Chem.* **2013**, *61* (43), 10198.
- [10] Scalone, G. L. L.; Cucu, T.; Kimpe, N. D.; Meulenaer, B. D. *J. Agric. Food Chem.* **2015**, *63* (22), 5364.
- [11] Hidalgo, F. J.; Alcón, E.; Zamora, R. *Food Res. Int.* **2013**, *54* (2), 1394.
- [12] Nikolov, P. Y.; Yaylayan, V. A. *J. Agric. Food Chem.* **2011**, *59* (18), 10104.
- [13] Nooshkam, M.; Varidi, M.; Verma, D. K. *Food Res. Int.* **2020**, *131*, 109003.
- [14] Li, H.; Yu, S. J. *J. Sci. Food Agric.* **2018**, *98* (9), 3225.
- [15] Hellwig, M.; Henle, T. *Angew. Chem. Int. Edit.* **2014**, *53* (39), 10316.
- [16] Newton, A. E.; Fairbanks, A. J.; Golding, M.; Andrewes, P.; Gerrard, J. A. *Food Funct.* **2012**, *3* (12), 1231.
- [17] Liu, J. B.; Song, H. L.; Liu, Y.; Li, P.; Yao, J.; Xiong, J. *J. Sci. Food Agric.* **2015**, *95* (15), 3183.
- [18] Deng, W. J.; Luo, J. W.; Yan, X. M. *Ferroelectrics* **2020**, *562* (1), 39.