

•科普•

doi: 10.3866/PKU.DXHX202002008

www.dxhx.pku.edu.cn

舌尖上的化学——酱油那些事儿

龚钰扉, 李世扬, 宋红杰, 张立春*

四川大学化学学院, 成都 610064

摘要: 古语云: “柴米油盐酱醋茶”, 作为厨房中最普遍的调味品之一, 酱油每天都会为我们带来丰富的味觉体验。为了让读者更加全面深刻地了解这一与我们生活密切相关的调味品, 本文从化学的角度介绍了酱油的历史、酿造工艺和色香味形成的原理。

关键词: 酱油; 历史; 工艺; 性质; 科普

中图分类号: G64; O6

A Taste of Chemistry: All the Little Things about Soy Sauce

Yufei Gong, Shiyang Li, Hongjie Song, Lichun Zhang*

College of Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064, P. R. China.

Abstract: As an old saying goes: “firewood, rice, oil, salt, sauce, vinegar, tea”, as one of the most popular seasonings in the kitchen, soy sauce brings us rich taste experience every day. In order to give readers a more comprehensive and in-depth understanding of this condiment that is closely related to our lives, this paper introduces the history of soy sauce, brewing technology and the formation principle of color and flavor from the perspective of chemistry.

Key Words: Soy sauce; History; Technology; Nature; Science popularization

“是谁来自山川湖海, 却囿于厨房与爱”, 厨房里的故事, 舌尖上的化学, 便从柴米油盐酱醋茶开始^[1-3]……大家好, 我是《舌尖上的化学》的主持人——小化, 本期我将带您走进发酵的奇妙世界, 一起来聊聊酱油那些事。

1 时间的积淀

酱油, 想必大家都不陌生, 从我们小时候尝到第一口家常饭菜起, 便与它结下了不解之缘, 它那芳香馥郁的特殊风味, 是人与微生物携手共进的成果, 这充满魔力的变化, 称之为发酵。而这一切, 早已传承了三千多年……

这一古老的发酵工艺产物, 源自于周, 脱胎于酱, 中国人的老祖宗, 在幸运女神的眷顾下, 用一些坛坛罐罐, 加上敏锐的直觉, 打造了一个食物的新境界。

“中国的酱”, 是人类的发酵史上一颗耀眼的明星, 绵延数千年间, 它不断改变, 也有所保留, 承载着一代又一代中国人的饮食文化。随着酿造工艺的不断进步, 各式新颖的调味料出现在家家户户的厨房里和餐桌上, 但在现代化的流水线上, 酱油这一古老的调味品, 正焕发着它新的光彩。

收稿: 2020-02-02; 录用: 2020-02-27; 网络发表: 2020-03-06

*通讯作者, Email: zhanglichun@scu.edu.cn

基金资助: 四川大学创新火花项目(2018SCUH0078); 四川大学新世纪高等教育教学改革工程第八期(SCU8157)

2 转化的奥秘

作为一种咸与鲜完美融合的调味品，酱油来自于自然的馈赠，由富含蛋白质的豆类和富含淀粉的谷类通过微生物发酵、过滤、配制等工序制作而成。在时间的作用下，每一滴酱油都凝结着天地之精华，从氨基酸、多肽、可溶性蛋白，到糖类、脂质、维生素，再到钙、铁、磷等矿物质^[4]，可谓是有应有尽有、无一或缺。要达到让食物转化成美食的境界，这其中要逾越屏障，要营造条件，要把握机缘，要经历成败，要用心去感受这转化的奥秘……

2.1 原料的精细

大豆、小麦等富含蛋白质和淀粉的原料，是构筑这味觉奇迹的基石。

何为蛋白质？蛋白质是由数十个至数百个氨基酸，以脱水缩合的方式组成的多肽链，经过盘曲折叠形成的具有一定空间结构的物质。

何为淀粉？淀粉是由葡萄糖分子聚合而成的高分子碳水化合物，可分为直链淀粉和支链淀粉两类。直链淀粉是由许多个 α -D-吡喃葡萄糖分子通过 α -1,4 糖苷键连接而成的大分子化合物，而支链淀粉中除了 α -1,4 糖苷键，还有部分的 α -1,6 糖苷键。

以蛋白质为砖、以淀粉为瓦，在时间的洗刷下，它们与水解产物一道，是鲜味的担当，是能量的来源，是这座味觉奇迹建造的不竭动力，是那香气的类型、颜色的深浅的最为直接的决策者，它们的数量与比例，将与这座味觉奇迹的成败荣辱，产生千丝万缕的密切联系。

至于食盐，则是另一不可或缺的重要原料。酱油的咸味，主要来源于食盐，并在氨基酸、多肽、可溶性蛋白的共同调节作用下，食盐单调的咸味得以抹去，酱油独特的咸鲜由此显现。不仅如此，食盐还可以抑制发酵过程中有害杂菌的生长，为这味觉奇迹的保存也起到了重要的作用。

2.2 菌种的精巧

曲霉菌、酵母菌、乳酸菌^[5]等微生物，是建造这味觉奇迹的巧匠。

在建造这味觉奇迹的过程中，首先闪亮登场的便是曲霉菌，它可以释放蛋白酶系、淀粉酶系、糖化酶系等多种魔法，将蛋白质、淀粉等大分子转化为小分子的氨基酸、多肽和可发酵糖，为其他微生物提供发酵的原材料^[6]。

曲霉菌释放的蛋白魔法中，以中性蛋白酶活性最强，在其催化作用下，蛋白质中的多肽链首先解开缠绕折叠，变为单独的肽链，肽链再逐步断裂肽键，生成小分子的多肽，最终降解为游离的氨基酸。

曲霉菌释放的淀粉魔法中，以 α -淀粉酶为主，在其催化作用下，淀粉中的 α -1,4 糖苷键和 α -1,6 糖苷键逐渐水解断裂，生成糊精、麦芽三糖、麦芽二糖和葡萄糖(图 1)。

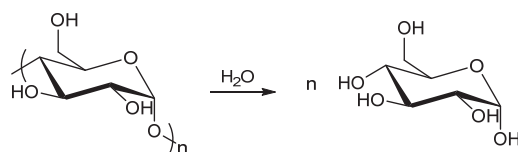


图 1 直链淀粉的水解

蛋白质、淀粉等大分子转化为小分子后，曲霉菌的表演就进入了尾声。随着温度的下降，曲霉菌很快便失去活力，接下来酱醅发酵的舞台就交给了酵母菌和乳酸菌。

利用曲霉菌产生的可发酵糖，酵母菌和乳酸菌便开始了它们的表演：

酵母菌发酵产生醇类、醛类、羧酸类、酚类、酯类等风味物质^[7]，它们可是酱油风味的中流砥柱。

而乳酸菌则发酵产生乳酸，乳酸可与酱油中的各种醇类物质发生反应，产生具有特殊气味的乳酸酯，其为酱油香气的重要来源。除此之外，乳酸菌还可以促进其他微生物的生长和繁殖^[8]，加快这

一味觉奇迹的建造速度。

各种微生物在酱油酿造的过程中，各司其职、相互协作，施展着生物化学的魔法，只为给我们带来这舌尖上的味觉奇迹。

2.3 工序的精妙

精细的原料，精巧的菌种……要想建造这伟大的味觉奇迹，已是万事俱备，只欠精妙的工序了。酱油，可划分为发酵酱油和配制酱油两大阵营^[9]，而前者的发酵方式，宛如天上繁星不胜枚举，而低盐固态发酵^[10]便是其中最为璀璨绚丽的一颗；至于后者，则是以发酵酱油为原料，配以辅料制作而成，名虽两派，里脉实同。

要想建造这伟大的味觉奇迹，必须历经七个步骤^[11] (图 2)，每一步都是勇气与智慧的考验，每一步都是成功与失败的较量。



图 2 酱油生产工序

首先便是制曲，按照曲霉菌的生长曲线，进行严格的控温控湿和通风通氧，为其大展身手营造良好的环境。曲霉菌在底料中繁殖，并分泌大量的蛋白酶和淀粉酶为后续的酱醅发酵养精蓄锐。

成熟的曲饼在制醅机的磨砺下，粉碎成颗粒，与食盐水按一定的比例混合均匀，制成酱醅，转入干净的发酶池内，一场波澜壮阔的表演，即将开始。

在这场名为酱醅发酵的表演中，前半段主要是酱醅中的蛋白质和淀粉分别在蛋白酶和淀粉酶的作用下，分解为小分子的氨基酸、多肽和可发酵糖^[12]，一般持续 10 天左右。

之后，酵母菌和乳酸菌便登上了酱醅发酵舞台，开始了接下来的表演^[13]，在酵母菌和乳酸菌的共同作用下，一味觉奇迹的各种风味物质得以形成，30℃ 下持续 14–20 天，方才落幕。

待各种微生物表演完毕后，向酱醅中加入水进行浸泡洗涤，将其中含有的可溶性物质抽取出来，过滤得到生酱油，再经过加热灭菌，并加入防腐剂、甜味剂、助鲜剂等食品添加剂后，各类不同规格层次的味觉奇迹就此建成。

3 意境的调和

与西方“菜生而鲜，食分而餐”的传统饮食文化相比，中国的菜肴更讲究“色、香、味”，而在这一系列意境的追逐中，酱油无疑是意境调和的集大成者……

3.1 色

酱油之色，红棕抑或焦黄，这诱人食欲的颜色，是美拉德反应、焦糖化反应和酶促褐变反应的手笔^[14]。

何为美拉德反应？它是一种在食品加工中广泛存在的非酶促褐变反应，是指羰基化合物和氨基化合物之间通过许多复杂的反应，最终生成深色大分子的过程。自 1953 年 Hodge^[15]对美拉德反应的机理提出了较为系统的解释至今，仍有许多未解之谜等待后人去探索，你若想在这里了解它的冰山一角，我可以偷偷告诉你它第一步的奥秘(图 3)。

在那场名为酱醅发酵的表演中，酱醅中丰富的氨基酸、多肽、可溶性蛋白等各种胺类和糖类物质相互作用，共同谱写那具有特殊香气的类黑色素^[16]，它们不仅给酱油染上了诱人的颜色，还赋予了酱油独特的口感。

至于这魔法施展的快慢，以及所生成的色素颜色的深浅，则和施展魔法的底物有着直接的关系。由于色氨酸、组氨酸等含有共轭体系的氨基酸比较调皮，喜欢夺取光子的能量，所以生成的色素往往颜色较深。糖类化合物中，以还原性的五碳糖最为活泼，例如核糖、阿拉伯糖、木糖，所以当采用含有丰富的多聚木糖的麸皮为发酵原料时，所得到的酱油颜色也会偏深。

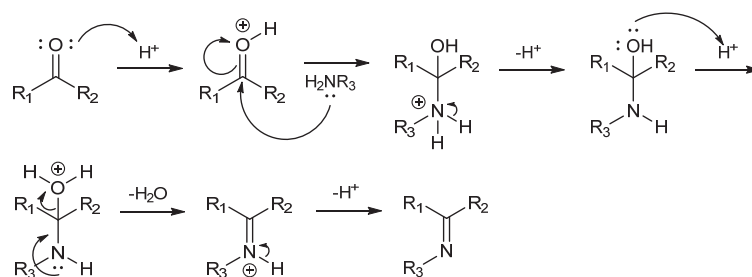


图3 美拉德反应起始阶段第一步：席夫碱(Schiffbase)的生成

何为焦糖化反应？它是糖类在加热条件下发生脱水、降解、缩合，最终生成成分复杂的焦糖色化合物的过程^[17] (图 4)。

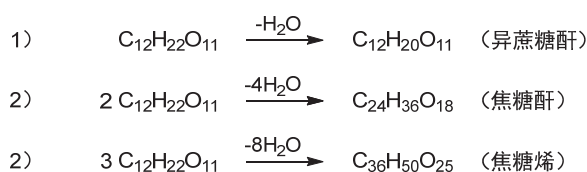


图4 蔗糖的焦糖化反应方程式

焦糖化反应一般发生在生酱油加热灭菌的阶段，这也是成品酱油较生酱油颜色加深的原因。焦糖类物质在给酱油染色的同时，也赋予了酱油特殊的甜味口感。

何为酶促褐变反应？它是酱醅中络氨酸或带有络氨酸残基的多肽、蛋白质，在酪氨酸酚羟基酶、多酚氧化酶和氧同时存在下，被氧化为醌类，再氧化聚合形成黑色素的过程。酶促褐变一般发生在酱醅发酵的后期。

除此之外，不同种类酱油的颜色还与酱油中亚铁离子含量、有机酸的种类及含量、酱油的 pH 有着密切的关系。

3.2 香

酱油之香，一闻钟情，再闻倾心，这诱人食欲的香气的形成，是一个极为复杂的过程，但无论如何，总有醇类、醛类、羧酸类、酯类、酚类、缩醛类和呋喃类化合物的身影^[18]。

酱油中的醇类化合物主要有乙醇、正丁醇、异戊醇等。乙醇作为一种易挥发的溶剂，可以将酱油中的香味物质带出，促进了酱油风味的表达。此外，酱油中还含有微量的苯乙醇、2,3-二甲基丁醇、辛-1-烯-3-醇、3-甲硫基丙醇等具有特殊气味的醇。虽然它们相较于乙醇含量较低，但是对酱油的风味却有重要的贡献^[19]。低级的醇主要是由酵母菌发酵所得，较高级的醇则是由相应的氨基酸通过脱氨脱羧而成。

酱油中醛类和羧酸类物质主要包含苯乙醛、2-甲基-2-丁烯醛、2,3-二甲基丁醛、乙酸、2-甲基丙酸、2,3-二甲基丁酸、乳酸、柠檬酸、苹果酸、琥珀酸等。它们主要是由相应的醇，在微生物的作用下催化氧化而来，乳酸则是由乳酸菌通过发酵产生的。其中 2-甲基-2-丁烯醛、乳酸、苯乙酸、2,3-二甲基丁酸是决定酱油风味的关键物质。

酯类化合物是由酱油中的醇类和羧酸类物质通过酯化反应形成的。主要包括乙酸酯和乳酸酯两类化合物，酯香型酵母也可以产生一部分酯类。酯类化合物都具有特殊的香气，其中乳酸酯是酱油中重要的风味物质。

至于缩醛类化合物，则具有和酯类化合物类似的气味。

酱油中酚类物质的含量和种类都比较少，主要包括麦芽酚和愈创木酚两类，它们都是决定酱油风味的关键性物质，其中麦芽酚给酱油带来焦糖的气息。

呋喃类化合物主要包含糠醛和糠醇，它们都是由糖脱水而来，具有类似焦糖的甜香和辛香，在一定程度上，影响了酱油的风味。

3.3 味

酱油之味，始于咸，继以鲜，终于甜，咸中带鲜，鲜里回甜。

酱油之咸，源于食盐，较之盐水，更显柔和。这是由于酱油中丰富的氨基酸、多肽、可溶性蛋白和有机酸缓和了食盐的味道，使酱油的咸味显得柔和爽口，更加能刺激人的食欲。

鲜味是富含氨基酸或核苷酸的食物的一种特殊复杂而难以用语言来描述的味道，酱油之鲜，源于蛋白质水解得到的氨基酸和多肽，其中以谷氨酸钠的鲜味最佳^[20]。除此之外，核酸分解得到的 5'-肌苷酸和 5'-鸟苷酸也是强鲜味的物质(图 5)。鲜味通常不能独立作为菜肴的滋味，在鲜味的表达过程中，一般要先建立在咸味的基础之上，方能呈现出真正的鲜味。酱油的咸和鲜相互衬托，造就了酱油特殊的口感。

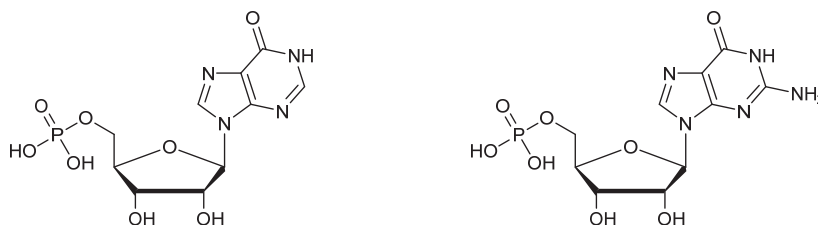


图 5 5'-肌苷酸和 5'-鸟苷酸结构式

酱油甜味的主要来源，是酱油中丰富的糖类物质。另外，具有甜味的氨基酸和多元醇也赋予了酱油醇厚的甜味。

4 结语

从周而始，延续至今，从百顷良田，走遍万家餐桌，三千年洗礼，不曾使其褪色分毫，数十道工序更令其容光焕发，行文至此，文尽而意无穷，酱油的故事仍在继续，舌尖上的化学，正在为我们的生活创造无限可能！

参 考 文 献

- [1] 张海波, 白云玲, 丁琼. 大学化学, **2019**, 34 (8), 92.
- [2] 龚钰扉, 车永杰, 孔建云, 郑学丽. 大学化学, **2019**, 34 (8), 118.
- [3] 刘艳红, 李静, 李坤, 余孝其, 吴迪. 大学化学, **2019**, 34 (8), 102.
- [4] 周琪洋. 酱油生产菌种改良及其工艺的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009.
- [5] 陈彬, 鲁绯, 王夫杰, 殷丽君. 中国酿造, **2010**, No. 6, 1.
- [6] 李园园. 米曲霉产淀粉酶和纤维素酶的初步研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2011.
- [7] 王姝妤. 学周刊, **2018**, No. 6, 169.
- [8] 刘卓. 耐盐乳酸菌对酱油风味的影响[D]. 天津: 天津科技大学, 2009.
- [9] 赵维克. 食品安全导刊, **2016**, No. 33, 98.
- [10] 百度百科. [2019-10-22]. <https://baike.baidu.com/item/%E9%85%B1%E6%B2%B9/1246>.
- [11] 王振伟, 王振强. 发酵食品加工技术. 第1版. 郑州: 郑州大学出版社, 2014.
- [12] 杨牢记, 徐敏锐, 祝熙, 谢国排, 程伟, 施春霖, 李彬, 汪焰胜, 黄训端, 张部昌. 酿酒, **2017**, No. 4, 48.
- [13] 李荣和, 姜浩奎. 大豆深加工技术. 第1版. 北京: 中国轻工业出版社, 2010.

-
- [14] 张国珍. 食品生物化学. 第1版. 北京: 中国农业出版社, 1992.
- [15] Hodge, J. E. *J. Agric. Food Chem.* **1953**, No. 3, 928.
- [16] 赵德安. 江苏调味副食品, **2006**, No. 1, 22.
- [17] 百度百科. [2019-10-22].
<https://baike.baidu.com/item/%E7%84%A6%E7%B3%96%E5%8C%96%E5%8F%8D%E5%BA%94/3374228?fr=aladdin>.
- [18] 张博华. 高盐稀态酱油中主要风味物质的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2009.
- [19] 张艳芳, 陶文沂. 精细化工, **2008**, No. 3, 260.
- [20] 吴秀琴. 江苏食品与发酵, **2003**, No. 3, 35.