

“食”游记之“火眼金睛辨凝妖”

董梓凝¹, 姚力箏¹, 李一冉¹, 郑非凡¹, 蔡梓曦¹, 石朝阳¹, 蔡宁静¹, 王景源¹, 颜静^{2,*}, 闫毅^{1,2,*}

¹ 西北工业大学伦敦玛丽女王大学工程学院, 西安 710072

² 西北工业大学化学与化工学院, 西安 710129

摘要: 水凝胶是一种具有三维网络结构的高分子, 在食品、日常用品和高科技等领域都有着广泛应用。本文以天然水凝胶和合成水凝胶在食品领域的几个应用为例, 一方面, 从食品化学的角度介绍了西安地域美食文化中具有天然水凝胶结构的多种美食以及其所涉及的化学原理。同时也介绍了水凝胶食品中添加硼砂、工业明胶和明矾的潜在健康危害和辨别方法; 另一方面还穿插介绍了水凝胶的性质和前沿应用。

关键词: 水凝胶; 美食; 食品安全

中图分类号: G64; O6

An Introduction to Hydrogels in Delicacy

Zining Dong¹, Lizheng Yao¹, Yiran Li¹, Feifan Zheng¹, Zixi Cai¹, Zhaoyang Shi¹, Ningjing Cai¹, Jingyuan Wang¹, Jing Yan^{2,*}, Yi Yan^{1,2,*}

¹ Queen Mary University of London Engineering School, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China.

² School of Chemistry and Chemical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China.

Abstract: Hydrogel is a polymer with a three-dimensional network structure, and is widely used in food, daily necessities and high technology fields. This article introduced the applications of natural hydrogels in food by using the examples of delicacy from Xi'an. On one hand, the chemistry for the preparation of these foods was well introduced, especially the potential health hazards and identification methods of borax, industrial gelatin and alum in hydrogel food were also introduced. On the other hand, the properties and advanced applications of hydrogels are also included.

Key Words: Hydrogel; Delicacy; Food safety

为了找寻大唐盛世遗落的美食真经, 高僧唐藏带领他的徒弟孙空空、猪八戒和沙净净准备再走取经之路。第一站他们去了位于西安(古长安城)北侧的大明宫, 也就是大唐帝国曾经的大朝正宫。结束探访后已经天色渐晚, 于是他们来到了离大明宫不远的永兴坊稍作休整。师徒四人从百姓口中打听到, 永兴坊是大唐长安城一百零八坊之一, 是长安著名的小吃聚集地。放眼望去, 美食珍馐琳琅满目, 牛羊肉泡馍、肉夹馍、老酸奶、金线油塔、甑糕等各色小吃映入眼帘, 引得四人迫不及待地加入热闹之中……

收稿: 2021-02-24; 录用: 2021-05-04; 网络发表: 2021-05-14

*通讯作者, Email: yanyj@nwpu.edu.cn (闫毅); yanjing@nwpu.edu.cn (颜静)

基金资助: 西北工业大学教育教学改革研究项目(2020JGY31, 2021JGY41); 第二批陕西省新工科研究与实践项目(20GZ110109); 陕西省教育科学“十三五”规划2020年度课题(SGH20Y1020); 西北工业大学2020年“课程思政”示范课程建设项目(Polymer Degradation); 2021年校高等教育研究基金(G2020KY0701)

1 师徒初闻水凝妖 村民困惑难辨真伪

“我曾听说坊间有个家喻户晓的水凝妖。”唐藏藏介绍道，“他是水凝胶幻化而来，就是一种装满水(以水为分散介质)的立体网状凝胶，他本是一种能溶于水(水溶性或亲水性)的高分子。这不怕水的本领，就是因为一些亲水的朋友(亲水基团)愿意加入他，把水分子紧紧地抓住。再通过物理或化学交联形成的网络结构，使他不溶于水。所以，水凝妖不仅可以将大量的水吸进体内，还能保持自己的身材(形状)，而且还具有很强的抗溶解能力^[1]。”

“师父，我还听说水凝妖好像不是只身一人呢！他还有很多兄弟姐妹。”沙净净感叹。

“没错，水凝妖大家庭的成员，有来自天然的，也有后天人工合成的。比如我们常食用的淀粉、纤维素和壳聚糖等多糖类，以及胶原等多肽类，就是天然的水凝妖；像聚丙烯酸、聚甲基丙烯酸、聚丙烯酰胺、聚异丙基丙烯酰胺之类，就是合成的水凝妖。”

猪八戒一心只想着吃，边流着口水边问：“这么厉害的人物，他是不是能制作很多美食呢？”

唐藏藏耐心地讲：“这个水凝妖，精通物理和化学变化，能够烹饪出具有水凝胶结构的美食，他的厨艺收获了来自世界各国游客的一致好评。想必，他会知晓这所谓美食真经的线索吧……”

“明明是你假扮的我！”唐藏藏的介绍被突然从远处传来的争吵声打断。

“施主，这里发生什么了？”唐藏藏向村民打听道。

“此地有一对水凝妖兄弟，一位是天然水凝妖，一位是合成水凝妖。天然水凝妖十分擅长将物理化学原理运用到烹饪艺术中，他有许多拿手好菜，比如胡辣汤、甍糕、玉米搅团等。而合成水凝妖开了家零售店，专门售卖各种水凝胶的生活用品，比如隐形眼镜、液体创可贴、免洗手消毒液等。本来相安无事，但最近合成水凝妖假冒天然水凝妖的样子，想要吞并他的美食店，大家分不清孰真孰假了。”

“哎，本是同根生，相煎何太急。贫僧提议进行厨艺争霸赛，孰真孰假当下立见。”唐藏藏提议。

2 胶妖斗法争厨王 化学原理辨真身

唐藏藏的提议赢得了大家的认可，师徒四人被邀请成为评委，一场紧张激烈的比赛拉开了帷幕。比赛分为三局，每回合参赛双方需要拿出一道自己的拿手好菜。

2.1 第一回合——劲道的奥妙

只见左边的水凝妖手法娴熟流畅，不一会儿就端出几大碗biangbiang面呈现在评委面前。右边的水凝妖也不甘示弱，紧随其后端上来几份玉米搅团。

左边的水凝妖率先开口：“biangbiang面的名字来源于面条制作过程中与案板接触摔打的声音。此面条的独特之处在于添加了硼砂，可以让面条变得白净、劲道。硼砂俗称月石，其水溶液呈弱碱性。如图1所示，和面的过程中，面粉中的麦胶蛋白和麦谷蛋白与水形成氢键，水分子被吸附到蛋白质表面形成水化膜。作为电解质的硼砂则可以有效改变蛋白的水化作用，增加其表面的电荷数量；同时，面粉中的淀粉在硼砂碱性作用下部分水解成糊精，破坏了蛋白质的结构，使蛋白质内部基团的相互接触成为可能，增大了形成蛋白质凝胶网络的概率，使得面条的口感更有韧性^[2]。

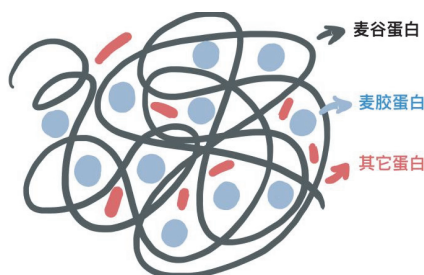


图1 面粉蛋白质凝胶结构

“胡说八道，妖言惑众！盐和碱面才是可食用的biangbiang面添加剂，你加入的硼砂根本就不可食用！国家早就明令禁止其作为食品添加剂使用。你忘了有个食客吃了你的面条急性中毒了吗？他当时呕吐得一塌糊涂，险些丧命。你一定是合成水凝胶！”孙空空用他的火眼金睛辨别后大声说道。

“胡说！口说无凭，有本事你拿出证据来！”左边的水凝妖气得跳了起来。

“哼，别急啊！看我姜黄试纸！”孙空空拔了根毫毛一吹，变出来几盒试纸。“人摄入硼砂后，会与胃酸混合形成硼酸，引起‘硼酸症’，轻者呕吐腹泻，重者昏迷休克。姜黄试纸检测法便是依据质子化的姜黄试纸在酸性条件下和硼砂反应形成硼酸而呈现红色的原理来检验硼砂的^[3]。”

话音未落，孙空空手里接触到了左边水凝妖的biangbiang面的试纸就已经变红了。

“那他带了什么呢？”左边的水凝妖眼见自己要败露，气急败坏地用手指了指右边的水凝妖。

右边的水凝胶缓缓开口介绍自己的美食：“我们常见的淀粉其实是好哥俩‘直链淀粉’和‘支链淀粉’的组合。他们的基本结构虽然都是吡喃葡萄糖，但是二级结构和性质差异较大。直链淀粉顾名思义是由一个直链型大分子，在分子内氢键的作用下呈现螺旋状，有时也可能呈现卷曲状；而支链淀粉的分子由主链和若干侧链组成，呈现树状分叉结构，与直链分子相比聚合度要大得多。我们常说的碘遇淀粉变蓝指的就是直链淀粉。此外，直链淀粉溶于热水，难以糊化，支链淀粉在热水中糊化膨胀。”

“我做的这道美食是搅团，其原料选自陕西本地的玉米淀粉，支链淀粉含量约74%。制作时，向玉米淀粉中加入清水，这时的淀粉颗粒具有胶束结构，淀粉分子形成的结晶区较为紧密，因此水分子只进入淀粉粒的非晶质部分，体积略有膨胀；加热后，淀粉颗粒开始大量吸水，体积剧烈膨胀至原来的60–100倍，发生了所谓膨润现象；紧接着，当温度达到糊化的起始温度时，淀粉分子晶区会发生水合作用，结晶区和无定形区间的氢键被破坏，晶体结构解体，淀粉颗粒原有的缔合状态被改变，直链淀粉双螺旋伸直形成分离状态，变为粘稠的胶体溶液，此时糊化发生。随着温度的升高，黏度开始不断增加。当其体积膨胀到一定程度时，比较小的直链分子从淀粉颗粒中渗析出来，形成粘稠状的凝胶，这便是搅团^[2]。要做出口感软糯且劲道的搅团，关键在于‘搅’。俗话说‘搅团要好，搅上百搅’，这是因为温度足够高时，在不断搅动的过程中，物理做功一方面使得本不溶于热水的支链分子也吸水膨胀形成稳定的粘稠胶体溶液，另一方面使得分子链缠结，强化了网状结构，缠结的高分子链段之间的滑移和分子链的自由运动受到限制，使其黏度上升，变得十分粘稠、有弹性。”

“我宣布第一回合右方水凝妖胜。”唐藏藏公布道。

2.2 第二回合——黏度的真谛

第二回合开始后，只见左边的水凝妖端出来几杯老酸奶，而右边的水凝妖端出了几大碗胡辣汤。

左边的水凝妖最先开口：“牛奶中含有的水溶性蛋白质能够形成亲水胶体。牛奶变成酸奶的秘诀在于向杀菌后的牛奶中添加有益菌进行发酵。牛奶在酸化处理前，pH在6.4–6.8之间，其中的蛋白质与酪蛋白磷酸肽结合成的酪蛋白微胶团在水合作用、负电性及斥力的共同作用下保持稳定。随着pH的逐渐降低，微胶团的电性被中和导致酪蛋白微粒聚集形成线团状的聚集体，此时受加热而交联的变性乳清蛋白，促进了酪蛋白微粒桥连作用，同时增大了酪蛋白微粒的位阻效应，防止过多的酪蛋白聚集产生沉淀。相互交联的蛋白质凝胶网络结构由此形成(图2)^[4]。为了稳定酸奶中的酪蛋白凝胶网络结构，我在酸奶中添加适量的可食用增稠剂。常用的增稠剂有明胶、琼脂等，它们可以通过静电作用吸附到酪蛋白上，从而渗入酪蛋白网络中，限制分子的运动，提高酸奶的粘稠度，稳定酸奶的性质。除了改善口感和质地，这些可食用增稠剂也可以促进肠胃蠕动，帮助食物消化。”

听罢，孙空空点评道：“虽然适量添加对人体无害的添加剂确实能改善酸奶的口感，加入明胶和琼脂也不会对人体有危害，但是也有一些不良商家为了减少成本，采用鞣制过的皮革来制作明胶，而鞣制过程中常用的铬盐鞣剂会导致皮胶原料中的铬元素超标，对人体有害，增加致癌风险。还记得‘皮鞋胶囊’吗？早在2012年，国家质检总局就明确禁止了工业明胶用于食品行业。而这位水凝

妖带来的这些老酸奶里，恰恰就是添加了这种工业明胶，对人体的危害极大。更可恶的是，明胶熔点低不易生产和保存，这个坏蛋竟然用醛做交联剂来得到稳定的凝胶。所以，你一定是合成水凝妖！”

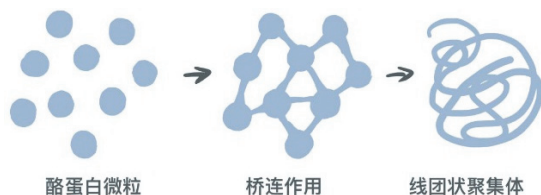


图2 酸奶中蛋白质结构网络的形成过程

“老规矩，你倒是把证据拿出来啊！”左边的水凝妖不服气地说道。

“还不死心，等我去请太白金星。先让另一位展示自己的菜肴吧。”孙空空说道。

“我带来的是西安特色胡辣汤。制作胡辣汤最重要的步骤是勾芡。淀粉先与适量的冷水混合，让淀粉颗粒进行溶胀。当水淀粉下锅后，随着温度的升高，淀粉胶束运动的强度变大，微粒运动的动能增大；同时淀粉中氢键的强度变弱，结晶区域会变得更加不稳定，更加疏松。此时水分子得以进入淀粉结晶区的内部，与淀粉在高温下断裂的极性键上的极性基团相结合，使淀粉得以迅速吸水。当吸水后淀粉颗粒的体积达到一定程度时，便会发生破裂，在汤汁中四散开，通过规则的交联形成胶体溶液，形成网络结构，使得汤汁的黏稠度增加，菜肴便成为我们所熟悉的糊状。需要注意的是，不同的植物提取出来的淀粉两种组分的比例不尽相同。马铃薯淀粉与玉米淀粉相比颗粒较大，结构相对疏松，在水中的溶解度相对较大，使其能够在菜肴中快速形成胶体，增加汤汁的黏稠度。因此，为了保证胡辣汤的口感，我坚持用最优质的陕北马铃薯淀粉勾芡，用最优质的玉米淀粉制作搅团。”

等右边的水凝妖说完，孙空空一手扶着太白金星，一手拿着一张谱图走来了。“大家看，太白金星最新发明的工业明胶检测技术——太赫兹波谱^[5]明明白白地显示他的酸奶里有工业明胶。”

2.3 第三回合——蛋白的幻化

比赛马上进行到了第三回合，这次右边的水凝妖先开口：“我带来的是西安著名的黑暗料理‘卤汁凉粉’。大家可能有所耳闻，卤汁凉粉主料是豌豆淀粉水凝胶，配料是松花蛋，再加上勾好的芡。淀粉水凝胶和勾芡的原理我上面都讲过了，下面我特别来说一说这溏心的松花蛋。在由草木灰和碱配成的松花蛋粉作用下，鸡蛋中的蛋白发生凝胶化反应，形成富有弹性的交联网络。同时，蛋黄中的蛋白质也会分解形成氨基酸，使得皮蛋的蛋黄吃起来更鲜。”

“有的朋友可能要问我，放了这么多碱对身体没有伤害吗？放心，在卤汁凉粉的制作过程中我们特意加入了陈醋，既能杀菌，又能中和碱。”

“真是妙啊，美食里面的化学知识这么多！”唐藏藏惊叹道。

“各位评委也看看我的凉皮吧，爽滑弹牙，你们一定会喜欢的。和面、饧面、洗面、蒸制是制作凉皮的四个重要步骤。最重要的就是饧面和洗面了：饧面的目的是让面团中的蛋白质得到充分的蓬松从而保证凉皮的筋道。洗面则是洗去面团中麦胶蛋白和麦谷蛋白分子之间紧密排列形成的具有蛋白质胶体结构的面筋。蒸制过程中胶粒热运动加快导致淀粉溶液凝聚，形成具有淀粉胶体结构的凉皮。洗出来的面筋也不浪费，可以放在凉皮上当辅料。”

说着，他拿出了姜黄试纸在凉皮上沾了几下，得意洋洋地说：“看好了，这次可没加硼砂呦。”

“我就知道你拿出来的不会是什么好东西，看我火眼金睛。你这凉皮虽然没加硼砂，但是为了让其口感更加讨喜，加入了过量的明矾。明矾又叫十二水合硫酸铝钾，可以在水中水解成氢氧化铝形成胶体。凉皮的凝胶结构主要由蛋白质组成，而明矾能作用于蛋白质，与之结合形成疏松凝胶，从而强化了凉皮中的网络结构，吃起来更劲道。明矾听着是个好东西，但是，其最可怕之处就在于含铝。过量摄入铝这种人体非必需物质，可能会对脑神经产生影响，增大患老年痴呆症的可能，大

家忘了前几天被停业整顿的那个明矾油条了吗？”说着，孙空空变出了一排试剂盒说：“明矾中的三价铝离子可以与铬天青S及溴化十六烷基三甲铵反应，形成蓝色三元络合物^[6]。如果我的试剂盒显示蓝色或绿色，则说明存在铝，颜色越深，铝的含量就越多。”

“大师兄快看！变蓝了，蓝色这么深一定加了很多明矾！”猪戒戒惊呼道。

“真是黑心，你就是合成水凝妖。”孙空空愤愤地说。

三局之后，胜负已定。左边的水凝妖虽然偷学了凝胶类食物中的物理化学变化，但是却没有学到天然水凝妖“崇尚天然，无毒无害”的美德，被孙空空及时识破。

赢得胜利后，天然水凝妖补充道：“其实在我们身边有很多食物都具有水凝胶的结构，不只是今天比赛中提到的食物，我们常吃的果酱、果冻、肉皮冻等都是水凝胶。其实我还有一些亲戚，就是干凝胶，他们润湿之后便是水凝胶了。海参、干贝、鱿鱼、海石花等海产品烹饪过程中的泡发，就是干凝胶恢复成水凝胶的膨润过程。别看合成水凝妖今天在美食制作中的表现令人心寒，但是他之前在日用品行业的发展，真地帮大家解决了很多问题，比如他制作的水凝胶隐形眼镜。”

“可别替他说话了，俺小孙今天非收拾了这个为非作歹的妖怪不可。等等，人呢？”孙空空转身四处搜寻合成水凝妖的身影，只见这妖怪抱着自己的家当趁大家不注意，灰溜溜正往远处跑走了。

3 胶妖自愈惊悟空 圣僧劝诫降胶妖

“妖怪站住！”孙空空一个筋斗翻到了合成水凝妖的面前。合成水凝妖感到了威胁的逼近，猛地跳到旁边的小池里，张着血盆大口喝起了水。只见，他的身体瞬间胀大了数倍。孙空空对准妖怪一棒打了下去，可谁知这合成水凝妖竟然以柔克刚，柔软Q弹的身体吸收了金箍棒的全部能量。随即对孙空空展开反击，凭借自身强大的储水能力，水凝妖将方才吸纳的水向孙空空喷射过去。

见水凝妖毫发未伤，孙空空变出三头六臂同时对水凝妖展开攻势，将水凝妖大卸八块。本以为这样就消灭了妖怪，谁知这水凝妖身体的各个部分又自动拼了回去。

“我们水凝妖还有个巨大的自愈合本领，你不知道吧，无知的毛猴！”

孙空空本身就嫉恶如仇，一听合成水凝妖如此鄙视自己，更是气得火冒三丈，变出一个巨大的透明玻璃罩把合成水凝妖罩在其中，周围燃起了火焰，说道：“让你小看我，我要让你尝尝俺小孙的厉害，看我今天不给你烤成干凝胶！”

这一来合成水凝妖可害怕了，求饶道：“我冒充天然水凝妖也只是贪图一己私利，但是各位圣僧神通广大，我的计谋全被识破了，看在我以往在日用品方面的功劳，就饶我一命吧。”又转身对唐藏藏说：“师父，我知道错了，从今往后我一定认真悔改。”

唐藏藏说道：“放下屠刀，立地成佛。既然水凝妖已经知错，空空，那就给他放了吧。”

合成水凝妖握着唐藏藏的手满怀歉意地说道：“师父，没想到我鬼迷心窍惊扰大家，您却如此宽宏大量饶了我小命。我一定好好修炼，为人类做出更大贡献。”

“施主，你若真心悔改，日后还要好好发挥自己优异的自愈合和力学性能等长处啊，切莫弄虚作假为害百姓，这就算是对我最好的报答了。”唐藏藏轻拍合成水凝妖的手说道。说完，带着三个徒弟继续上路了。留下合成水凝妖呆呆地站在那里，回味着唐藏藏的嘱托。

4 胶妖悔过改自新 前沿科技放异彩

闭关修炼很多年后，合成水凝妖带着新的名字出现在了不同领域的高科技产品中：

在创面抗菌愈合领域，合成水凝妖发挥他良好的3D可吸水网络结构，可以通过直接注入药物、膨胀扩散、胶囊封装等方法进行药物封装，既可以发挥抗菌作用，避免伤口感染，其优异的生物相容性还可以减少疤痕的形成，促进毛囊等组织的发育^[7]。

在生物力学传感领域，合成水凝妖发挥其自愈合能力，在化学键断裂时自我重组、重建，在提高弹性和机械强度的方向上手不凡，常常出现在智能电子皮肤研制中。

在恢复神经系统功能方面,合成水凝胶帮助研究人员确定了PEG水凝胶配方,再次发挥他特有的三维网络状结构,开发了一种可以持续可控释放神经营养因子的凝胶结构^[8]。

此外,他的名字也屡次出现在国际著名学术期刊上。2021年3月的*Nature*封面便是一种由浙江大学研究团队研发的能够自供能的软体仿生机械狮子鱼。合成水凝胶在其中担当软启动器的重要材料,这种拥有良好抗压能力的机器鱼通过了马里亚纳海沟最深10900米和南海最深3224米的实际测试^[9]。无独有偶,美国哈佛大学的锁志刚教授课题组利用水凝胶的柔性和离子传导性特征,实现了水凝胶神经接口,可以记录大脑高质量信号^[10]。日本北海道大学的龚剑萍教授团队提出了双网络水凝胶概念,实现了力响应性自生长水凝胶,只需寥寥数小时就能把目测比它重很多的200 g重物越拉越高^[11]。

合成水凝胶逐渐感受到了奉献的快乐,也在高科技领域找到了自己的价值,每天奔波在为人类创造更美好未来的道路上。

参 考 文 献

- [1] 褚良银, 谢锐, 巨晓洁, 汪伟. 智能水凝胶功能材料. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- [2] 曾洁. 烹饪化学. 第2版. 北京: 化学工业出版社, 2019.
- [3] 岑海蓉, 唐帅, 符郁馥, 韦盈. 现代食品, **2019**, No. 17, 168.
- [4] 李红. 食品化学. 北京: 中国纺织出版社, 2015.
- [5] 黄略略, 李辰, 李彬, 刘妙玲, 邱浩榆. 食品与生物技术学报, **2019**, 38 (11), 33.
- [6] 贾旭东. 易滥用食品添加剂危害识别. 北京: 人民卫生出版社, 2014.
- [7] Huang, W. C.; Ying, R.; Wang, W.; He, Y. J.; Mo, X. Y.; Mao, X. Z. *Adv. Func. Mater.* **2021**, 30 (21), 2000644.
- [8] Wang, J.; Youngblood, R.; Cassinotti, L.; Skoumal, M.; Corfas, G.; Shea, L. *J. Control. Release* **2021**, 330, 575.
- [9] Li, G. R.; Chen, X. P.; Zhou, F. H.; Liang, Y. M.; Xiao, Y. H.; Li, T. F.; Zhang, Z.; Zhang, M. Q.; Wu, B. S.; Yin, S. Y.; *et al. Nature* **2021**, 591, 66.
- [10] Sheng, H.; Wang, X. M.; Kong, N.; Xi, W.; Yang, H.; Wu, X. T.; Wu, K. L.; Li, C. H.; Hu, J.; Tang, J. D.; *et al. Extreme Mech. Lett.* **2019**, 30, 100510.
- [11] Matsuda, T.; Kawakami, R.; Namba, R.; Nakajima, T.; Gong, J. P. *Science* **2019**, 363, 504.