

朱颜驻镜花伴树，SOD 来相助 ——化学科普实验

郝利强，聂博毅，万紫萍，邱江华*

武汉科技大学化学与化工学院，武汉 430081

摘要：在现在这个人人爱美的年代，护肤品已经成为我们生活中不可缺少的助手，而SOD蜜就是其中一种我们所熟知的护肤品，其中起关键作用的物质是超氧化物歧化酶(SOD)。本实验基于SOD的作用机理，设计实验探索了SOD清除超氧自由基从而延缓皮肤衰老的奥秘，同时揭示了辅料二甲基硅油和硬脂酸甘油酯如何协助SOD顺利穿透皮肤表面角质层的作用机理。通过本科普实验的展示与互动，能够让受众学习到SOD蜜各成分的作用机制、表面张力作用、表面活性剂的乳化作用等内容，让大家感受到无处不在的化学知识，激发人们对化学学习和探索的兴趣。

关键词：超氧化物歧化酶；抗氧化；二甲基硅油；硬脂酸甘油酯；乳化

中图分类号：G64；O6

The Role of SOD in Skincare: A Chemical Science Popularization Experiment

Liqiang Hao, Boyi Nie, Ziping Wan, Jianghua Qiu *

School of Chemistry and Chemical Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China.

Abstract: In an era where beauty is universally cherished, skincare products have become essential in daily life. SOD honey is one such product, where the key active ingredient is superoxide dismutase (SOD). This experiment, based on the mechanism of SOD action, investigates how SOD scavenges superoxide radicals to delay skin aging. Additionally, it explores the role of excipients like dimethyl silicone oil and glyceryl stearate in facilitating the penetration of SOD through the skin's stratum corneum. Through the demonstration and interactive engagement of this science popularization experiment, the audience gains insights into the mechanisms of SOD honey's components, including surface tension and the emulsifying effects of surfactants. This experience highlights the pervasive presence of chemistry in everyday life and stimulates curiosity and interest in chemical exploration and learning.

Key Words: Superoxide dismutase (SOD); Antioxidant; Dimethyl silicone oil; Glyceryl stearate; Emulsification

SOD蜜在日常生活中十分常见，男女老少皆可使用，是护肤品家族中的重要一员。SOD蜜中发挥主要作用的是超氧化物歧化酶(Superoxide Dismutase, SOD)，是一类能催化超氧自由基阴离子歧化为过氧化氢和氧气的酶。本文设计了一系列实验，探索了SOD减缓皮肤衰老的机理，同时揭示了辅料二甲基硅油对皮肤的渗透作用和硬脂酸甘油酯的乳化作用，即它们是如何帮助SOD顺利跨越皮肤表面角质层进入皮肤中间层的。

收稿：2024-09-19；录用：2024-11-13；网络发表：2025-02-14

*通讯作者，Email: jianghua790109@163.com

基金资助：湖北省教育厅教学改革研究项目(2023229)；武汉科技大学教学研究项目(2023Z022)

本文所展示的实验，表明化学与化妆、材料等应用领域具有学科交叉性，体现了化学知识在生活和生产过程中的重要性，为不同层次的社会受众提供了学习的机会。小学生可以通过有趣的互动实验和直观的现象感受化学之美，中学生可以通过SOD蜜中各成分的重要作用机理等实验来感受化学的魅力，社会大众可以通过SOD的抗衰老作用和辅料的协助作用体会到化学对社会发展的重要贡献。

1 实验部分

1.1 实验原理

1.1.1 SOD对超氧自由基的清除

众所周知，SOD蜜是一种常见的护肤品，但是，你知道它是如何保护我们的皮肤的么？

SOD是超氧化物歧化酶^[1]的简称，天然存在的有Cu-Zn SOD、Fe-SOD、Mn-SOD三种，最为常见的就是Cu-Zn SOD，其结构如图1所示。

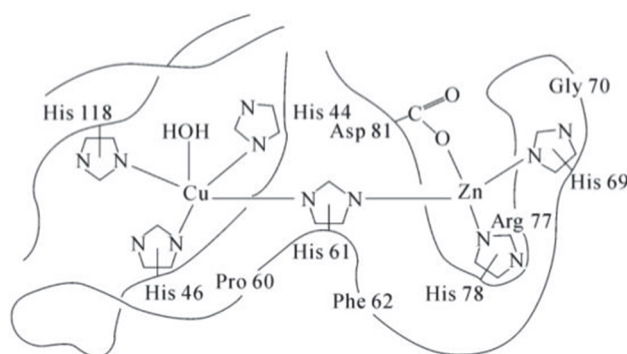


图1 Cu-Zn SOD的结构图

SOD具有催化超氧离子自由基歧化生成过氧化氢与氧气，防止超氧离子自由基积累和转化为反应活性更强的羟自由基，保护生命体内核酸、蛋白质、多糖等大分子免受破坏和被降解的作用^[2]。

测定SOD活性的邻苯三酚法^[3]是Marklund等于1974年建立的。在碱性条件下，邻苯三酚迅速氧化释放出超氧自由基，促进邻苯三酚的氧化，生成有色中间产物，吸光度随之增加，使吸光度值与反应时间呈良好的线性关系。SOD加入邻苯三酚自氧化反应体系后，催化超氧自由基分解为过氧化氢和氧气，使有色中间产物的生成受阻，导致吸光值下降，邻苯三酚自氧化速率降低，可作为测定SOD活性的理论依据。

1.1.2 二甲基硅油的浸润作用

从以上可知，SOD进入皮肤层后，可以达到清除自由基延缓衰老的作用。但是，SOD是亲水性的，而人皮肤表面的角质层(图2)是疏水性的，SOD要发挥作用必须穿越角质层“这座高山”。那么，SOD蜜是如何做到的？

为了使得SOD顺利穿越角质层“这座高山”，SOD蜜中的辅料聚二甲基硅氧烷的作用就不得不说了。聚二甲基硅氧烷，又名二甲基硅油，是一类高分子有机硅材料的统称(本文所用的六甲基二硅氧烷是该类物质中的一种)。作为一种疏水性物质，涂抹在皮肤表面时，由于表面张力小、易于铺展，和同为非极性的角质层具有良好的相容性，就好比在角质层“这座高山”中打通了无数个高速公路隧道，可以确保SOD顺利穿越。

鉴于植物的表皮层和人的皮肤表层都是蜡质结构，都具有相似的疏水性，而且植物叶子容易获得，采摘后一段时间内还能保持其鲜活性，具有绿色、安全、价廉的优点。因此，本文采用植物叶子代替人体皮肤进行二甲基硅油的浸润作用实验。

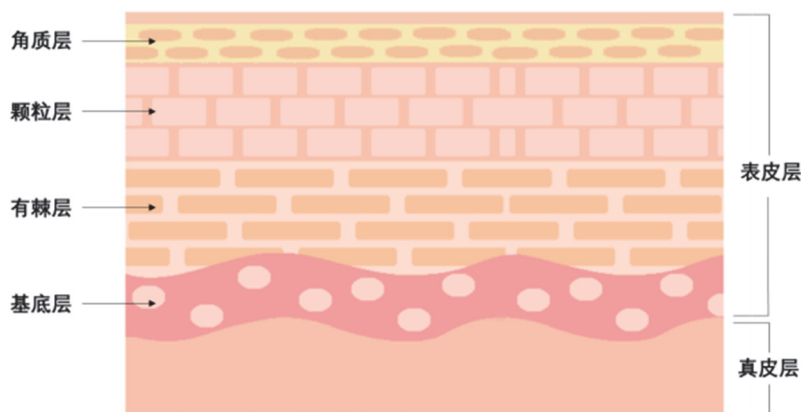


图2 皮肤结构图

1.1.3 硬脂酸甘油酯的乳化作用

从以上可知，二甲基硅油建立了SOD顺利穿越角质层“这座高山”的高速公路隧道，那么？亲水性的SOD又是如何在疏水性二甲基硅油这条高速公路上驰骋的呢？

为了实现这个目的，SOD蜜中还含有另外一个辅料——硬脂酸甘油酯。它是一种典型的表面活性剂，同时具有亲水性的极性基团和憎水性的非极性基团。在二甲基硅油基质中，硬脂酸甘油酯的疏水性烷基链向外，亲水性羟基向内，在溶液中整齐地排列聚合形成油包水型的反式胶束。

由于SOD具有亲水性，它存在于水溶液中，因为反胶束内部是亲水基团，所以被反式胶束包裹在内部，而反胶束外部的疏水性基团和二甲基硅油、角质层具有良好的相容性。这样的反胶束就像一辆辆球形大卡车，把SOD源源不断地从SOD仓库送往皮肤中间层，以发挥清理超氧自由基的作用。

本部分实验将向二甲基硅油和水的混合液中加入单硬脂酸甘油酯，考察硬脂酸甘油酯的乳化作用。由于二甲基硅油和水都为无色，为了便于观察，用 $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的硫酸铜蓝色溶液模拟SOD的水溶液。

1.2 实验试剂与仪器设备

1.2.1 实验试剂

本实验所用的主要试剂如表1所示。

表1 主要实验试剂

试剂名称	分子式	规格	生产厂家
硫酸铜	$\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	AR	阿拉丁生化科技股份有限公司
邻苯三酚	$\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_3$	AR	阿拉丁生化科技股份有限公司
六甲基二硅氧烷	$\text{C}_6\text{H}_{18}\text{Si}_2\text{O}$	99%	阿拉丁生化科技股份有限公司
单硬脂酸甘油酯	$\text{C}_{21}\text{H}_{42}\text{O}_4$	> 60.0%	阿拉丁生化科技股份有限公司
Tris-HCl缓冲液	-	pH 8.0	福州飞净生物科技有限公司
SOD粉	-	食品级	上海轩辕生物工程有限公司

1.2.2 仪器设备

本实验中所涉及的主要仪器设备如表2所示。

1.3 实验步骤

1.3.1 SOD对超氧自由基的清除

称取 0.15 g 邻苯三酚，溶解于 10 mL 含有10%白醋的溶液，得到邻苯三酚溶液。称取 1.0 g SOD粉，溶解于 5 mL 纯净水中，得到SOD溶液。

表2 主要实验仪器

仪器名称	型号	生产厂家
电子天平	Scout SE	奥豪斯仪器(常州)有限公司
可见分光光度计	V-1000	上海添时科技仪器有限公司
接触角测量仪	JC2000C1	上海中晨数字技术设备有限公司

向1#试管中依次加入6 mL Tris-HCl pH 8.0缓冲液、3 mL纯净水、2滴邻苯三酚溶液，搅拌均匀，观察溶液颜色的变化，并分别在第5秒、第5分钟、第10分钟测试其在325 nm处的吸光度。

向2#试管中依次加入6 mL Tris-HCl pH 8.0缓冲液、3 mL SOD溶液、2滴邻苯三酚溶液，搅拌均匀，观察溶液颜色的变化，并分别在第5秒、第5分钟、第10分钟测试其在325 nm处的吸光度。

通过比较两只试管的颜色及吸光度的差异，揭示SOD对邻苯三酚自氧化的抑制作用，即SOD对超氧自由基的清除作用。

1.3.2 二甲基硅油的浸润作用

取几片鲜活的树叶和草叶，分别滴上几滴纯净水、二甲基硅油，观察以上两种溶液在树叶和草叶表面的分散性，并测试其接触角。

取几片较大的鲜活树叶，滴上几滴纯净水，然后在叶片上滚动水珠，观察水珠的形状是否发生变化。另外，滴上几滴二甲基硅油，观察是否也可以进行滚动实验。

1.3.3 硬脂酸甘油酯的乳化作用

称取0.25 g五水硫酸铜，溶解于10 mL纯净水中，得到0.1 mol·L⁻¹的硫酸铜溶液。

向1#试管中加入3 mL二甲基硅油和3 mL 0.1 mol·L⁻¹的硫酸铜溶液，搅拌后静置，观察是否产生分层现象。

向2#试管中加入3 mL二甲基硅油和0.25 g的单硬脂酸甘油酯，然后将试管放入装有开水的烧杯中加热并搅拌至完全溶解。接着加入3 mL 0.1 mol·L⁻¹的硫酸铜溶液，搅拌后静置，观察是否产生乳化现象。

2 实验结果与讨论

2.1 SOD对超氧自由基的清除

图3和图4分别为邻苯三酚自氧化和加入SOD的邻苯三酚自氧化结果。通过对比可以看出，加入SOD的2#试管在第5分钟、10分钟的邻苯三酚溶液的颜色，明显比未加SOD的1#试管溶液的颜色浅很多，表明邻苯三酚的氧化受到了显著的抑制，即邻苯三酚自氧化所产生的超氧自由基被SOD清除了。1#试管溶液在第5秒、5分钟、10分钟所测得的吸光度分别为0.038、0.431和0.553，而2#试管溶液在第5秒、5分钟、10分钟所测得的吸光度分别为0.045、0.046和0.047，均与上述颜色变化相一致。1#试管溶液第10分钟的颜色、吸光度和第5分钟差别不显著，表明邻苯三酚在碱性条件下自氧化非常迅速。

超氧化物歧化酶是一种特殊的金属酶，它能催化超氧阴离子自由基($\cdot\text{O}_2^-$)发生歧化反应，具体反应如下：



在这个歧化反应中，Cu-Zn SOD中的Zn²⁺发挥稳定酶的结构性作用，Cu²⁺发生氧化还原反应实现催化作用。

在碱性条件下，邻苯三酚自氧化释放出超氧自由基，进而促进邻苯三酚的快速氧化，生成有色中间产物。1#试管中未加入SOD，所以能快速生成大量中间有色物质，导致颜色变化明显，吸光度改变大，而加入了SOD的2#试管因为SOD与超氧自由基反应，极大地降低了超氧自由基的浓度，导致生成中间有色物质受阻，所以颜色变化慢，吸光度明显变小。



图3 邻苯三酚自氧化结果



图4 加入SOD的邻苯三酚自氧化结果

SOD对超氧自由基阴离子歧化的实验结果，证明SOD能及时清除皮肤中间层内产生的超氧自由基，进而减缓皮肤的衰老。

2.2 二甲基硅油的浸润作用

判断液体是否浸润主要是看液体与材料表面的接触角大小，接触角就是一液滴在固体表面上不完全展开时，在气、液、固三相汇合点，固-液界面的水平线与气-液界面切线之间的夹角。如果接触角小于 90° 称为浸润，如果接触角大于 90° 称为不浸润^[4,5]。

如图5所示，第一组叶片滴加的是纯净水，可以看出，纯净水在树叶和草叶表面形成球形水滴状。水与树叶、草叶之间的接触角分别为 161.5° 和 163.4° ，表明树叶和草叶表面具有超级疏水的作用。

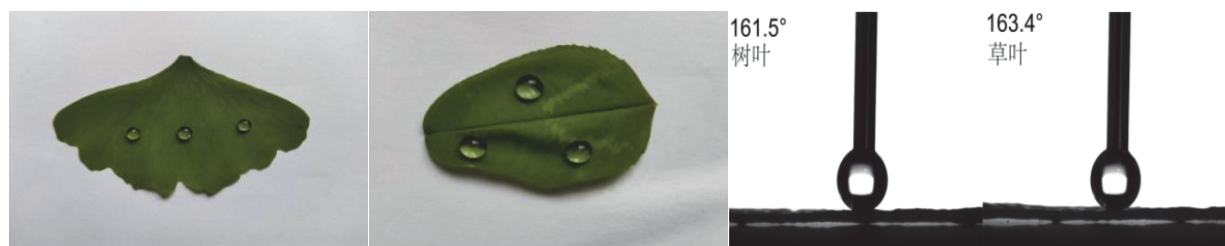


图5 水对植物叶片的不浸润作用及接触角测试结果

那为什么水滴是球形的呢？由于水滴内部分子对表面层的吸引力远远大于空气分子和叶片表面对水滴表面层的吸引力，使表面层分子始终受到指向液体内部的拉力，水分子有向内部移动来缩小表面积的趋势，而实现这一过程的力就叫表面张力。所以，水滴表面如同层绷紧了膜，从而使得液滴基本呈现球形，接触角大于 90° 。

第二组叶片滴加的是二甲基硅油，如图6所示。可以看出，二甲基硅油在树叶和草叶表面完全铺展开来，其接触角都为 0° ，属于超浸润现象。因为二甲基硅油的表面分子受到液滴内部的引力小于固体对表面层的引力，合力指向液体外部，使得液体在固体表面铺展开来。

二甲基硅油对叶片表面的浸润实验结果表明，它作为一种疏水性物质，涂抹在皮肤表面时，和非极性的角质层具有良好的相容性，为SOD顺利穿越角质层“这座高山”进入皮肤层开辟了高速通道。

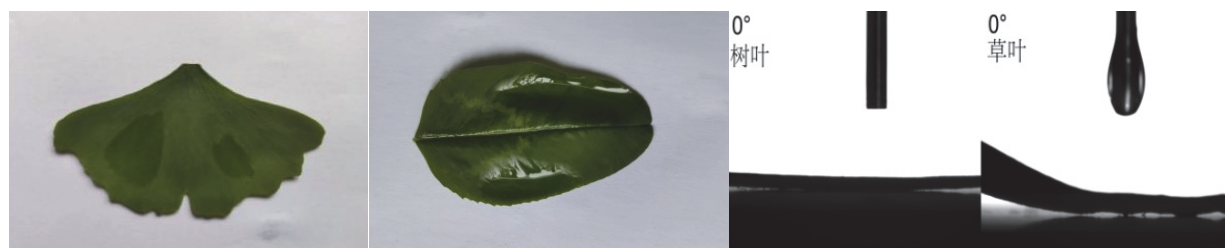
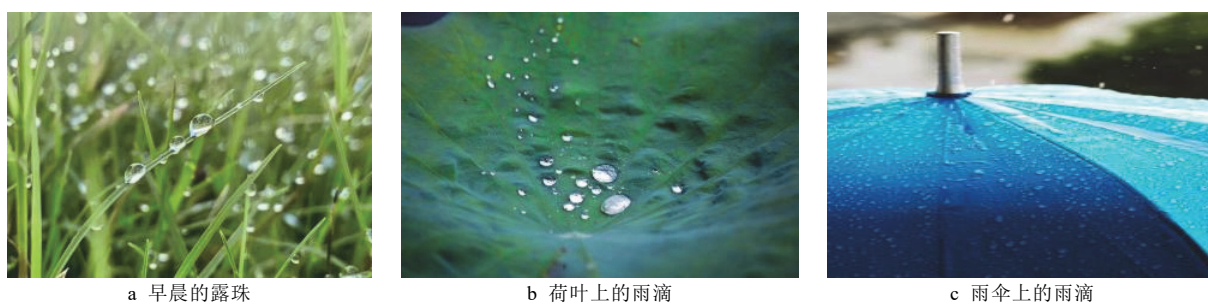


图6 二甲基硅油对植物叶片的浸润作用及接触角测试结果

生活中还有很多类似现象，如清晨的露珠(图7a)、荷叶上的雨滴(图7b)，都是由于表面不浸润导致的。同时，它也有广泛的应用，例如雨衣和雨伞(图7c)的雨布是由表面均匀分布石蜡的棉布制成的，水和石蜡不浸润，水在其上的接触角大于 90° ，形成水珠滚落，起到了防水的作用。浸润在生活中也很常见，例如毛巾就是利用能被水浸润的织物造成的，钢笔能写字也是因为墨水对纸有浸润作用。



a 早晨的露珠

b 荷叶上的雨滴

c 雨伞上的雨滴

图7 生活中几种常见的疏水现象

2.3 硬脂酸甘油酯的乳化作用

如图8所示，1#试管观察到二甲基硅油和 CuSO_4 溶液分层，而2#试管加入硬脂酸甘油酯后形成了明显的乳化现象。这是因为硬脂酸甘油酯是一种非离子型表面活性剂，同时具有亲水性的极性基团和憎水性的非极性基团。在二甲基硅油基质中，当硬脂酸甘油酯浓度足够大时，在溶液中排列成憎水基团烷基链向外，亲水基团向里的油包水(W/O)结构，把水溶液包裹在其中，从而形成稳定的反式胶束乳化液^[4]，如图9a所示。

由于SOD具有亲水性，它存在于水溶液中，所以被硬脂酸甘油酯形成的反式胶束包裹在内部。借助于硬脂酸甘油酯外部的疏水性基团和二甲基硅油、角质层具有良好的相容性，在扩散作用下，它可以轻松跨过皮肤表面的角质层，到达皮肤中间层作业区。

表面活性剂在生活中被广泛应用，最常见的就是我们日常使用的各类洗涤剂，如洗衣粉、洗洁精、洗发露等，它们的作用基质常为极性溶剂水，和上述的二甲基硅油基质不一样，所以作用机理也不一样，下面我们就洗涤剂的去油污作用机理进行简要介绍。织物洗涤时，洗涤剂会渗入纤维表面，表面活性剂的亲油基插入油中，而亲水基一端则伸向水中，进而在油滴表面定向排列，组成一层亲水性分子膜，把油滴包裹在里面(图9b)。然后随着物理搅拌作用脱落下来，形成小乳滴稳定地分散在水中，从而顺利实现油污从织物表面的脱除。

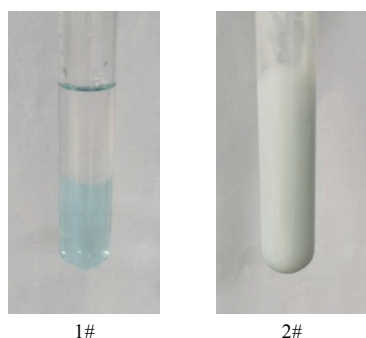


图8 乳化实验结果

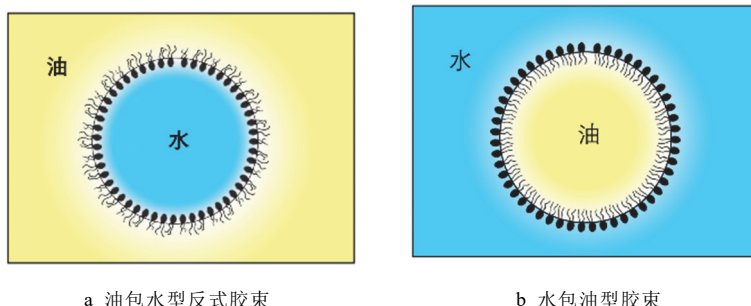


图9 胶束结构图

3 实验展示及互动方案

本作品实现梯度科普，面向包括从中小學生到社会大众等不同知识储备的人群，具体方案如下。

3.1 面向小学生：通过植物叶子的简单实验，提升科学素养

本实验的展示内容可以在小学课堂进行，互动实验可以在课堂或家中进行。家长可以购买二甲基硅油，然后取一些鲜活的树叶和草叶，让孩子分别滴加水和二甲基硅油，观察它们在叶片表面的分布有何差异。另外，取几片较大的鲜活树叶，滴上几滴纯净水，然后在叶片上滚动水珠。然后换成二甲基硅油，看是否也可以进行滚动实验。通过植物叶子表面水和二甲基硅油的不同分散性，展示化学的奇妙现象，激发他们对化学学习的浓厚兴趣。

3.2 面向中学生：深入了解化学原理，探究化学奥秘

本实验的展示和互动内容可以在中学实验室进行。中学生通过SOD消除自由基的实验、植物叶片表面水不浸润和油浸润的实验和乳化实验，掌握SOD消除自由基的原理、浸润和不浸润的原理、乳化的原理，展示化学的魅力，认识到化学对日常生活和社会发展的重要贡献，从而激发他们学习化学的兴趣和动力。

3.3 面向社会大众：提高对化学重要性的认识，服务于日常生活和社会发展

本实验的展示和互动可以在公共场合进行。社会大众也可以自行选择感兴趣的实验部分，购买试剂并开展实验探索，了解SOD蜜中SOD对抗衰老的作用、二甲基硅油的浸润作用和表面活性剂的乳化作用，从而认识到化学知识在日常生活中也必不可少，进而自学一些日常有用的化学知识。同时，提升化学对经济发展和社会服务的重要贡献的认识，并引导家人和亲朋好友正确认识化学的地位和作用。

4 实验特色与创新点

- (1) 本实验项目具有绿色、安全、价廉的优点，同时兼具科学性和趣味性；
- (2) 通过本实验探索，揭示了SOD抗衰老的机理、浸润原理和乳化原理；
- (3) 展示了化学与老百姓的日常生活密不可分，激发大众学习化学的兴趣。

5 结语

SOD蜜等护肤品对于我们的皮肤保护起着重要的作用，但是大众对SOD是如何保护我们的皮肤知之甚少。本次科普实验通过一些简单、安全、直观的实验，一方面使大众对SOD抗氧化作用、二甲基硅油的浸润作用和表面活性剂的乳化作用有所了解，提升日常化学知识水平；另一方面通过化学的奇妙现象和原理，激发学生对化学学习的浓厚兴趣，帮助大众正确认识化学对经济发展和社会服务的重要贡献，促进化学更好更快发展。

参 考 文 献

- [1] 朱秀敏. 当代医学, **2011**, *15*, 26.
- [2] 张丽媛, 王丕武, 马红丹, 赵邯郸, 曲静, 关淑燕. 农产品加工, **2014**, *361*, 65.
- [3] 许雅娟, 赵艳景, 胡虹. 西南民族大学学报(自然科学版), **2006**, *32* (6), 1207.
- [4] 黄方志, 张丽娜, 李士阔, 吴涛, 汪琳. 大学化学, **2020**, *35* (11), 202.
- [5] 肖怡婷, 赵瑾瑜, 孟莹, 帅琴, 欧阳磊. 大学化学, **2023**, *38* (9), 114.