

## 从酒石酸中探寻手性的奥秘

瞿科颖, 李杰, 赖紫秋, 陈凯\*

中南大学化学化工学院, 长沙 410083

**摘要:** 生活中处处充满手性之美, 为了让大众正确认识手性, 本文基于L-和D-酒石酸对映异构体的差异, 设计实验开展科普教育: (1) 酒石酸的分子模型搭建; (2) 酒石酸晶体的培养与观察; (3) 酒石酸溶液的旋光性观察; (4) 酒石酸分子的手性拆分。科普深入浅出, 实验操作简单, 现象明显, 互动性强, 早期科普工作反响良好。

**关键词:** 酒石酸; 对映体; 晶体; 手性拆分; 旋光性

**中图分类号:** G64; O6

## Unveiling the Mystery of Chirality from Tartaric Acid

Keying Qu, Jie Li, Ziqiu Lai, Kai Chen\*

College of Chemistry and Chemical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China.

**Abstract:** Chirality permeates every aspect of life's beauty. To foster a proper understanding of chirality among the public, this paper employs the differences between L- and D-tartaric acid enantiomers to design experiments for popularization of science: (1) Construction of molecular models of tartaric acid enantiomers; (2) Cultivation and observation of tartaric acid crystals; (3) Observation of the optical activity of tartaric acid solutions; (4) Recognition of chirality in tartaric acid molecules. These experiments range from basic to advanced, featuring simple operation, obvious phenomena, interactive communication, and have received positive feedback in the early stages of implementation.

**Key Words:** Tartaric acid; Enantiomers; Crystals; Chiral resolution; Optical activity

### 1 引言

生活中处处充满着手性的不对称之美, 如蜗牛螺壳纹的方向大多是右旋的, 牵牛和马兜铃藤缠绕的方向都是左旋的。在生命体内也存在类似的现象, 比如蛋白质的 $\alpha$ -螺旋结构都是右旋的, DNA的双螺旋结构也都为右旋<sup>[1]</sup>。上述现象揭示了自然科学领域一个非常奇特的现象, 即同手性(homochirality)现象。那什么是手性呢? 手性是指物体与其镜中的影像不能重合的特征, 就如同人的左手和右手不能重合。

在化学中, 手性是一个非常重要的概念。人体内具有手性的氨基酸都是左旋的, 而我们吃的糖, 无论是甘蔗汁制的, 还是甜菜汁制的, 它们都是右旋的<sup>[2]</sup>。人类历史上对于手性化合物的认识曾经付出了惨痛的代价。二十世纪五六十年代, 瑞士Ciba药厂生产的沙利度胺广泛用于抑制妊娠妇女的早孕反应<sup>[3]</sup>。由于当时的科学家没有意识到(R)-沙利度胺和其镜像结构具有不同的生理活性, 导致大量的畸形胎儿出生。这就是医药史上著名的反应停事件。

收稿: 2023-10-25; 录用: 2024-01-05; 网络发表: 2024-05-29

\*通讯作者, Email: kaichen@csu.edu.cn

基金资助: 中南大学教育教学改革研究项目(2022jy081); 国家自然科学基金青年项目(22003077)

事实上人类最早分离得到化合物的两种手性结构可以追溯到1848年。著名的科学家巴斯德通过仔细的观察，惊奇地发现酒石酸具有两种不同的结晶，这两种结晶所含的化合物使偏振光发生旋转的方向刚好相反<sup>[4]</sup>。巴斯德的光学异构体分离实验开拓了化学结构的新领域，也被称为化学史上最美丽的实验之一。鉴于酒石酸安全价廉、绿色环保的优点，我们基于巴斯德的酒石酸晶体分离实验设计了4个简单有趣，体现化学中的自然美、结构美的科普实验，帮助大众了解手性化学的重要性，体会手性化学之美<sup>[5,6]</sup>：

(1) 分子模型的搭建：搭建L-和D-酒石酸的分子模型，理解酒石酸分子的微观结构特点，化抽象为具体，在培养科普对象动手能力的同时更加直观地展示手性概念；

(2) 晶体的培养与晶面观察：改进化学史上最美丽实验——巴斯德的酒石酸盐旋光异构体分离实验，培养酒石酸对映异构体的晶体，观察晶体晶面的差异，并设计折纸小游戏，增加实验的趣味性；

(3) 溶液旋光性测量：设计和制作简易旋光仪“望远镜”，观察L-和D-酒石酸溶液的旋光性差异，了解手性化合物与其镜像的性质差异；

(4) 酒石酸分子手性拆分实验：观察(1*R*,2*R*)-环己二胺分别与L-和D-酒石酸混合后的现象差异，理解对映异构体与手性化合物之间相互作用的差别，了解手性拆分的概念。

整个科普实验通过分层推进的方式，为社区与小学、中学、大学设计了不同深度、层层递进的实验环节，让参与者在零基础的情况下了解手性化学，认识手性化学的重要性，感受到化学的魅力。其有助于培养青少年的自主思考能力，激发学习化学的热情，了解科学发展前沿动态，提高大众的化学知识水平，意识到化学对社会发展的重要贡献。

## 2 实验部分

### 2.1 实验原理

#### 2.1.1 酒石酸的结构特征

酒石酸，即2,3-二羟基丁二酸，存在于多种植物中，是一种有机酸。其含有两个手性碳原子，故酒石酸有三种异构体，分别为一个内消旋体以及一对对映体。内消旋体存在对称轴，不是手性分子，因此本论文围绕酒石酸的一对外消旋体——L-酒石酸、D-酒石酸开展实验设计。

L-酒石酸和D-酒石酸的分子结构互为镜像(图1)，两个分子与其镜像均无法重叠，均具有手性。手性化合物的镜像化合物称为其对映异构体(enantiomer，简称对映体)。化合物与其对映体具有相同的物理化学性质，如熔点、沸点、溶解度、折射率、密度等，只有在手性环境中才表现出差异。

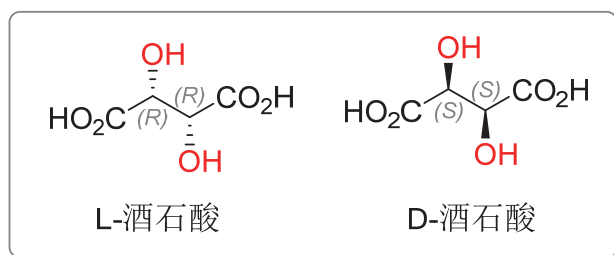


图1 L-和D-酒石酸的分子结构示意图

#### 2.1.2 酒石酸的晶体培养

酒石酸在水中的溶解度随温度升高而增加，因此，可以加热溶解过量的酒石酸制备过饱和溶液，过饱和溶液在温度降低的过程中会较快地析出晶体，从而缩短晶体培养的时间。在过饱和溶液中，晶核不断生长，大概3–5天即可观察到较好的晶体<sup>[7]</sup>。酒石酸对映体的结晶是不对称的，晶面有着不同的取向：一种向左，一种向右。通过观察酒石酸晶面可以区分酒石酸的两种对映异构体(图2)。

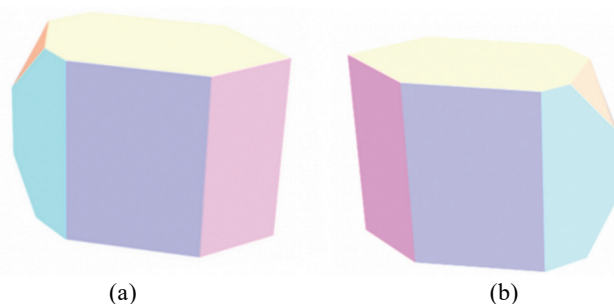


图2 酒石酸晶体图

(a) L-酒石酸; (b) D-酒石酸

### 2.1.3 溶液旋光性的观察

线偏振片作为一种光学基础元件,可将任意偏振态的入射光转变为线偏振光。当其通过含有手性化合物的溶液时,线偏振光的平面会向左或向右旋转,手性化合物的这种性质称为旋光性。所有的手性分子都具有光学活性,同时所有具有光学活性的化合物分子,都是手性分子。面对光源的方向看,使偏振光的振动平面顺时针方向旋转的物质称为右旋物质,而使振动平面逆时针方向旋转的物质称为左旋物质<sup>[8]</sup>。

由马吕斯定律可知:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha \quad (1)$$

其中,  $\alpha$  是入射偏振光的光振动方向和偏振片偏振化方向之间的夹角( $^\circ$ ),  $I_0$  是入射光光强(cd),  $I$  是透射光光强(cd)。所以当入射光的振动方向与偏振片的偏振化方向平行时,  $\alpha = 0^\circ$  或  $180^\circ$ , 此时  $I = I_0$ , 透射光最强。当两线偏振光垂直时,  $\alpha = 90^\circ$  或  $270^\circ$ , 此时  $I = 0$ , 透射光强为零, 表现为不透光的黑色。其余角度, 透射光的强度在  $0-I_0$  之间。

根据马吕斯定律, 我们设计了简易的旋光装置(图3), 可以通过旋转线偏振片2, 使仪器消光, 通过旋转的方向即可观测物质手性带来的旋光性差异。

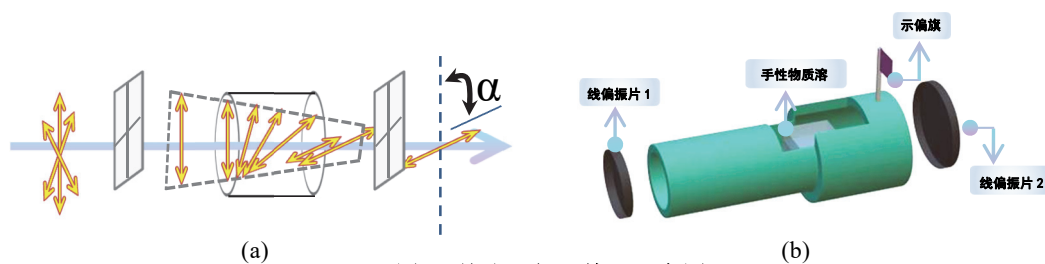


图3 旋光“望远镜”示意图

(a) 旋光原理; (b) 仪器模型图

### 2.1.4 酒石酸分子手性拆分

环己二胺酒石酸盐的溶解度差异明显<sup>[9,10]</sup>, 具体表现为: L-酒石酸和(1*R*,2*R*)-环己二胺形成的盐溶解度较低, 混合后立即析出大量白色沉淀, D-酒石酸和(1*R*,2*R*)-环己二胺形成的盐溶解度较高, 混合后不析出沉淀(图4)。该实验现象明显, 肉眼即可观察到反应现象, 故可以通过(1*R*,2*R*)-环己二胺对酒石酸对映体进行特异性识别, 理解对映体与手性化合物相互作用的区别, 并根据上述性质进行外消旋酒石酸手性拆分的基本原理。

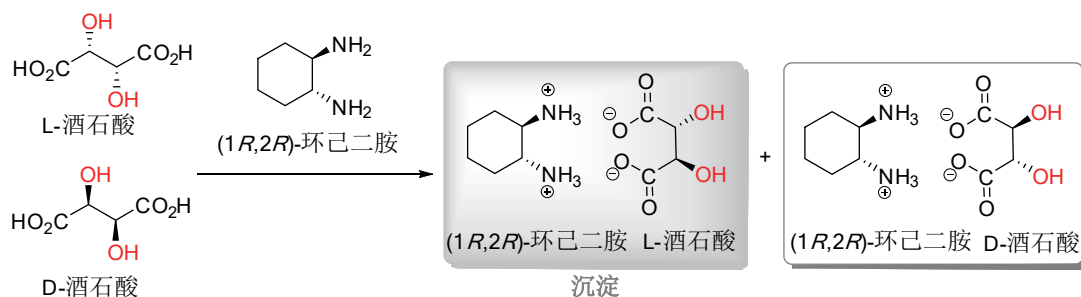


图4 (1R,2R)-环己二胺特异性识别酒石酸反应方程式

## 2.2 原料与试剂

实验所用试剂和仪器详见表1。

表1 实验试剂与材料

试剂名称	分子式	规格	生产厂家
(1R,2R)-1,2-环己二胺	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> N <sub>2</sub>	AR	安徽泽升科技股份有限公司
无水乙醇	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	AR	安徽泽升科技股份有限公司
D-酒石酸	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>6</sub>	AR	上海毕得医药科技股份有限公司
L-酒石酸	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>6</sub>	AR	上海毕得医药科技股份有限公司

## 2.3 设备与仪器

电子天平(梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司, LE104E/02)、磁力搅拌器(海道尔夫仪器设备(上海)有限公司, Hei-Tec)。

## 2.4 实验步骤/方法/现象

### 2.4.1 酒石酸分子模型搭建

使用可普2032大号演示有机无机分子结构模型,以红色球代表氧原子(O),白色球代表氢原子(H),黑色球代表碳原子(C),白色短键代表单键,灰色长键用来组装双键,搭建L-酒石酸、D-酒石酸的分子球棍模型(图5)。

### 2.4.2 酒石酸晶体培养与观察实验

(1) 酒石酸晶体培养与观察实验步骤。

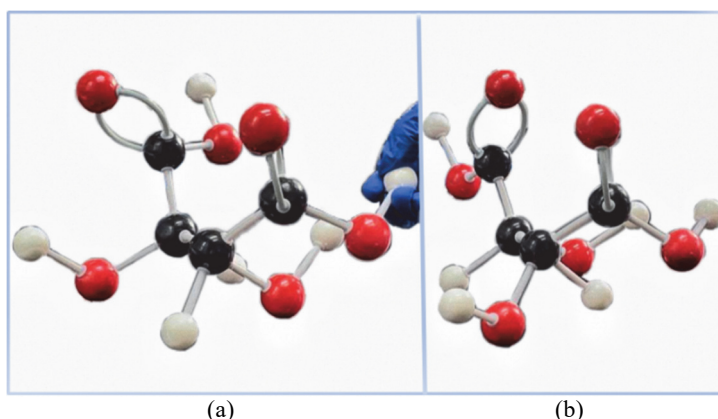


图5 酒石酸对映体分子模型

(a) L-酒石酸; (b) D-酒石酸

参考巴斯德的酒石酸晶体分离实验，我们改进实验方案，培养酒石酸的晶体<sup>[11]</sup>。具体步骤为：称量L或D-酒石酸约13 g，加入蒸馏水10 mL，恒温水浴加热至40 °C，停止加热，玻璃棒搅拌利用余热使固体全部溶解，于烧杯口处盖上硬纸片，移至通风处静置。选择大小合适的结晶，寻找L-酒石酸、D-酒石酸对称晶面，画出大致形状，观察区别，按照图6流程进行。

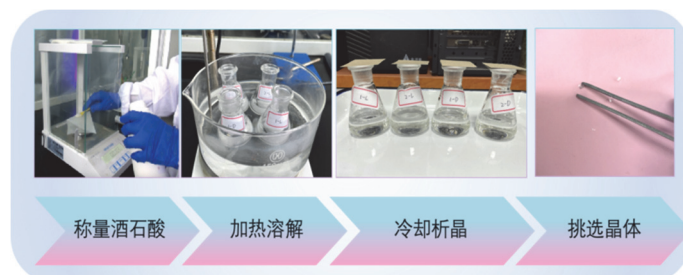


图6 酒石酸晶体培养与观察实验步骤

## (2) 实验现象。

通过观察可以发现L-酒石酸晶体晶面取向向左，D-酒石酸晶体晶面取向向右(图7)。由于培养酒石酸的完美单晶具有一定的难度，在实际科普活动开展过程中，可以参考崔爱莉等人的工作<sup>[12]</sup>，指导科普对象居家培养明矾晶体，并观察明矾晶体的八面体宏观形状。基于酒石酸晶体和明矾晶体的外观缺陷，解释晶体生长的影响因素，在此过程中科普“完美”晶体获取的不容易。

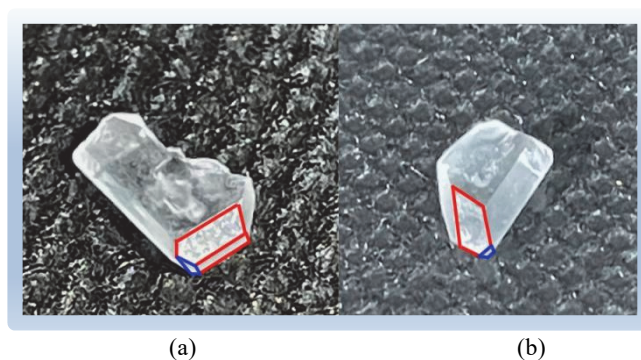


图7 酒石酸晶面图

(a) L-酒石酸；(b) D-酒石酸

## (3) 酒石酸晶体折纸。

经过很多次的尝试，我们并没有得到便于观察且互为镜像的完美单晶。但是这也可以让我们感受到巴斯德在发现两种酒石酸晶体的过程中付出的艰辛。为了更直观地观察两种酒石酸晶体的区别，我们设计了折纸的小游戏，按照模版折叠制作酒石酸晶体<sup>[13]</sup>，观察两种酒石酸晶体的差异(图8)。

### 2.4.3 酒石酸溶液旋光性观察

#### (1) 简易旋光仪“望远镜”搭建制作。

根据线偏振片特性，我们以卡纸、线偏振片、亚克力盒(3 cm × 3 cm × 2.2 cm)等材料，按图9搭建一个价廉、便捷的旋光仪。

#### (2) 简易旋光仪“望远镜”操作步骤。

加入水溶液，旋转偏振片使仪器消光，标记示偏旗位置。加入L-酒石酸，旋转仪器偏振片，使仪器消光，观察示偏旗旋转方向。然后加入D-酒石酸，步骤同上，对比实验现象(图10)。



### 2.4.4 酒石酸分子手性拆分

#### (1) 实验步骤。

称量约10 g L-和D-酒石酸分别加入烧杯中，加入15 mL蒸馏水于室温下溶解。称取7.5 g (1*R*,2*R*)-环己二胺，加入少量蒸馏水于室温下溶解。将(1*R*,2*R*)-环己二胺分别加入L-和D-酒石酸溶液中，观察实验现象(注意：环己二胺具有轻微腐蚀性以及刺激性气味，使用时建议佩戴橡胶手套和口罩)；将乙醇溶液分别加入L-和D-酒石酸溶液中，对比实验结果。

考虑到展示实验的便捷性，我们将试剂的容器改为10 mL离心管，在确保能清晰看到反应现象的同时兼具展示实验的便捷性与可操作性，按照图12流程进行。

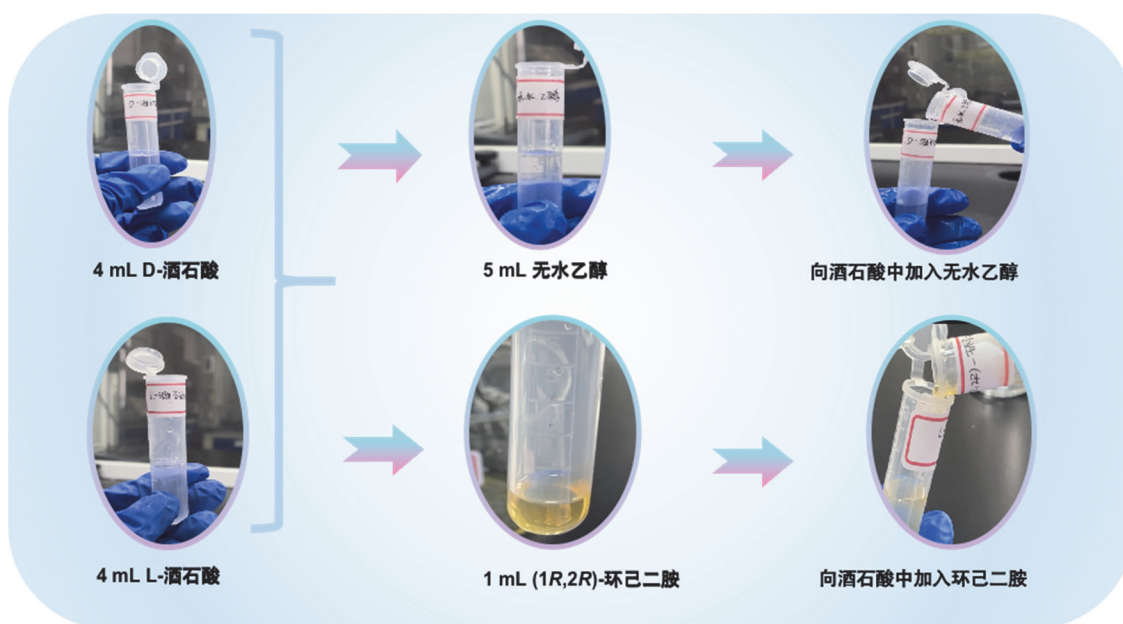


图12 酒石酸分子手性识别步骤流程图

#### (2) 实验现象与讨论。

无水乙醇与L-或D-酒石酸混合，以及(1*R*,2*R*)-环己二胺与D-酒石酸混合均未观察到沉淀生成，而(1*R*,2*R*)-环己二胺与L-酒石酸混合后立刻生成大量白色沉淀(图13)。

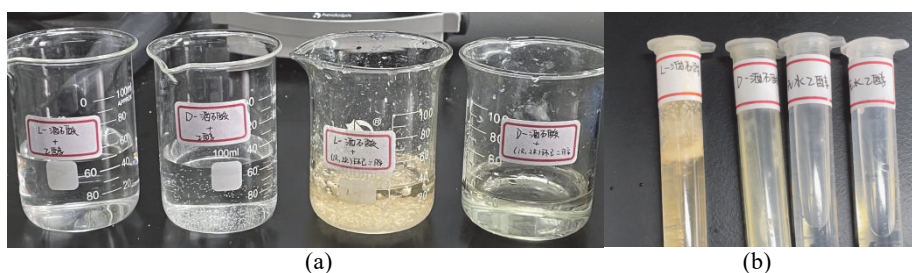


图13 酒石酸对映体与(1*R*,2*R*)-环己二胺和乙醇混合后的实验现象

(a) 预实验结果；(b) 离心管效果展示

## 3 科普展示和互动方案

科普展示对社区与小学、中学、大学进行分层次递进的方式，每个层次阶段面向的人群不同，准备的科普展示内容也适当调整，内容从社区与小学、中学到大学层层深入，向大众讲述什么是手

性。从微观到宏观、从结构到性质了解和认识手性化学，并结合学科前沿知识，回顾历史、展望未来，讲解手性拆分的原理以及重要意义等。

### 3.1 社区与小学

社区与小学面向的科普人群主要是围绕生活中手性现象以及简单易观测的项目为主，包括观察牵牛藤缠绕和海螺壳纹的方向，“生活中的手性”知识竞答，酒石酸结晶折纸，酒石酸分子模型搭建等，并且结合线上平台发布科普短视频(图14)，以期达到激发大众对化学的兴趣、感受化学知识的趣味、了解手性化学的重要性等目的。



图14 社区与小学科普展示

### 3.2 中学

中学面向的科普人群有一定的化学基础、动手能力强，我们在内容上进行适当调整，从分子层面深入科普手性知识，以酒石酸分子模型搭建为主，结合酒石酸对映体光学活性——简易旋光“望远镜”组装、酒石酸晶面观察、酒石酸手性拆分实验等科普项目(图15)。

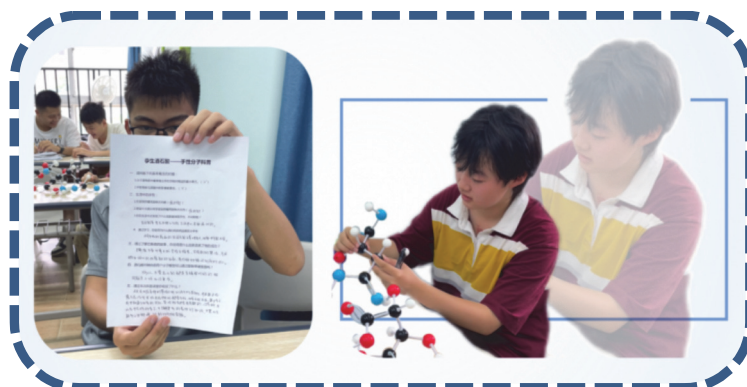


图15 中学科普展示

通过观察分子模型的差异，引领科普对象探索分子结构的奥妙，感受化学之趣。准备材料现场教学制作酒石酸的简易旋光“望远镜”，引导科普对象学习并观察手性化合物的旋光现象。酒石酸

晶面观察实验则是让同学们观察我们培养得到的晶体，引导同学观察细微差异。中学的科普主要是为了拓展同学们的知识，培养学科兴趣。

### 3.3 大学

大学我们主要面向非化学专业的学生进行科普，这类同学大多具备一定的化学学科基础，理解能力更强，善于观察思考，所以我们设置了酒石酸分子模型搭建、酒石酸简易旋光望远镜搭建、酒石酸晶面观测、酒石酸手性拆分等实验项目，同学可以根据自己的兴趣选择实验环节，我们每组都进行科普展示，但将重点放在(1*R*,2*R*)-环己二胺特异性拆分酒石酸对映体实验，着重介绍手性拆分的方法原理以及拆分的重要性，在实验过程中让同学预测实验结果(图16)。

大学的科普我们更加注重原理探究，学科知识宣讲，结合简单有趣的实验，激发同学们对化学学习的兴趣，了解化学对社会发展的贡献，拓展学科前沿知识，着重科普手性物质研究发展前景、对社会的重要意义等。



图16 大学科普展示

## 4 结语

本科普及实验展示从生活中随处可见的不对称现象入手，将学科前沿知识生活化、简易化，拉近前沿知识和大众生活的距离，激发大众深入探究学科知识的兴趣。结合化学史，展现科学家探究真理，永不言弃的美好品质，结合思政教育，培养青少年人文修养。根据微观到宏观、结构到性质、基础到前沿的底层思维逻辑，设置酒石酸对映体分子模型搭建、酒石酸晶面观测、酒石酸旋光性探究以及手性拆分等实验。四组实验简单可行、安全经济、富有趣味，根据不同的人群进行层层递进、深入浅出的科普，并且结合线上平台，发布科普短视频，从而以小见大、化抽象为具体地带领大众认识手性、了解手性，窥得手性宇宙的一隅，激发大众领略化学之美，感受化学之趣，认知化学对社会的重要贡献。

## 5 创新性声明

- (1) 贴近生活兼顾学科前沿知识，结合化学史，注重人文修养、思政教育。
- (2) 为知识、思维能力不同对象定制不同深度科普，结合线上平台推广。
- (3) 实验现象明显，角度新颖，操作方式简单有趣，科普工作得到好评。

参 考 文 献

- [1] 徐昕. 物理化学学报, **2021**, *37* (10), 2011078.
- [2] 吴祺. 化学通报, **1995**, *1995* (3), 55.
- [3] 章伟光, 张仕林, 郭栋, 赵楠, 于腊佳, 章慧, 何裕建. 大学化学, **2019**, *34* (9), 1.
- [4] Gal, J. *Nat. Chem.* **2017**, *9*, 604.
- [5] 魏家玉. 甘肃科技纵横, **2008**, *37* (4), 185.
- [6] 刘麒麟, 吴仪, 罗毅, 刘媛, 吴凯群. 大学化学, **2023**, *38* (4), 88.
- [7] Dhas, S.; Suresh, M.; Bhagavannarayana, G.; Natarajan, S. *J. Cryst. Growth.* **2007**, *309* (1), 48.
- [8] 杨子轩, 王文权, 王子赞, 芮云军. 大学物理实验, **2022**, *35* (3), 81.
- [9] Schanz, H.-J.; Linseis, M. A.; Gilheany, D. G. *Tetrahedron: Asymmetr.* **2003**, *14* (18), 2763.
- [10] Walsh, P. J.; Smith, D. K.; Chris, C. *J. Chem. Educ.* **1998**, *75* (11), 1459.
- [11] Khan, N.; Vijayan, N.; Shandilya, K.; Kumaret, R.; Krishna, A.; Chopra, S.; Yadav, S.; Moona, G.; Jewariyaal, M. *J. Mater. Sci.* **2020**, *31*, 4494.
- [12] 张天一, 潘琦璠, 徐一寒, 崔爱莉. 大学化学, **2020**, *35* (1), 118.
- [13] Andrade-Gamboa, J. *J Chem Educ.* **2007**, *84* (11), 1783.