

## 液面蕴张力，滴水藏乾坤

董禹铜<sup>1,†</sup>, 许慧玲<sup>1,†</sup>, 赵与程<sup>1,†</sup>, 张泽新<sup>1,\*</sup>, 王颖<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> 苏州大学材料与化学化工学部, 江苏 苏州 215123

<sup>2</sup> 苏州大学分析测试中心, 江苏 苏州 215123

**摘要:** 本实验以日常生活中常见的表面张力现象为切入点, 结合现有文献方法, 系统优化科普实验。首先, 丙二醇和水以不同的体积比相互溶解, 并加入不同颜色的食用色素来代表不同浓度的丙二醇溶液。然后, 将不同浓度的丙二醇溶液滴加到亲水处理过的玻璃板上。由于蒸发梯度的不平衡和表面张力的不均匀, 小液滴在玻璃板上表现出各种运动行为, 如“追逐”和“跳舞”。此外, 小液滴可以准确避开与自身浓度不同的液滴, 并选择与自身浓度相同的“同类”液滴融合。这些现象反映了一系列与蒸发梯度和表面张力有关的物理化学原理。本实验的化学品安全易得, 主要装置是团队自制的。实验操作简单, 原理简单易懂。中小学生和幼儿园的孩子在家长的引导下可以清楚地观察到不同颜色小液滴的追逐和融合现象; 该实验绿色、安全、美观, 有利于培养大众, 特别是中小学生对物理化学现象的浓厚兴趣。

**关键词:** 科普实验; 物理化学; 表面张力; 蒸发梯度; 液滴追逐

**中图分类号:** O64; O6

## The Hidden World of Surface Tension and Droplets

Yutong Dong<sup>1,†</sup>, Huiling Xu<sup>1,†</sup>, Yucheng Zhao<sup>1,†</sup>, Zexin Zhang<sup>1,\*</sup>, Ying Wang<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> College of Chemistry, Chemical Engineering and Materials Science, Soochow University, Suzhou 215123, Jiangsu Province, China.

<sup>2</sup> Testing and Analysis Center, Soochow University, Suzhou 215123, Jiangsu Province, China.

**Abstract:** This experiment delves into the common phenomenon of surface tension in everyday life. By systematically optimizing existing methods from the literature, we create solutions of different concentrations using a mixture of glycerol and water, with food coloring added to represent the varying concentrations. Due to the imbalance in evaporation gradient and surface tension, small droplets on hydrophilically treated glass slides exhibit behaviors such as “chasing” and “dancing”. These movements reflect a range of physical chemistry phenomena related to surface tension and evaporation. The experiment employs safe and readily available chemicals, with custom-made main devices, making it straightforward and comprehensible. With parental guidance, primary and middle school students, and even kindergarten children, can distinctly observe the chasing and fusion of droplets of different colors. This experiment is eco-friendly, safe, and visually appealing, which is beneficial for cultivating a strong interest in physical chemistry phenomena among the general public, especially primary and secondary school students.

**Key Words:** Popular science experiment; Physical chemistry; Surface tension; Evaporation gradient; Droplets chasing

收稿: 2023-12-04; 录用: 2024-02-04; 网络发表: 2024-04-26

<sup>†</sup> 2021级本科生

<sup>\*</sup> 通讯作者, Emails: zhangzx@suda.edu.cn (张泽新); wangyingsuda@suda.edu.cn (王颖)

## 1 引言

在晴朗的夏日雨后，我们常常能够看到荷叶上晶莹剔透的球形水珠，这是由水珠的表面张力与荷叶的超疏水性表面共同作用形成的<sup>[1]</sup>。事实上，液体在不同材料表面上的润湿行为各不相同，对日常生活和工业生产应用均有重要影响。例如，最小润湿材料可应用于防水涂料<sup>[2]</sup>等，而最大润湿材料可应用于润滑<sup>[3-5]</sup>。此外，由于液滴表面能差异导致的梯度会促使液滴运动，这种运动常应用于微流控<sup>[6]</sup>、自洁表面<sup>[7]</sup>等领域。然而，实现液滴的可控运动仍然存在一定的挑战。

在这里，通过文献调研，我们选用蒸发速率迥异的丙二醇和水形成的双组分液滴构建了一种可控液滴运动的简单模型。简而言之，将这种液滴滴在亲水的洁净玻璃板上，其并未完全扩散，而是表现出明显的接触角。此外，液滴蒸发速率不同带来的表面张力梯度会使高浓度液滴追逐临近的较低浓度的液滴，进而实现可控运动。

基于以上思路，我们设计了一系列动态可视化物理化学实验，来演示物理化学中双组分液滴的远程和近程相互作用、内部流动、远程的相互吸引力、短程的追逐流体交换、排斥性远程定位等现象。另外，我们通过实验证明了不同浓度液滴响应邻近液滴发出的蒸汽而移动的结果，进一步阐释了液滴由于蒸发引起的表面张力梯度而相互作用的本质。

由于表面张力和蒸发接触角等原理相对复杂，我们改进了科普实验：通过检测不同浓度液滴相互作用的路径，使观众可以清晰地观测到液滴运动的轨迹和路径，以实现针对不同的参与人群的选择性讲解。对于相关领域内的专业人群，可以引导其进一步思考该实验在试剂和操作上的其他可能方案；对于非专业人群，实验过程中的液滴追逐现象紧张刺激，能够极大程度地激发他们对探索化学世界的兴趣。值得一提的是，水和丙二醇无毒无害，实验绿色安全，操作过程简单，观感愉悦，能够培养中小学生对物理化学现象的浓厚兴趣。此外，本科普实验能够促进学习者提高对身边物理化学现象的关注度，从而促进有趣的物理化学基础知识深入大众，实现科普的意义。

## 2 实验部分

### 2.1 实验原理

在洁净玻璃板这样的高能表面上，小液滴会形成一个特殊的形状。它们既不会完全聚拢形成圆形的水滴，也不会完全铺展摊平成一片，而是形成了一个“草帽形”的样子(图1)，上面依然可以看到水滴的模样，而贴着玻璃板的区域则铺展开了一层薄薄的液膜。在液膜的作用下，液滴移动时受到的摩擦力变得极小，因而容易运动。

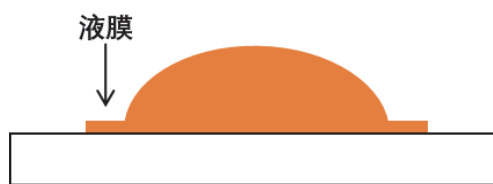


图1 玻璃板上形成的“草帽形”液滴

如图2所示，在亲水玻璃板上，丙二醇溶液的液滴会受到一个比较大的“界面铺展力”作用，这个力会拉着液滴向外摊平。同时，液体自身的表面张力又会产生回缩的趋势，这互相抗衡的两方面因素共同决定了液滴的形状<sup>[8]</sup>。

液膜位于液滴边缘的区域，此处的液体厚度小，表面积相对较大，因此蒸发对溶液成分的影响在液滴边缘区域会比液滴内部更加明显。此外，液滴中的水比丙二醇更容易蒸发，它产生的表面张力也比纯丙二醇大<sup>[9]</sup>。所以，在蒸发的过程中，液滴边缘的含水量会明显少于中间部分，导致边缘的表面张力也变得更小，而这种表面张力的不均会导致液滴发生变化，最终形成草帽状的液膜。如图3所示，在中间和边缘部分表面张力差异的作用下，液滴的内部会发生类似环流的流动。

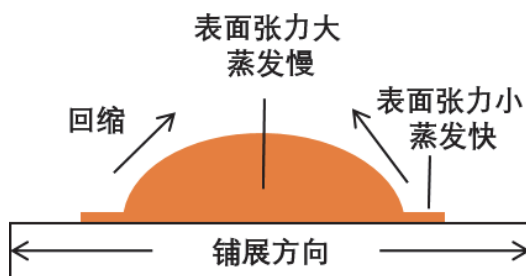


图2 玻璃板上“草帽形”液滴的铺展原理<sup>[8]</sup>



图3 “草帽形”液滴的内部液体流动的示意图

单独的小液滴的整体受力是均衡的，不会发生运动。当两个液滴相遇时，每一个液滴的身旁都围绕着蒸发出来的水蒸气，液滴周围湿度加大(图4)。越靠近液滴，湿度也就越高，而在两个液滴中间的区域，蒸发的叠加使局部湿度变得更大，而较大的湿度又会反过来抑制水分的蒸发。蒸发减慢，中间部分的液膜表面张力没有外围部分下降得多，小液滴两边的受力平衡也就被打破。对于浓度相同的两个小液滴，在这种不平衡的表面张力的拉拢之下，会滑到一起发生合并。

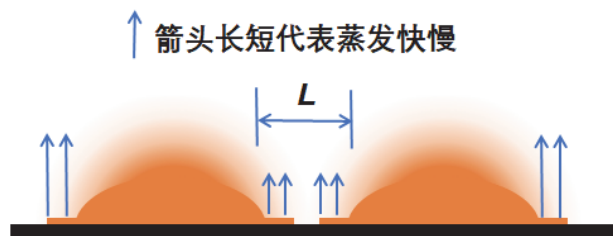


图4 相同丙二醇浓度的两个“草帽形”液滴的不平均蒸发

$L$ 代表液滴边缘间距

对于两个浓度差别较大的两个小液滴，当相遇时，在液滴接触的区域会首先发生小范围的成分交换，并在中间形成一个成分与张力均介于两液滴之间的区域，如图5所示。表面张力较低区域的液体向表面张力较高区域流动，含水量小(张力小)的液滴倾向于靠近接触区，而含水量大(张力大)的液滴倾向于“逃离”接触区，就造成了“你追我赶”的景象<sup>[10-13]</sup>。

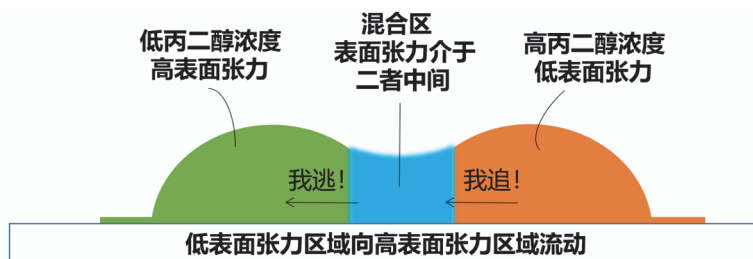


图5 不同丙二醇浓度的两个“草帽形”液滴的相互运动原理

## 2.2 试剂及材料

本实验所用主要试剂及材料见表1。

表1 实验所用试剂及材料

试剂名称	生产厂商	规格
1,2-丙二醇(C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> )	安徽泽升科技有限公司	AR
疏水油性笔	宁波得力集团有限公司	No. 6881
疏水油性笔	纽威日用品(上海)有限公司	S0810930
食品添加剂-复配着色剂	连云港新爱食品科技有限公司	嫩芽绿色
食品添加剂-复配着色剂	连云港新爱食品科技有限公司	香芋紫色
食品添加剂-复配着色剂	连云港新爱食品科技有限公司	橙黄色
食品添加剂-复配着色剂	连云港新爱食品科技有限公司	天空蓝色
食品添加剂-复配着色剂	连云港新爱食品科技有限公司	大红色
玻璃板	江苏海门区科影实验器材厂	52 mm × 76 mm × 1 mm
DI water	四川优普超纯科技有限公司	实验室自制去离子水

## 2.3 仪器及型号

本实验所用主要仪器及型号见表2。

表2 实验所用仪器及型号

仪器名称	生产厂商	型号
等离子清洗仪	美国Harrick Scientific	Harrick Plasma PDC-002
移液枪	赛默飞世尔科技(中国)有限公司	Thermo Scientific MZ-05024

## 2.4 实验步骤

- (1) 配制溶液：1%、5%、15%、20%、25%、30%丙二醇-水溶液。
- (2) 用不同颜色的食用色素染料，对不同浓度的丙二醇-水进行染色，色素的最终质量百分比浓度为0.1%。
- (3) 用氮气吹净玻璃板并用等离子清洗仪对玻璃板进行亲水处理，处理时间为5 min。
- (4) 用疏水油性笔，在处理后的玻璃板上绘制出液滴运动区域限制图案，并对液滴进行运动观察。同时，利用普通手机的录像功能拍摄液滴运动的录像，本实验拍摄使用的手机为华为荣耀80手机。
- (5) 利用开源的图像处理软件Imagej(NIH)对液滴的运动视频进行分析，得出运动轨迹路线和运动速度数据。

## 2.5 实验结果及讨论

### 2.5.1 不同浓度液滴的自由追逐

将不同浓度的液滴滴在亲水处理后的玻璃板上，以不同颜色表示不同浓度的丙二醇水溶液。由于距离相近的不同浓度液滴蒸发速率不同，导致其表面张力不同，水平方向上的表面张力差异作为动力推动液滴呈现出高浓度追逐低浓度的现象，如图6所示，浓度不同且距离相近的丙二醇液滴之间开始相互追逐，图中蓝色液滴是被追逐者，呈弯月状；其他颜色，例如红色、绿色等液滴，为追逐者，呈条状。这种追逐会持续影响其余液滴的运动，形成一幅“你追我赶”的景象。

### 2.5.2 多种不同浓度液滴的直线追逐

为了进一步研究浓度差异的大小与追逐速度的关系，现对整个过程进行定性分析。首先，用疏

水油性笔绘制直线运动轨迹，将蓝色丙二醇液滴滴入两个直线“赛道”作为被追逐液滴。然后，向左边“赛道”中滴入绿色丙二醇液滴，向右边“赛道”中滴入紫色丙二醇液滴，分别作为追逐液滴。如图7a-d所示，由于被疏水条纹限制，两“赛道”液滴追逐但并不相互融合。绿色-蓝色液滴对的浓度差异大于紫色-蓝色液滴对，因此追逐速度更快。浓度差异图7e展示了此过程中液滴的运动轨迹图像，其中颜色代表运动时间，如右侧的彩色时间标尺所示，轨迹的总时间为45 s。

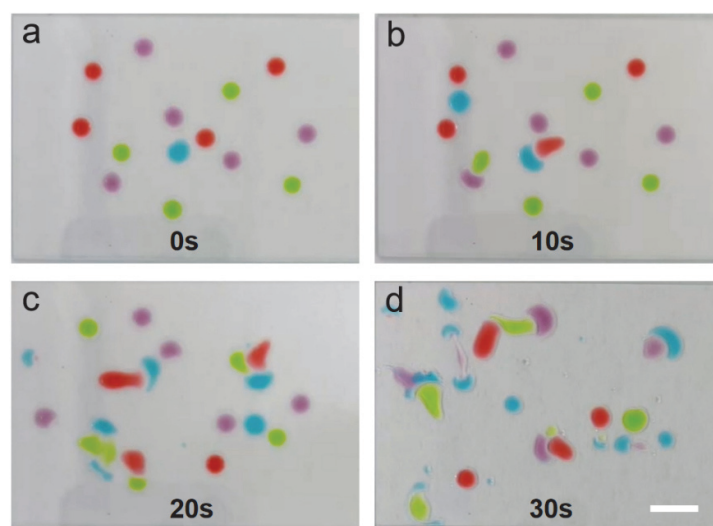


图6 不同浓度液滴随时间的自由追逐过程

丙二醇溶液浓度：红色-25%、绿色-15%、紫色-5%、蓝色-1%；图(d)中标尺：10 mm；

电子版为彩图

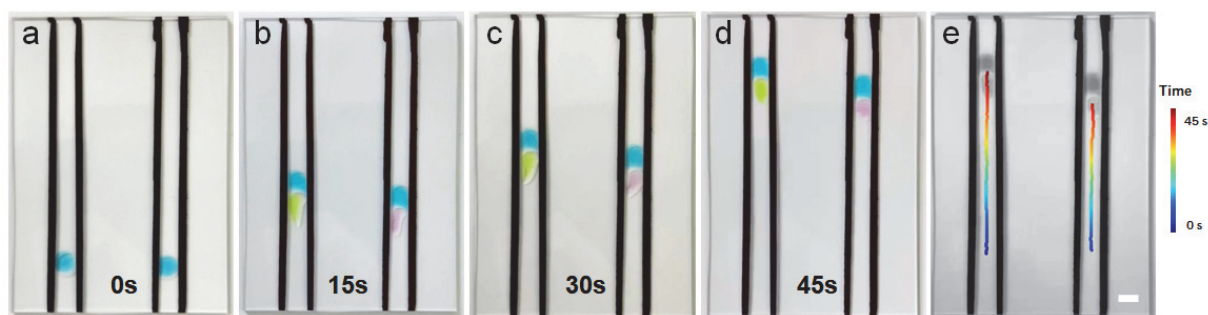


图7 不同浓度液滴的直线追逐

(a-d) 不同时间两液滴的位置；(e) 液滴直线运动轨迹路线

蓝色液滴代表被追逐者，绿色和紫色液滴代表追逐者；丙二醇溶液浓度：绿色-15%、紫色-5%、蓝色-1%；

图(e)中标尺：5 mm，彩色标尺代表轨迹的时间(下同)；电子版为彩图

最后，通过分析液滴的运动行为，计算得到液滴的运动速度。如图8所示，随着两种液滴间浓度差的增大，追逐速度也会增大。

### 2.5.3 不同浓度液滴的转圈追逐

液滴追逐现象在圆形“赛道”中也可以实现。在亲水玻璃板上用疏水油性笔绘制圆形“赛道”，滴入红色和蓝色液滴进行追逐实验。对液滴运动进行记录(图9a-d)，并对记录的视频进行分析，得出运动轨迹路线(图9e)。结果表明，高浓度液滴会沿着圆形轨迹追逐低浓度液滴且不相互融合。

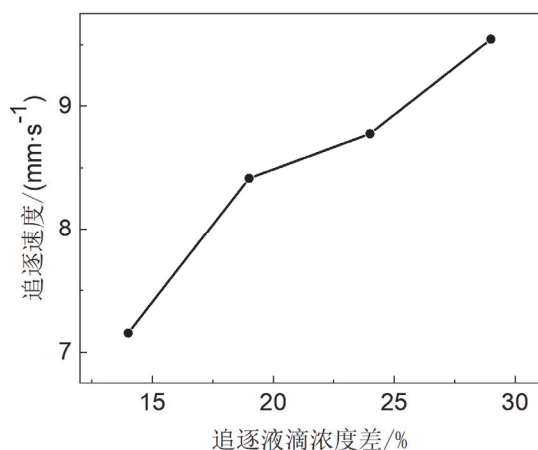


图8 浓度差与直线追逐速度的关系图

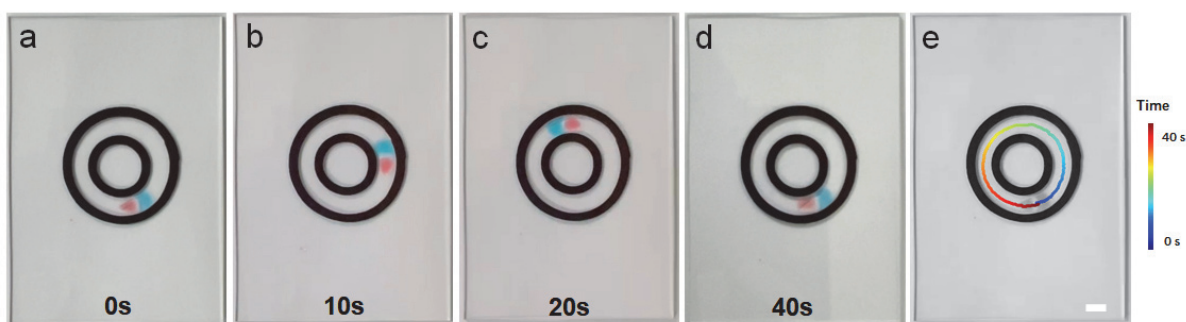


图9 不同浓度液滴的转圈追逐

(a-d): 不同时间两液滴的位置; (e) 液滴圆形运动轨迹路线

蓝色和红色液滴分别代表被追逐者和追逐者; 丙二醇溶液浓度: 红色-25%、蓝色-1%; 图(e)中标尺: 5 mm;

电子版为彩图

#### 2.5.4 不同浓度液滴的“彩虹梯子”实验

通过图10所示的方法, 以合适的角度(倾角 $\sim 5^\circ$ )摆放绘制好疏水梯子图案的亲水玻璃板, 随后由下而上加入浓度依次增大的溶液(黄色-30%、红色-25%、绿色-15%、蓝色-1%)。这种彩虹色与黑色的条纹一起形成梯子图案, 因此该实验被称为“彩虹梯子”实验。



图10 “彩虹梯子”实验装置图

由亲水玻璃板和疏水梯子图案组成

如图11a所示，在图案的右侧起点处滴下适量的蓝色液滴，在重力作用下，液滴会沿着所画轨迹向下流动。首先，当遇到最大浓度的黄色溶液时，液滴会因为表面张力和不平衡的蒸发梯度而被排斥离开，此后蓝色液滴依次经过红色溶液、绿色溶液而被排斥离开，原理同上。在接触到蓝色溶液时，由于两种液滴浓度相同，其蒸发梯度和表面张力相同，因此两液滴会融合，达到“回家”的效果。

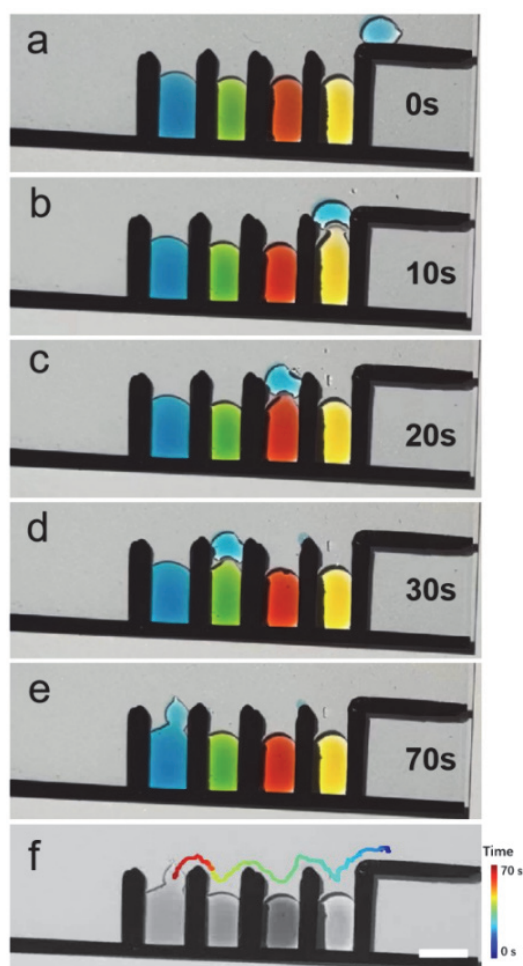


图11 不同浓度液滴的“彩虹梯子”实验

(a-e) 不同时间蓝色液滴的位置；(f) 液滴跳跃运动轨迹路线

丙二醇溶液浓度：黄色-30%、红色-25%、绿色-15%、蓝色-1%；图(f)中标尺：10 mm；

电子版为彩图

### 3 科普展示和互动方案

本次科普展示实验是在苏州大学材料与化学化工学部软物质材料实验室设计完成。另外，由于实验装置的简易性、实验药品安全性和可回收性，本展示实验可以在其他任何空气流动性较好的公共场所进行，如图12所示。

展示对象：大学生、中小学生、市民群众(在后续描述中，对象分为初三年级以下学生和初三及以上年级学生两类，其中，市民群众被视作初三年级以下学生)。

展示形式：演示实验 + 讲解 + 观众体验。

展示内容：具体呈现内容、顺序及形式可根据展示时长进行调整。



图12 科普实验展示现场

演示实验：

(1) 玻璃板的亲水处理。

针对不同的展示对象采用不同的展示方案，对于有实验室基础的大学生、中学生可以采用酒精灯炙烤法对玻璃板进行亲水处理；对于小学生或者市民群众可以采用超纯水(为实验室自制超纯水)冲洗、无水乙醇冲洗方式进行亲水处理。

(2) 不同浓度丙二醇溶液的配制(染色以表示不同浓度)。

对于全体展示对象均可展示，首先配制不同浓度的丙二醇水溶液，并选取不同食用色素进行染色。

(3) 运动轨迹的图画。

对于液滴自由追逐实验，可以直接采用亲水处理过的玻璃板进行实验；对于多种不同浓度液滴的直线追逐、不同浓度液滴的转圈追逐以及不同浓度液滴的彩虹梯子，可以用疏水油性笔画出相应的轨迹，或者自由发挥画出各种各样的赛道进行实验。

(4) 实验现象和结果分析讨论(学生互动，后由志愿者补充完善)。

【提问1】不同的浓度大小，对于追逐速度快慢的关系？

答案：浓度差异越大，追逐速度越快，整体呈现正相关关系。

【提问2】可能会影响到我们刚刚制备玻璃板亲水效果的因素有哪些？

答案：A、玻璃板上的灰尘粒子会固定住液滴。

B、亲水处理不均匀。

C、疏水油性笔画线不均匀。

【提问3】除了丙二醇水溶液，其他的双组分溶液是否有类似的液滴追逐现象？

答案：有的，例如甘油水溶液，双组分液滴有不同的蒸发梯度和表面张力即有可能实现该效果。

【提问4】如果液滴追逐足够长的时间，最终会不会停下来？

答案：会的，在追逐过程中，两液滴的浓度差逐渐缩小，在浓度相同时会融合并停下。

## 4 结语

液滴追逐及融合实验将打破以往传统的科普展示形式，从所需溶液配制到实验整体过程演示均可实现现场演示，针对不同的学习群体能够以不同高度的理解层次进行讲述，以生活中随处可见的醇类和纯净水为原料，切实反映了“化学在生活中无处不在”这一理念，结合蒸发梯度、表面张力原理以及实验运动现象的展示，能够大幅度激发观众对于物理化学现象的浓厚兴趣。此外，蒸发梯度和表面张力在生活中的应用也十分广泛，在学习了这一实验的相关原理后，学习者更能提高自己在日常生活中对物理化学现象的关注度。本实验既涉及物理化学原理，又与颜色混合相关，内容丰富，现象生动有趣，能够满足不同人群的学习需求。它打破了传统科普实验的局限，开拓了更多的实验思路，帮助人们认识表面张力的强大威力，在滴水之中启发人们对科学的无尽探索。

## 5 特点/特色/创新性声明

- (1) 将不同液滴浓度和颜色结合, 色彩斑斓, 观赏性强。
- (2) 绿色源于生活: 实验药品用量少, 为食品添加剂, 无毒无害并常见于生活。
- (3) 趣味性强, 操作简单: 配制溶液过程简易, 液滴动感十足, 能极大提高观众兴趣。

## 参 考 文 献

- [1] 傅献彩, 沈文霞, 姚天扬, 侯文华. 物理化学下册. 第5版. 北京: 高等教育出版社, 2005: 311-323.
- [2] Wenzel, R. N. *Ind. Eng. Chem.* **1936**, *28*, 988.
- [3] Bascom, W. D.; Cottingham, R. L.; Singleterry, C. R. *Adv. Chem.* **1964**, *43*, 355.
- [4] Thomson, J. *Phil. Mag.* **1855**, *10*, 330.
- [5] Barthlott, W.; Neinhuis, C. *Planta* **1997**, *202* (1), 1.
- [6] Pollack, M.G.; Fair, R. B.; Shenderov, A. D. *Appl. Phys. Lett.* **2000**, *77* (11), 1725.
- [7] Zhang, X.; Shi, F.; Niu, J.; Jiang, Y.; Wang, Z. *J. Mater. Chem.* **2008**, *18* (6), 621.
- [8] Hoke, B. C., Jr.; Patton, E. F. *J. Chem. Eng.* **1992**, *37* (3), 331.
- [9] Cira, N. J.; Benusiglio, A.; Prakash, M. *Nature* **2015**, *519* (7544), 446.
- [10] Brzoska, J. B.; Brochard-Wyart, F.; Rondelez, F. *Langmuir* **1993**, *9* (8), 2220.
- [11] Ichimura, K.; Oh, S.-K.; Nakagawa, M. *Science* **2000**, *288* (5471), 1624.
- [12] Gallardo, B. S.; Gupta, V. K.; Eagerton, F. D.; Jong, L. I.; Craig, V. S.; Shah, R. R.; Abbott, N. L. *Science* **1999**, *283* (5398), 57.
- [13] Style, R. W.; Che, Y.; Park, S. J.; Weon, B. M.; Je, J. H.; Hyland, C.; German, G. K.; Power, M. P.; Wilen, L. A.; Wettlaufer, J. S.; *et al.* *Proc. Natl. Acad. Sci.* **2013**, *110* (31), 12541.