

追寻时间的化学足迹 ——碘钟反应

作者：郑琳萱，唐祯悦，万科；Email: 1325485668@qq.com

1. 引言

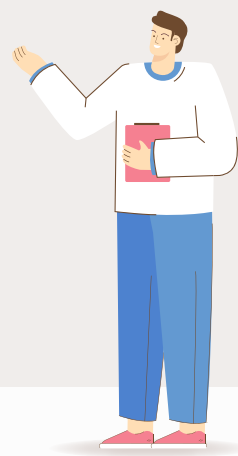
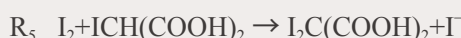
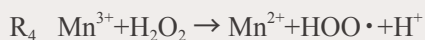
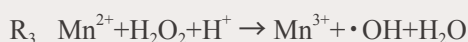
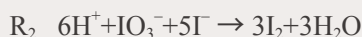
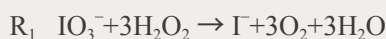
想象一下：一杯透明溶液，滴入几种常见材料后，突然变成琥珀色，几秒后又变蓝，像被按下“循环键”一样反复交替——这就是化学世界里著名的“时间魔术师”：**碘钟反应**。碘钟反应是一类具备自组织现象的化学振荡反应^[1-2]，由瑞士科学家 Hans Heinrich Landolt 于 1886 年首次

发现。化学振荡反应最早发现于汞心脏实验中^[3]，其物质浓度在系统中会发生周期性改变。随着对化学振荡探究的深入，其他的振荡反应也逐渐被探索出来。B-L^[4]和 B-Z^[5]反应最先被发现，在它们的基础上，人们又发现了 Briggs-Rauscher 反应（以下简称 B-R 反应），它以首次发现的两位科学家来命名^[6]。本文

将从科普的角度出发，介绍 B-R 反应的原理，对日常生活中水果的抗氧化剂的含量进行了定性比较，兼具趣味性与简便性。

2. 碘钟反应原理

碘钟反应以碘离子为核心，借助不同价态的碘化合物，让溶液中各物质浓度周期性变化，**具体反应机理如下：**



在酸性条件下，生成的 HIO_3 氧化 H_2O_2 释放 I^- (R_1)^[7]，为自催化反应提供 I^- 来源。过量 H_2O_2 在酸性条件下将无色的 Mn^{2+} 氧化为琥珀色的 Mn^{3+} (R_3)^[8]，随 I_2 浓度增加，溶液逐渐呈蓝色， I_2 取代 $\text{CH}_2(\text{COOH})_2$ 中的活泼氢的同时释放 I^- ，溶液变为无色。伴随 I_2 的生成、消耗和再

生，体系出现周期性节律，在颜色上表现为无色→琥珀色→蓝色的周期性变化^[7-9]。

3. 碘钟反应的应用

3.1 水果中抗氧化物的测定

B-R 振荡体系中的自由基 ($\text{HOO}\cdot$) 和 ($\text{I}\cdot$) 会优先和果汁中的维生素 C (VC) 等抗氧化剂反应^[10]，阻止了振荡的进行，只有

当抗氧化剂被完全反应完时，振荡才能继续进行^[11]。利用此原理可以对水果中的水溶性抗氧化剂 (VC、绿原酸和多酚等) 进行定性分析。

在室温下，进行碘钟反应，在第二次出现琥珀色时加入 5 滴鲜榨果汁（苹果、香蕉和柠檬），记录第二次蓝色周期时

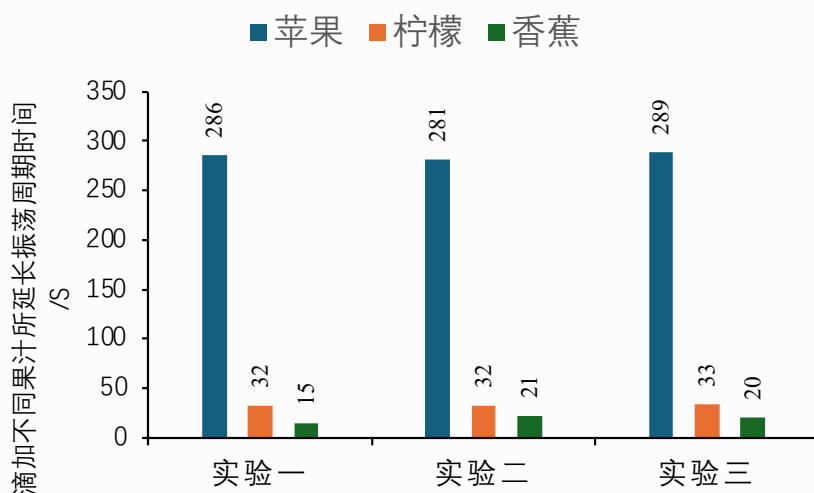
长(图1)。

由图1可直观看出,苹果的抗氧化剂含量明显高于其它水果,而其它水果的抗氧化剂含量相近。该实验通过科学的方法验证了水果对人体健康的重要性,有力地证实了“一天一苹果,医生远离我。”的观点。

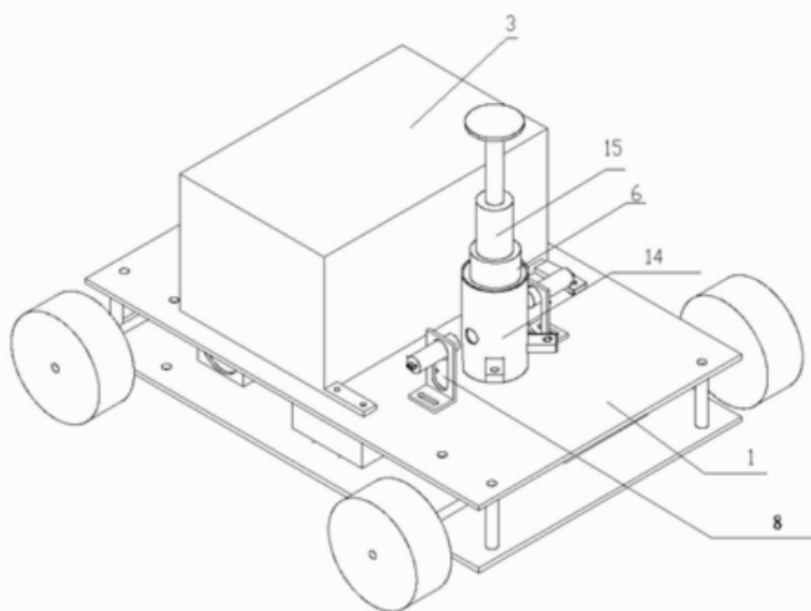
3.2 智能控制

碘钟反应的颜色会随着时间发生周期性变化,如同一个精密的仪表,更如控制我们生活起居的“生物钟”。根据这一联想,不少工程师便将碘钟反应中颜色的精密变化与智能控制结合在一起,设计出了一套基于碘钟反应颜色变化的控制系统,该系统仅需要一套光学传感器便能实现对机械的精准控制。

其中具有代表性的例子是大连理工大学研发的一种基于VC碘钟反应的智能小车(图2)^[12]。该小车的核心是一个装有VC、碘化钾和淀粉溶液的透明反应瓶。开始时溶液无色,当注入过氧化氢后,反应开始。VC先被消耗,之后碘离子被氧化生成碘单质,与淀粉结合使溶液迅速变蓝。小车两侧装有一对激光对射传感器,实时检测溶液颜色。只要溶液为无色,传感器输出低电平,继电器保持闭合,小车继续行驶。一旦溶液变蓝,传感器输出高电



【图1】滴加不同果汁所延长振荡周期时间



【图2】智能小车^[12]

注: 1. 为上底板; 3. 为锌空电池; 6. 为VC碘钟反应瓶; 8. 为激光对射传感器; 14. 为反应容器固定底座; 15. 为注射器

平,继电器断开,电机断电,小车停止。在控制智能小车按照固定距离行驶的场景中,这一富有

创意性的发明因其简易、廉价和绿色的特性,有着巨大的潜力。

在为这一创意感到惊叹的同

时, 我们也不能忘记其作为一种化学反应, 在精密程度上是逊色于精密的电子元件的。对碘钟反应的精确控制将成为未来这一领域的重点研究方向, 目前科学家们已经在该方向上取得了一些进展。如荣秦朗等人^[13]在其发明专利中提到的内置冷激光光源 + 光敏电阻, 实时监测溶液透光率变化, 避免激光发热影响反应温度, 同时在反应瓶周围设置聚氨酯隔热层, 效隔绝外界温度与光线干扰。

3.3 胶体材料系统

淀粉作为一种天然聚合物, 遇到含 I_2 溶液时变为深

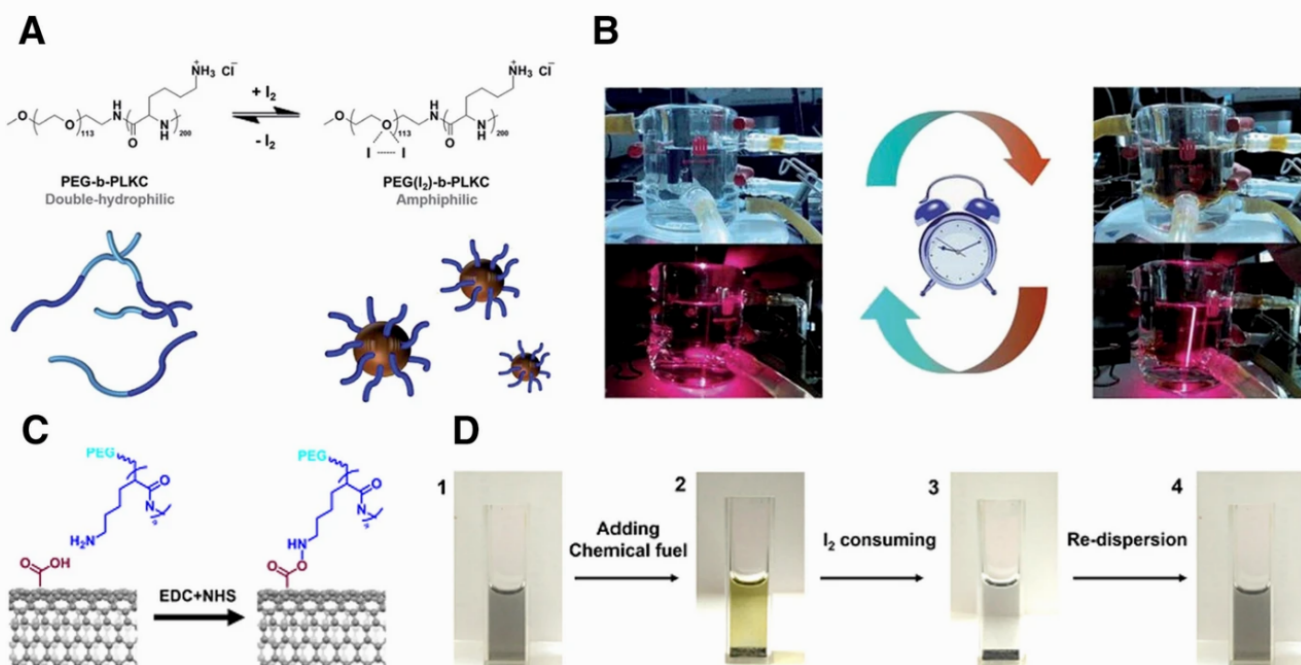
蓝色, 是因为形成了碘 - 淀粉络合物。以此为例, 将亲水性嵌段共聚物 PEG-b-PLKC 加入含 I_2 的溶液中, 形成超两亲性络合物 PEG(I_2)-b-PLKC, 其中 PEG 片段由亲水性转变为疏水性, PLKC 片段保持亲水性。

PEG(I_2)-b-PLKC 与羧化多壁碳纳米管(MCNT)在碘酸盐 - 硫脲溶液中形成多壁碳纳米管(MWCNTs)胶体, MCNT 通过其结构上存在的羧基(-COOH)“抓手”与亲水片段 PLKC 结合, 而疏水片段 PEG 给予 MWCNTs “浮力”, 使胶体能够稳定地悬浮在水中。MWCNTs 与水中的有机污

染物反应重新生成 MCNT。保持溶液中 I_2 充足, 可实现 MCNT、MWCNTs 循环生成, 直至有机污染物完全去除, 达到少量、高效和低成本去除有机污染物的效果^[14]。

4. 总结与展望

碘钟反应作为一类经典化学振荡反应, 自发现以来已衍生出过氧化氢型和碘酸盐型等多种变体。以碘离子为核心, 通过不同价态碘化合物之间的转化, 呈现琥珀色——蓝色的周期性交替, 现象明显, 颜色美丽。在实际应用中, 碘钟反应可用于水果中水溶性抗氧化剂的定性分



① 【图3】A 为 PEG 结构示意图, B 为 (I_2)-b-PLKC 的形成, C 为 MWCNTs 制备示意图, D 为 MWCNTs 瞬时摄影图^[14]

析, 验证水果健康价值; 还能与智能控制结合, 如研发基于 VC 碘钟反应的智能小车; 同时在胶体系统等材料领域也有应用, 为相关研究提供支持。

未来, 可进一步优化碘钟反应在不同类型反应体系中的条件, 如温度和 pH 值等, 提升反应稳定性与可控性; 结合更多前沿技术, 拓展其在环境监测和精准医疗辅助

检测等新领域的应用; 此外, 依托其直观的反应现象, 持续推进化学科普工作, 可以让更多人了解化学振荡反应的魅力, 为化学学科发展及实际应用创新注入更多活力。

参考文献

- [1] 李雷召, 袁玲, 杨加平. 化学振荡和时空斑图动力学研究进展[J]. 广州化工, 2010, 38(12): 40-41.
- [2] 李如生. 非平衡非线性现象和涨落化学——物理化学的新课题[J]. 化学通报, 1984(5): 41-47.
- [3] 向晓明, 张斌. 化学振荡及其应用[J]. 西北民族大学学报(自然科学版), 2002, 23(4): 14-18.
- [4] Liebhafsky, Herman A. Reactions involving hydrogen peroxide, iodine and iodate ion. I. Introduction [J]. J Am Chem Soc, 1931, 53(1): 38-44.
- [5] Zhabotinsky A M, Rovinsky A B. Mechanism and nonlinear dynamics of an oscillating chemical reaction[J]. J Statistic Phys, 1987, 48(5/6): 959-975.
- [6] Briggs T S, Rauscher W C. An oscillating iodine clock[J]. J Chem Educ, 1973, 50(7): 496.
- [7] Furrow S D, Noyes R M. The oscillatory Briggs-Rauscher reaction. 1. Examination of subsystems[J]. J Am Chem Soc, 1982, 104(1): 38-42.
- [8] 常海. 碘钟颜色震荡反应的研究[J]. 广州化学, 2016, 41(5): 33-36+41.
- [9] 袁玲, 王子悦, 高庆宇, 等. Briggs-Rauscher振荡反应时空节律实验设计和实践[J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(11): 142-147, 152.
- [10] 张望宁, 张慧, 周颖, 等. 利用四氮杂大环二镍催化的新型Briggs-Rauscher振荡体系定量分析测定槲皮素[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2019, 43(4): 73-81.
- [11] Höner K, Cervellati R. Measurements of the antioxidant capacity of fruits and vegetables using the BR reaction method[J]. Europ Food Res Technol, 2002, 215: 437-442.
- [12] 大连理工大学. 一种基于VC碘钟反应的智能小车: 中国, 201922178879.X[P]. 2021-01-29.
- [13] 荣秦朗. 一种基于Chem-E-Car竞赛的新型碘钟反应控制装置: 中国, 202120996269.5[P]. 2022-04-19.
- [14] Panzarasa G. Iodine clocks: Applications and untapped opportunities in materials science[J]. React Kinet Mech Cat, 2022, 135: 1349-1364.