

智能手机光传感的“丙酮碘化反应”实验改进

柴红梅*, 任宜霞, 侯向阳, 唐龙, 谢佳威

延安大学化学化工学院, 陕西 延安 716000

摘要: 本研究采用手持技术对丙酮碘化反应实验进行改进, 通过将盛有反应液的容器置于智能手机感光口上方, 检测体系透过光强度随时间的变化, 实现对反应时间的精确测量和数据的自动采集, 结果与文献一致。与光度法相比, 该方法快速、高效、便携、成本低, 能满足学生独立操作实验的条件, 可以提高学生的参与度, 培养学生的化学学科核心素养。

关键词: 智能手机; 光传感器; 丙酮碘化反应; 速率方程

中图分类号: G64; O64

Enhanced Experimental Method for Acetone Iodination Reaction Utilizing Smartphone Light Sensors

Hongmei Chai*, Yixia Ren, Xiangyang Hou, Long Tang, Jiawei Xie

College of Chemistry and Chemical Engineering, Yan'an University, Yan'an 716000, Shaanxi Province, China.

Abstract: This study presents an improved approach to the acetone iodination reaction experiment by employing handheld technology. The reaction vessel was positioned directly above the light sensing port of a smartphone, enabling real-time monitoring of light intensity changes over time. This setup facilitates precise measurement of reaction time and automatic data collection, with results aligning with existing literature. Compared to traditional spectrophotometric methods, this novel approach is rapid, efficient, portable, and cost-effective. It allows each student to conduct experiments using an individual device, thereby enhancing student engagement and fostering essential competencies in the field of chemistry.

Key Words: Smartphones; Light sensors; Acetone iodization reactions; Rate equations

随着信息技术的不断发展与更新, 手持技术在化学教学及研究中也在不断形成, 已有许多高校和发达地区的中学先后建立起手持技术实验室, 比如华南师范大学钱扬义教授的研究团队^[1,2]、宁夏大学倪刚教授的研究团队^[3,4]等。手持技术是由计算机和微电子技术相结合的新型数字化实验手段, 集数据采集、传感、计算分析于一体, 具有便携、直观、实时、定量等特点^[1,2]。将手持技术应用于化学实验教学与研究性学习, 能转变学生的学习方式, 培养学生的科学探究能力和创新精神, 体现了当前教育改革思想和理念。近年来, 随着智能手机的普及, 下到几岁小孩, 上到几十岁老人, 无一不使用智能手机, 手机的功能越来越强大, 再加上手机APP也是层出不穷, 不断完善, 利用其内置的各种传感器(GPS位置传感器、距离传感器、气压传感器、光线传感器、温度传感器、紫外线

收稿: 2024-07-22; 录用: 2024-09-25; 网络发表: 2024-12-09

*通讯作者, Email: chm8550@163.com

基金资助: 延安大学教学改革研究项目(YDJG23-32, YDYTG2020031)

传感器等)完成了许多有意思的物理和化学实验^[5-10]。

丙酮碘化反应动力学参数的测定实验是物理化学实验中的一个基本实验,近年来各高校基本都采用分光光度法来测定,由实验可求出反应级数、速率常数和活化能^[5,11]。但是此法不能实现微型操作、节约试剂和信息化教学的目的,同时也不能满足学生独立操作实验的条件,更难达到培养学生创新能力。

因此,我们利用智能手机的光传感系统对丙酮碘化反应动力学参数的测定实验进行改进研究。将盛有反应液的容器(小烧杯)直接置于智能手机光感应口,利用智能手机APP“Phyphox”实时监测反应过程中的体系透过光强度随时间的变化,实验结束导出数据进行数据处理,线性拟合,建立一个描述反应速率与透过光强度之间关系的数学模型,以此建立丙酮碘化反应的速率方程,结果与文献高度符合,令人满意。该方法不仅操作简单、快速、试剂用量少,而且增加了实验的趣味性和可操作性,有利于学生化学学科素养的提高,也有助于师生了解人工智能在化学学习中的作用,极大地丰富了化学实验的研究方法,拓展了化学实验的研究范围,为信息时代下的化学实验带来了新的变革。

1 实验部分

1.1 实验原理

丙酮碘化反应是一个复合反应,总反应为:



其中 H^+ 既是反应的催化剂,又是产物,所以该反应是一个自催化反应。该反应的速率方程为

$$r = -d[\text{I}_2]/dt = k[\text{CH}_3\text{COCH}_3]^\alpha [\text{H}^+]^\beta [\text{I}_2]^\gamma \quad (2)$$

式中 k 为速率系数, $[\text{CH}_3\text{COCH}_3]$ 、 $[\text{H}^+]$ 、 $[\text{I}_2]$ 分别为丙酮、盐酸和碘溶液在某一时刻的浓度($\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$), α 、 β 、 γ 依次为丙酮、盐酸和碘的反应级数。

孤立法^[11]是测定反应级数常用的方法。该方法是保持其他反应物(比如盐酸和碘)的起始浓度不变,只改变某一反应物(如丙酮)的起始浓度,此时速率公式为

$$r_0 = -d[\text{I}_2]/dt = k[\text{CH}_3\text{COCH}_3]^\alpha \quad (3)$$

用 $\lg r$ 对 $\lg[\text{CH}_3\text{COCH}_3]$ 作图,从斜率可以计算出 α ,按照上述同样的思路,可以依次计算出 β 和 γ ,那么反应级数为 $n = \alpha + \beta + \gamma$ 。

碘溶液在可见光区有宽的吸收带,在此吸收带中丙酮、盐酸及其他的生成物均无明显吸收,所以可以根据朗伯比尔定律:

$$A = -\lg T = \varepsilon b [\text{I}_2] \quad (4)$$

其中, ε 是摩尔吸光系数; b 是光束通过溶液的厚度。在同一条件下(包括溶液厚度), ε 、 b 都是常数,可以看作 B 。

将 $\lg T = \lg I_t - \lg I_0$ 带入(4)式得:

$$\lg I_t - \lg I_0 = \varepsilon \times b \times [\text{I}_2] = B \times [\text{I}_2] \quad (5)$$

将式子的两端对时间 t 求导,可以得到

$$-d\lg I_t/dt = B d[\text{I}_2]/dt \quad (6)$$

与(3)式比较得:

$$r_0 = d\lg I_t/Bdt \quad (7)$$

① 求 B 。在某一温度下测定一系列已知浓度碘溶液的透过光强度 I_t ,根据(5)式,以 $\lg I_t$ 为纵坐标,以 $[\text{I}_2]$ 为横坐标,所得直线的斜率为 $-B$,可求出对应的 B 值;

② 求 r 。在某温度下测定某一丙酮碘化反应体系不同时刻 t 时的透过光强度 I_t ,用 $\lg I_t$ 对 t 作图,当 $t = 0$ 时,切线斜率为 $d\lg I_t/dt$,根据(7)式,可求的反应的初始速率 r_0 。(本次实验所用设备以秒计时,

故 r_0 单位为 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)

③ 求 α , β , γ 。例如求 α : 首先, 在相同温度下保持盐酸和碘液的浓度不变, 只改变丙酮的浓度, 且第二次浓度是第一次浓度的 A 倍, 设两组实验的初始速率分别为 r_1 和 r_2 , 则

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{k[\text{CH}_3\text{COCH}_3]_2^\alpha [\text{H}^+]_2^\beta [\text{I}_2]_2^\gamma}{k[\text{CH}_3\text{COCH}_3]_1^\alpha [\text{H}^+]_1^\beta [\text{I}_2]_1^\gamma} = \frac{[\text{CH}_3\text{COCH}_3]_2^\alpha}{[\text{CH}_3\text{COCH}_3]_1^\alpha} = A^\alpha \quad (8)$$

$$\alpha = \lg(r_2/r_1)/\lg A \quad (9)$$

同理, 可以计算出 β 和 γ , 进而求得 n 。

也可以通过只改变其中一种反应物(比如丙酮)进行线性拟合求 α :

由(7)式、(6)式和(2)式结合得:

$$\text{d} \lg I_t / \text{d} t = -B \text{d} [\text{I}_2] / \text{d} t = B k [\text{CH}_3\text{COCH}_3]^\alpha [\text{H}^+]^\beta [\text{I}_2]^\gamma \quad (10)$$

两边取对数得: $\lg(\text{d} \lg I_t / \text{d} t) = \lg B + \lg k + \alpha \lg[\text{CH}_3\text{COCH}_3] + \beta \lg[\text{H}^+] + \gamma \lg[\text{I}_2]$

当盐酸、碘的浓度不变时, 只改变丙酮的浓度, 上式可变为:

$$\text{Lg}(\text{d} \lg I_t / \text{d} t) = \alpha \lg[\text{CH}_3\text{COCH}_3] + \lg Z \quad (11)$$

式中 Z 为常数, 用 $\lg(\text{d} \lg I_t / \text{d} t)$ 对 $\lg[\text{CH}_3\text{COCH}_3]$ 作图, 直线的斜率即为 α , 同理可求得 β 和 γ 。

④ 求 k , 利用已知的初始速率及对应的各反应物的初始浓度, 由速率方程可以计算各反应的速率常数 k , 最后求取平均值。

⑤ 写出速率方程。将 α 、 β 、 γ 以及 k , 代入速率方程式, 就可以建立该反应的速率方程。

1.2 实验仪器和试剂

智能手机(华为P50 Pro), 50 mL容量瓶(2个), 100 mL容量瓶(2个), 移液枪, 小烧杯(5 mL, 底面直径约为2.0 cm, 高约为2.8 cm)。

0.02 mol·L⁻¹的标准碘溶液, 2.00 mol·L⁻¹丙酮溶液, 1.00 mol·L⁻¹盐酸溶液^[11,12]。

1.3 实验方法

第一步, 下载并安装“手机物理工坊Phyphox”手机APP^[4]。

第二步, 寻找手机光感应口(每个型号的手机不太一样)。打开手机APP(图1a), 点击光, 再点击启动键(图1b), 手指轻轻按住手机前置摄像头周围, 当看到图表显示的曝光度趋近于0时, 手指所按下的地方即为该手机的光感应口(图1c)。

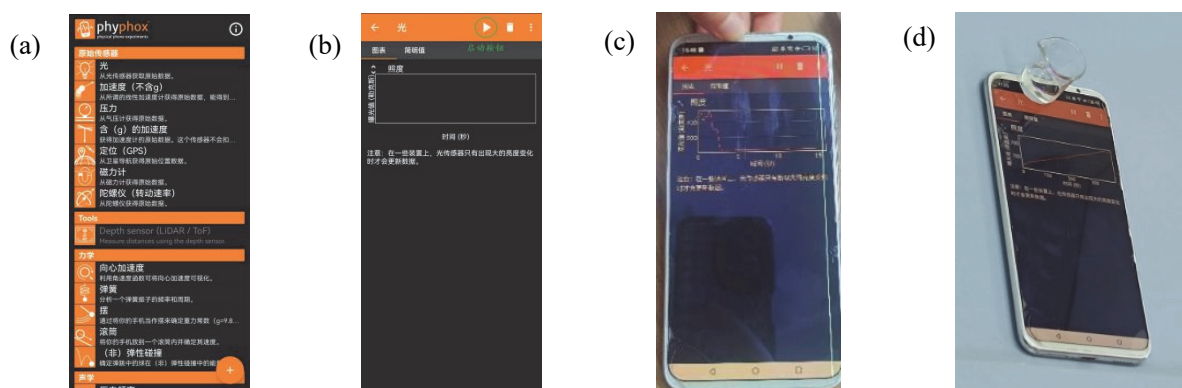


图1 手机APP操作图

第三步, 将恒温水浴调至30.0 °C(或36.0 °C), 将装有蒸馏水、碘液、丙酮溶液以及盐酸溶液的磨口比色管中, 然后将其置于恒温水浴中恒温10 min以上。

第四步, 测定体系的透过光强度。

(1) 测量 B 值。用移液枪分别移取一定体积的标准碘液(0.02 mol·L⁻¹)于小烧杯中, 再加入一定体

积的蒸馏水,使得体系的总体积为2.00 mL,浓度范围为0.002–0.02 mol·L⁻¹。然后将小烧杯置于手机感光孔处,点击启动键测量其透过光强度 I_t 。每个浓度反复测量3次取平均值,计算 B 值。

(2) 测定1号体系的 $\lg I_t-t$ 曲线。按照表1,将恒温好的碘溶液、盐酸溶液和水分别加入到恒温的小烧杯中,然后迅速加入丙酮溶液,立即摇匀后将小烧杯置于手机感光孔处,点击启动键,即可实时自动监测反应过程中透过光强度随时间的变化曲线,见图1d。

表1 丙酮碘化反应的反应体系

| 体系 | $V(I_2)/\text{mL}$ (0.02 mol·L ⁻¹) | $V(H^+)/\text{mL}$ (1.00 mol·L ⁻¹) | $V(\text{丙酮})/\text{mL}$ (2.00 mol·L ⁻¹) | $V(H_2O)/\text{mL}$ |
|----|---|---|---|---------------------|
| 1 | 0.40 | 0.40 | 0.50 | 0.70 |
| 2 | 0.40 | 0.40 | 1.00 | 0.20 |
| 3 | 0.40 | 0.80 | 0.50 | 0.30 |
| 4 | 0.20 | 0.40 | 1.00 | 0.40 |

第五步,导出并处理数据^[4]。

第六步,按照测定1号体系的方法,依次测量2、3和4号体系在不同时刻 t 的透过光强度 I_t ,并导出数据,每个体系平行测定3次。

第七步,以4#体系为准,其他反应物浓度不变,只改变其中一种反应物进行测定。丙酮的浓度范围为:0.20–1.00 mol·L⁻¹,盐酸的浓度范围为:0.050–0.65 mol·L⁻¹,碘液的浓度范围为:0.0010–0.0050 mol·L⁻¹。

第八步,同法测定36.0 °C时各反应体系在不同时刻 t 的透过光强度 I_t 。

2 结果与讨论

2.1 实验条件及反应体系的选择

按照文献^[11]的比例配制总体积为2.00 mL的反应体系进行实验,结果见图2,发现除了3#,其他曲线斜率较小,说明反应较为缓慢。

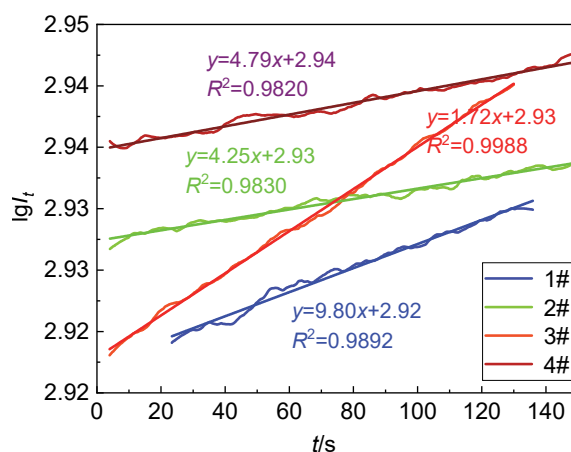


图2 按照文献比例的实验结果

由于该反应为一个自动催化反应,盐酸为催化剂,为了加快反应速率,选择加大盐酸的用量,同时为了控制该反应在一元碘化阶段,选择丙酮和酸的浓度大大过量于碘的浓度。也为了将反应速率控制在可操作范围内,用反应速率较快的3#体系进行用量选择,结果见表2。

表2 3号体系实验测试

| 次数 | $V_{\text{碘液}} : V_{\text{盐酸}} : V_{\text{丙酮}} : V_{\text{水}}$ | 现象 |
|----|--|--|
| 1 | 0.6 : 0.8 : 0.6 : 0.0 | 反应所需时间需23 min左右, 反应时间过长, 说明碘液浓度较大 |
| 2 | 0.1 : 0.8 : 0.4 : 0.7 | 反应所需时间5 min左右, 反应时间略长, 而且透过光强度 I 较低, 反应不灵敏 |
| 3 | 0.4 : 1.0 : 0.4 : 0.0 | 反应所需时间为160 s左右, 多次平行实验测定, 发现反应所得曲线较不稳定 |
| 4 | 0.4 : 0.8 : 0.5 : 0.3 | 反应所需时间为200 s左右, 此时反应曲线稳定 |

根据上表现象, 选择第4次的比例为3号体系的比例, 相应的设计1、2、4号体系比例, 结果见表1。

2.2 实验数据处理(以30.0 °C的数据为例)

(1) B值的测定结果见图3所示, 由曲线的斜率可得 $B = 52.06 \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。

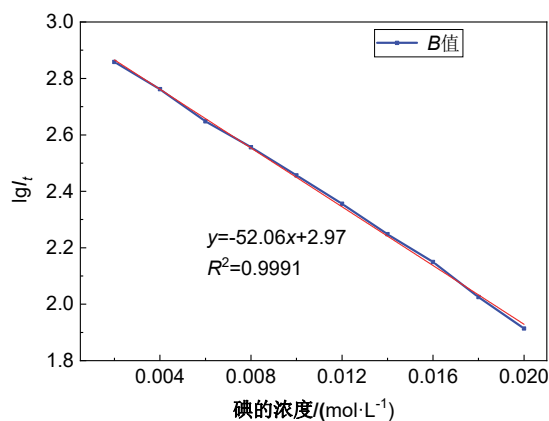


图3 B值

(2) 1[#]-4[#]体系的 $\lg I_t$ 对 t 作图(图4), 将各体系的斜率求取平均值后根据(9)式, 由1[#]和2[#]求 α , 1[#]和3[#]体系求 β , 2[#]和4[#]体系求 γ 。

对于 α : $2^\alpha = 0.000937/0.000477 = 1.96$, 得 $\alpha = 1$ 。

对于 β : $2^\beta = 0.00101/0.000477 = 2.12$, 得 $\beta = 1$ 。

对于 γ : $2^\gamma = 0.000850/0.000937 = 0.29$, 得 $\gamma = 0$ 。

总反应级数: $n = \alpha + \beta + \gamma = 2$ 。

用 $\lg(d\lg I_t/dt)$ 对 $\lg[\text{某反应物}]$ 作图, 见图5所示, 结果发现, $\alpha = 1$ 、 $\beta = 1$ 、 $\gamma = 0$ 。与上述结果一致。

(3) 将反应级数和1[#]-4[#]体系平均斜率代入(7)式和(2)式求出反应的速率常数 k :

$$1^\#: \frac{4.77 \times 10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}}{52.06 \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}} = k_1 \left[\frac{2.00 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \times 0.50 \text{ mL}}{2.00 \text{ mL}} \right]^1 \times \left[\frac{1.00 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \times 0.40 \text{ mL}}{2.00 \text{ mL}} \right]^1$$

解得: $k_3 = 9.16 \times 10^{-5} \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$

同理2[#]-4[#]的速率常数: $k_2 = 9.00 \times 10^{-5} \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, $k_3 = 9.70 \times 10^{-5} \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, $k_2 = 8.16 \times 10^{-5} \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, 那么: $\bar{k} = 9.01 \times 10^{-5} \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

故, 丙酮碘化反应在30.0 °C的速率方程为: $r = 9.01 \times 10^{-5} \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{s}^{-1} \times [\text{CH}_3\text{COCH}_3] \times [\text{H}^+]$ 。

同理36.0 °C时体系1[#]-4[#]的斜率和平均速率常数结果见表3。

为了检验该方法的准确性, 同时采用光度法测得结果见表3所示。

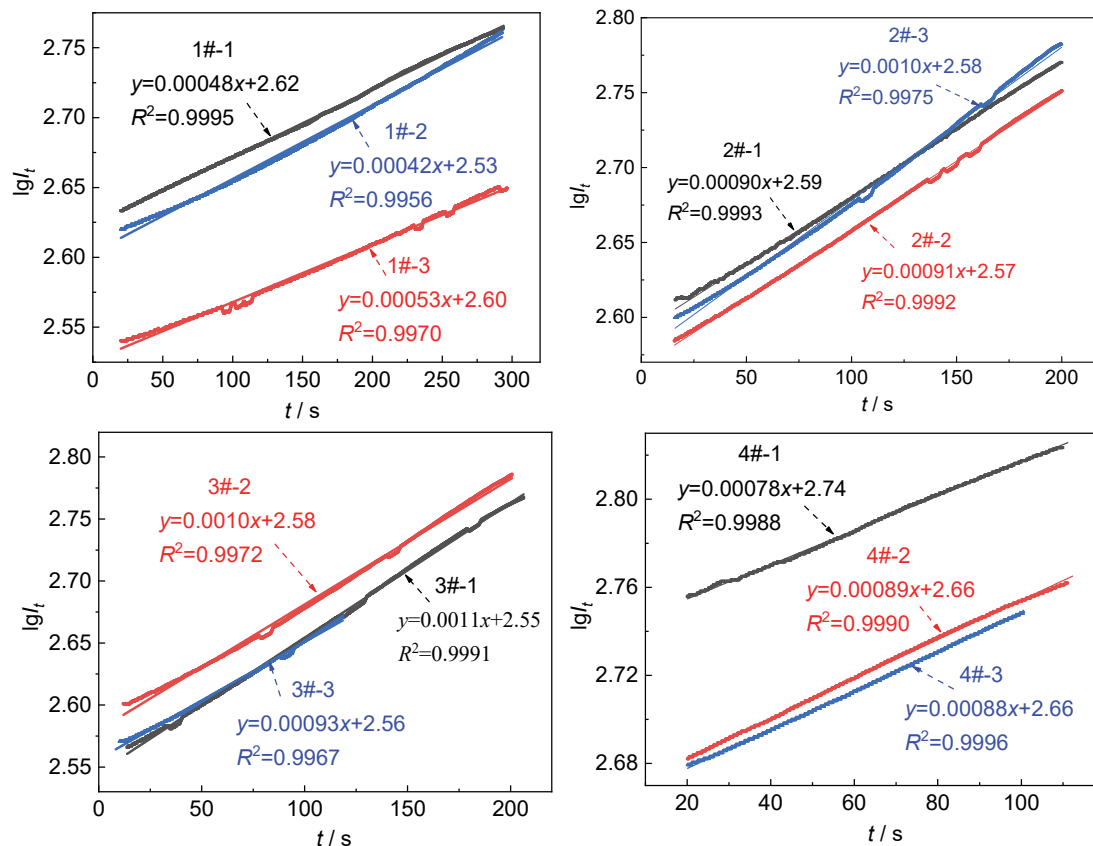


图4 1-4号体系的 $\lg I_t$ 与 t 的关系

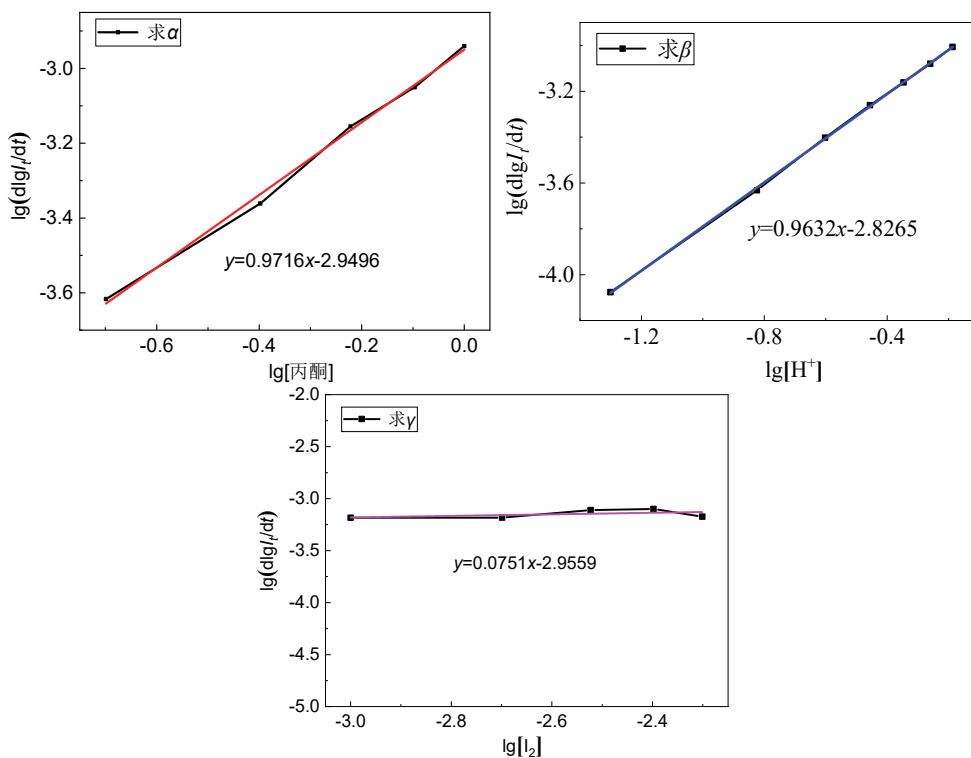


图5 改变某一反应的初始浓度求反应级数

表3 本方法和光度法各体系斜率和平均速率常数

| 实验温度 | 编号 | 本方法 | | 光度法 | |
|----------------------|----------------|----------------------------|---|----------------------------|---|
| | | lgI-t直线斜率 | k (L·mol ⁻¹ ·s ⁻¹) | A-t直线斜率 | k (L·mol ⁻¹ ·s ⁻¹) |
| 30.0 °C | 1 [#] | 4.77 × 10 ⁻⁴ | 9.01 × 10 ⁻⁵ | -7.76 × 10 ⁻⁴ | 8.24 × 10 ⁻⁵ |
| | 2 [#] | 9.37 × 10 ⁻⁴ | | -16.4 × 10 ⁻⁴ | (B = 95.4 L·mol ⁻¹) |
| | 3 [#] | 10.1 × 10 ⁻⁴ | | -15.5 × 10 ⁻⁴ | |
| | 4 [#] | 8.50 × 10 ⁻⁴ | | -15.5 × 10 ⁻⁴ | |
| 36.0 °C | 1 [#] | 9.18 × 10 ⁻⁴ | 17.86 × 10 ⁻⁵ | -8.91 × 10 ⁻⁴ | 15.28 × 10 ⁻⁵ |
| | 2 [#] | 19.50 × 10 ⁻⁴ | | -24.6 × 10 ⁻⁴ | (B = 95.4 L·mol ⁻¹) |
| | 3 [#] | 16.80 × 10 ⁻⁴ | | -33.4 × 10 ⁻⁴ | |
| | 4 [#] | 19.70 × 10 ⁻⁴ | | -29.2 × 10 ⁻⁴ | |
| <i>E_a</i> | | 88.77 kJ·mol ⁻¹ | | 80.12 kJ·mol ⁻¹ | |

根据阿龙尼乌斯公式可得两种方法的活化能分别为88.77和80.12 kJ·mol⁻¹·K⁻¹。该结果与文献^[12]值(*E_a* = 86.20 kJ·mol⁻¹·K⁻¹)基本一致, 而且本方法的误差相对较小, 该误差主要是测定过程中温度的变化引起。

3 实验注意事项

(1) 由于相同体积的溶液在不同烧杯中的溶液厚度不同, 并且不同烧杯的底部玻璃的厚度也不同, 所以为了减少实验误差确保实验时使用同一小烧杯。

(2) 为了确保小烧杯稍微移动时光通过溶液的厚度不变, 需使用后置摄像头不突出的手机(如果突出, 请调整至水平状态), 也不套手机外壳, 确保小烧杯水平放置。

(3) 由于环境的光强度对实验影响较大, 所以在测定过程中尽量保持手机周围光线不变, 尽可能在一定范围内操作, 比如在测定过程中不要在装置周围走动等。

4 结语

本研究利用智能手机的便捷性和实时性特点, 不仅降低了实验的成本投入, 同时也降低了实验的环境和条件要求。通过手机应用程序自动记录实验数据, 实现了对反应时间的精确测量和实验数据的高效收集。这有效地消除了传统数据读取方式与实际反应进程不一致的问题, 从而减少了人为误差, 使得实验结果更加准确可靠。另外, 将智能手机应用于化学实验教学之中, 使得人手一部实验设备成为可能, 实验教学不受制于高昂的设备成本和复杂的操作流程, 这也体现了STS(科学、技术、社会)的教育理念。更重要的是, 信息技术与化学实验的深度结合, 不仅有利于培养学生的创新意识与科学探究能力, 还锻炼了学生信息技术的应用能力。

综上所述, 智能手机光传感技术的应用为化学实验教学带来新的可能性。它不仅提高了实验效率, 使得数据分析变得更加便捷, 还为化学实验教学提供了重要的参考和借鉴。我们相信, 随着信息技术的不断发展, 智能手机将在化学实验教学领域发挥更加重要的作用。

参 考 文 献

- [1] 李林桑, 钱扬义, 蔡丹菊, 黄倩莹, 朱庆. 化学教育(中英文), 2021, 42 (19), 87.
- [2] 林惠梅, 钱扬义, 吴宝珠, 陈柳青, 叶健西, 王磊明. 化学教育(中英文), 2021, 42 (17), 85.
- [3] 任动, 倪刚, 吴晓红, 温宁红. 中国现代教育装备, 2020, 334, 31.

- [4] 温宁红, 倪刚, 李海玲, 吴晓红. 化学教育(中英文), **2019**, *40* (9), 75.
- [5] 张越, 于海英, 郝俊生. 大学化学, **2023**, *38* (4), 7.
- [6] 柴红梅, 闫婷婷, 任宜霞, 杨子涵, 张妍妍. 延安大学学报(自然科学版), **2019**, *38* (2), 48.
- [7] Jarujarect, U.; Pichayawaytin, G.; Sripetch, P.; Doljirapisit, N.; Sumriddetchkajorn, S.; Prempre, P.; Chaitavon, K.; Punpetch, P.; Amarit, R. *J. Chem. Educ.* **2023**, *100* (2), 546.
- [8] 闫彩霞. 物理教师, **2022**, *43* (6), 64.
- [9] 黄艳丽. 中小学实验与装备, **2023**, *33* (3), 47.
- [10] Xue, J. Q.; Mao, K.; Cao, H. R.; Feng, R. D.; Chen, Z.; Du, W.; Zhang, H. *Food Chem.* **2024**, *434*, 137456.
- [11] 高楼军, 侯向阳, 柴红梅, 唐龙. 物理化学实验. 北京: 科学出版社, 2018: 73–81.
- [12] 庄继华, 等. 物理化学实验. 第3版. 北京: 高等教育出版社, 1980: 107–111.