

中華民國第 64 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 化學科

050211

「碘精之比」— 以手機光感應器比色法測量三
碘陰離子生成反應的平衡常數

學校名稱：臺中市立臺中女子高級中等學校

作者： 高二 葉家均 高二 蔡亞情	指導老師： 蔡旺璋 李依澄
---------------------------------	-----------------------------

關鍵詞：平衡常數、比爾定律、手機照度

摘要

本研究欲改良常見的比色法實驗，以手機光感應器做為主要測量反應 $I_2 + I^- \rightarrow I_3^-$ 平衡常數的工具。共使用三個方法：硫代硫酸鈉滴定法、光譜法及手機光測法。滴定法以硫代硫酸鈉將 I_2 還原成 I^- ，求得平衡常數約為 710。而光譜法則是將不同濃度的碘化鉀溶液代入等吸收點總濃度與吸光度的檢量線，求其平衡常數約為 660。光測法以 phyphox 測量溶液照度，經檢量線換算總濃度，再計算出平衡常數為 704~775，手機光測法最佳化感測條件後的優勢為可得到高精確、高準確和再現性高之平衡常數，且儀器取得便利、易架設，少許溶液即可測量，期許之後可用以改良高中傳統比色法實驗及實際應用在生活上。

壹、研究動機

化學實驗課上做過關於平衡常數測定的實驗，當時我們覺得這是一個有趣的實驗，但在操作其中一步驟：比色法時，我們便對自己的眼睛能否準確判斷顏色深淺一致產生疑問。在專題研究課中，也有以光譜法、滴定法或生成氣體換算濃度的經驗。我們覺得光譜儀並不是人人都有的儀器，也不是每個家庭都會有實驗桌及滴定管，是否有更客觀的量化顏色及濃度的工具，且更方便操作又比比色法更準確的實驗方式？因此我們找到名為 Phyphox 的應用程式，並使用裡面的光感測器做為量化工具，希望能以此取代課綱實驗中以肉眼辨識的實驗方式。

經文獻調查後，課綱及多數的比色實驗對象為血紅色的 $FeSCN^{2+}$ ，並求其反應的平衡常數，我們想到化學老師上課示範碘萃取實驗時，了解到固體碘溶於碘化鉀溶液（無色）後變成三碘陰離子（棕色）時會變色的特性，所以我們決定使用光感測器來測量三碘陰離子濃度，進而換算出濃度及平衡常數的方法。

貳、研究目的

為了將手機光測法最佳化，及尋找產生誤差的成因，鑑於定量分析常使用滴定法，先以滴定測量溶液濃度作為標準。又比色法的原理是溶液吸收可見光程度不同產生不同亮度，故先使用光譜進行分析。再汲取滴定法及光譜法的經驗來操作手機光測法，期許能優化實驗操作及流程，得到精準的實驗結果。

- 一、以滴定法求濃度及平衡常數：準確數據、易判別的實驗結果。
- 二、以光譜法求濃度及平衡常數：精準數據，藥劑節省。
- 三、以手機光測法求濃度及平衡常數：精確數據、藥劑節省、方便操作。

參、研究設備及器材

一、設備與器材：

安卓系統手機上 Phyphox 應用程式	Veimer Go Direct 螢光/ UV-VIS 光譜儀	超音波震盪儀
石英比色槽	三位數天秤	微型吸量管
拭鏡紙	燈箱	燒杯
滴定管	鐵架	滴定管夾
吸量管	安全吸球	量筒
錐形瓶	錐形瓶刷	洗滌瓶
刮勺	濾紙	秤量紙
玻璃漏斗	滴管	抹布

二、 實驗藥品：

藥品名稱	化學式（或英文簡稱）
碘	I_2
碘化鉀	KI
硫代硫酸鈉	$Na_2S_2O_3$
澱粉	$(C_6H_{10}O_5)_n$
蒸餾水	H_2O

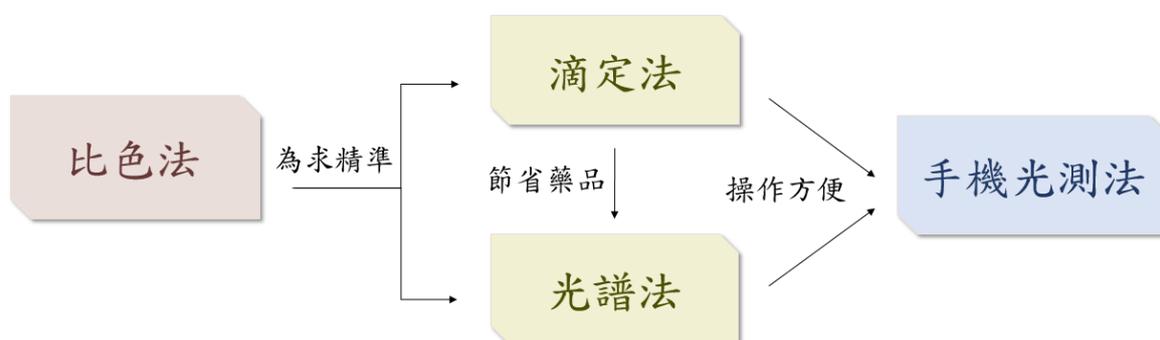
三、 裝置圖：

	
▲圖 1、光譜儀（本圖引自 Veimer Go Direct 官網產品介紹圖）	▲圖 2、光測法裝置（本照片由第二作者拍攝）

肆、研究方法

一、 研究架構：

求 $I_2 + I^- \rightarrow I_3^-$ 平衡常數



▲圖 3、研究架構（本圖由第一作者、第二作者共同製作）

二、 研究原理：

（一）比爾定律及其相關實驗設計原理：

根據比爾-朗伯定律：一束光照射於一吸收介質表面，在通過一定厚度的介質後，由於介質吸收了一部分光能，透射光的強度就要減弱。吸收介質的濃度愈大、介質的厚度愈大，則光強度的減弱愈顯著。

其公式常以 $A = -\log_{10} \frac{I_t}{I_0} = a \cdot b \cdot c$ 表示，其中，A 代表吸光度，b 是光穿過樣品的路徑長度，c 是樣品中吸光物質的濃度，a 則與樣品在特定的波長下的吸光能力有關，稱為消光係數（extinction coefficient or absorptivity）， I_0 為入射光強度， I_t 是透射光強度。

根據此定律，我們設計了兩種實驗以求碘離子溶液之照度與濃度、厚度的關係，實驗之操作變因分別為：不同濃度之碘離子溶液及同一容器中取不同厚度之碘離子溶液。並做出光感測器測出之 log 照度與濃度、厚度之檢量線，而後續實驗數據能以此檢量線為參考基準。

(二) 平衡常數計算：

平衡常數：當可逆化學反應達平衡時，產物的濃度並以係數為指數的乘積與反應物濃度的係數為指數的乘積相除，此比值即為化學平衡常數，簡稱平衡常數，書寫上常記做 K 。若欲求平衡常數，須找出反應物的平衡濃度。



▲式 1、平衡常數計算

(三) 等吸光度點 (isosbestic point)：

等吸光度點(isosbestic point)又稱等吸收點或等吸光點。本實驗中同濃度的 I_2 及 I_3^- 在波長為 464.3 nm 時有相同的吸光度，則該處為 I_2 、 I_3^- 的等吸光度點。因此在 $I_2 + I_3^-$ 總濃度相同的情況下，不論 I_2 、 I_3^- 的比值為何，以光譜儀量測得的吸收曲線會在 464.3 nm 產生交點。

(四) 碘即其相關反應：

1. 碘：

20 °C時，碘在水中的溶解度為 0.03 g/100 g。在水中與碘化鉀反應後會產生三碘陰離子及其他多碘離子，藉此使碘在水中的溶解度增加，兩者生成電荷轉移錯合物，水溶液為棕色。非極性溶劑則可以溶解更多的碘，其溶液則呈現紫色，也就是碘原本的顏色。

2. 三碘陰離子：

三碘陰離子在低濃度溶液中顯黃色，而在高濃度時為棕色。當碘與澱粉反應產生三碘陰離子後會呈藍黑色。

3. 碘與碘離子形成三碘陰離子：

$I_2 + I^- \rightarrow I_3^-$ 此反應為吸熱錯合反應，平衡常數 K 為 706。

三、 研究流程：

➤ 前置準備：配置溶液

1. 配置不同濃度 KI 溶液 250 mL：

- (1) 配置 0.005 M KI：取 0.2075 g KI 溶於 250 mL 蒸餾水中。
- (2) 配置 0.01 M KI：取 0.415 g KI 溶於 250 mL 蒸餾水中。
- (3) 配置 0.02 M KI 溶液：取 0.83 g KI 溶於 250 mL 蒸餾水中。
- (4) 配置 0.1 M KI 溶液：取 4.15 g KI 溶於 250 mL 蒸餾水中。
- (5) 配置 0.5 M KI 溶液：取 20.75 g KI 溶於 250 mL 蒸餾水中。
- (6) 配置 5 M KI 溶液：取 83 g KI 溶於 100 mL 蒸餾水中。

2. 配置不同碘化鉀濃度稀釋的甲乙丙丁戊己溶液：

(1) 以 0.5 M KI 稀釋：

- a. 配置 0.5^M 甲溶液：取 0.127 g 碘與 4.15 g 碘化鉀溶於 50 mL 蒸餾水中，此溶液的 $[I_2 + I_3^-] \approx 0.01$ M，以超音波振盪 1 min 使碘晶體全溶。
- b. 配置 0.5^M 乙溶液：取 0.5^M 甲 20 ml 以 0.5M KI 溶液稀釋至 50 mL， $[I_2 + I_3^-] \approx 0.004$ M。
- c. 配置 0.5^M 丙溶液：取 0.5^M 乙 20 ml 以 0.5 M KI 溶液稀釋至 50 mL， $[I_2 + I_3^-] \approx 0.0016$ M。
- d. 配置 0.5^M 丁溶液：取 0.5^M 丙 20 ml 以 0.5 M KI 溶液稀釋至 50 mL， $[I_2 + I_3^-] \approx 0.00064$ M。
- e. 配置 0.5^M 戊溶液：取 0.5^M 丁 20 ml 以 0.5 M KI 溶液稀釋至 50 mL， $[I_2 + I_3^-] \approx 2.56 \times 10^{-4}$ M。

(2) 以 0.1 M KI 稀釋：

- a. 配置 0.1^M 甲溶液：取 0.102 g 碘晶體和 1.66 g KI 定量至 100 mL，以超音波振盪 1 min 使碘晶體全溶，溶液中 $[I_2 + I_3^-] \approx 0.004$ M。
- b. 配置 0.1^M 乙溶液：取 0.1^M 甲 40 mL 以 0.1M KI 稀釋至 80 mL。
- c. 配置 0.1^M 丙溶液：取 0.1^M 乙 40 mL 以 0.1 M KI 稀釋至 80 mL。
- d. 配置 0.1^M 丁溶液：取 0.1^M 丙 40 mL 以 0.1 M KI 稀釋至 80 mL。
- e. 配置 0.1^M 戊溶液：取 0.1^M 丁 40 mL 以 0.1 M KI 稀釋至 80 mL。

- f. 配置 $0.1M$ 己溶液：取 $0.1M$ 戊 40 mL 以 0.1 M KI 稀釋至 80 mL 。
3. 配置 ABCD 溶液 250ml ：碘過量碘化鉀濃度不同的溶液。
- (1) 配置 A 溶液：加過量碘於 250 mL 蒸餾水中，置於超音波振盪一小時，確認溶液顏色不再改變該溶液為飽和碘溶液，過濾殘留碘備用。
- (2) 配置 B 溶液：加過量碘於 $250\text{ mL } 0.005\text{ M}$ 碘化鉀飽和溶液，置於超音波振盪一小時，確認溶液顏色不再改變該溶液為飽和碘溶液，過濾殘留碘備用。
- (3) 配置 C 溶液：加過量碘於 $250\text{ mL } 0.01\text{ M}$ 碘化鉀溶液中，置於超音波儀振盪一小時，確認溶液顏色不再改變該溶液為飽和碘溶液，過濾殘留碘備用。
- (4) 配置 D 溶液：加過量碘於 $250\text{ mL } 0.02\text{ M}$ 碘化鉀飽和溶液，置於超音波振盪一小時，確認溶液顏色不再改變該溶液為飽和碘溶液，過濾殘留碘備用。
4. 配置純碘溶液並稀釋。
- (1) 配置純碘溶液：取少量碘至蒸餾水中，以超音波振盪十分鐘，過濾備用。
- (2) 稀釋純碘溶液：將過濾後之純碘溶液以蒸餾水稀釋，分別稀釋為三分之二、三分之一、六分之一、十二分之一、二十四分之一倍。

(一) 滴定法：

1. 取適量澱粉溶於 50 mL 熱水中，冷卻備用。
2. 以二個 125 mL 錐形瓶各取 A 溶液 5 mL 後以 $0.002\text{ M Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 溶液滴定，滴定至顏色漸淡呈無色或淡黃色時，加入 3 滴澱粉液使呈藍色，再繼續滴定至無色，紀錄 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 用量，計算 A 溶液的 $I_2 + I_3^-$ 濃度。
3. 重覆步驟 2，滴定 B、C、D 溶液各 2 次，紀錄用量並計算 B、C、D 溶液的濃度。
4. 計算 $I_2 + I^- \rightarrow I_3^-$ 的平衡常數。

(二) 光譜法：

1. 找出等吸收點：比色槽中加入飽和碘溶液 3 mL 逐次加入 2 μ L 的 1 M 碘化鉀溶液，依次在每次加入後放入以 MV-VIS 光譜儀測量其吸光度，將每一次光譜疊加作圖。觀察圖形交叉重疊點，即碘及碘化鉀的等吸光度點。
2. 碘及碘化鉀離子總濃度對吸收度的檢量線： 0.5^M 甲 $\sim 0.5^M$ 戊溶液 3 mL 測光譜，取各溶液等吸光度點數據，做出碘及碘化鉀離子總濃度對等吸光度點吸光度的檢量線。
3. 計算 $I_2 + I^- \rightarrow I_3^-$ 的平衡常數：在比色槽中分別加入 A、B、C、D 溶液 3 mL 分別測其光譜。從數據中擷取各等吸光度點之數據，利用步驟 2 所做出之檢量線換算濃度並算出 $I_2 + I^- \rightarrow I_3^-$ 的平衡常數。

(三) 手機光測法 1.0 (0.5 M KI)：

1. 架設實驗裝置如圖：以 android 手機或平板下載 phyphox app，打開 phyphox 程式的光感測器，先以直尺尋找光感測器位置（遮住後照度可下降至接近 0 處），打開燈箱，放上 50 mL 燒杯置於光感測器上，讀取數值並紀錄。（每次開始做實驗前皆需以此數據進行校準）。
2. 以 50 mL 燒杯，裝入 10 mL、20 mL、30 mL、40 mL 0.5^M 甲溶液，置於光感測器上，讀取照度值並紀錄。
3. 以相同裝置分別量測 10 mL、20 mL、30 mL、40 mL 0.5^M 乙、 0.5^M 丙、 0.5^M 丁、 0.5^M 戊溶液的照度值，在 excel 上畫出體積 - log 照度及濃度 - log 照度的檢量線。
4. 以 50 mL 燒杯取 A 溶液 10 mL，加入 KI 0.83 g 後，置於光感測器上，測量其照度。
5. 以 50 mL 燒杯分別裝入 B 溶液 10 mL、C 溶液 10 mL、D 溶液 10 mL 置於光感測器上，測量其照度，再代入檢量線（圖 14）換算出濃度（表 6）。
6. 取 A 溶液加入 KI 0.83 g 10 mL、稀釋 3 倍的 B 溶液 10 mL、稀釋 3 倍的 C 溶液 10 mL、稀釋 3 倍的 D 溶液 10 mL 置於光感測器上，分別測量照度，代入檢量線（圖 14）換算出濃度（表 7）。

(四) 手機光測法 2.0 (0.1 M KI) :

1. 重覆光測法 1.0 步驟 1~4，將待測液改為 0.1M 甲、0.1M 乙、0.1M 丙、0.1M 丁、0.1M 戊、0.1M 己溶液，紀錄照度值並在 excel 上畫出體積 - log 照度及濃度 - log 照度的檢量線 (圖 21)。
2. 取 A 溶液 10 mL、稀釋 3 倍的 B 溶液 10 mL、稀釋 3 倍的 C 溶液 10 mL、稀釋 3 倍的 D 溶液 10 mL 置於光感測器上，分別測量照度，再代入檢量線 (圖 22) 換算出濃度 (表 12)。

(五) 手機光測法 2.2 (0.1 M KI；光源改成藍光) :

1. 在燈箱上覆蓋藍色玻璃紙，製造出藍色光源
2. 重覆光測法 1.0 步驟 1~4，將待測液改為 0.1M 甲、0.1M 乙、0.1M 丙、0.1M 丁、0.1M 戊、0.1M 己溶液，紀錄照度值並在 excel 上畫出體積 - log 照度及濃度 - log 照度的檢量線。
3. 取 A 溶液 10 mL 加入 200ul KI、稀釋 3 倍的 B 溶液 10 mL 加入 190ul KI、稀釋 3 倍的 C 溶液 10 mL 加入 180ul KI、稀釋 3 倍的 D 溶液 10 mL 加入 160ul KI、稀釋 5 倍的 D 溶液 10 mL 加入 160ul KI 置於光感測器上，分別測量照度，再代入檢量線換算出濃度。

伍、研究結果及討論

一、滴定法：

溶液		A	B	C	D
取樣體積(mL)		3	3	3	2
Na ₂ S ₂ O ₃ 濃度(M)		0.002018	0.002018	0.002018	0.002018
Na ₂ S ₂ O ₃ 用量	第一次體積(mL)	4.02	10.84	17.35	21.38
	第二次體積(mL)	3.70	11.20	18.30	22.40
	平均使用體積(mL)	3.86	11.02	17.825	21.89
[I ₃ ⁻ + I ₂] (M)		0.001299	0.003708	0.005997	0.01105
平衡 [I ₂] (M)		0.001299	0.001299	0.001299	0.001299
平衡 [I ₃ ⁻] (M)		—	0.002409	0.004699	0.009749
初始 [I ⁻] (M)		—	0.005	0.01	0.02
[I ⁻] (M)		—	0.002591	0.005301	0.010251
K		—	715.7482	682.3992	732.1241

▲表 1、滴定法實驗數據 (23.8°C)

(一) 研究結果：

- 依反應式為 $I_3^- (aq) + 2 S_2O_3^{2-} (aq) \rightarrow S_4O_6^{2-} (aq) + 3 I^- (aq)$ (或 $I_2 (s) + 2 S_2O_3^{2-} (aq) \rightarrow S_4O_6^{2-} (aq) + 2 I^- (aq)$)，可知溶液 ABCD 中 I_3^- 和 I_2 皆可被硫代硫酸鈉還原成 I^- ，我們將實驗測得數據帶入公式中可得 I_3^- 和 I_2 濃度和。(式 2)

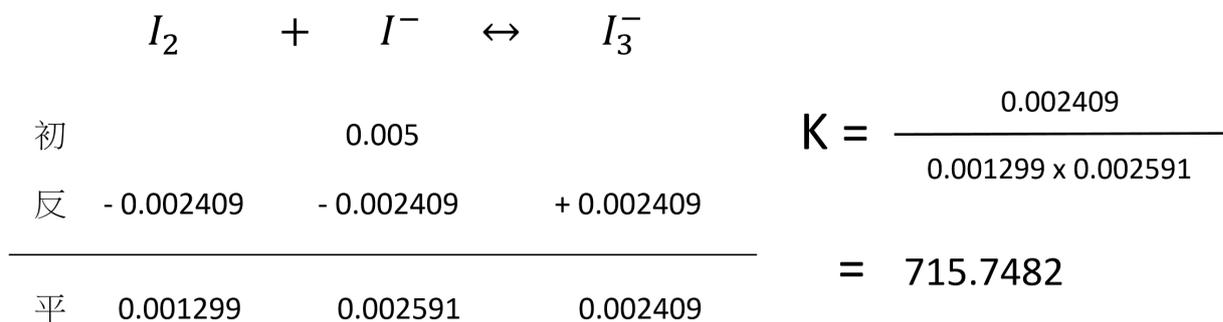
$$V_{Na_2S_2O_3} \times [Na_2S_2O_3] = 2 \times V_{I_2+I_3^-} \times [I_2 + I_3^-]$$

($V_{Na_2S_2O_3}$: $Na_2S_2O_3$ 滴定用量(mL) ; $V_{I_2+I_3^-}$: 溶液取樣體積)

▲式 2、 I_3^- 、 I_2 濃度和(M) 計算公式

- A 溶液為純碘的飽和水溶液，溶液中不會有 I_3^- 的存在，經滴定求得碘在水中飽和濃度為 0.001299 M。
- B、C、D 三溶液是將過量碘固體溶於不同濃度的碘化鉀溶液達平衡後，再過濾而得。故在三個溶液中，方程式 $I_2(s)$ 、 $I_2(aq)$ 達平衡狀態，故 $[I_2(aq)]$ 為定值，將溶

液所測得的濃度和扣除純碘在水中平衡濃度 $[I_{2(aq)}]$ 後，即可得 B、C、D 三溶液之濃度。透過計量化學的計算出 I^- 濃度後，由平衡常數公式 $K = \frac{[I_3^-]}{[I_2][I^-]}$ 可得到 B、C、D 溶液之平衡常數。（見圖 4、圖 5）



▲圖 4、溶液 B 的 I^- 濃度計算
（本圖由第一作者製作）

▲圖 5、平衡常數計算
（本圖由第一作者製作）

4. 溶液 C、D 以此算法類推。
5. B、C、D 三溶液得到的平衡常數平均可得三碘陰離子生成反應 $I_2 + I^- \rightarrow I_3^-$ 的平衡常數為 710.0905（23.8 °C）。

（二）問題討論：

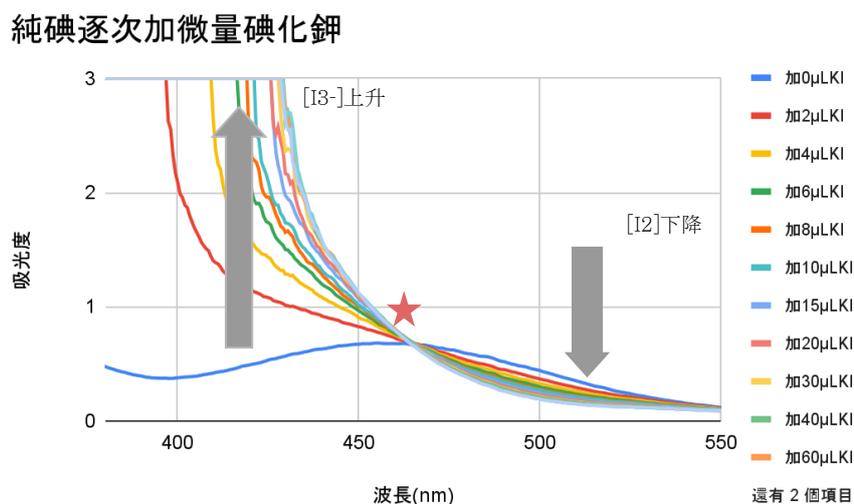
1. 接近滴定終點時溶液的顏色會變為淡黃色接近無色，難以判斷是否以滴定結束，因此當顏色接近透明時可滴入少量澱粉液，使其顏色變為較好利用肉眼判別的淺藍色再滴定至無色即為當量點。
2. 為了檢驗溫度是否會影響平衡濃度及平衡常數，我們進行了多次滴定實驗（表 2），結果為高溫時碘的飽和碘溶液濃度較高，反之較低。

實驗	低溫	高溫
溫度(°C)	23.8	25.5
A 溶液 $[I_2]$ (M)	0.001082	0.001208

▲表 2、溫度與 A 溶液 $[I_2]$ 關係

二、光譜法：

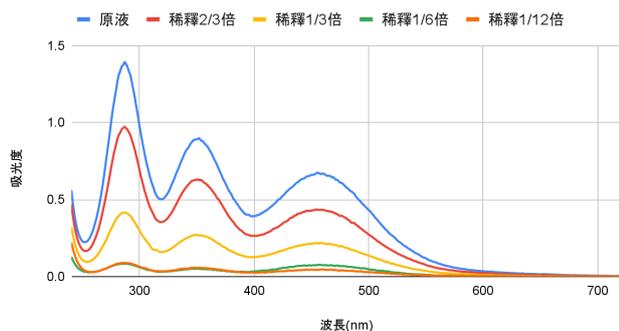
(一) 研究結果：



▲圖 6、 I_2 、 I_3^- 的等吸光度點（本圖由第一作者製作）

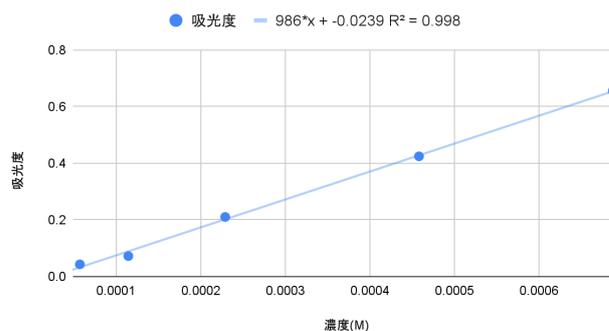
1. 以硫代硫酸鈉滴定純碘溶液測得 $[I_2(aq)]$ 濃度為 0.00687 M。
2. 將純碘溶液逐次加入少量 KI 溶液並量測其光譜，由圖 6 對照數據可知等吸收點的位置在波長 464.3 nm 處。
3. 量測純碘及其稀釋溶液的吸收光譜，繪製其吸光度曲線及 464.3 nm 處的檢量線。因同濃度 $I_2 + I_3^-$ 在等吸收點的吸收值相同，故可利用此點的吸收度換算出 I_2 與 I_3^- 的濃度和。運用等吸收點總濃度不變吸光度不變的性質可作得濃度與吸光度之檢量線圖（圖 8）。

稀釋純碘溶液



▲圖 7、不同濃度碘溶液吸收光譜
(本圖由第一作者製作)

吸光度與濃度檢量線



▲圖 8、等吸光點的吸光度與濃度檢量線圖
(本圖由第一作者製作)

波長 464.3 nm	A 原液	稀釋 10 倍的 B	稀釋 10 倍的 C	稀釋 10 倍的 D
吸收度	1.067589236	0.286257622	0.5067789326	0.9360137227
換算 $[I_2+I_3^-]$ (M)	0.001106	0.003144	0.005380	0.009731
起始 $[KI]$ (M)	0	0.005	0.01	0.02
平衡 $[I_3^-]$ (M)	-	0.002038	0.001106	0.002962
平衡 $[I_2]$ (M)	-	0.004273	0.001106	0.005727
平衡 $[I^-]$ (M)	-	0.008625	0.001106	0.01138
K	-	621.6831	674.3734	685.2094

4. 利用檢量線，可算出本實驗之平衡常數：

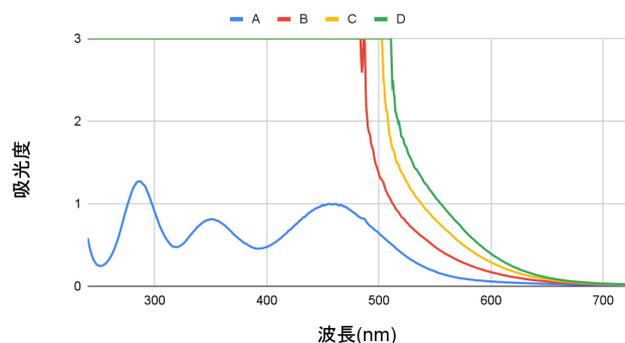
▲表 3、光譜法平衡常數計算 (23.8°C)

- (1) 從光譜所得數據中挑出波長 464.3 nm 時各溶液的吸光度。
- (2) 將 464.3 nm 吸光度代入檢量線 (圖 8) 方程式得 $I_2+I_3^-$ 濃度等於：
(吸光度+0.0239) ÷ 986.44。
- (3) 因量測的是 B、C、D 的稀釋溶液，需將 $I_2 + I_3^-$ 濃度乘 10 倍，得 B、C、D 溶液裡的 $I_2 + I_3^-$ 濃度和。

(4) 依照實驗一滴定法之計算推算平衡常數。

5. 所求所有平衡常數平均值為 660.4220 (23.8°C)。

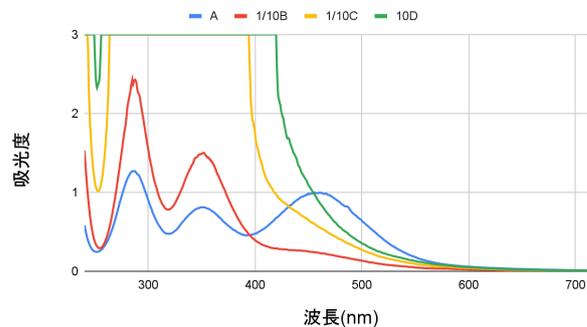
A、B、C和D的光譜



▲圖 9、溶液 A、B、C、D 溶液之光譜

(本圖由第一作者製作)

A、1/10B、1/10C、1/10D的光譜



▲圖 10、A 與稀釋 10 倍之 B、C、D 溶液光

譜 (本圖由第一作者製作)

(二) 問題討論：

1. 觀察光譜所得資料，由於該光譜儀的吸光度偵測上限為 3，B、C、D 的等吸收點波長 464.3 nm 處由於顏色過深因而無法偵測，因此在實驗二求平衡常數時，我們將 BCD 溶液分別稀釋 10 倍後再次量測其光譜以獲得更準確的數據。
2. 光譜儀偵測極限大致與肉眼可辨別出的相同，因此當肉眼觀察不出溶液顏色時，光譜儀的吸光值也會接近零。我們觀察到當純碘溶液稀釋成 1/12 倍時肉眼觀察幾乎為無色，此時碘的濃度為 $5.725 \times 10^{-5} \text{M}$ ，且在 464.3 nm 的吸光值為 0.04312706754，可推測光譜法可量測碘溶液的最低濃度約為 $5 \times 10^{-5} \text{M}$ 。
3. UV-VIS 光譜分析法，光譜儀的偵測約在吸光度 0.05~1 間有較高的準確度，依檢量線 (圖 8) 可知光譜法適用測量與的濃度和範圍約為 $1 \times 10^{-3} \text{M} \sim 5 \times 10^{-5} \text{M}$ 。
4. 量測 A、B、C、D 溶液的光譜發現 A 溶液的吸光值略小於 1，但 B、C、D 超過偵測極限，至少需稀釋 8 倍才可讓 D 溶液的吸光值小於 1。

三、手機光測法 1.0 (0.5 M KI) :

(一) 研究結果：

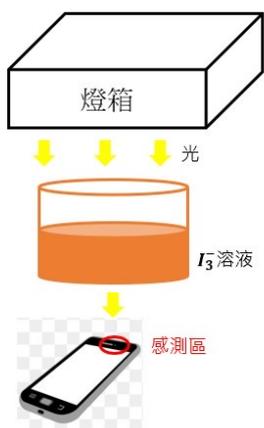
I ₂ +I ₃ -濃度(M)		10ml	20ml	30ml	40ml
甲	0.01	824	658	588	531
乙	0.004	1085	916	820	754
丙	0.0016	1493	1245	1171	1103
丁	0.00064	1812	1700	1605	1529
戊	0.000256	1942	1965	1916	1895

▲表 4、甲~戊、溶液之照度 (23.8°C)

溶液	A 加 0.83gKI	B	C	D
照度	1750	1167	986	874
溶液		1/3B	1/3C	1/3D
照度		1632	1409	1156

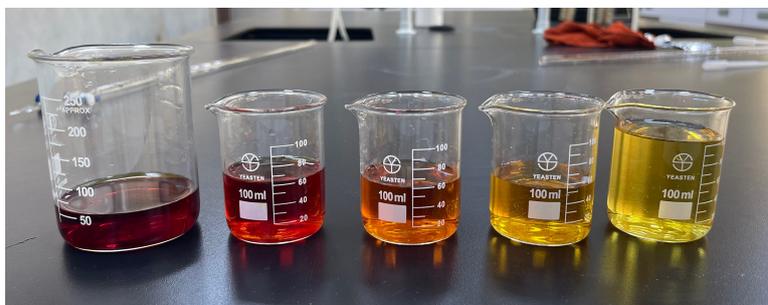
▲表 5、A 加 0.83KI、BCD、1/3BCD 溶液乙之照度 (23.8°C)

(二) 討論：



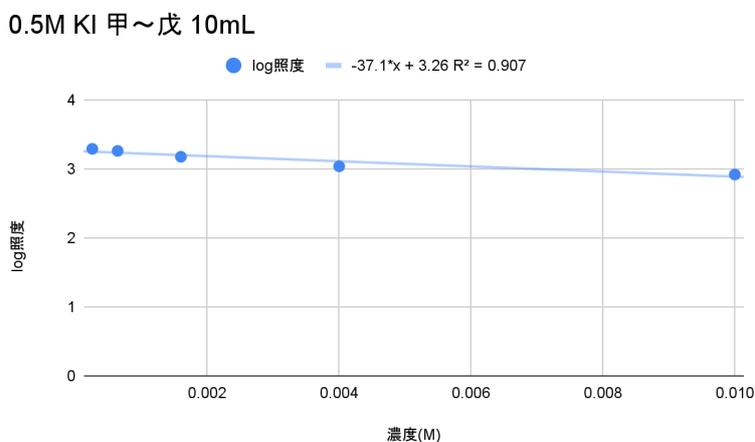
▲圖 11、光測法裝置圖 (本圖由指導老師製作)

1. 以手機光感測器裝置測量溶液照度時，因手機光感測區範圍小，約只有 1 cm^2 ，且手機表面平整，可平穩的放置透明玻璃容器，因此我們以 50 mL 乾淨燒杯做為測量容器，不需消耗太多藥品就可進行測量。



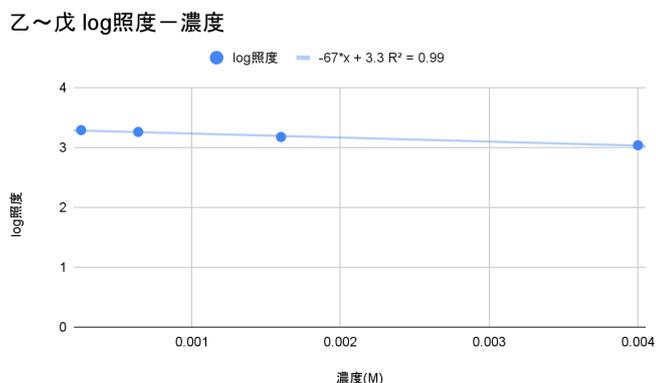
▲圖 12、0.5M 甲、0.5M 乙、0.5M 丙、0.5M 丁、0.5M 戊溶液（本照片由第二作者拍攝）

2. 根據 $I_2 + I^- \rightarrow I_3^-$ 反應式，以過量 KI 和定量 I_2 反應時，可假設 I_2 完全向右反應時形成 I_3^- ，且在溶液中呈現棕色。以 0.5M 甲來說明，0.5M 甲是以 $0.0005\text{ mol } I_3^-$ 溶於 $0.5\text{ M } 50\text{ mL KI}$ 溶液，因假設反應全部向右，所以可將此溶液視為 $0.01\text{ M } I_3^-$ 溶液，則當以 0.5 M KI 稀釋形成 0.5M 乙~0.5M 戊溶液，隨著稀釋倍數越大，溶液會漸漸從棕色變成亮黃色（圖 12），測量到的照度也漸大，根據比爾定律公式，可以利用 I_3^- 濃度與 \log 照度的關係來製作檢量線（圖 13）。

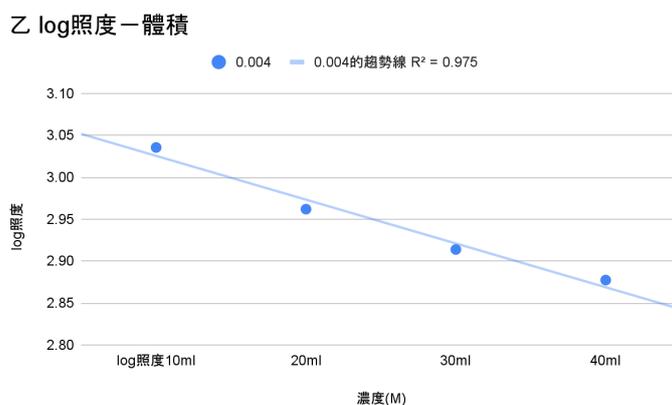


▲圖 13、10 mL 0.5M 甲~0.5M 戊碘離子溶液之 \log 照度－濃度檢量線
（本圖由第二作者製作）

3. 由 10 mL 不同濃度溶液與照度關係圖（圖 13）中，所描繪出之檢量線相關係數只有 0.907，根據文獻資料，使比爾定律無法成立的原因有許多，其中一項為溶液濃度過高引起偏離，所以我們將甲溶液([甲]=0.01M)數值去除，重做一次檢量線，如圖 14，相關係數提高到 0.99，因此後續實驗也會降低使用的溶液濃度，來避免計算上的偏差。



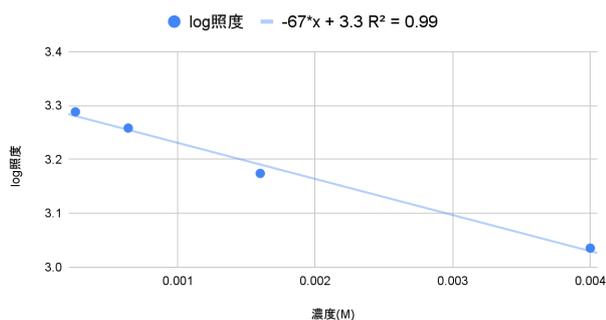
▲圖 14、10 mL $0.5M$ 乙~ $0.5M$ 戊溶液 log 照度－濃度檢量線（本圖由第二作者製作）



▲圖 15、10 mL $0.5M$ 乙~ $0.5M$ 戊溶液 log 照度－濃度檢量線（本圖由第二作者製作）

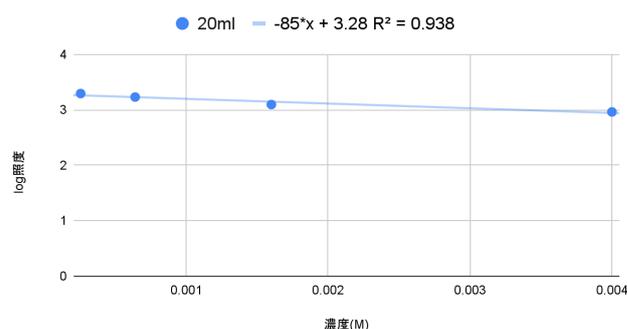
4. 由圖 15 ($0.5M$ 乙溶液取不同體積) 中可知厚度 (溶液體積) 與照度所繪出之檢量線相關係數為 0.975，可將燒杯視為完美的圓柱體容器，溶液高度與體積呈正比，溶液體積愈大，則光經過溶液的路徑愈長，吸收掉的光的愈多，log 照度愈小符合比爾定律。

0.5MKI 乙~戊 log照度-10mL



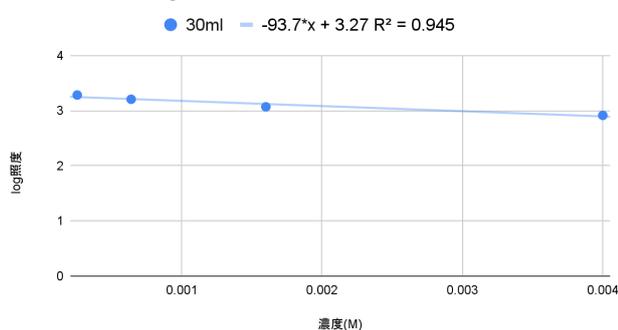
▲圖 16、10 mL $0.5M$ 丙、 $0.1^{0.5M}$ 甲、 $0.5M$ 丁、 $0.1^{0.5M}$ 乙、 $0.5M$ 戊碘離子溶液濃度與照度檢量線
(本圖由第二作者製作)

0.5MKI 乙~戊 log照度-20mL



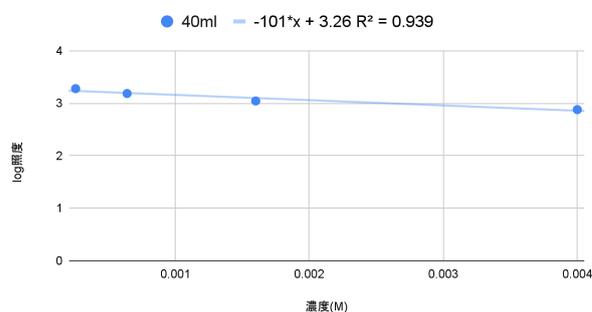
▲圖 17、20 mL $0.5M$ 丙、 $0.1^{0.5M}$ 甲、 $0.5M$ 丁、 $0.1^{0.5M}$ 乙、 $0.5M$ 戊碘離子溶液濃度與照度檢量線
(本圖由第二作者製作)

0.5MKI 乙~戊 log照度-30mL



▲圖 18、30 mL $0.5M$ 丙、 $0.1^{0.5M}$ 甲、 $0.5M$ 丁、 $0.1^{0.5M}$ 乙、 $0.5M$ 戊碘離子溶液濃度與照度檢量線
(本圖由第二作者製作)

0.5MKI 乙~戊 log照度-40mL



▲圖 19、40 mL $0.5M$ 丙、 $0.1^{0.5M}$ 甲、 $0.5M$ 丁、 $0.1^{0.5M}$ 乙、 $0.5M$ 戊碘離子溶液濃度與照度檢量線
(本圖由第二作者製作)

5. 比較取不同體積的乙~戊檢量線(圖 16~圖 19) 10mL 製成的檢量線相關係數為 0.99, 且隨溶液體積增加得到的檢量線相關係數降低, 之後測量照度皆取樣 10 mL 來測量, 提高換算成濃度的準確性。

	A 加 0.83gKI	B	C	D
照度	1750	1167	986	874
log 照度	3.24304	3.06707	2.99388	2.94151
I ₂ +I ₃ -濃度	0.00085	0.00348	0.00457	0.00535
初始 KI		0.00500	0.01000	0.02000
平衡 I ₃ -		0.00263	0.00372	0.00450
平衡 I ₂		0.00085	0.00085	0.00085
平衡 KI		0.00237	0.00628	0.01550
K		1301.47229	696.39301	341.52321

▲表 6、A 加 0.83g KI、B、C、D 照度換算濃度並計算平衡常數

6. 以手機光測法求 $I_2 + I^- \rightarrow I_3^-$ 的平衡常數的計算方式

(1) 以表 6 為例，將 A、B、C、D 溶液 10 mL 分別測量照度後代入圖 16 檢量線。

(2) A log 照度為 3.243038049，代入圖 16 檢量線 $y = -67x + 3.3$ 。

(3) A 平衡 $I_3^- + I_2$ 濃度 = 0.0008501783778 M，因溶液 A 反應時沒有加 KI，所以溶液中沒有 I_3^- ，換算出的濃度即為 I_2 在水中的飽和濃度。

(4) B log 照度 3.067070856 代入圖 16 檢量線計算得
平衡 $[I_3^- + I_2] = 0.003476554387$ M。

(5) 平衡 I_3^- 濃度 = $I_3^- + I_2$ 濃度 - I_2 濃度，計算得 0.00206921689 M。

(6) 平衡 KI 濃度 = B 溶液 KI 初濃度 - 平衡 I_3^- 濃度，B 溶液 KI 濃度為 0.005 M，則平衡 KI 濃度 = 0.002930783101 M。

(7) 根據反應式平衡常數 $K = \frac{[I_3^-]}{[I_2] \cdot [I^-]}$ ，將數據代入得 $K = 830.447692$ 。

(8) C、D 溶液求反應平衡常數算法以此類推。

7. 初代光測法 1.0 以 0.5 M KI 為標準，但因 A 溶液中原本無 KI，所以我們將 A 加 0.83 g KI 使其 KI 濃度達 0.5 M KI，測量 ABCD 溶液照度後代入 $^{0.5M}$ 乙 ~ $^{0.5M}$ 戊 溶液製成的檢量線（圖 16），以上述計算方式將照度換算成濃度並計算平衡常數後，結果為表 6，求出的平衡常數範圍在 288 ~ 830。

8. 如表 7，C、D 溶液與滴定誤差值分別為-27%和-36%，表示光測法求出的濃度小於滴定法，和前述甲溶液原因相同，0.5M KI 濃度太大，使濃度偏差較大，所以我們改以 0.1M KI 來實驗，降低溶液濃度過高對計算的影響。

	B	C	D
光測法濃度(M)	0.003476554387	0.00456900127	0.005350575632
滴定濃度(M)	0.003235	0.00634	0.00844
誤差百分比(%)	7.466905329	-27.93373392	-36.60455412

▲表 7、光測法濃度與滴定濃度誤差百分比

四、手機光測法 2.0 (0.1 M KI)：

(一) 研究結果：

I2+I3-濃度(M)	10mL	20mL	30mL	40mL	
甲	0.004	1121	954	849	780
乙	0.002	1458	1210	1107	1040
丙	0.001	1710	1535	1389	1264
丁	0.0005	1861	1805	1697	1625
戊	0.00025	2005	2003	1970	1954
己	0.000125	2030	2084	2095	2101

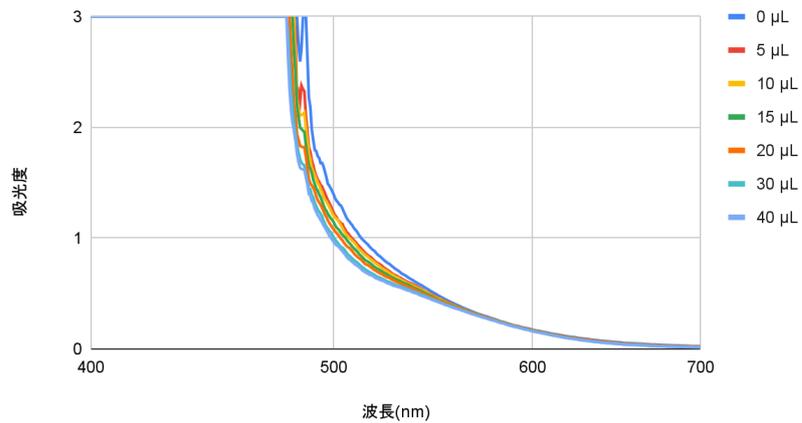
▲表 8、0.1M 甲、0.1M 乙、0.1M 丙、0.1M 丁、0.1M 戊、0.1M 己溶液照度 (23.8°C)

溶液	A 加 0.166gKI	1/3B	1/3C	1/3D
照度(lux)	1685	1632	1409	1156

▲表 9、A 加 0.166g KI、1/3BCD 溶液照度 (23.8°C)

(二) 討論：

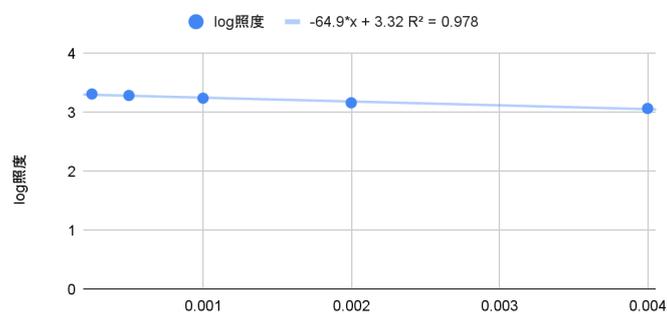
溶液B逐次加入少量碘化鉀



▲圖 20、溶液 B 逐次加入少量碘化鉀（本圖由第一作者製作）

1. 碘在加入碘化鉀後，在 400 nm~450 nm 的吸收會急劇增大（圖 6），在初代手機光測法中，我們認為碘化鉀過量（0.5 M）不會影響實驗結果，但在實驗的過程中的嘗試，發現了在 B 溶液(含有 0.005 M KI 溶液)再加入更多的 KI 溶液時，溶液顏色會變亮，光譜圖形左移（圖 20），故推測過量的碘化鉀反而使照度變大，推算出來的濃度不準，故決定將測量照度的碘化鉀濃度降為 0.1 M。

0.1M 甲~戊 log照度—濃度



▲圖 21、10 mL^{0.1M} 甲~^{0.1M} 戊溶液之濃度與照度檢量線（本圖由第二作者製作）

2. 圖 21 為 ^{0.1M} 甲~^{0.1M} 戊溶液之濃度與照度檢量線，相關係數為 0.978。

白光	A 10ml	1/3B 10ml	1/3C 10ml	1/3D 10ml
照度	1846	1829	1650	1386
log 照度	3.26623	3.26221	3.21748	3.14176
I2+I3-濃度	0.00083	0.00267	0.00474	0.00824
初始 KI		0.00500	0.01000	0.02000
平衡 I3-		0.00184	0.00391	0.00741
平衡 I2		0.00083	0.00083	0.00083
平衡 KI		0.00316	0.00609	0.01259
K		704.45526	775.06203	710.49036

▲表 10、0.1M KI A、1/3BCD 溶液濃度代入計算平衡常數

3. 以 0.1M KI 實驗，可得表 14 數據，其中 BCD 溶液求得之平衡常數為 704~775，所以證實比爾定律會受到溶液濃度影響，若調低實驗濃度，即可得高精確值、高準確值和再現性之平衡常數。

	A 10ml	1/3B 10ml	1/3C 10ml	1/3D 10ml
藍光光測法濃度	0.001226664203	0.003977336108	0.005888033565	0.008751991384
滴定濃度	0.001208	0.003512	0.00567	0.009
誤差百分比(%)	1.545049895	13.24988917	3.845389147	-2.755651285

▲表 11、藍光光測濃度與滴定濃度比較

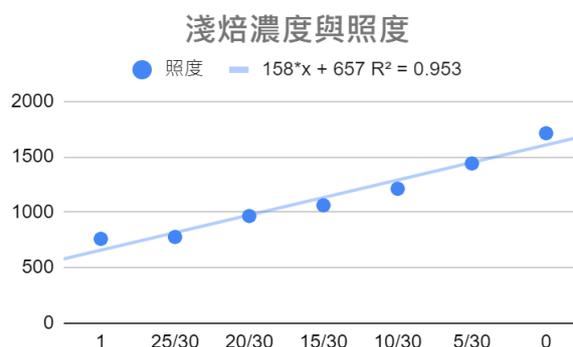
4. 圖 6 提到 400 nm~450 nm 的吸收會急劇增大，而藍光的波長就界在這個範圍中，因此設計以藍色玻璃紙罩住燈箱作為照射光源，製作檢量線並測量 A 溶液照度後與滴定濃度比較計算誤差百分比，表 11 中得使用藍光時可使 ACD 溶液的濃度誤差可降低。（藍光組實驗尚未完成）

陸、結論

本實驗所嘗試的三種測量平衡常數方法皆為能測量出準確數據的方法。滴定法使用硫代硫酸鈉還原碘分子及三碘陰離子，可求出平衡常數為 753，但操作步驟較繁雜，需要耗費較多時間；光譜法利用等吸收點的特性可求得平衡常數，光譜法的平衡常數為 609。

最優化條件的光測法所求得平衡常數約在 704~775，具有高精確度、高準確度及再現性高的特性，雖會受環境光、溫度等因素影響而變動，但相較於滴定法較為便捷且較節省藥品的使用（如：硫代硫酸根）然而光譜儀並非一個隨處可得的機器，因此最容易在大部分高中課堂及實驗中運用的是手機光測法，可將科學實驗帶進日常生活，不一定要在實驗室，使用光譜儀等高端儀器才能測量溶液濃度，phyphox 是 android 系統上的免費 app，不須任何花費，便能輕鬆的測量濃度，是一個可推廣的實驗方式，希望能藉此增加實驗效率。

手機光測法是未來可推廣至在家中、辦公室中測量溶液濃度的便捷方法，如煮中藥時，只要簡單的乾淨透明杯及手機 app 即可量測出中藥的大概濃度，幫助煎煮中藥。抑或是烹煮咖啡時，可以使用本實驗方法輕鬆量出咖啡濃度，調配出黃金比例的咖啡。



▲圖 22、23、光照法實驗日常運用-咖啡

照度與濃度（本照片由第二作者拍攝；本圖由第二作者製作）

捌、參考資料及其他

一、張煥宗,李弘文,簡敦誠等... (2020). 選修化學 II (全) 物質構造與反應速率 (No. 9789865190033). 龍騰文化.

二、Pavia, D. L., Lampman, G. M., & Kriz, G. S. (n.d.). INTRODUCTION TO SPECTROSCOPY (No. 0-03-031961-7; third edition). Brooks/Cole.

三、Equilibrium Constant - Formula, Applications, Relationships. (n.d.). BYJU'S.
https://www.google.com/search?q=Equilibrium+constant.&oq=Equilibrium+constant.&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUyBggAEEUYOTIGCAEQABgeMgYIAhAAGB4yBggDEAAyHjIGCAQ QABgeMgYIBRAAGB4yBggGEAAyHjIGCAcQABgeMgYICBAAGB4yBggJEAAyHtIB BzcwNGowajSoAgCwAgA&sourceid=chrome&ie=UTF-8

四、What Is an Isosbestic Point? (n.d.). Chemicool.
https://www.chemicool.com/definition/isosbestic_point.html

五、Iodine. (n.d.). Wikipedia.
<https://en.wikipedia.org/wiki/Iodine>

六、吸收光譜與比爾定律. (n.d.). 東海大學普通大學實驗室. <http://gclab.thu.edu.tw/gen-chem/pdf-gc/Exp07.pdf>

七、Beer-Lambert Law. (n.d.). 國立清華大學.
<https://webmail.life.nthu.edu.tw/~labcjw/BioPhyChem/Spectroscopy/beerslaw.htm>

八、Prasanna, bhat k shrikanth & m s hegde. (2021, May 8). Formation and Structure of Iodine: Water (H₂O-I₂) Charge-Transfer Complex. SpringerLink.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s12039-021-01912-7#citeas>

九、Calculate Equilibrium Constant for $I_2 + I^- \rightleftharpoons I_3^-$. (n.d.). Toppr.
<https://www.toppr.com/ask/question/calculate-equilibrium-constant-for-i2-i-rightleftharpoons-i3at-298-k/>

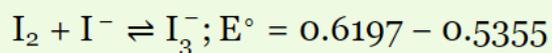
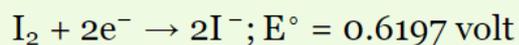
玖、附錄

一、實驗二

溶液		純碘溶液
取樣體積(mL)		5
Na ₂ S ₂ O ₃ 濃度(M)		0.002
Na ₂ S ₂ O ₃ 用量	第一次體積(mL)	3.4
	第二次體積(mL)	3.47
	平均(mL)	3.435
[I ₂ +I ₃ ⁻](M)		0.000687
I ₂ 平衡濃度(M)		0.000687
I ₃ 濃度(M)		0

附表 1、純碘溶液滴定數據 (23.8°C)

二、碘平衡常數



$$= 0.0842 \text{ volt}$$

$$K = \text{antilog} \left[\frac{nE^\circ}{0.0591} \right] = \text{antilog} \left[\frac{2 \times 0.0842}{0.0591} \right] = 706.9.$$

附圖 1、 $I_2 + I^- \rightarrow I_3^-$ 的平衡常數計算 (本圖引自參考資料八「三碘陰離子生成反應平衡常數計算」)

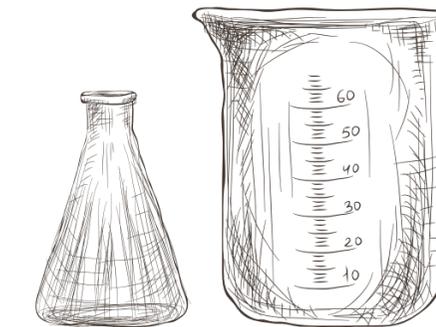
【評語】 050211

本研究工作相較於過去用儀器來測量，此作品使用手機光測法來進行測量，並以硫代硫酸鈉還原碘分子及三碘陰離子的實驗來展示手機光測法的準確性和方便性。對手機光測法推廣有幫助。下列一點建議：因為 I_2 滴定實驗相對被報導較多，比較難突出，應嘗試把所開發之手機光測方法應用到其他實驗上。

作品簡報

「碘精之比」— 以手機光感應器

比色法測量三碘陰離子生成反應的平衡常數



摘要

本研究欲改革高中常見的比色法實驗，以手機光感測器做為主要測量 $I_2 + I^- \rightleftharpoons I_3^-$ 反應的平衡常數工具。共使用三個方法：硫代硫酸鈉滴定法、光譜法以及手機光測法。滴定法以硫代硫酸鈉將 I_3^- 還原成 I^- ，求得平衡常數為710。而光譜法則是將不同濃度的KI溶液代入等吸收點的 $I_2 + I_3^-$ 總濃度與吸光度檢量線，求其平衡常數為660。光測法以手機光感測器測量溶液照度，經檢量線換算 I_3^- 濃度，再計算出平衡常數為704~775，手機光測法的優勢在最佳化感測條件後，可得到高精度、高準確和再現性高之平衡常數，且感測器取得便利、裝置易架設、體積即可測量，期許之後可以改良高中課綱的比色法及實際應用在生活上。

壹、研究動機

在操作比色法實驗時，我們對眼睛能否準確判斷顏色深淺產生疑問。我們結合在專題研究課中，以光譜法、滴定法換算濃度的經驗。但由於光譜儀、實驗桌等並不是民眾易取得的工具，因此我們嘗試使用應用程式Phyphox中的光感測器做為量化顏色及濃度且方便操作的工具。又我們想到化學課碘萃取實驗，固體碘溶於碘化鉀溶液（無色）後變成三碘陰離子（棕色）時會變色的特性，所以我們決定使用光感測器來測量三碘陰離子濃度，進而換算出濃度及平衡常數的方法。

貳、研究目的

鑑於定量分析常使用滴定法，先以滴定測量溶液濃度作為標準。又比色法的原理是溶液吸收可見光程度不同產生不同亮度，故先使用光譜進行分析。再汲取滴定法及光譜法的經驗來操作手機光測法，期許能優化實驗操作及流程，得到精準的實驗結果。

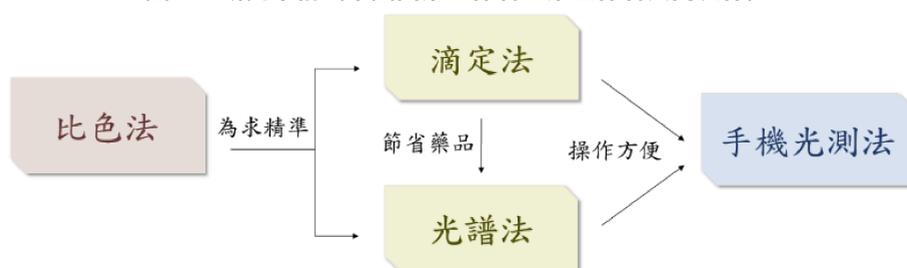
- 一、以滴定法求濃度及平衡常數：準確數據、易判別的實驗結果。
- 二、以光譜法求濃度及平衡常數：精準數據，藥劑節省。
- 三、以手機光測法求濃度及平衡常數：精確數據、藥劑節省、方便操作。

參、研究過程及方法

一、研究架構

圖一、研究架構（本圖由第一作者、第二作者共同製作）

求 $I_2 + I^- \rightleftharpoons I_3^-$ 平衡常數



二、研究原理

(一) 比爾-朗伯定律：

$$A = -\log_{10} \frac{I_t}{I_0} = a \cdot b \cdot c$$

A：吸光度
 I_0 ：為入射光強度
 I_t ：是透射光強度
a：消光係數
b：光穿過樣品的路徑長度
c：樣品中吸光物質的濃度

(二) 平衡常數K計算：



(三) 等吸光度點 (Isosbestic point)

本實驗中同濃度的 I_2 及 I_3^- 在波長為464.3 nm時有相同的吸光度，則該處為 I_2 、 I_3^- 的等吸光度點。因此在 $I_2 + I_3^-$ 濃度相同的情況下，不論 I_2 、 I_3^- 的比值為何，以光譜儀量測得的吸收曲線會在464.3 nm產生交點。

(四) 碘即其相關反應：

1. 碘：在水中與碘化鉀反應後會產生三碘陰離子，水溶液為棕色。與澱粉反應後呈藍黑色。
2. 三碘陰離子：在低濃度溶液中顯黃色，而在高濃度時為棕色。
3. 碘與碘離子形成三碘陰離子： $I_2 + I^- \rightleftharpoons I_3^-$ 此反應為吸熱錯合反應，平衡常數K為706。

三、研究方法

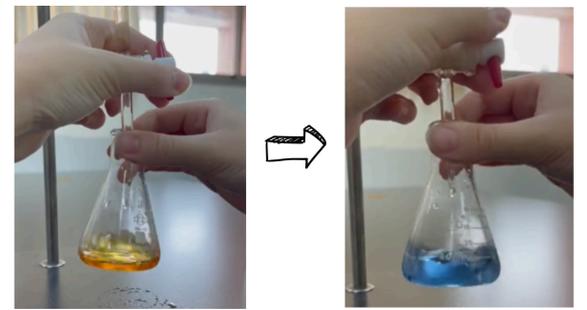
前置實驗：配置溶液

1. 不同濃度碘化鉀溶液：分別為0.005 M、0.01 M、0.02 M、0.1 M、0.5 M、5 M KI溶液
2. 不同碘化鉀濃度稀釋的甲乙丙丁戊己溶液：分別為0.5M、0.1M、0.02M KI稀釋而成
 - 0.5M甲：取0.127 g碘溶於50 ml 0.5 M KI水溶液中，因KI過量，因此此溶液的 $[I_3^- + I_2] \approx 0.01$ M。
 - 0.5M乙 ~ 0.5M戊：取前一順序之溶液稀釋為2/5倍。
 - 0.1M甲：取0.102 g碘溶於100 ml 0.1 M KI水溶液中，因KI過量，因此此溶液的 $[I_3^- + I_2] \approx 0.004$ M。
 - 0.1M乙 ~ 0.1M己：取前一順序之溶液稀釋為2/5倍。
3. 不同碘化鉀溶過量碘溶（簡稱A~D）：過量碘溶於純水、0.005 M、0.01 M、0.02M KI溶液
4. 純碘及其稀釋溶液：取少量碘至蒸餾水中，再分別稀釋為2/3、1/3、1/6、1/12、1/24倍
5. 澱粉液：將澱粉液溶於熱水中並攪拌

三、研究方法

(一) 滴定法：

1. 取A溶液5 mL 後以0.002 M $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 溶液滴定，滴定至顏色漸淡呈淡黃色時，加入3滴澱粉液使溶液呈藍色後，再繼續滴定至無色。
2. 重覆步驟2，再滴定B、C、D溶液各2次，紀錄 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 用量。
3. 計算 $\text{I}_2 + \text{I}^- \rightleftharpoons \text{I}_3^-$ 的平衡常數。



圖二、三滴定溶液圖 (第二作者拍攝)

(二) 光譜法：

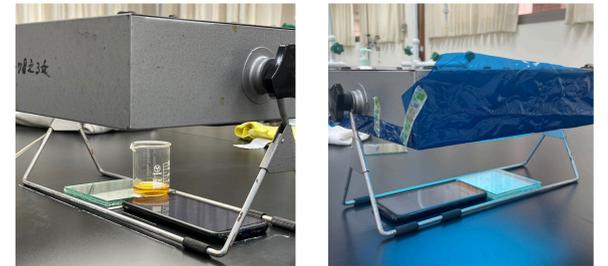
1. 找出等吸收點：飽和碘溶液逐次加少量碘化鉀溶液測其吸光度，將所得光譜疊圖。觀察圖形交叉點，此即碘及碘化鉀的等吸光度點。
2. 總濃度對吸光度檢量線：取 0.5M 甲~ 0.5M 戊 溶液測光譜，取各溶液等吸光度點數據，做 I_2 及 I_3^- 總濃度對等吸光度點吸光度的檢量線。
3. 計算平衡常數：測A、B、C、D溶液光譜。從中取等吸光度點數據利用步驟2所作之檢量線換算濃度並算 $\text{I}_2 + \text{I}^- \rightleftharpoons \text{I}_3^-$ 的平衡常數。



圖四、Phyphox app (第二作者拍攝)

(三) 手機光測法：

1. 架設實驗裝置
2. 將待測液裝入50ml燒杯，置於裝置上測量照度並紀錄數值
3. 測量完甲~戊溶液照度後，畫出濃度-log照度的檢量線。
4. ABCD溶液測量照度後換算成log照度並代入檢量線計算濃度
5. 求得濃度後和滴定法濃度相同之方法計算平衡常數。



圖五六七、光測法裝置圖 (第二作者拍攝；指導老師製作)

肆、實驗結果與討論

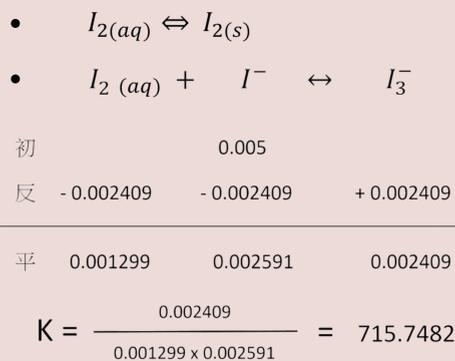
一、滴定法

$$V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \times [\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3] = 2 \times V_{\text{I}_2+\text{I}_3^-} \times [\text{I}_2 + \text{I}_3^-]$$

($V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}$: $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 滴定用量(mL); $V_{\text{I}_2+\text{I}_3^-}$: 溶液取樣體積)

式一、 $\text{I}_3^- + \text{I}_2$ 總濃度計算

依反應式為 $\text{I}_3^- (\text{aq}) + 2 \text{S}_2\text{O}_3^{2-} (\text{aq}) \rightarrow \text{S}_4\text{O}_6^{2-} (\text{aq}) + 3 \text{I}^- (\text{aq})$ 可知溶液A、B、C、D中 I_3^- 和 I_2 皆可被硫代硫酸鈉還原成 I^- ，將實驗測得數據帶入公式可得 $[\text{I}_2 + \text{I}_3^-]$ 。



圖八、平衡常數計算 (第一作者製作)

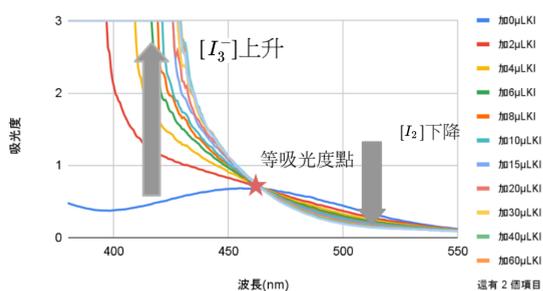
溶液	A	B	C	D	
取樣體積(mL)	5	5	2	2	
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 濃度(M)	0.002018	0.002018	0.002018	0.002018	
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 用量	第一次體積(mL)	4.02	10.84	17.35	21.38
	第二次體積(mL)	3.70	11.20	18.30	22.40
	平均使用體積(mL)	3.86	11.02	17.825	21.89
$[\text{I}_2 + \text{I}_3^-]$ (M)	0.001299	0.003708	0.005997	0.01105	
平衡 $[\text{I}_2]$ (M)	0.001299	0.001299	0.001299	0.001299	
平衡 $[\text{I}_3^-]$ (M)	-	0.002409	0.004699	0.009749	
初始 $[\text{I}^-]$ (M)	0	0.005	0.01	0.02	
$[\text{I}^-]$ (M)	-	0.001397	0.001465	0.001366	
K	-	715.7482	682.3992	732.1241	

表一、滴定法數據

B、C、D $[\text{I}_2]$ 為等值，將溶液所測得 $\text{I}_2 + \text{I}_3^-$ 濃度和扣除碘在水中平衡濃度 (A溶液 $[\text{I}_2 + \text{I}_3^-]$) 得 I_3^- 濃度後，透過計量化學計算出 I^- 濃度，再由平衡常數公式得到B、C、D溶液之平衡常數。(見圖八)

二、光譜法

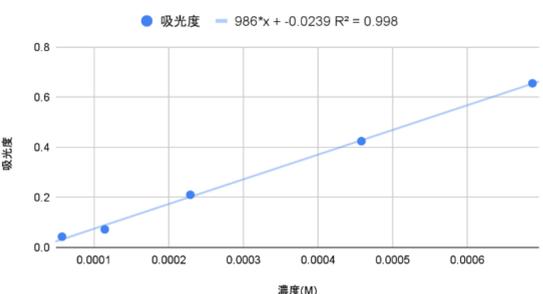
純碘逐次加微量碘化鉀



圖九、等吸光度點圖 (第一作者製作)

將純碘溶液逐次加入少量碘化鉀溶液，並量測其光譜。由圖三對照數據可知等吸收點的位置在波長464.3 nm處。

吸光度與濃度檢量線



圖十、濃度與吸光度檢量線 (第一作者製作)

量測純碘及其稀釋溶液的吸光光譜。因等吸收點如 $\text{I}_2 + \text{I}_3^-$ 總濃度不變，則吸光度亦不變，故可用此點的吸光度作檢量線圖、以換算溶液 $\text{I}_2 + \text{I}_3^-$ 濃度。

溶液	A	稀釋10倍的B	稀釋10倍的C	稀釋10倍的D
吸收度	1.067589	0.286258	0.506779	0.936013
換算 $[\text{I}_2 + \text{I}_3^-]$ (M)	0.001106	0.003144	0.005380	0.009731
平衡 $[\text{I}_2]$ (M)	0.001106	0.001106	0.001106	0.001106
平衡 $[\text{I}_3^-]$ (M)	-	0.002038	0.004273	0.008625
初始 $[\text{I}^-]$ (M)	0	0.005	0.01	0.02
$[\text{I}^-]$ (M)	-	0.002962	0.005727	0.001138
K	-	621.6831	674.3734	685.2094

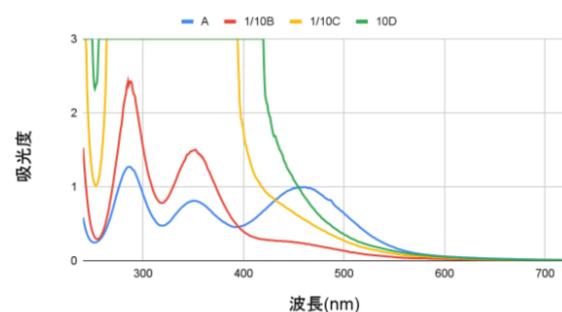
表二、光譜法平衡常數計算方法

取各溶液於波長464.3 nm的吸光度，代入檢量線 (圖十) 方程式得 $[\text{I}_2 + \text{I}_3^-] = (\text{吸光度} + 0.0239) \div 986.44$ 。又因量測的是B、C、D的稀釋溶液，需將所得 $[\text{I}_2 + \text{I}_3^-]$ 乘10倍，可得為稀釋之B、C、D $\text{I}_2 + \text{I}_3^-$ 濃度和。最後依照實驗一滴定法之計算方法推算出平衡常數。

(二) 問題討論

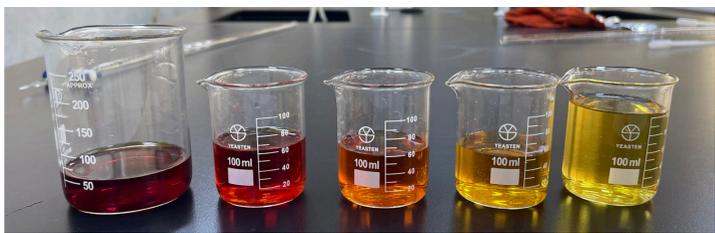
由於UV-VIS光譜儀偵測約在吸光度 0.05~1 間有較高準確度，因B、C、D顏色過深而無法偵測，在求平衡常數時，我們將其稀釋10倍後，再次量測光譜以獲得更準確的數據。而依檢量線可推測光譜法適用測量與的濃度和範圍約為 $1 \times 10^{-3} \text{ M} \sim 5 \times 10^{-5} \text{ M}$ 。

A、1/10B、1/10C、1/10D的光譜



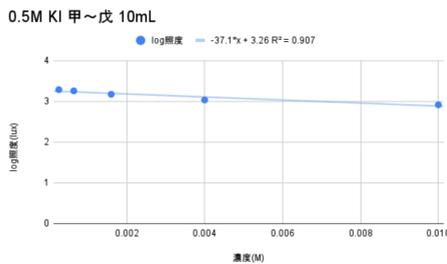
圖十一、A與稀釋10倍B、C、D溶液光譜 (第一作者製作)

三、光測法

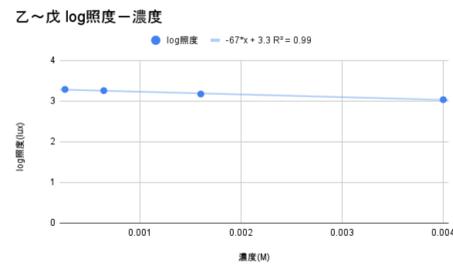


圖十二、甲~戊溶液 (第二作者拍攝)

根據 $I_2 + I^- \rightleftharpoons I_3^-$ 反應式，以過量KI和定量 I_2 反應時，可假設 I_2 完全向右反應時形成 I_3^- ，且在溶液中呈現棕色，隨著稀釋倍數越大，溶液會漸漸從棕色變成亮黃色，測量到的照度也漸大。



圖十三、甲~戊溶液 log照度-濃度檢量線 (第二作者製作)



圖十四、乙~戊溶液log照度-濃度檢量線 (第二作者製作)

根據比爾定律公式，可以利用 I_3^- 濃度與log照度的關係來製作檢量線，但溶液濃度過高會使比爾定律有偏差，所以我們將甲溶液([甲]=0.01 M)數值去除，重做檢量線後相關係數提高到0.99，因此實驗也會降低使用的溶液濃度，來避免計算上的偏差。

	A	B	C	D
照度(lux)	1750	1167	986	874
log照度	3.24304	3.06707	2.99388	3.24304
$[I_2 + I_3^-]$ M	0.00085	0.00348	0.00457	0.00085
初始 $[I^-]$ M	0	0.00500	0.01000	0.02000
平衡 $[I_3^-]$ M	-	0.00263	0.00372	0.00450
平衡 $[I_2]$ M	-	0.00085	0.00085	0.00085
平衡 $[I^-]$ M	-	0.00237	0.00628	0.01550
平衡常數K	-	1301.47229	696.39301	341.52321

表三、0.5M KI ABCD溶液濃度計算平衡常數

將log照度代入檢量線換算濃度，再以和滴定法相同之計算方式求得平衡常數。

	A	B	C	D
照度(lux)	1846	1829	1650	1386
log照度	3.26623	3.26221	3.21748	3.14176
$[I_2 + I_3^-]$ M	0.00083	0.00267	0.00474	0.00824
初始 $[I^-]$ M	0	0.00500	0.01000	0.02000
平衡 $[I_3^-]$ M	-	0.00184	0.00391	0.00741
平衡 $[I_2]$ M	-	0.00083	0.00083	0.00083
平衡 $[I^-]$ M	-	0.00316	0.00609	0.01259
平衡常數K	-	704.45526	775.06203	710.49036

表五、0.1M KI A,1/3BCD溶液濃度計算平衡常數

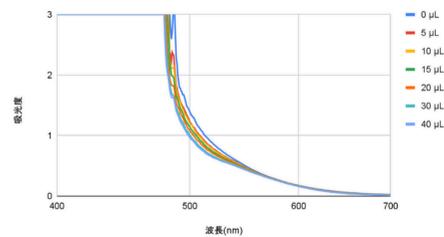
以0.1 M KI求得平衡常數範圍在704~775。

誤差比較	B	C	D
光測法 $[I_2 + I_3^-]$ M	0.00348	0.00457	0.00535
滴定法 $[I_2 + I_3^-]$ M	0.00324	0.00634	0.00844
誤差百分率(%)	7.46691	-27.93373	-36.60455

表四、BCD溶液光測濃度與滴定濃度誤差百分比

表四可知CD溶液光測濃度和滴定誤差較大，因此做出0.1M KI版本

溶液B逐次加入少量碘化鉀



圖十三、B溶液逐次加入碘化鉀 (第一作者製作)

誤差比較	A	B	C	D
光測法 $[I_2 + I_3^-]$ M	0.00123	0.00398	0.00589	0.00875
滴定法 $[I_2 + I_3^-]$ M	0.00121	0.00351	0.00567	0.0090
誤差百分率(%)	1.54505	13.24989	3.84539	-2.75565

表六、藍光ABCD溶液光測濃度與滴定濃度誤差百分比
光譜法顯示400 nm~450 nm的吸收會增大，此為藍光波長範圍，因此以藍色作為照射光源，以同樣方法測量照度計算濃度後，得誤差較白光小。

伍、結論

本實驗所嘗試的三種測量平衡常數方法皆為能測量出準確數據的方法。硫代硫酸鈉還原滴定法，可求出平衡常數為710，但操作步驟較繁雜，需費較多時間；光譜法利用等吸光度點的特性可求得平衡常數，光譜法的平衡常數為660。但光譜儀較不易取得。

最優化條件的光測法所求得平衡常數約在704~775，且高精度度、高準確度及再現性高，雖會受環境光、溫度等因素影響而變動，但較為便捷且節省藥品的使用，不一定要使用高端儀器才能測量溶液濃度，Phyphox是的免費app，能輕鬆的測量濃度，手機光測法是一個可推廣的實驗方式，最易在高中實驗中運用，可將科學實驗帶進日常生活，希望能藉此增加實驗效率。也是未來可推廣至在家中、辦公室中測量溶液濃度的便捷方法，如煮中藥時，只要簡單的乾淨透明杯及手機app及可量測出中藥的大概濃度，幫助煎煮中藥。抑或烹煮咖啡時，也可使用本實驗煮出黃金比例咖啡。

陸、參考資料

- 一、張煥宗,李弘文,簡敦誠等... (2020). 選修化學II (全) 物質構造與反應速率 (No. 9789865190033). 龍騰文化.
- 二、Pavia, D. L., Lampman, G. M., & Kriz, G. S. (n.d.). INTRODUCTION TO SPECTROSCOPY (No. 0-03-031961-7; third edition). Brooks/Cole.
- 三、What Is an Isosbestic Point? (n.d.). Chemicool. https://www.chemicool.com/definition/isosbestic_point.html
- 四、Beer-Lambert Law. (n.d.). 國立清華大學. <https://webmail.life.nthu.edu.tw/~labcyjw/BioPhyChem/Spectroscopy/beerslaw.htm>
- 五、Prasanna, bhat k shrikanth & m s hegde. (2021, May 8). Formation and Structure of Iodine: Water (H₂O-I₂) Charge-Transfer Complex. SpringerLink. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12039-021-01912-7#citeas>
- 六、Calculate Equilibrium Constant for $I_2 + I^- \rightleftharpoons I_3^-$. (n.d.). Toppr. <https://www.toppr.com/ask/question/calculate-equilibrium-constant-for-i2-i-rightleftharpoons-i3at-298-k/>