

# 透過 MS-Excel 學習滴定曲線的原理

游文綺、胡景瀚\*

國立彰化師範大學化學系

\*[chingkth@cc.ncue.edu.tw](mailto:chingkth@cc.ncue.edu.tw)

## ■ 前言

傳統上，酸鹼滴定著重於學生動手操作實驗學習操作技巧以及定量分析未知酸（鹼）的濃度，對於酸鹼滴定曲線意義的理解缺乏親自動手學習，特別在生成滴定曲線、決定當量點和半當量點、選擇合適指示劑的方面。通常，學生對這些原理和概念的學習是透過教師在實驗之前以講述方式來完成，這種學習顯得抽象化而不形象化。

在「十二年國民基本教育課程綱要國民中小學暨普通型高級中等學校--自科學領域課程綱要」的加深加廣選修課程中提到有關酸鹼滴定有如下描述：課程名稱：化學反應與平衡一；主題：物質的反應、平衡及製造 ( J )；次主題：酸鹼反應 ( Jd )；學習內容 ( 加深加廣選修 )：CJd-Va-6 酸鹼滴定原理與定量分析；學習內容說明：6-1 酸鹼滴定之原理、計算及滴定曲線之意義，6-2 實驗：酸鹼滴定 ( 教育部，2018 )。明顯地，新課綱有提到修習自然科學的高中學生需要動手做酸鹼滴定的定量分析實驗，並且需要學會酸鹼滴定的原理、計算及滴定曲線的意義。

為了呼應新課綱對高中學生學習的酸鹼滴定的要求，本文作者以 MS-Excel 開發一份互動式酸鹼滴定曲線模擬器 ( 附錄一 )，學生可在家中自我學習或在學校透過教師引導和從旁協助來完成學習。透過這份滴定曲線模擬器，讓學生可以根據自己的興趣和需求自由調整實驗參數，就可立即觀察到滴定曲線的變化，並且學習到解酸鹼滴定的原理、計算及滴定曲線的意義。

## ■ 酸鹼滴定的原理和概念

酸鹼滴定是將已知濃度的酸或鹼滴入定量體積的待測鹼或酸溶液中，待反應達終點 ( 指示劑變色 ) 後，利用滴定液的體積，就可以推算待測溶液的濃度。在滴定過程中，以滴定液的體積量和滴定後混合溶液的 pH 值做成一個圖表，這就是所謂的滴定曲線。透過這個曲線，不僅可以看出溶液 pH 值的變化方向和幅度，還可以找到合適的指示劑。

當進行酸鹼滴定實驗時，有兩個關鍵點需要知道。首先是當量點 ( equivalence point )，這表示酸所消耗氫離子莫耳數等於鹼所消耗氫氧根離子莫耳數。而另一個關鍵點是滴定終點

( endpoint )，這時指示劑的顏色改變會是永久的。當量點的體積非常接近滴定終點時，實驗的準確性越高。當討論酸性分子時，常會提到  $pK_a$  值，這是一個描述酸強度的重要數據。 $pK_a$  是酸解離常數  $K_a$  的負對數，如式[1]所示：

$$pK_a = -\log K_a \quad [1]$$

$pK_a$  表示酸分子釋放質子能力的強弱。數值越小，代表酸越容易解離，酸性越強； $pK_a$  越大，則酸性越弱。

當強鹼滴定弱酸時，開始溶液的 pH 值相對較低，這是因為溶液中含有大量的未解離的酸分子。隨著強鹼溶液的加入，弱酸分子開始解離，並逐漸被中和，pH 值開始上升。滴定曲線上還有一個關鍵點叫做半當量點 ( half-equivalence point )，這是在滴定過程中酸被中和到一半的點。在這個點上，溶液中的未解離酸 ( HA ) 和其共軛鹼 (  $A^-$  ) 的濃度相等。根據亨德森-哈塞爾巴赫方程式 ( Henderson-Hasselbalch equation )，如式[2]所示：

$$pH = pK_a + \log\left(\frac{[A^-]}{[HA]}\right) \quad [2]$$

在半當量點上， $[A^-]$ 和 $[HA]$ 相等，亦即  $\log\left(\frac{[A^-]}{[HA]}\right)$  等於 0，得到式[3]：

$$pH = pK_a \quad [3]$$

因此，透過觀察滴定曲線圖，可以在半當量點對應到 pH 值，這個 pH 值就是酸的  $pK_a$  值，如圖 1 所示。

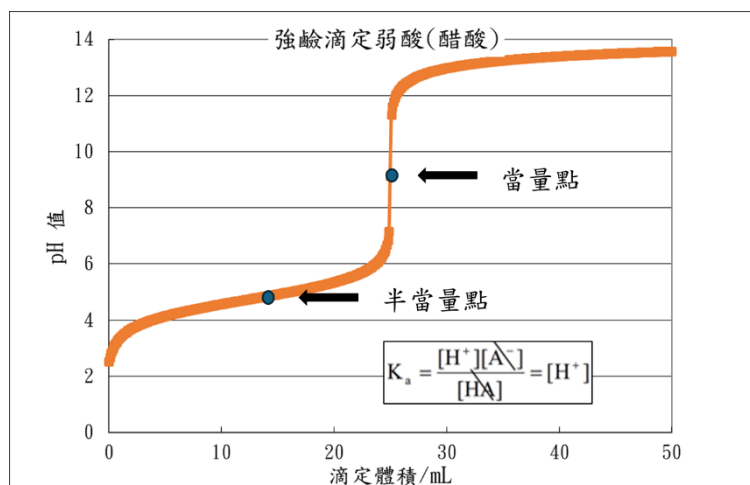


圖 1：處於半當量點， $pH = pK_a = 4.99$

在溶液中加入緩衝溶液，讓溶液的滴定初期能夠保持穩定的 pH 值，什麼是緩衝溶液？緩衝溶液是由弱酸及其共軛鹼（或弱鹼及其共軛酸）所組成的溶液，當加入少量的強鹼（或強酸）時，溶液 pH 值的改變較為緩慢。

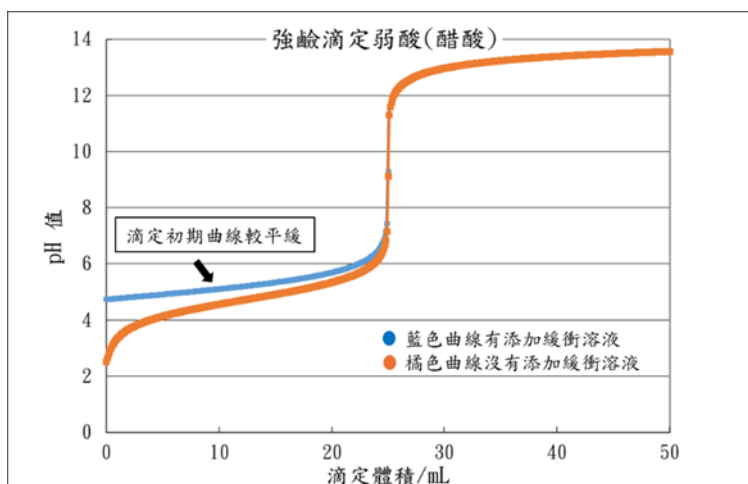


圖 2：強鹼滴定弱酸的滴定曲線。(酸體積 50 mL、酸濃度 0.5 M、鹼濃度 1.0 M；藍色曲線：有添加共軛鹼濃度 (0.5 M)；橘色曲線：無添加共軛鹼濃度 (0 M)。

## ■ 互動式滴定曲線模擬器

現在，就讓我們打開 MS-Excel 模擬器 (附錄一) 的檔案，開始這場探索之旅吧！首先，看到欄 A 有許多參數可以做設定，這模擬器的工作表有兩個例子，其一是強鹼溶液滴定弱酸溶液，其二是強酸溶液滴定弱鹼溶液。只要在兩個工作表更改欄 A 的參數，後續的表格中的數值將會跟著連動更改。輸入參數包括：待測液酸 (鹼) 濃度、酸 (鹼) 體積、及其酸 (鹼) 解離常數  $K_a$  ( $K_b$ )、滴定液強鹼 (強酸) 的濃度、以及添加共軛鹼 (共軛酸) 的濃度。(解離常數表可在網路搜尋得到，輸入關鍵詞「解離常數表」或「Table of Dissociation Constants」)，參考網頁 (維基百科, 2024a；LibreTexts libraries, 2024a & 2024b)。藉由在 25°C 下水的離子積常數 ( $K_w = [H^+][OH^-] = 1.0 \times 10^{-14}$ )，利用酸的解離常數，可計算得到其共軛鹼的解離常數。

### 一、強鹼滴定弱酸

在工作表一為強鹼滴定弱酸的模擬器，黑色曲線是以強鹼 (1 M NaOH) 滴定弱酸 (0.5 M, 50 mL 醋酸,  $K_a = 1.8 \times 10^{-5}$ ) 為固定參數，以作為對照組使用。舉例說明，若是想要調整待測液弱酸濃度 (即調整工作表一的 A6)，會得到圖 3。

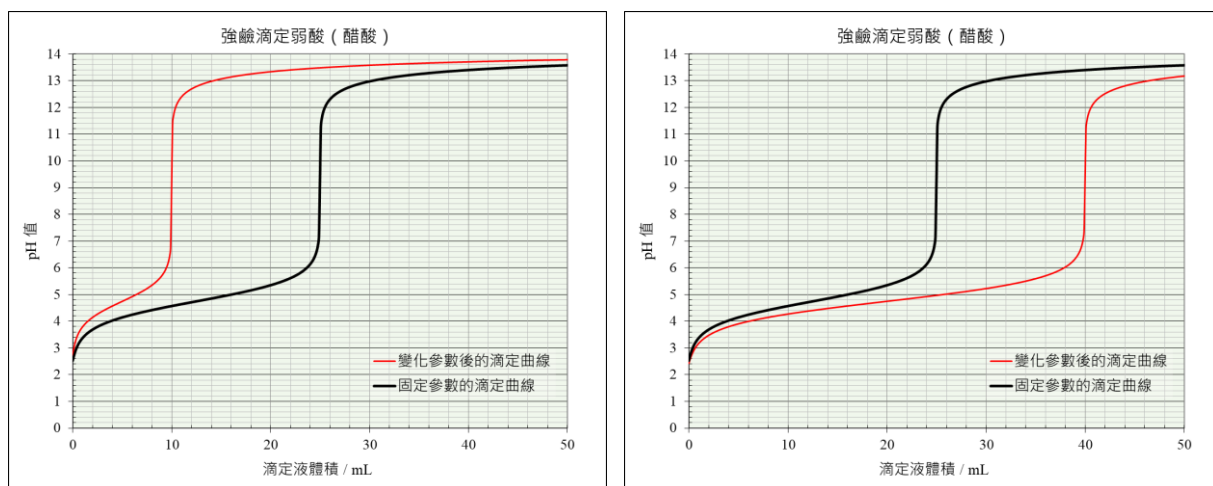


圖 3：醋酸濃度改為 0.2 M (左)；醋酸濃度改為 0.8 M (右)。

若是想要調整滴定液氫氧化鈉的濃度 (即調整工作表一的 A10)，會得到圖 4。

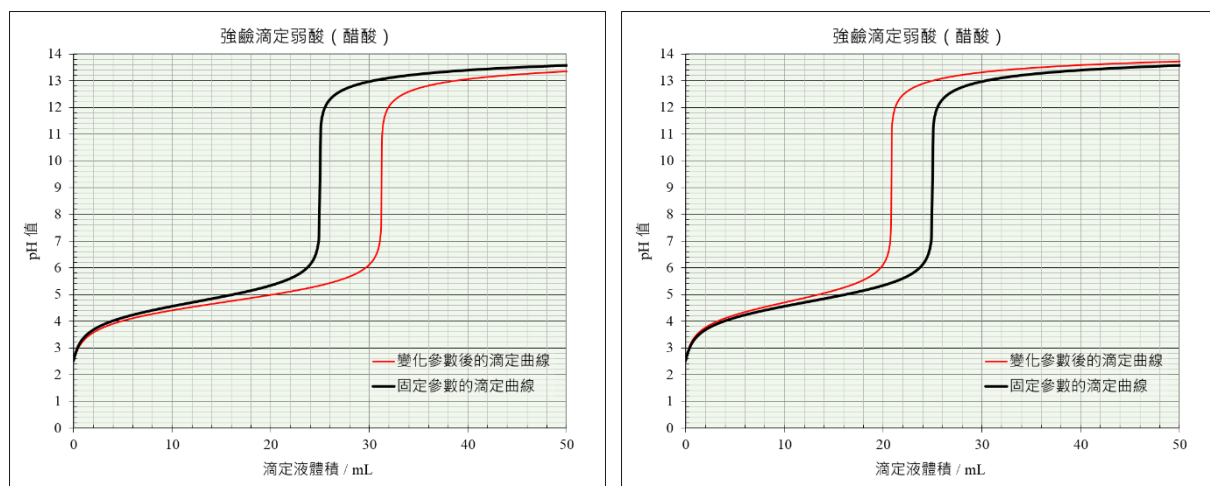


圖 4：氫氧化鈉濃度改為 0.8 M (左)；氫氧化鈉濃度改為 1.2 M (右)

若是想要將弱酸換成強酸，或是換成更弱的酸 (即調整工作表一的 A8) 時，會得到圖 5。

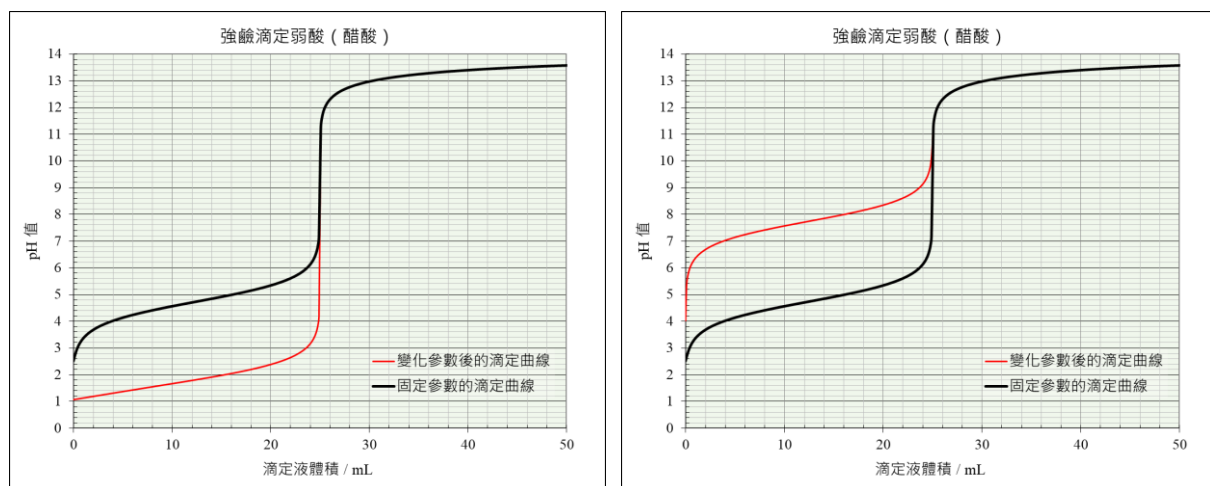


圖 5：比醋酸強千倍的酸 ( $pK_a=1.80; K_a = 1.8 \times 10^{-2}$ ) (左)；比醋酸弱千倍的酸 ( $pK_a=7.80; K_a = 1.8 \times 10^{-8}$ ) (右)

若是想要更改緩衝溶液 (添加共軛鹼) 的濃度 (即調整工作表一的 A10)，會得到圖 6。黑色曲線未加緩衝溶液；紅色曲線為添加 0.5 M 共軛鹼溶液 (如醋酸鈉溶液)，紅色曲線會跟隨參數的變化而產生改變。

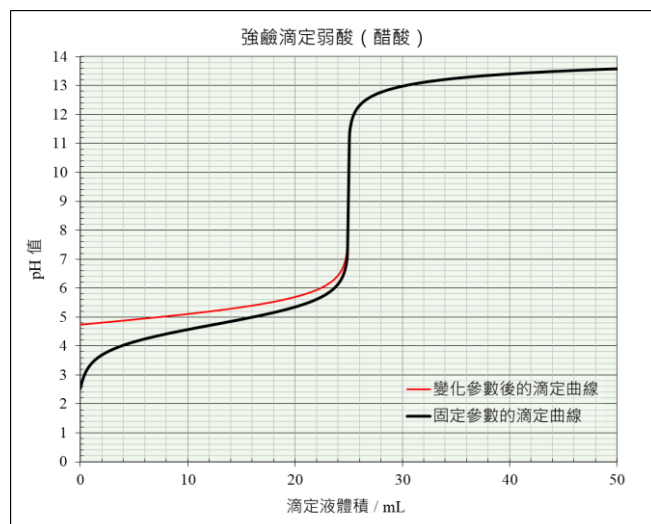


圖 6：紅色曲線的參數設定：強鹼 (1 M 氫氧化鈉) 滴定弱酸 (0.5 M, 50 mL 醋酸,  $K_a = 1.8 \times 10^{-5}$ )，添加 0.5 M 共軛鹼溶液 (醋酸鈉溶液)

## 二、強酸滴定弱鹼

若是想要看強酸滴定弱鹼的例子，則需要切換到工作表二的強酸滴定弱鹼：黑色曲線是以強酸 (1 M 鹽酸) 滴定弱鹼 (0.5 M, 50 mL 氨水,  $K_b = 1.8 \times 10^{-5}$ ) 為固定參數，以作為對照組使用。舉例說明，若調整待測液弱鹼濃度 (即調整工作表二的 A6)，會得到圖 7。

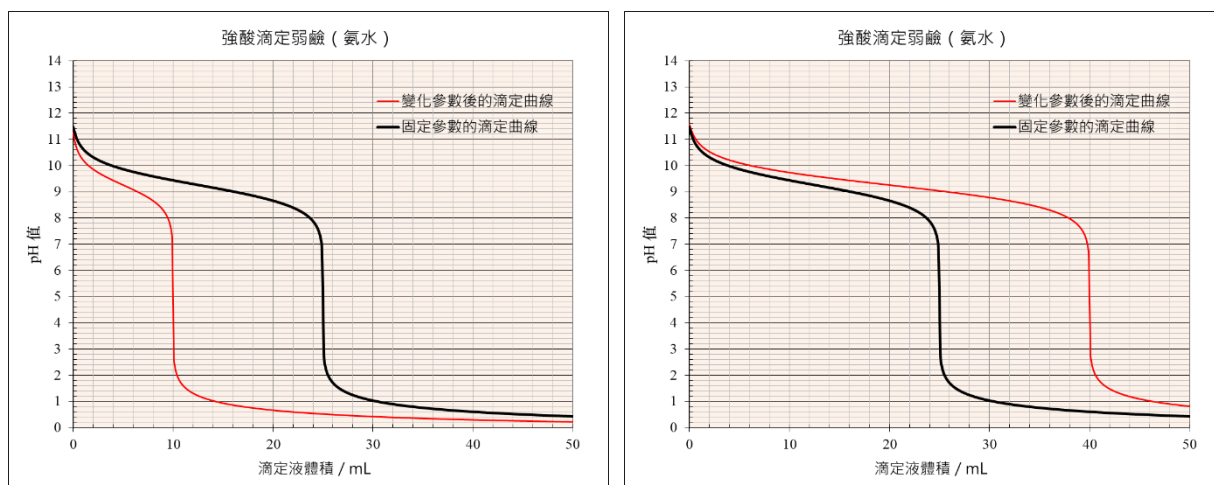


圖 7：氨水濃度改為 0.2 M (左)；氨水濃度改為 0.8 M (右)

若是想要調整鹽酸濃度 ( 即調整工作表二的 A10 ) , 會得到圖 8 。

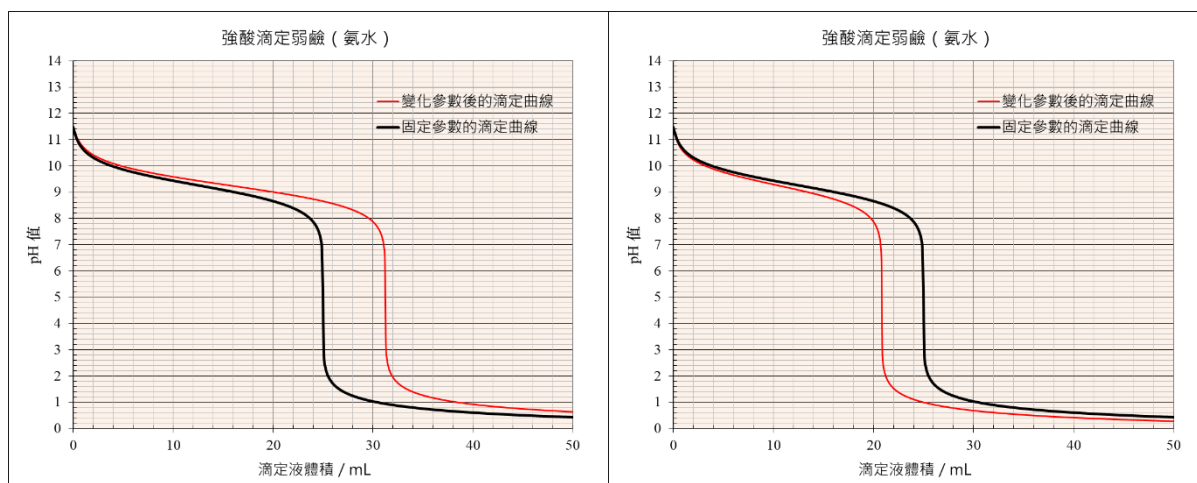


圖 8 : 鹽酸濃度改為 0.8 M ( 左 ) ; 圖 14 : 鹽酸濃度改為 1.2 M ( 右 )

若是想要將強酸換成弱酸 , 或是換成更強的酸時 ( 即調整工作表二的 A8 ) , 會得到圖 9 。

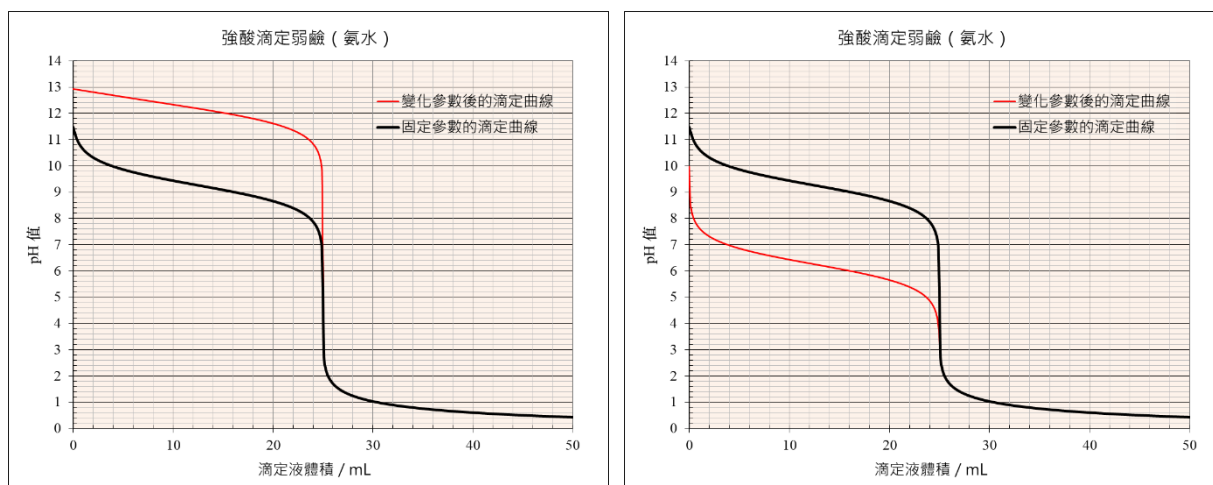


圖 9 : 比鹽酸強 1000 倍的酸 (  $pK_b=1.74$ ;  $K_b = 1.8 \times 10^{-2}$  ) ( 左 ) ; 比鹽酸弱 1000 倍的酸 (  $pK_b=7.74$ ;  $K_b = 1.8 \times 10^{-8}$  ) ( 右 )

若是想要更改緩衝溶液 ( 添加共軛酸溶液 ) 的濃度 ( 即調整工作表二的 A10 ) , 會得到圖 10 。黑色曲線未加緩衝溶液 ; 紅色曲線為添加 0.5 M 共軛鹼溶液 ( 如氯化銨溶液 ) , 紅色曲線將會跟隨參數的變化而產生改變 。



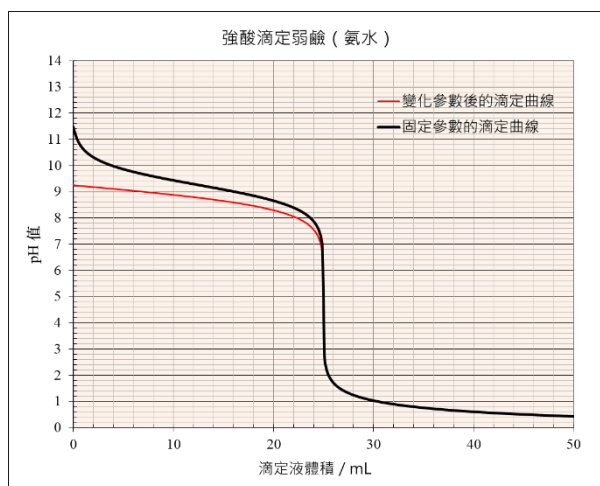


圖 10：紅色曲線的參數設定：強酸（1 M 鹽酸）滴定弱鹼（0.5 M, 50 mL 氨水,  $K_b = 1.6 \times 10^{-5}$ ），添加 0.5 M 共軛鹼溶液（氯化銨溶液）

## ■ 教學提示和建議

在高中化學和大學普通化學實驗的課程中，學習酸鹼滴定的重點不僅要熟練操作技巧，而且理解滴定的原理和概念也是非常重要。本文作者開發 MS-Excel 互動式酸鹼滴定曲線模擬器（附錄一），可作為學生理解滴定曲線意義的學習工具。

### 一、教學提示

1. 強烈地建議此滴定曲線模擬器的教學時機在學生實際操作酸鹼滴定後，且未進行滴定曲線原理和概念的教學，使學生有更多探索的學習機會。
2. 此滴定曲線模擬器適合學生在教室或實驗室中藉由教師引導並從旁協助學習，也適合學生在家中自我學習和教師在疫情期間進行線上或離線教學。
3. 若教學時間不足，建議在「探索滴定曲線」和「認識當量點、半當量點及酸鹼平衡常數」方面，選擇【強鹼滴定弱酸】或【強酸滴定弱鹼】一項進行教學。
4. 在「改變共軛鹼濃度生成滴定曲線」方面的原理稍有難度，對高中學生不易理解，建議不在高中階段實施探索，在大學普通化學實驗和普通化學（酸鹼平衡章節）中實施教學較為適宜。
5. 本文作者設計一份高中學習階段的教案和學習單（附錄二），提供給高中教師教學的參考。

### 二、教學項目建議

1. 探索【強鹼滴定弱酸】的滴定曲線：(1)先讓學生預測：若強鹼滴定液（氫氧化鈉溶液）以逐次小量方式滴到弱酸溶液（醋酸溶液）中，並測量混合溶液的 pH 值，以滴定液體積為橫座標，以 pH 值為縱座標，想像畫出滴定曲線；(2)學生透過附檔的 MS-Excel 模擬器，觀察此滴定曲線（黑色曲線）；以及(3a)改變使用弱酸不同體積，觀察並比較生成滴定曲線的同異處及說明其理由；(3b)改變使用弱酸不同濃度，觀察並比較生成滴定曲線的同異處及說明其理由；(3c)改變使用強鹼（滴定液）不同濃度，觀察並比較生成滴定曲線的同異處及說明其理由；(3d)改變醋酸為其他弱酸（即改變  $K_a$  值），觀察並比較生成滴定曲線的同異處及說明其理由；以及(3e)改變共軛鹼濃度（緩衝溶液濃度），觀察並比較生成滴定曲線的同異處及說明其理由。
2. 探索【強酸滴定弱鹼】的滴定曲線：(1)先讓學生預測：若強酸滴定液（鹽酸）以逐次小量方式滴到待測溶液（氨水）中，並測量混合溶液的 pH 值，以滴定液體積為橫座標，以 pH 值為縱座標，想像畫出此滴定曲線；(2)學生透過附檔的 MS-Excel 虛擬實驗，觀察此滴定曲線（黑色曲線）；以及(3a)改變弱鹼不同體積，觀察並比較生成滴定曲線的同異處及說明其理由；(3b)改變弱鹼不同濃度，觀察並比較生成滴定曲線的同異處及說明其理由；(3c)改變使用強酸（滴定液）不同濃度，觀察並比較生成滴定曲線的同異處及說明其理由；(3d)改變氨水為其他弱鹼（即改變  $K_b$  值），觀察並比較不同弱鹼生成滴定曲線的同異處及說明其理由；以及(3e)改變共軛酸濃度（緩衝溶液濃度），觀察並比較生成滴定曲線的同異處及說明其理由。
3. 觀察並認識【強鹼滴定弱酸】的當量點、半當量點及弱酸的  $K_a$ ：(1)學生仔細觀察滴定曲線中曲折處的中心點稱為當量點；(2)觀察由曲線圖的當量點對應到橫座標上使用氫氧化鈉的體積，此體積的一半值對應在曲線上的點稱為半當量點；以及(3)透過半當量點的 pH 值，找出  $pK_a$  和  $K_a$ ；以及(4)比較自己找出的  $K_a$  與設定參數的  $K_a$  是否相同。
4. 觀察並認識【強酸滴定弱鹼】的當量點、半當量點及弱鹼的  $K_b$ ：(1)學生仔細觀察滴定曲線中曲折處的中心點稱為當量點；(2)觀察由曲線圖的當量點對應到橫座標上使用鹽酸的體積，此體積的半值對應在曲線上的點稱為半當量點；以及(3)透過半當量點的 pH 值，找出  $pK_b$  和  $K_b$ ；以及(4)比較自己找出的  $K_b$  與設定參數的  $K_b$  是否相同。
5. 計算並理解酸鹼滴定曲線各階段的意義：(1)學生計算在滴定開始、滴定前期、滴定當量點時及滴定後期的  $H^+$  和  $OH^-$  的毫莫耳數、體積、濃度及溶液的 pH 值（計算過程需要寫出反應式，並用到酸鹼反應的化學計量和利用平衡常數的計算）；以及(2)利用附檔的 MS-Excel 模擬器的滴定曲線，找出滴定各階段的相關數值，並學生自己的計算值作比較。
6. 找出合適的酸鹼指示劑當作滴定終點的判定：(1)學生根據【強鹼滴定弱酸】滴定曲線的



當量點，配合各種酸鹼指示劑的 pH 值範圍與其對應的顏色變化表（搜尋關鍵詞“酸鹼指示劑”或“pH indicator”）（維基百科，2024b；Wikipedia, 2024），針對二種不同強度的弱酸，分別找出適當的酸鹼指示劑；以及(2)根據【強酸滴定弱鹼】滴定曲線的當量點，配合各種酸鹼指示劑的 pH 值範圍與其對應的顏色變化表，針對二種不同強度的弱鹼，分別找出合適的酸鹼指示劑。

## ■ 結語

透過酸鹼滴定模擬來讓學生自主學習和練習化學知識，早在 2014 年，就有一位巴西科學家，Dr. Ivano Gebhardt Rolf Gutz，在網上發布 CurTiPot Excel 檔案（Gutz, 2024），可以對滴定實驗做複雜的理論計算，同樣也透過調整不同參數觀察滴定曲線的變化，學生可以更深入地理解酸鹼滴定的相關理論。礙於 CurTiPot 內容複雜難懂，本文作者開發的互動式滴定曲線模擬器適合國內高中生進行使用，也方便教師在課內進行教學。

使用 MS-Excel 互動式酸鹼滴定曲線模擬器具有多項優點。首先，它能幫助學生更直觀地理解酸鹼滴定過程中的 pH 變化，增強學習效果。透過 Excel，使用者可以輕鬆進行數據輸入與分析，且不須運用網際網路，即可利用內建的公式和圖表工具自動生成滴定曲線，便於解釋和討論。此外，模擬器提供靈活性，讓使用者可隨意調整滴定液的濃度和體積，以模擬不同的實驗條件，同時也避免化學試劑或設備帶來的成本與安全風險。固定模擬使學生能夠重複實驗，熟悉程序和技巧，並能即時看到反應結果以便快速調整學習策略。這些優勢使得 MS-Excel 互動式酸鹼滴定曲線模擬器成為一個有效且值得推廣的教學工具。

應用 MS-Excel 互動式酸鹼滴定曲線模擬器，教師可設計一個綜合性的教學單元，旨在提升學生對酸鹼化學及滴定曲線的理解。在這個單元中，教師可以讓學生進行一系列的模擬實驗，從選擇不同的酸和鹼進行滴定，到分析生成的滴定曲線和計算相應的濃度及  $pK_a$  值。學生在操作過程中，不僅能加深理論知識，還能培養數據分析和問題解決能力。在預期教學效果方面，利用模擬器進行教學可以促進學生更主動的學習態度，並強化對酸鹼反應的理解。透過即時反饋，學生能迅速修正錯誤，提升學習效率。同時，教師在課堂上可以利用模擬器展示滴定曲線的生成過程，增強互動性，從而鼓勵學生之間的合作與討論。

## ■ 附錄

附錄一：MS-Excel 互動式酸鹼滴定曲線模擬器，下載 Excel 檔

附錄二：教案和學習單，下載 pdf 檔

## ■ 參考文獻

- 教育部 (2018)。十二年國民基本教育課程綱要：國民中小學暨普通型高級中等學校自然科學領域。臺北市：教育部。
- 維基百科 (2024a)。酸度係數/解離常數。檢索日期：2024 年 12 月 2 日。取自 <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/酸度係數>。
- 維基百科 (2024b)。酸鹼指示劑。2024 年 12 月 2 日。取自 <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/酸鹼指示劑>。
- Gutz, I. G. R. (2024). CurTiPot. Retrieved December 2, 2024, from [https://www.iq.usp.br/gutz/Curtipot\\_.html](https://www.iq.usp.br/gutz/Curtipot_.html).
- LibreTexts libraries (2024a). E1: Acid Dissociation Constants at 25°C. Retrieved December 2, 2024, from <https://shorturl.at/AR4Dm>.
- LibreTexts libraries (2024b). E2. Base Dissociation Constants at 25°C. Retrieved December 2, 2024, from <https://shorturl.at/ini2d>.
- Wikipedia (2024). pH indicator. Retrieved December 2, 2024, from [https://en.wikipedia.org/wiki/PH\\_indicator](https://en.wikipedia.org/wiki/PH_indicator).