

# 第十五屆旺宏科學獎

## 創意說明書

參賽編號：SN15-010

作品名稱：磁性分子模板在重金屬吸  
附及脫附之應用

姓名：李康平

關鍵字：分子模板、磁顆粒、重金屬、萃  
取

# 目 錄

|                   |    |
|-------------------|----|
| 壹、摘要              | 1  |
| 貳、研究動機            | 1  |
| 參、研究目的            | 1  |
| 肆、研究設備及器材         | 2  |
| 伍、研究原理及方法         | 3  |
| 一、研究原理            | 3  |
| 二、研究過方法           | 3  |
| 陸、研究結果            | 8  |
| 一、金屬溶液吸附檢量線       | 8  |
| 二、分子模板在聚合中之反應速率   | 9  |
| 三、空白分子模板吸附效果      | 10 |
| 四、分子模板專一性吸附效果     | 10 |
| 五、重金屬分子模板吸附效果     | 11 |
| 六、分子模板競爭吸附效果      | 13 |
| 七、分子模板在不同酸鹼度之吸附效果 | 19 |
| 八、分子模板脫附效果        | 19 |
| 柒、結論              | 20 |
| 捌、未來展望            | 21 |
| 玖、參考資料            | 22 |

## 圖目錄

|   |    |
|---|----|
| 圖 1 磁性分子模板示意圖                                 | 1  |
| 圖 2 索式萃取器                                     | 2  |
| 圖 3 烘箱  | 2  |
| 圖 4 原子吸收光譜儀                                   | 2  |
| 圖 5 氯化鐵及氯化亞鐵溶液                                | 3  |
| 圖 6 氯化鐵及氯化亞鐵溶液                                | 3  |
| 圖 7 經沉澱後撈出的磁鐵                                 | 3  |
| 圖 8 經研鉢搗碎後之磁顆粒                                | 3  |
| 圖 9 未萃取之銅分子模板                                 | 4  |
| 圖 10 索氏萃取器進行重金屬脫附                             | 4  |
| 圖 11 銅分子模板                                    | 4  |
| 圖 12 空白分子模板示意圖空白分子模板因未加入單體，因此並不會吸附重金屬，也不會影響實驗 | 5  |
| 圖 13 聚合完成之空白分子模板                              | 5  |
| 圖 14 空白分子模板粉末                                 | 5  |
| 圖 15 聚合完成之磁性銅分子模板                             | 6  |
| 圖 16 萃取完成之磁性銅分子模板粉末                           | 6  |
| 圖 17 SEM 拍攝圖，磁性銅分子模板尺寸為 55 $\mu\text{m}$ 粉末   | 6  |
| 圖 18 銅主要吸收值(波長)檢量線                            | 8  |
| 圖 19 錳主要吸收值(波長)檢量線                            | 8  |
| 圖 20 鋅主要吸收值(波長)檢量線                            | 8  |
| 圖 21 鉛主要吸收值(波長)檢量線                            | 8  |
| 圖 22 銅分子模板在聚合中之反應速率                           | 9  |
| 圖 23 錳分子模板在聚合中之反應速率                           | 9  |
| 圖 24 鋅分子模板在聚合中之反應速率                           | 9  |
| 圖 25 鉛分子模板在聚合中之反應速率                           | 9  |
| 圖 26 分子模板示意圖                                  | 11 |
| 圖 27 在相同分子模板克數下，於不同銅離子濃度下測量                   | 11 |
| 圖 28 在相同銅離子濃度下測量，於不同克數分子模板下測量                 | 11 |
| 圖 29 在相同分子模板克數下，於不同錳離子濃度下測量                   | 11 |
| 圖 30 在相同錳離子濃度下測量，於不同克數分子模板下測量                 | 11 |
| 圖 31 在相同分子模板克數下，於不同鋅離子濃度下測量                   | 12 |
| 圖 32 在相同鋅離子濃度下測量，於不同克數分子模板下測量                 | 12 |
| 圖 33 在相同分子模板克數下，於不同鉛離子濃度下測量                   | 12 |
| 圖 34 在相同鉛離子濃度下測量，於不同克數分子模板下測量                 | 12 |
| 圖 35 銅、錳競爭吸附與銅之比較                             | 13 |

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 圖 36 銅、錳競爭吸附與錳之比較.....  | 13 |
| 圖 37 銅在不同 pH 值下測量.....  | 19 |
| 圖 38 錳在不同 pH 值下測量.....  | 19 |
| 圖 39 鉛在不同 pH 值下測量.....  | 19 |
| 圖 40 鋅在不同 pH 值下測量.....  | 19 |
| 圖 41 分子模板裝設在水龍頭示意圖..... | 21 |
| 圖 41 分子模板裝設在水管示意圖.....  | 21 |
| 圖 42 分子模板裝設在茶包示意圖.....  | 21 |

## 表目錄

|   |    |
|---|----|
| 表 1 空白分子模板吸附效果 .....  | 10 |
| 表 2 鋅分子模板 $\text{Cu}^{2+}$ , $\text{Mn}^{2+}$ , $\text{Pb}^{2+}$ 吸附效果 ..... | 10 |
| 表 3 鉛分子模板 $\text{Cu}^{2+}$ , $\text{Mn}^{2+}$ , $\text{Zn}^{2+}$ 吸附效果 ..... | 10 |
| 表 4 銅分子模板 $\text{Zn}^{2+}$ , $\text{Mn}^{2+}$ , $\text{Pb}^{2+}$ 吸附效果 ..... | 10 |
| 表 5 錳分子模板 $\text{Cu}^{2+}$ , $\text{Zn}^{2+}$ , $\text{Pb}^{2+}$ 吸附效果 ..... | 11 |
| 表 6 銅、鉛競爭吸附之比較 .....  | 13 |
| 表 7 銅、鋅競爭吸附之比較 .....  | 14 |
| 表 8 錳、鋅競爭吸附之比較 .....  | 14 |
| 表 9 錳、鉛競爭吸附之比較 .....  | 15 |
| 表 10 鋅、鉛競爭吸附之比較 .....   | 15 |
| 表 11 銅、錳、鋅競爭吸附之比較 .....   | 15 |
| 表 12 錳、鋅、鉛競爭吸附之比較 .....   | 16 |
| 表 13 銅、鋅、鉛競爭吸附之比較 .....   | 17 |
| 表 14 銅、錳、鉛競爭吸附之比較 .....   | 17 |
| 表 15 銅、鋅、錳、鉛競爭吸附之比較 .....   | 18 |
| 表 16 銅、鋅、錳、鉛脫附之實驗 .....   | 19 |
| 表 17 銅、鋅、錳、鉛磁性分子模板吸附實驗 .....  | 21 |

## 壹、摘要

本研究探討新型分子模板之製作，並分析分子模板在台灣河川中最常見的四種重金屬(銅、鉛、鋅、錳)之吸附效果，亦利用各個不同變因(競爭吸附、pH 值及溫度等因素)，比較分子模板分別在不同條件下的重金屬吸附效果。接著再結合磁顆粒之創新構想，製作出磁性分子模板。磁性分子模板的形成中，使用了特定的重金屬離子。聚合後，形成一個特定的結合位點(“空位”)。因此，它可吸附特定之重金屬離子。經由實驗測量後磁性分子模板重金屬最高吸附量可達 95%，其重金屬脫附效果也可達 83%。磁性分子模板中的磁顆粒並不會影響分子模板的吸附，不僅可加快分子模板的吸附及回收時間，更可以有效控制分子模板的吸附，將分子模板做更有效回收利用。

## 貳、研究動機

台灣的重金屬污染日益嚴重，尤其河川污染程度已嚴重超過安全標準值 [1-2]，所以本研究希望藉由我們所發想出的創新想法，嘗試解決當今台灣嚴重的河川污染問題。在查詢資料的過程中，我們查閱到幾丁聚醣吸附重金屬的文獻資料 [3-5]，因此我們繼續延伸此研究方向，進一步的探討一種新型技術-分子模板 [6]。此新型技術可以快速並高專一性吸附各種重金屬，且成本便宜，吸附程度高，除可以更有效的吸附重金屬，並具有脫附及重複使用之功能。另外再結合磁顆粒之概念，可以有效快速利用磁場回收重金屬。對於工廠廢水處理、河川重金屬清除及家庭飲用水之應用有重大助益。

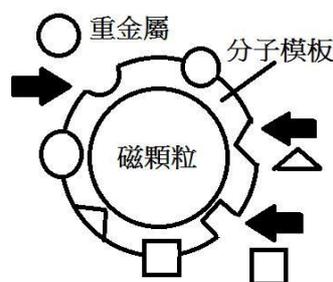


圖 1 磁性分子模板的示意圖。在模板的形成中，使用了特定的重金屬離子。聚合後，形成一個特定的結合位點(“空位”)，因此它可吸附特定之重金屬離子。此外，磁性分子模板具有磁性，可方便且快速進行回收。

## 參、研究目的

利用分子模板上具有的特殊性重金屬專一孔洞，可藉由吸附的方式將遭受污染的河川裡的重金屬物質吸附出來，之後再利用磁顆粒之概念，製作出磁性分子模板，可快速有效地利用磁場回收重金屬；接者利用特殊操作條件進行重金屬脫附後，便可將分子模板重新回收使用。本研究之目的即是將此創新之研究構想具體實現，並探討分子模板製作、磁顆粒製作、重金屬吸附、重金屬脫附及磁性分子模板(如圖 1)吸附及回收效果。最後本研究並提出一重金屬吸附元件之構想，可望使用於家庭飲用水及工廠廢水等重金屬簡易去除之重要應用。

本研究將針對以下各面向進行探討：

- 一、探討「相同克數分子模板」對特定重金屬溶液的吸附效果
- 二、探討「在相同重金屬溶液下，探究不同克數分子模板」對特定重金屬溶液的吸附效果
- 三、探討「空白模板」對特定重金屬溶液的吸附效果
- 四、探討「分子模板」對於混合金屬溶液的競爭吸附效果
- 五、探討「分子模板」的重金屬脫附效果
- 六、探討「分子模板」對其他三種重金屬之專一性吸附之效果

## 肆、研究設備及器材

|   |  |
|---|--|
| (一) 硝酸錳 99 %  | (十八) 電子天平 AND 牌 GF300  |
| (二) 硝酸鉛 99 %  | (十九) 50 ml 燒杯 x5   |
| (三) 硝酸鋅 99 %  | (二十) 蒸餾瓶   |
| (四) 硝酸銅 99 %  | (二十一) 抽氣櫃  |
| (五) 三羥甲基丙烷三丙烯酸酯 99%   | (二十二) 研鉢   |
| (六) 索式萃取器(如圖 2)   | (二十三) 篩網(mesh 400, 200)  |
| (七) 戊二醛 99%   | (二十四) 500 ml 燒杯 x5   |
| (八) 偶氮二異丁腈(AIBN) 99 % (起始劑)                                   | (二十五) 200 ml 燒杯 x5   |
| (九) 乙醇 95 %   | (二十六) 150 ml 燒杯 x5   |
| (十) 硫酸 1 N  | (二十七) 原子吸收光譜儀(Atomic Absorption Spectrophotometer, Jas. C. D V-730) (如圖 4) |
| (十一) 氫氣 99 %  |  |
| (十二) 工業液鹼 45%   |  |
| (十三) 氫氧化鈉 6 M   |  |
| (十四) 氯化鐵溶液( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) 97 %  |  |
| (十五) 氯化亞鐵溶液( $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) 97 % |  |
| (十六) 烘箱(如圖 3)   |  |
| (十七) 酸鹼度計(pH meter)   |  |



圖 2 索式萃取器



圖 3 烘箱



圖 4 原子吸收光譜儀

## 伍、研究原理及方法

### 【一、研究原理】

分子模板：

分子模板聚合前將單體和目標分子(或金屬離子)產生鍵結，合成可聚合的目標分子(或金屬離子)衍生物，然後加入交聯劑使分子相互鍵結交聯成網狀結構，以聚合成高分子。高分子和目標分子的鍵結可輕易被打斷，在移除目標分子(或離子)後，便會留下具有目標分子(或離子)具高度親和性及辨識性的孔洞(即為分子模板)。

因此，分子模板將模板分子與官能基單體以非共價鍵或是彼此形成共價鍵的錯合物，加入交聯劑進行聚合反應，再將模板分子從聚合高分子內移除，得到具有模板分子孔洞的高分子聚合物，且相對應的官能基也存在孔洞外緣，其孔洞可提取與模板分子相似的分子結構，並將此分子滯留於高分子聚合物內，使聚合高分子具有辨識分子的能力。

分子模板為物理性吸附，推測主要是由分子間的凡得瓦力和氫鍵。凡得瓦力所引起的吸附作用。普遍存在於吸附劑和吸附質之間，所以一種吸附劑可以吸附多種不同的吸附質，使得物理吸附一般沒有選擇性，但因為分子模板上有目標分子的孔洞，所以具有選擇性這個重要特性。而氫鍵則是在分子模板和功能單體通過多氫鍵生成基於配位體-選擇的結合位點並通過該作用力在分子印跡體系中進行目標分子的識別。

### 【二、研究方法】

#### 【實驗 I】



圖 5 氯化鐵及氯化亞鐵溶液溶解在鹽酸中。



圖 6 氯化鐵及氯化亞鐵溶液放入 NaOH 中反應並形成氧化鐵磁顆粒。



圖 7 經沉澱後撈出的磁顆粒。



圖 8 經研鉢搗碎後之磁顆粒。

一、目的：磁顆粒製作

二、變因：(一) 操縱變因：以不同比例的  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  調製出磁顆粒  
(二) 控制變因：固定 HCl 和 NaOH 濃度

三、步驟：(一) 用電子天平量取  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  (24 mM, 2.50 g) 以及  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (12 mM, 1.50 g) 分別溶於 HCl (2 N, 12.00 ml)，使其完全溶解(如圖 5)。

(二) 待完全溶解後，用 3.00 ml 針筒吸取出氧化鐵溶液，再加入 NaOH (20%, 50.00 ml) 固化液中，即可反應生成氧化磁鐵顆粒 (如圖 6)。

- (三) 用蒸餾水清洗磁顆粒 2~3 次以去除表面殘留之氫氧化鈉(如圖 7)，再以研鉢搗碎後即可得到磁顆粒(如圖 8)。

## 【實驗 II】

- 一、目的：分子模板製作
- 二、變因：(一) 操縱變因：不同重金屬溶液  
(二) 控制變因：分子模板聚合物
- 三、步驟：(一) 將 4 種重金屬(硝酸錳(2.0 M, 1.79 g)、硝酸鉛(2.0 M, 3.31 g)、硝酸鋅(2.0 M, 1.89 g)、硝酸銅(2.0 M, 1.88 g))溶解於乙醇 (75%, 3.00 ml)中。  
(二) 加入單體三羥甲基丙烷三丙烯酸酯(2.0 M, 3.00 ml)。  
(三) 加入起始劑 AIBN(2.0 M, 3.00 g)，並將混和溶液攪拌成均一液相。  
(四) 通以氮氣以防止氧化反應之發生。  
(五) 置入定溫 60 °C 的烘箱中進行分子聚合反應，時間為 24 小時(如圖 9)，再利用索氏萃取器將重金屬移除出來以形成專一性孔洞，接著將聚合完成之聚合物以研鉢研磨成粉末狀(如圖 10)。  
(六) 粉碎後之分子模板以 mesh 200 和 mesh 400 的篩網，取得粒徑範圍為 37-74  $\mu\text{m}$  以及小於 37  $\mu\text{m}$  的分子板以進行後續研究(如圖 11) [7] [8]。

分子模板合成原理為將模板分子與官能基單體以非共價鍵或是彼此形成共價鍵的錯合物，加入交聯劑進行聚合反應，再將模板分子從聚合高分子內移除，得到具有模板分子孔洞的高分子聚合物，且相對應的官能基也存在孔洞外緣，其孔洞可提取與模板分子相似的分 子結構，並將此分子滯留於高分子聚合物內，使聚合高分子具有辨識分子的能力。同樣地，通過在聚合過程中添加不同的金屬離子，並使用相同的萃取，研磨和過濾過程中，即可形成其它三個分子的模板。



圖 9 聚合完成後尚未萃取之銅分子模板。



圖 10 將銅分子模板利用索氏萃取器進行重金屬移除及萃取，以形成具有專一性之孔洞。



圖 11 銅分子模板經由晾乾後，再經由研磨及篩選過程即可得到對特定重金屬具有高度專一性之分子模板。

## 【實驗 III】

- 一、目的：空白分子模板(如圖 12)製作
- 二、變因：(一)操縱變因：不加入四種重金屬

(二)控制變因：分子模板聚合物粉末

三、步驟：(一) 加入單體三羥甲基丙烷三丙烯酸酯(2.0 M, 3.00 ml)  
溶解於乙醇 (75%, 3.00 ml)中。

(二) 加入起始劑 AIBN(2.0 M, 3.00 g)，並將混和溶液攪拌成均一液相。

(三) 通以氮氣以防止氧化反應之發生。

(四) 置入定溫 60 °C 的烘箱中進行分子聚合反應，時間為 24 小時，  
接著將聚和完成之聚合物(如圖 13)以研鉢研磨成粉末狀(如圖 14)。

(五) 粉碎後之分子模板以 mesh 200 和 mesh 400 的篩網，取得粒徑範圍為 37-74  $\mu\text{m}$   
以及小於 37  $\mu\text{m}$  的分子板以進行後續研究。

製作完成之空白分子模板並不具有特定重金屬之孔洞，預期將出不具有吸附效果

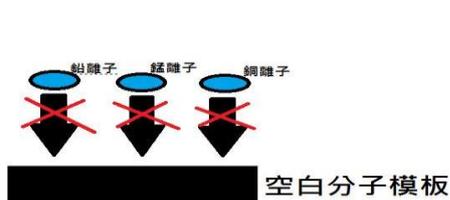


圖 12 空白分子模板示意圖空白分子模板因未加入單體，因此並不會吸附重金屬，也不會影響實驗。

圖 13 聚合完成之空白分子模板。 圖 14 空白分子模板粉末。

#### 【實驗 IV】

一、目的：磁性分子模板製作

二、變因：(一) 操縱變因：不同重金屬溶液

(二) 控制變因：分子模板聚合物粉末及磁顆粒

三、步驟：(一) 將 4 種重金屬(硝酸錳(2.0 M, 1.79 g)、硝酸鉛(2.0 M, 3.31 g)、硝酸鋅(2.0 M, 1.89 g)、硝酸銅(2.0 M, 1.88 g)分別溶解於乙醇 (75%, 3.00 ml) 中。

(二) 加入磁顆粒 1.00 g。

(三) 加入單體三羥甲基丙烷三丙烯酸酯(2.0 M, 3.00 ml)  
溶解於乙醇 (75%, 3.00 ml) 中。

(四) 加入起始劑 AIBN(2.0 M, 3.00 g)，並將混和溶液攪拌成均一液相。

(五) 通以氮氣以防止氧化反應之發生。

(六) 置入定溫 60 度的烘箱中進行當分子聚合反應，時間為 24 小時(如圖 24)，  
再利用索氏萃取器將重金屬移除出來以形成專一性孔洞，接著將聚合完成之聚合物以研鉢研磨成粉末狀(如圖 16)。

(七) 粉碎後之分子模板以 mesh 200 和 mesh 400 的篩網，取得粒徑範圍為 37-74  $\mu\text{m}$   
以及小於 37  $\mu\text{m}$  的分子模板以進行後續研究。

(八) 重複上述實驗步驟分別製作鉛、錳、鋅、鉛磁性分子模板。



圖 15 聚合完成之磁性銅分子模板。



圖 16 萃取完成之磁性銅分子模板粉末。

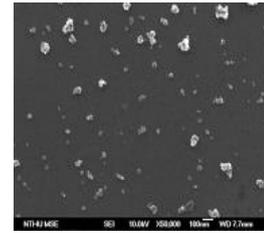


圖 17 SEM 拍攝圖，磁性銅分子模板尺寸為 55  $\mu\text{m}$  粉末

同樣地，通過在聚合過程中添加不同的金屬離子及磁顆粒，並使用相同的萃取，研磨和過濾過程中，即可形成其它三個磁性分子的模板。

### 【實驗 V】

#### 探究相同重量分子模板之吸附效果

一、目的：分子模板吸附效果

二、變因：(一)操縱變因：不同濃度重金屬溶液

(二)控制變因：相同重量分子模板、溫度、時間

三、步驟：(一)分別取出銅分子(0.0030 g)、錳分子模板(0.0072 g)、鋅分子模板(0.0024 g)及鉛分子模板(2.7450 g)。

(二)將銅離子溶液調出 0.0013 M、0.0085 M 及 0.0157 M 等 3 種濃度各 100 毫升以進行吸附；將錳離子溶液調出 0.0001 M、0.0011M 及 0.0036 M 等 3 種濃度各 100 毫升以進行吸附；將鋅離子溶液調出 0.0007 M、0.0067 M 及 0.0127 M 等 3 種濃度各 100 毫升以進行吸附；將鉛離子溶液調出 0.00001 M、0.00015 M 及 0.00050 M 等 3 種濃度各 100 毫升以進行吸附。

(三)將模板加入不同濃度重金屬溶液當中進行吸附，時間為 24 小時。

(四)將模板取出，採樣剩餘重金屬溶液進行檢測，以量測其吸附效果。

### 【實驗 VI】

#### 在相同重金屬溶液下，探究不同克數分子模板之吸附效果

一、目的：分子模板吸附效果

二、變因：(一)操縱變因：不同重量分子模板

(二)控制變因：一定濃度(均為台灣河川中汙染之最高值。)重金屬溶液、溫度、時間

三、步驟：(一)調製四種濃度重金屬溶液 (Cu, 0.0157 M; Mn, 0.0036 M; Zn, 0.0127 M; Pb, 0.00050 M)。

(二)分別取出四種分子模板三種不同重量：銅(0.0015 g, 0.0030 g, 0.0060 g)、錳(0.0035 g, 0.0070 g, 0.0140 g)、鋅(0.0012 g, 0.0024 g, 0.0050 g)、鉛(0.09 g, 0.18 g, 0.36 g)。

(三)將不同克數模板加入重金屬溶液中進行吸附，時間為 24 小時。

(四)將模板取出後，採樣剩餘重金屬溶液進行檢測，以量測其吸附效果。

### 【實驗 VII】

#### 混入二種以上之重金屬，探究分子模板之競爭吸附效果

一、目的：分子模板吸附效果

二、變因：(一)操縱變因：二種以上不同濃度重金屬混合溶液

(二)控制變因：相同重量(銅 0.013 g、錳 0.024 g、鋅 0.012 g、鉛 0.033 g)分子模板、溫度、時間

三、步驟：(一) 將銅離子溶液調出 0.0013 M、0.0085 M 及 0.0157 M 等 3 種濃度以進行吸附；將錳離子溶液調出 0.0001 M、0.0011M 及 0.0036 M 等 3 種濃度以進行吸附；將鋅離子溶液調出 0.0007 M、0.0067 M 及 0.0127 M 等 3 種濃度以進行吸附；將鉛離子溶液調出 0.00001 M、0.00015 M 及 0.00050 M 等 3 種濃度以進行吸附。

(二)依照列組合一共有 16 種實驗，例如：先將銅分子模板放入銅離子溶液當中，再依序加入錳離子溶液、鋅離子溶液、鉛離子溶液進行混合；將模板加入二種以上重金屬溶液當中進行吸附，時間為 24 小時。

(三)將模板取出，採樣剩餘重金屬溶液進行檢測，以量測其吸附效果。

### 【實驗 VIII】

#### 探究分子模板脫附效果

一、目的：分子模板脫附效果

二、變因：(一)操縱變因：脫附液(HCl)pH 值

(二)控制變因：相同重量分子模板、溫度、時間

三、步驟：(一)將吸附重金屬後的模板浸泡在去離子水中，再加入 pH =4 至 pH 6 的鹽酸加入以調製出 pH4-6 之脫附液以進行脫附。

(二)將模板取出，採樣剩餘重金屬溶液進行檢測，測量其脫附效果。

## 陸、研究結果

### 一、金屬溶液吸附檢量線

#### (一)銅、錳、鋅、鉛主要吸收值(波長)檢量線

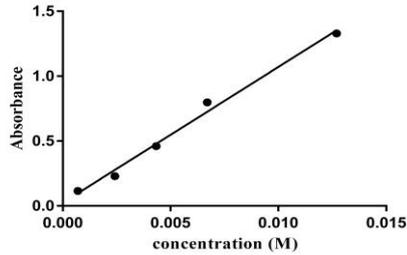


圖 18：銅主要吸收值(波長)檢量線  
(波長 325 nm)

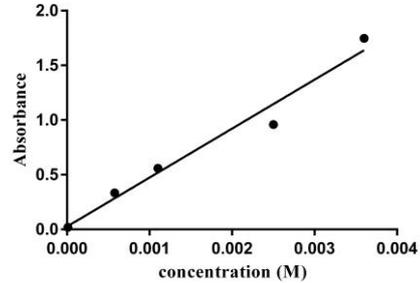


圖 19：錳主要吸收值(波長)檢量  
(波長 280 nm)

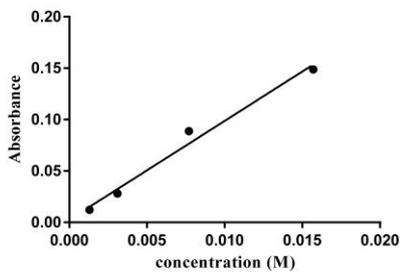


圖 20：鋅主要吸收值(波長)檢量線  
(波長 214 nm)

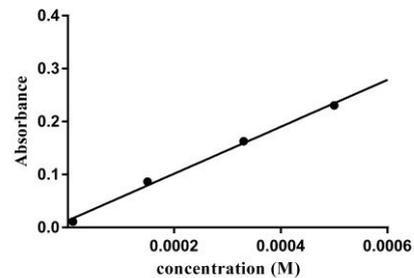


圖 21：鉛主要吸收值(波長)檢量線  
(283.3 nm)

銅離子溶液濃度分別為 0.0013 M、0.0031 M、0.0085 M 及 0.0157 M，經原子吸收光譜儀測量，銅波長在 324.5 nm 時吸收值為最高值，三種不同銅離子溶液之檢量線如圖 18 所示。經由線性迴歸後得到檢量線。

錳離子溶液濃度分別為 0.0001 M、0.0006、0.0011 M、0.0025 及 0.0036 M，經原子吸收光譜儀測量，錳波長在 279.5 nm 時吸收值為最高值，三種不同錳離子溶液之檢量線如圖 19 所示。經由線性迴歸後得到檢量線。

鋅離子溶液濃度分別為 0.0007 M、0.0024 M、0.0043 M、0.0067 M 及 0.0127 M，經原子吸收光譜儀測量，鋅波長在 213.9 nm 時吸收值為最高值，三種不同鋅離子溶液之檢量線如圖 20 所示。經由線性迴歸後得到檢量線。

鉛離子溶液濃度分別為 0.00001 M、0.00015 M、0.00033 M 及 0.00050 M，經原子吸收光譜儀測量，鉛波長在 283.3 nm 時吸收值為最高值，三種不同鉛離子溶液之檢量線如圖 21 所示。經由線性迴歸後得到檢量線。

## 二、分子模板在聚合中之反應速率

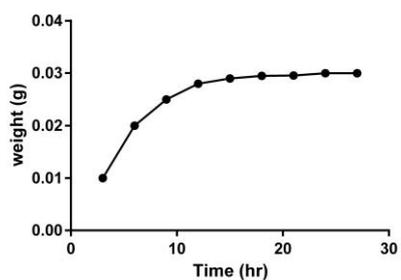


圖 22 銅分子模板在聚合中之反應速率

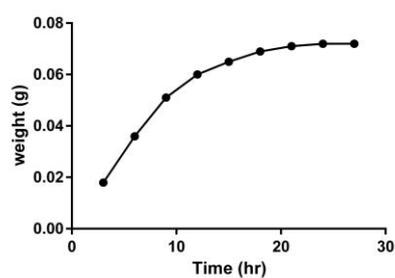


圖 23 錳分子模板在聚合中之反應速率

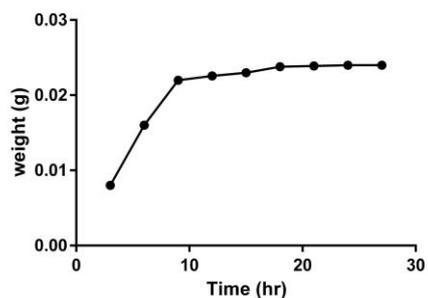


圖 24 鋅分子模板在聚合中之反應速率

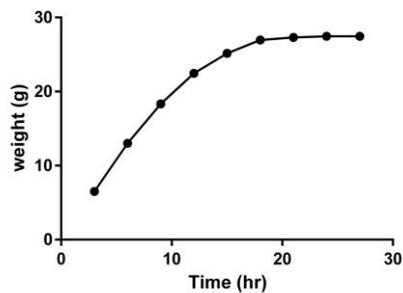


圖 25 鉛分子模板在聚合中之反應速率

由圖 22-25 顯示，分子模板在聚合過程中，當聚合到 12 hr 時，可明顯從肉眼觀察出已變為固體。我們藉由重量的量測來測其反應速率，在 3-6 hr 時反應速率為最快，其次為 6-9 hr，再來為 9-12 hr，在 12 hr 之後曲線趨於平緩。最後在 24 hr 之後達到平衡，可得知聚合反應已完成。

### 三、空白分子模板吸附效果

表 1 空白分子模板吸附效果

| 離子原始濃度                     | 吸附後離子濃度   | 吸附率(%) |
|----------------------------|-----------|--------|
| Cu <sup>2+</sup> 0.0157 M  | 0.0157 M  | 0.00%  |
| Mn <sup>2+</sup> 0.0036 M  | 0.0036 M  | 0.00%  |
| Pb <sup>2+</sup> 0.00050 M | 0.00050 M | 0.00%  |
| Zn <sup>2+</sup> 0.0127 M  | 0.0127 M  | 0.00%  |

為瞭解分子模板專一性，我們首先測試空白模板是否會影響實驗結果。在製作空白模板時，我們並未放入銅、鋅、錳、鉛四種重金屬，因此不應具有吸附效果。而從表 1 可得知空白模板因未放入四種重金屬，使其產生特殊性專一孔洞，因此並不會改變吸收值。又由此可證明高分子聚合物之非專一性吸附，並不會影響實驗結果，證明本研究之重金屬分子模板具有高專一性。

### 四、分子模板專一性吸附效果

為瞭解分子模板之專一性，我們測試四種分子模板分別在其餘三種重金屬溶液下的吸附效果。在調製完四種重金屬溶液後，我們將四種分子模板分別加入其餘三種重金屬溶液，發現模板僅 1% 吸附(表 2-5)。又由此可證明高分子聚合物之非專一性吸附，並不會影響實驗結果，證明本研究之重金屬分子模板具有高專一性。

表 2 鋅分子模板 Cu<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup> 吸附效果

| 離子原始濃度                    | 吸附後離子濃度    | 吸附率(%) |
|---------------------------|------------|--------|
| Cu <sup>2+</sup> 0.007 M  | 0.00027 M  | 0.03%  |
| Mn <sup>2+</sup> 0.0008 M | 0.000031 M | 0.03%  |
| Pb <sup>2+</sup> 0.0011 M | 0.00004 M  | 0.04%  |

表 3 鉛分子模板 Cu<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup> 吸附效果

| 離子原始濃度                    | 吸附後離子濃度   | 吸附率(%) |
|---------------------------|-----------|--------|
| Cu <sup>2+</sup> 0.007 M  | 0.00077 M | 1.00%  |
| Mn <sup>2+</sup> 0.0008 M | 0.00004 M | 0.05%  |
| Zn <sup>2+</sup> 0.0055 M | 0.00003 M | 0.01%  |

表 4 銅分子模板 Zn<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup> 吸附效果

| 離子原始濃度                    | 吸附後離子濃度   | 吸附率(%) |
|---------------------------|-----------|--------|
| Zn <sup>2+</sup> 0.0055 M | 0.0004 M  | 0.07%  |
| Mn <sup>2+</sup> 0.0008 M | 0.00006 M | 0.08%  |
| Pb <sup>2+</sup> 0.0011 M | 0.0001 M  | 0.09%  |

表 5 錳分子模板  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  吸附效果

| 離子原始濃度                    | 吸附後離子濃度   | 吸附率(%) |
|---------------------------|-----------|--------|
| $\text{Cu}^{2+}$ 0.007 M  | 0.00057 M | 0.08%  |
| $\text{Zn}^{2+}$ 0.0055 M | 0.00017 M | 0.03%  |
| $\text{Pb}^{2+}$ 0.0011 M | 0.00008 M | 0.07%  |

## 五、重金屬分子模板吸附效果

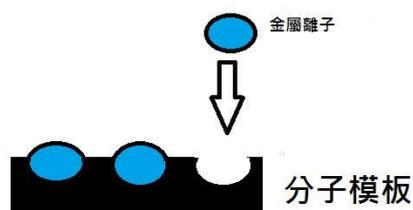


圖 26 分子模板示意圖，分子模板因為在聚合過程中加入重金屬，因此並會吸附特定重金屬。

### (一) 銅分子模板之吸附效果

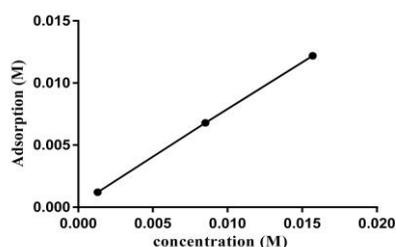


圖 27 在相同分子模板克數下，於不同銅離子濃度下測量。

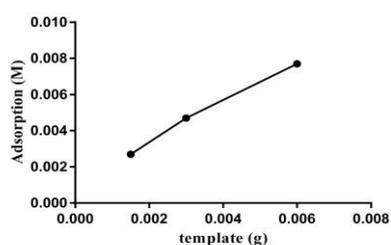


圖 28 在相同銅離子濃度下測量，於不同克數分子模板下測量。

實驗數據重複進行 3 次顯示，在相同分子模板重量(0.003 g)下，於不同銅離子濃度下，吸附值隨著銅離子溶液濃度增加而增加，因加入模板克數一樣，使得分子模板吸附重金屬量質逐漸趨近飽和，最後呈現平緩之趨勢。當銅離子溶液在 0.0013 M 時，銅分子模板吸附量為 0.0012 M，吸附率為 92%；當銅離子溶液在 0.0085 M 時，分子模板吸附量為 0.0068 M，吸附率為 80%；當銅離子溶液在 0.0157 M 時，分子模板吸附量為 0.0122 M，吸附率為 78%(如圖 27 所示)。另外，在相同銅離子濃度(0.0157 M)下，發現當分子模板克數越多時，吸附值也隨之上升，得知當添加越多分子模板時，其銅離子吸附值也隨之提高(如圖 28 所示)。

### (二) 錳分子模板之吸附效果

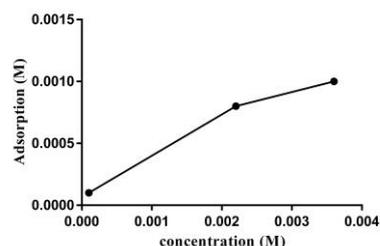


圖 29 在相同分子模板克數下，於不同錳離子濃度下測量。

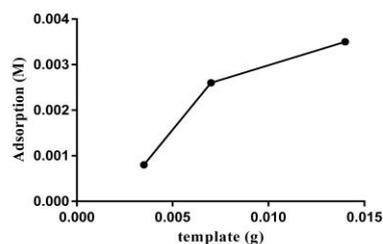


圖 30 在相同錳離子濃度下測量，於不同克數分子模板下測量。

實驗數據重複進行 3 次顯示，在相同分子模板重量(0.0072 g)下，於不同錳離子濃度，吸附值隨著錳離子溶液濃度增加而增加，因加入模板克數一樣，使得分子模板吸附重金屬量質逐漸趨近飽和，最後呈現平緩之趨勢。(如圖 29 所示)。當錳離子溶液在 0.0001 M 時，分子模板吸附值為 0.000095 M，吸附率為 95%；當錳離子溶液在 0.0011M 時，分子模板吸附值為 0.00097 M，吸附率為 88%；當錳離子溶液在 0.0036 M 時，分子模板吸附值為 0.00288 M，吸附率則為 80%。另外，在相同錳離子濃度(0.0036 M)下，於不同克數分子模板下測量，發現當分子模板克數越多時，吸附值隨之上升，得知當添加越多分子模板時，其錳離子吸附值也隨之提高(如圖 30 所示)。

### (三) 鋅分子模板之吸附效果

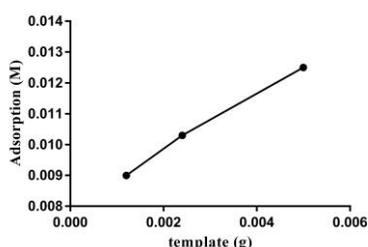


圖 31 在相同分子模板克數下，於不同鋅離子濃度下測量。

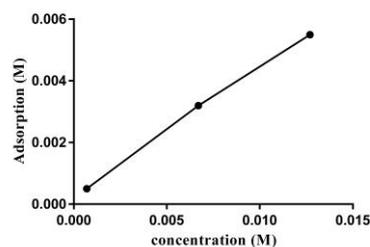


圖 32 在相同鋅離子濃度下測量，於不同分子模板克數下測量。

實驗數據重複進行 3 次顯示，在相同分子模板重量(0.0024 g)下，於不同鋅離子濃度下，吸附值隨著濃度提高而增加(如圖 31 所示)。當鋅離子溶液在 0.0007 M 時，分子模板吸附量為 0.00053 M，吸附率為 75%；當鋅離子溶液在 0.0067 M 時，分子模板吸附量為 0.0047 M，吸附率為 70%；當鋅離子溶液在 0.0127 M 時，分子模板吸附量為 0.0083 M，吸附率為 53%，因加入模板克數一樣，使得分子模板吸附重金屬量質逐漸趨近飽和，最後呈現平緩之趨勢。而在相同鋅離子濃度(0.0127 M)下測量，發現當分子模板克數越多時，鋅離子吸附值隨之上升，得知當添加越多分子模板時，其鋅離子吸附值也隨之提高(如圖 32 所示)。

### (四) 鉛分子模板之吸附效果

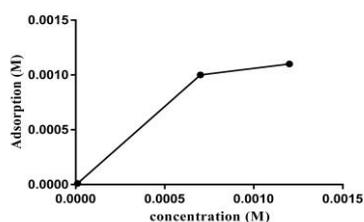


圖 33 在相同分子模板克數下，於不同鉛離子濃度下測量。

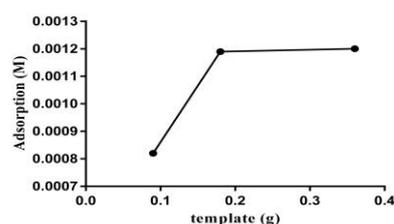


圖 34 在相同鉛離子濃度下測量，於不同分子模板克數下測量。

實驗數據重複進行 3 次顯示，在相同分子模板重量(2.745 g)下，於不同鉛離子濃度，吸附值隨著濃度提高而增加(如圖 33 所示)。當鉛離子溶液在 0.00001 M 時，分子模板吸附量為 0.0000095 M，吸附率為 95%；在 0.00015 M 時，分子模板吸附量為 0.00012 M，吸附率為 80%；在 0.00050 M 時，分子模板吸附量為 0.00039 M，吸附率為 77%，因加入模板克

數一樣，使得分子模板吸附重金屬量質逐漸趨近飽和，最後呈現平緩之趨勢。另外，在相同鉛離子濃度(0.00050 M)下測量，發現當分子模板克數越多時，其鉛離子吸附值隨之提高，得知當添加越多分子模板，其鉛離子吸附值因加入之分子模板重量(2.745 g)已足夠吸附我們所調製之鉛重金屬溶液，因此在重量(5.49 g)並不會隨加入重量越多而上升(如圖 34 所示)。

## 六、分子模板競爭吸附效果

### (一)銅、錳競爭吸附

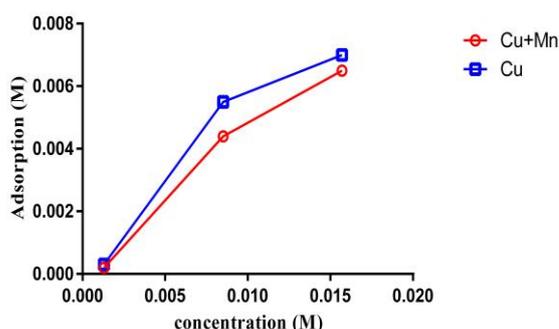


圖 35 銅、錳競爭吸附與銅之比較

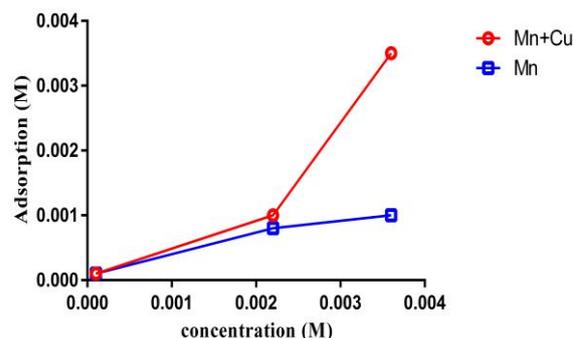


圖 36 銅、錳競爭吸附與錳之比較

因為在河川可能存在多種金屬離子，本研究進一步研究銅和錳離子的競爭吸附並比較單一重金屬離子（銅和錳離子）使用單一的分子模板（銅或錳分子模板）之效應。如圖 35 中所示，當銅離子和錳離子同時存在的情況相比，出人意料的是，競爭吸附下假使同時銅離子和錳離子同時存在時，銅分子模板的吸附量可能下降約 20-30%。而錳分子模板的吸附量不但不會受到影響，反而錳分子模板的吸附量是增加（圖 36）。產生此現象之原因為錳的活性比銅更高。因此，它增加了硝酸錳在水中的解離能力和降低的硝酸銅在水中的解離能力 [9-11]。錳分子模板之吸附因此而增加。相反地，導致了銅分子模板的吸附量因而減少。類似的趨勢在以下之實驗均有觀察到。總結以下表中的結果來做說明。

### (二) 銅、鉛競爭吸附

表 6 銅、鉛競爭吸附之比較

| [Cu <sup>2+</sup> ] | 單一重金屬吸收後 Cu <sup>2+</sup> 濃度 | 競爭吸附後 Cu <sup>2+</sup> 濃度 | 增加/減少百分比 | [Pb <sup>2+</sup> ] | 單一重金屬吸收後 Pb <sup>2+</sup> 濃度 | 競爭吸附後 Pb <sup>2+</sup> 濃度 | 增加/減少百分比 |
|---------------------|------------------------------|---------------------------|----------|---------------------|------------------------------|---------------------------|----------|
| 0.0013 M            | 0.0012 M                     | 0.0010 M                  | -16 %    | 0.00001 M           | 0.0000095 M                  | 0.00001 M                 | +0.05 %  |
| 0.0085 M            | 0.0068 M                     | 0.0045 M                  | -24 %    | 0.00015 M           | 0.00012 M                    | 0.00014 M                 | +13 %    |
| 0.0157              | 0.0122 M                     | 0.0055 M                  | -43 %    | 0.00050 M           | 0.00039 M                    | 0.00044 M                 | +10 %    |

本研究進一步研究銅和錳離子的競爭吸附並比較單一重金屬離子（銅離子和鉛離子）使用單一的分子模板（銅或鉛分子模板）之效應。如表 6 所示，當銅離子和鉛離子同時存在的情況相比，出人意料的是，競爭吸附下假使同時銅離子和鉛離子同時存在時，銅分子模板的吸附量可能下降約 16-43%。而鉛分子模板的吸附量不但不會受到影響，反而鉛分子模板的吸附量是增加（表 6）。產生此現象之原因為鉛的活性比銅更高。因此，它增加了硝

酸鉛在水中的解離能力和降低的硝酸銅在水中的解離能力 [9-11]。鉛分子模板之吸附因此而增加。相反地，導致了銅分子模板的吸附量因而減少。

### (三)銅、鋅競爭吸附

表 7 銅、鋅競爭吸附之比較

| [ Cu <sup>2+</sup> ] | 單一重金屬吸收後 Cu <sup>2+</sup> 濃度 | 競爭吸附後 Cu <sup>2+</sup> 濃度 | 增加/減少百分比 | [ Zn <sup>2+</sup> ] | 單一重金屬吸收後 Zn <sup>2+</sup> 濃度 | 競爭吸附後 Zn <sup>2+</sup> 濃度 | 增加/減少百分比 |
|----------------------|------------------------------|---------------------------|----------|----------------------|------------------------------|---------------------------|----------|
| 0.0013 M             | 0.0012 M                     | 0.0003 M                  | -70 %    | 0.0007 M             | 0.00053 M                    | 0.0006 M                  | +7 %     |
| 0.0085 M             | 0.0068 M                     | 0.0040 M                  | -33 %    | 0.0067 M             | 0.0047 M                     | 0.0057 M                  | +5 %     |
| 0.0157               | 0.0122 M                     | 0.0065 M                  | -37 %    | 0.0127 M             | 0.0083 M                     | 0.00112 M                 | +10 %    |

本研究進一步研究銅和鋅離子的競爭吸附並比較單一重金屬離子（銅離子和鋅離子）使用單一的分子模板（銅或鋅分子模板）之效應。如表 7 所示，當銅離子和鋅離子同時存在的情況相比，出人意料的是，競爭吸附下假使同時銅離子和鋅離子同時存在時，銅分子模板的吸附量可能下降約約 37-70%。而鋅分子模板的吸附量不但不會受到影響，反而鋅分子模板的吸附量是增加（大約 5-10%）（表 7）。產生此現象之原因為鋅的活性比銅更高。因此，它增加了硝酸鋅在水中的解離能力和降低的硝酸銅在水中的解離能力 [9-11]。鋅分子模板之吸附因此而增加。相反地，導致了銅分子模板的吸附量因而減少。

### (四)錳、鋅競爭吸附

表 8 錳、鋅競爭吸附之比較

| [ Mn <sup>2+</sup> ] | 單一重金屬吸收後 Mn <sup>2+</sup> 濃度 | 競爭吸附後 Mn <sup>2+</sup> 濃度 | 增加/減少百分比 | [ Zn <sup>2+</sup> ] | 單一重金屬吸收後 Zn <sup>2+</sup> 濃度 | 競爭吸附後 Zn <sup>2+</sup> 濃度 | 增加/減少百分比 |
|----------------------|------------------------------|---------------------------|----------|----------------------|------------------------------|---------------------------|----------|
| 0.0001 M             | 0.000095 M                   | 0.0001 M                  | +0.05 %  | 0.0007 M             | 0.00053 M                    | 0.0001 M                  | -64 %    |
| 0.0011 M             | 0.00097 M                    | 0.0011 M                  | +12 %    | 0.0067 M             | 0.0047 M                     | 0.0030 M                  | -22 %    |
| 0.0036 M             | 0.00288 M                    | 0.0030 M                  | +3 %     | 0.0127 M             | 0.0083 M                     | 0.0050 M                  | -14 %    |

本研究進一步研究鋅和錳離子的競爭吸附並比較單一重金屬離子（鋅離子和錳離子）使用單一的分子模板（鋅或錳分子模板）之效應。如表 8 所示，當鋅離子和錳離子同時存在的情況相比，出人意料的是，競爭吸附下假使鋅離子和錳離子同時存在時，鋅分子模板的吸附量可能下降約 14-64%。而錳分子模板的吸附量不但不會受到影響，反而錳分子模板的吸附量是增加（高達 12%）（表 8）。產生此現象之原因為錳的活性比銅更高。因此，它增加了硝酸錳在水中的解離能力和降低的硝酸銅在水中的解離能力 [9-11]。錳分子模板之吸附因此而增加。相反地，導致了銅分子模板的吸附量因而減少。

### (五) 錳、鉛競爭吸附

表 9 錳、鉛競爭吸附之比較

| [Mn <sup>2+</sup> ] | 單一重金屬吸收後 Mn <sup>2+</sup> 濃度 | 競爭吸附後 Mn <sup>2+</sup> 濃度 | 增加/減少百分比 | [Pb <sup>2+</sup> ] | 單一重金屬吸收後 Pb <sup>2+</sup> 濃度 | 競爭吸附後 Pb <sup>2+</sup> 濃度 | 增加/減少百分比 |
|---------------------|------------------------------|---------------------------|----------|---------------------|------------------------------|---------------------------|----------|
| 0.0001 M            | 0.000095 M                   | 0.0001 M                  | +0.05 %  | 0.00001 M           | 0.0000095 M                  | 0 M                       | -95 %    |
| 0.0011 M            | 0.00097 M                    | 0.0011 M                  | +12 %    | 0.00015 M           | 0.00012 M                    | 0.00010 M                 | -23 %    |
| 0.0036 M            | 0.00288 M                    | 0.0032 M                  | +9 %     | 0.00050 M           | 0.00039 M                    | 0.00011 M                 | -56 %    |

本研究進一步研究鋅和錳離子的競爭吸附並比較單一重金屬離子（鉛離子和錳離子）使用單一的分子模板（鉛或錳分子模板）之效應。如表 9 所示，當鉛離子和錳離子同時存在的情況相比，出人意料的是，競爭吸附下假使鉛離子和錳離子同時存在時，鉛分子模板的吸附量可能下降約 23-95%。而錳分子模板的吸附量不但不會受到影響，反而錳分子模板的吸附量是增加（高達 12%）（表 9）。產生此現象之原因為錳的活性比鉛更高。因此，它增加了硝酸錳在水中的解離能力和降低的硝酸鉛在水中的解離能力 [9-11]。錳分子模板之吸附因此而增加。相反地，導致了鉛分子模板的吸附量因而減少。

### (六) 鋅、鉛競爭吸附

表 10 鋅、鉛競爭吸附之比較

| [Zn <sup>2+</sup> ] | 單一重金屬吸收後 Zn <sup>2+</sup> 濃度 | 競爭吸附後 Zn <sup>2+</sup> 濃度 | 增加/減少百分比 | [Pb <sup>2+</sup> ] | 單一重金屬吸收後 Pb <sup>2+</sup> 濃度 | 競爭吸附後 Pb <sup>2+</sup> 濃度 | 增加/減少百分比 |
|---------------------|------------------------------|---------------------------|----------|---------------------|------------------------------|---------------------------|----------|
| 0.0007 M            | 0.00053 M                    | 0.0007 M                  | +12 %    | 0.00001 M           | 0.0000095 M                  | 0.0000093 M               | -0.02 %  |
| 0.0067 M            | 0.0047 M                     | 0.0057 M                  | +15 %    | 0.00015 M           | 0.00012 M                    | 0.00009 M                 | -20 %    |
| 0.0127 M            | 0.0083 M                     | 0.0098 M                  | +24 %    | 0.00050 M           | 0.00039 M                    | 0.00010 M                 | -58 %    |

本研究進一步研究鋅和錳離子的競爭吸附並比較單一重金屬離子（鉛離子和鋅離子）使用單一的分子模板（鉛或鋅分子模板）之效應。如表 10 所示，當鉛離子和鋅離子同時存在的情況相比，出人意料的是，競爭吸附下假使鉛離子和鋅離子同時存在時，鉛分子模板的吸附量可能下降(最高達 58%)。鋅分子模板的吸附量不但不會受到影響，反而鋅分子模板的吸附量是增加（約 12-24%）（表 10）。產生此現象之原因為鋅的活性比鉛更高。因此，它增加了硝酸鋅在水中的解離能力和降低的硝酸鉛在水中的解離能力 [9-11]。鋅分子模板之吸附因此而增加。相反地，導致了鉛分子模板的吸附量因而減少。

### (七) 銅、錳、鋅競爭吸附

表 11 銅、錳、鋅競爭吸附之比較

| [Cu <sup>2+</sup> ] | 單一重金屬吸收後 | 競爭吸附後 Cu <sup>2+</sup> 濃 | 增加/減少 | [Zn <sup>2+</sup> ] | 單一重金屬吸收後 | 競爭吸附後 Zn <sup>2+</sup> 濃 | 增加/減少 |
|---------------------|----------|--------------------------|-------|---------------------|----------|--------------------------|-------|
|---------------------|----------|--------------------------|-------|---------------------|----------|--------------------------|-------|

|          | Cu <sup>2+</sup> 濃度 | 度        | 百分比   |          | Zn <sup>2+</sup> 濃度 | 度        | 百分比   |
|----------|---------------------|----------|-------|----------|---------------------|----------|-------|
| 0.0013 M | 0.0012 M            | 0.0002 M | -77 % | 0.0007 M | 0.00053 M           | 0.0007 M | +12 % |
| 0.0085 M | 0.0068 M            | 0.0030 M | -45 % | 0.0067 M | 0.0047 M            | 0.0050 M | +5 %  |
| 0.0157   | 0.0122 M            | 0.0055 M | -45 % | 0.0127 M | 0.0083 M            | 0.0097 M | +23 % |

| { Mn <sup>2+</sup> } | 單一重金屬吸收後 Mn <sup>2+</sup> 濃度 | 競爭吸附後 Mn <sup>2+</sup> 濃度 | 增加/減少百分比 |
|----------------------|------------------------------|---------------------------|----------|
| 0.0001 M             | 0.000095 M                   | 0.0001 M                  | +0.05 %  |
| 0.0011 M             | 0.00097 M                    | 0.0010 M                  | +2 %     |
| 0.0036 M             | 0.00288 M                    | 0.0035 M                  | +17 %    |

本研究進一步研究銅、錳和鋅離子的競爭吸附並比較單一重金屬離子（銅、錳和鋅離子）使用單一的分子模板（銅、錳或鋅分子模板）之效應。如表 11 所示，競爭吸附下假使銅、錳和鋅離子同時存在時，銅分子模板的吸附量可能下降(約 45-77%)。如果其它離子存在時，鋅分子模板的吸附量增加（約 12-24%）(表 11)。同樣地，競爭吸附下如果其它 2 種離子存在時，錳分子模板的吸附量亦增加（高達 17%）(表 11)。再次證明產生此現象之原因為鋅和錳的活性比銅更高。因此，在競爭吸附下，增加了硝酸鋅和硝酸錳的解離能力和降低的硝酸銅在水中的解離能力。鋅和錳分子模板吸附量因而增加。相反的，銅分子模板的吸附量則是減少。

#### (八)錳、鋅、鉛競爭吸附

表 12 錳、鋅、鉛競爭吸附之比較

| { Mn <sup>2+</sup> } | 單一重金屬吸收後 Mn <sup>2+</sup> 濃度 | 競爭吸附後 Mn <sup>2+</sup> 濃度 | 增加/減少百分比 | { Zn <sup>2+</sup> } | 單一重金屬吸收後 Zn <sup>2+</sup> 濃度 | 競爭吸附後 Zn <sup>2+</sup> 濃度 | 增加/減少百分比 |
|----------------------|------------------------------|---------------------------|----------|----------------------|------------------------------|---------------------------|----------|
| 0.0001 M             | 0.000095 M                   | 0.0001 M                  | +0.05 %  | 0.0007 M             | 0.00053 M                    | 0.0006 M                  | +8 %     |
| 0.0011 M             | 0.00097 M                    | 0.0011 M                  | +12 %    | 0.0067 M             | 0.0047 M                     | 0.0054 M                  | +11 %    |
| 0.0036 M             | 0.00288 M                    | 0.0031 M                  | +6 %     | 0.0127 M             | 0.0083 M                     | 0.0115 M                  | +38 %    |

| { Pb <sup>2+</sup> } | 單一重金屬吸收後 Pb <sup>2+</sup> 濃度 | 競爭吸附後 Pb <sup>2+</sup> 濃度 | 增加/減少百分比 |
|----------------------|------------------------------|---------------------------|----------|
| 0.00001 M            | 0.0000095 M                  | 0.00001 M                 | +0.05 %  |
| 0.00015 M            | 0.00012 M                    | 0.00008 M                 | -27 %    |
| 0.00050 M            | 0.00039 M                    | 0.00010 M                 | -58 %    |

本研究進一步研究錳、鋅和鉛離子的競爭吸附並比較單一重金屬離子（錳、鋅和鉛離子）使用單一的分子模板（錳、鋅或鉛分子模板）之效應。如表 12 所示，競爭吸附下假使錳、鋅和鉛離子同時存在時，鉛分子模板的吸附量可能下降(最高達 58%)。如果其它離子存在時，錳分子模板的吸附量增加（約 12%）(表 12)。同樣地，競爭吸附下如果其它 2 種離子存在時，鋅分子模板的吸附量亦增加（高達 38%）(表 12)。再次證明產生此現象之原因為鋅和錳的活性比鉛更高。因此，在競爭吸附下，增加了硝酸鋅和硝酸錳的解離能力和降低

的硝酸鉛在水中的解離能力。鋅和錳分子模板吸附量因而增加。相反的，鉛分子模板的吸附量則是減少。

### (九)銅、鋅、鉛競爭吸附

表 13 銅、鋅、鉛競爭吸附之比較

| [ Cu <sup>2+</sup> ] | 單一重金屬吸收後 Cu 濃度 | 競爭吸附後 Cu 濃度 | 增加/減少百分比 | [ Zn <sup>2+</sup> ] | 單一重金屬吸收後 Zn <sup>2+</sup> 濃度 | 競爭吸附後 Zn <sup>2+</sup> 濃度 | 增加/減少百分比 |
|----------------------|----------------|-------------|----------|----------------------|------------------------------|---------------------------|----------|
| 0.0013 M             | 0.0012 M       | 0.0003 M    | -69 %    | 0.0007 M             | 0.00057 M                    | 0.0007 M                  | +12 %    |
| 0.0085 M             | 0.0068 M       | 0.0044 M    | -28 %    | 0.0067 M             | 0.0047 M                     | 0.0057 M                  | +15 %    |
| 0.0157 M             | 0.0122 M       | 0.0065 M    | -37 %    | 0.0127 M             | 0.0083 M                     | 0.0117 M                  | +39 %    |

| [ Pb <sup>2+</sup> ] | 單一重金屬吸收後 Pb <sup>2+</sup> 濃度 | 競爭吸附後 Pb <sup>2+</sup> 濃度 | 增加/減少百分比 |
|----------------------|------------------------------|---------------------------|----------|
| 0.00001 M            | 0.0000095 M                  | 0.00000 M                 | -0.05 %  |
| 0.00015 M            | 0.00012 M                    | 0.00013 M                 | +7 %     |
| 0.00050 M            | 0.00039 M                    | 0.00042 M                 | +6 %     |

本研究進一步研究銅、鋅和鉛離子的競爭吸附並比較單一重金屬離子（銅、鋅和鉛離子）使用單一的分子模板（銅、鋅或鉛分子模板）之效應。如表 13 所示，競爭吸附下假使銅、鋅和鉛離子同時存在時，銅分子模板的吸附量可能下降(28-69%)。如果其它離子存在時，鋅分子模板的吸附量增加（12-39%）（表 13）。同樣地，競爭吸附下如果其它 2 種離子存在時，鉛分子模板的吸附量亦增加（高達 7%）（表 13）。再次證明產生此現象之原因為鋅和鉛的活性比銅更高。因此，在競爭吸附下，增加了硝酸鋅和硝酸鉛的解離能力和降低的硝酸鉛在水中的解離能力。鋅和鉛分子模板吸附量因而增加。相反的，銅分子模板的吸附量則是減少。

### (十)銅、錳、鉛競爭吸附

表 14 銅、錳、鉛競爭吸附之比較

| [ Cu <sup>2+</sup> ] | 單一重金屬吸收後 Cu <sup>2+</sup> 濃度 | 競爭吸附後 Cu <sup>2+</sup> 濃度 | 增加/減少百分比 | [ Mn <sup>2+</sup> ] | 單一重金屬吸收後 Mn <sup>2+</sup> 濃度 | 競爭吸附後 Mn <sup>2+</sup> 濃度 | 增加/減少百分比 |
|----------------------|------------------------------|---------------------------|----------|----------------------|------------------------------|---------------------------|----------|
| 0.0013 M             | 0.0012 M                     | 0.0002 M                  | -77 %    | 0.0001 M             | 0.000095 M                   | 0.0001 M                  | +0.05 %  |
| 0.0085 M             | 0.0068 M                     | 0.0053 M                  | -17 %    | 0.0011 M             | 0.00097 M                    | 0.0011 M                  | +12 %    |
| 0.0157 M             | 0.0122 M                     | 0.0060 M                  | -40 %    | 0.0036 M             | 0.00288 M                    | 0.0035 M                  | +17 %    |

| [ Pb <sup>2+</sup> ] | 單一重金屬吸收後 Pb <sup>2+</sup> 濃度 | 競爭吸附後 Pb <sup>2+</sup> 濃度 | 增加/減少百分比 |
|----------------------|------------------------------|---------------------------|----------|
| 0.00001 M            | 0.0000095 M                  | 0.00001 M                 | +0.05 %  |

|           |           |           |       |
|-----------|-----------|-----------|-------|
| 0.00015 M | 0.00012 M | 0.00014 M | +13 % |
| 0.00050 M | 0.00039 M | 0.00045 M | +12 % |

本研究進一步研究銅、錳和鉛離子的競爭吸附並比較單一重金屬離子（銅、錳和鉛離子）使用單一的分子模板（銅、錳或鉛分子模板）之效應。如表 14 所示，競爭吸附下假使銅、錳和鉛離子同時存在時，銅分子模板的吸附量可能下降(17-77%)。如果其它離子存在時，錳分子模板的吸附量增加（高達 17%）（表 14）。同樣地，競爭吸附下如果其它 2 種離子存在時，鉛分子模板的吸附量亦增加（高達 13%）（表 14）。再次證明產生此現象之原因為錳和鉛的活性比銅更高。因此，在競爭吸附下，增加了硝酸錳和硝酸鉛的解離能力和降低的硝酸銅在水中的解離能力。錳和鉛分子模板吸附量因而增加。相反的，銅分子模板的吸附量則是減少。

### (十一)銅、錳、鋅、鉛競爭吸附

表 15 銅、錳、鋅、鉛競爭吸附之比較

| [ Cu <sup>2+</sup> ] | 單一重金屬吸收後 Cu <sup>2+</sup> 濃度 | 競爭吸附後 Cu <sup>2+</sup> 濃度 | 增加/減少百分比 | [ Mn <sup>2+</sup> ] | 單一重金屬吸收後 Mn <sup>2+</sup> 濃度 | 競爭吸附後 Mn <sup>2+</sup> 濃度 | 增加/減少百分比 |
|----------------------|------------------------------|---------------------------|----------|----------------------|------------------------------|---------------------------|----------|
| 0.0013 M             | 0.0012 M                     | 0.0003 M                  | -77 %    | 0.0001 M             | 0.000095 M                   | 0.0001 M                  | +0.05 %  |
| 0.0085 M             | 0.0068 M                     | 0.0041 M                  | -20 %    | 0.0011 M             | 0.00097 M                    | 0.0010 M                  | +3 %     |
| 0.0157 M             | 0.0122 M                     | 0.0050 M                  | -47 %    | 0.0036 M             | 0.00288 M                    | 0.0035 M                  | +17 %    |

| [ Zn <sup>2+</sup> ] | 單一重金屬吸收 Zn <sup>2+</sup> 後濃度 | 競爭吸附後 Zn <sup>2+</sup> 濃度 | 增加/減少百分比 | [ Pb <sup>2+</sup> ] | 單一重金屬吸收後 Pb <sup>2+</sup> 濃度 | 競爭吸附後 Pb <sup>2+</sup> 濃度 | 增加/減少百分比 |
|----------------------|------------------------------|---------------------------|----------|----------------------|------------------------------|---------------------------|----------|
| 0.0007 M             | 0.00057 M                    | 0.0007 M                  | +12 %    | 0.00001 M            | 0.0000095 M                  | 0.00000 M                 | -0.05 %  |
| 0.0067 M             | 0.0047 M                     | 0.0050 M                  | +5 %     | 0.00015 M            | 0.00012 M                    | 0.00012 M                 | +0 %     |
| 0.0127 M             | 0.0083 M                     | 0.0115 M                  | +13 %    | 0.00050 M            | 0.00039 M                    | 0.00039 M                 | +0 %     |

本研究進一步研究銅、錳、鋅和鉛離子的競爭吸附並比較單一重金屬離子（銅、錳、鋅和鉛離子）使用單一的分子模板（銅、錳、鋅或鉛分子模板）之效應。如表 15 所示，競爭吸附下假使銅、錳、鋅和鉛離子同時存在時，銅分子模板的吸附量可能下降(20-77%)。如果其它離子存在時，錳分子模板的吸附量增加（高達 17%）（表 15）。同樣地，競爭吸附下如果其它 3 種離子存在時，鋅分子模板的吸附量亦增加（高達 13%）（表 15）。然而，鉛分子模板的吸附量無顯著上升或下降。產生此現象之原因為錳和鋅的活性比鉛和銅更高。因此，在競爭吸附下，增加了硝酸錳和硝酸鉛的解離能力和降低的硝酸銅在水中的解離能力。錳和鋅分子模板吸附量因而增加。相反的，銅分子模板的吸附量則是減少。

## 七、分子模板在不同酸鹼度之吸附效果

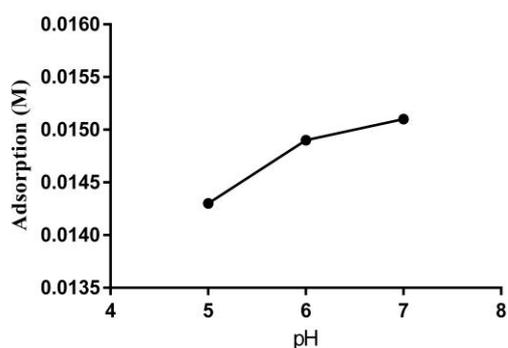


圖 37 銅在不同 pH 值下測量

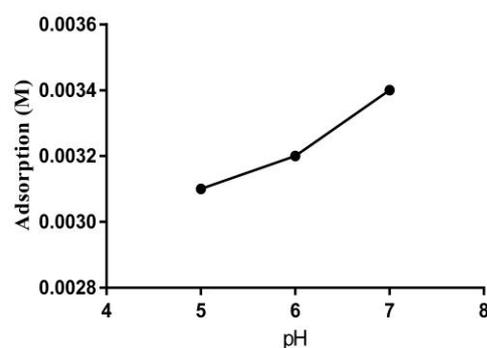


圖 38 錳在不同 pH 值下測量

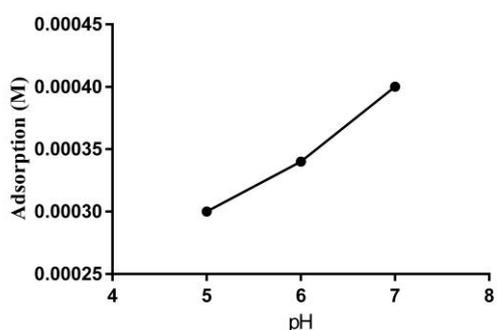


圖 39 鉛在不同 pH 值下測量

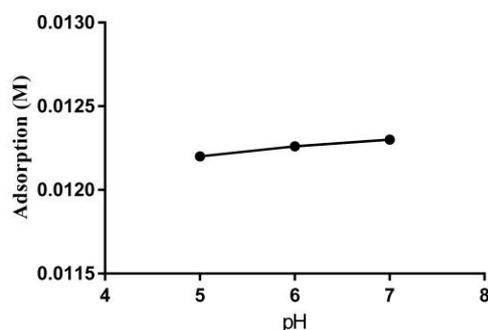


圖 40 鋅在不同 pH 值下測量

由圖 37-40 可知，四種重金屬分子模板在中性溶液下較容易吸附重金屬離子，根據文獻資料顯示[12]，當重金屬溶液超過 pH 7 時，並不會明顯增加吸附效果。

## 八、脫附實驗

表 16 銅、鋅、錳、鉛脫附之實驗

| Cu    | 原始濃度     | 脫附後濃度    | 脫附率  | Mn    | 原始濃度     | 脫附後濃度    | 脫附率  |
|-------|----------|----------|------|-------|----------|----------|------|
| pH4.0 | 0.0157 M | 0.0100 M | 64 % | pH4.0 | 0.0036 M | 0.0030 M | 83 % |
| pH4.5 | 0.0157 M | 0.0075 M | 48 % | pH4.5 | 0.0036 M | 0.0027 M | 75 % |
| pH5.0 | 0.0157 M | 0.0065 M | 42 % | pH5.0 | 0.0036 M | 0.0022 M | 61 % |

| Zn    | 原始濃度     | 脫附後濃度    | 脫附率  | Pb    | 原始濃度      | 脫附後濃度     | 脫附率  |
|-------|----------|----------|------|-------|-----------|-----------|------|
| pH4.0 | 0.0127 M | 0.0076 M | 60 % | pH4.0 | 0.00050 M | 0.00030 M | 60 % |
| pH4.5 | 0.0127 M | 0.003 M  | 24 % | pH4.5 | 0.00050 M | 0.00027 M | 54 % |
| pH5.0 | 0.0127 M | 0.002 M  | 16 % | pH5.0 | 0.00050 M | 0.00022 M | 44 % |

表 16 顯示在脫附實驗[13]當中，四種重金屬均一用最高濃度(Cu,0.0157 M/Mn,0.0036 M/Zn,0.0127 M/Pb,0.0005 M)進行脫附 24 小時之結果，其脫附效率分別如下，銅在 pH5.0 時脫附值為 42%，pH4.5 時脫附值為 48%，pH4.0 時脫附值為 64%；錳在 pH5.0 時脫附值為 61%，pH4.5 時脫附值為 75%，pH4.0 時脫附值為 83%；鋅在 pH5.0 時脫附值為 16%，pH4.5

時脫附值為 24%，pH4.0 時脫附值為 60%；鉛在 pH5.0 時脫附值為 44%，pH4.5 時脫附值為 54%，pH4.0 時脫附值為 60%。表 16 顯示在 pH 值越低時脫附效果愈好，最好時 Mn 脫附效果可達 83%。

## 柒、結論

1. 本研究之分子模板為物理性吸附，推測主要是由分子間的凡得瓦力和氫鍵，凡得瓦力所引起的吸附作用。普遍存在於吸附劑和吸附質之間，所以一種吸附劑可以吸附多種不同的吸附質，使得物理吸附一般沒有選擇性，但因為分子模板上有目標分子的孔洞，所以具有選擇性這個特性。而氫鍵則是在分子模板和功能單體通過多氫鍵生成基於配位體-選擇的結合位點並通過該作用力在分子印跡體系中進行目標分子的識別。
2. 空白模板因未放入四種重金屬，使其產生特殊性專一孔洞，因此並不會有重金屬之吸收。由此可證明高分子聚合物之非專一性吸附，並不會影響實驗結果。
3. 為瞭解分子模板之專一性，我們測試四種分子模板分別在其餘三種重金屬溶液下的吸附效果。在調製完四種重金屬溶液後，我們將四種分子模板分別加入其餘三種重金屬溶液，發現模板僅會有不到 1% 的吸附。由此可證明高分子聚合物之非專一性吸附，並不會影響實驗結果，證明本研究之重金屬分子模板具有高專一性。
4. 在相同分子模板克數下，於不同離子濃度下，銅分子模板吸附率最高可達 92 %、錳分子模板吸附率最高可達 95 %、鋅分子模板吸附率最高可達 75 %、鉛分子模板吸附率最高可達 95 %，吸附值在相同離子濃度下，發現當分子模板克數越多時，吸附值也隨之上升，得知當添加越多分子模板時，其離子吸附值也隨之提高。
5. 在競爭吸附下，錳活性大於鋅，會影響鋅模板吸收，進而增加硝酸錳在水中之解離能力，同時降低硝酸鋅在水中之解離能力，使得錳分子模板吸附量提升；相對地利用鋅分子模板進行鋅離子吸附時，鋅吸附量隨之降低，而鉛活性本身大於銅，進而增加硝酸鉛在水中之解離能力，同時降低硝酸銅在水中之解離能力，使得鉛分子模板吸附量提升；相對地利用銅分子模板進行銅離子吸附時，銅吸附量隨之降低。
6. 在脫附實驗中，四種重金屬均一用最高濃進行脫附 24 小時，其最高脫附效率分別為，銅 pH4 時脫附值為 64%，錳 pH4 時脫附值為 83%，鋅 pH4 時脫附值為 60%，鉛 pH4 時脫附值為 60%。

## 捌、未來展望

一、磁性分子模板吸附實驗 表 17 銅、鋅、錳、鉛磁性分子模板吸附實驗

| Cu 原始濃度  | 單一重金屬吸收後濃度 | 磁性分子模板吸收後濃度 | 相差百分比 | Mn 原始濃度  | 單一重金屬吸收後濃度 | 磁性分子模板吸收後濃度 | 相差百分比 |
|----------|------------|-------------|-------|----------|------------|-------------|-------|
| 0.0013 M | 0.0012 M   | 0.00012M    | 0%    | 0.0001 M | 0.000095 M | 0.000095 M  | 0%    |
| 0.0085 M | 0.0068 M   | 0.0068 M    | 0%    | 0.0011 M | 0.00097 M  | 0.00097 M   | 0 %   |
| 0.0157 M | 0.0122 M   | 0.00122 M   | 0%    | 0.0036 M | 0.00288 M  | 0.00288 M   | 0 %   |

| Zn 原始濃度  | 單一重金屬吸收後濃度 | 磁性分子模板吸收後濃度 | 相差百分比   | Pb 原始濃度   | 單一重金屬吸收後濃度  | 磁性分子模板吸收後濃度 | 相差百分比 |
|----------|------------|-------------|---------|-----------|-------------|-------------|-------|
| 0.0007 M | 0.00057 M  | 0.00057 M   | 0 %     | 0.00001 M | 0.0000095 M | 0.0000095 M | 0 %   |
| 0.0067 M | 0.0047 M   | 0.0047 M    | 0 %     | 0.00015 M | 0.00012 M   | 0.00012 M   | 0 %   |
| 0.0127 M | 0.0083 M   | 0.082 M     | -0.04 % | 0.00050 M | 0.00039 M   | 0.00039 M   | 0 %   |

表 17 顯示在磁性分子模板吸附實驗當中，為測其磁性粒子不會影響吸附效果，在四種重金屬聚合過程前，加入磁性粒子，使其讓分子模板產生磁性，以及加快分子模板的吸附及回收時間，結果如下，銅、錳、鉛及鋅在磁性分子模板吸附實驗當中，均和單一重金屬吸收後濃度一樣，所以磁性粒子並不會影響吸附效果，因此我們可以以磁性分子模板進行重金屬之吸附及收集。此應用不僅加快分子模板的吸附及回收時間，更可以自由控制分子模板的吸附位置，將分子模板更有效利用。

## 二、分子模板其他應用

製作完分子模板後，我們可將其運用到家庭用水、工業廢水及簡易過濾裝置上，以圖 41-43 所示。

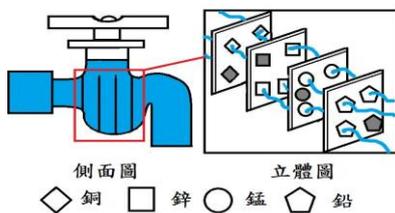


圖 41：將分子模板裝設在水龍頭示意圖

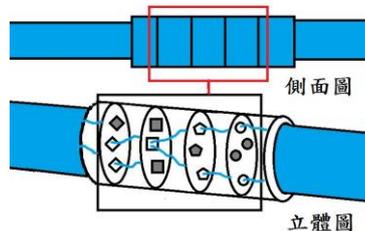


圖 42：將分子模板裝設在水管示意圖

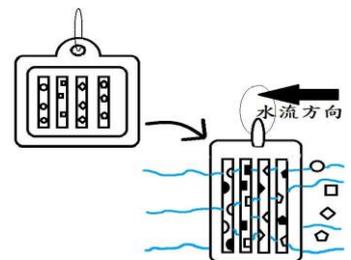


圖 43：將分子模板裝設在茶包示意圖

未來可能應用是將分子模板裝設在水龍頭及水管中及茶包中，來快速吸附水中特定重金屬。在水龍頭中，當分子模板吸附量達到飽和時，可迅速更換模板，並將更換下來的模組進行脫附，再重新利用。在工業水管中，更可依據河川汙染之特定重金屬進行有效吸附，

將乾淨的河水流回大海。在茶包上裝設分子模板，主要是針對經常忙碌的人，進行快速且方便取得的吸附方式，分子模板不僅吸附率、脫附率很高，吸附及脫附時間也很短，且成本低廉。

## 玖、參考資料及其他

- [1]陳秋炳 選修化學(下) 一百零一年八月 翰林出版 P.35-37
- [2] 2014~2015 環保署全國環境水質監測網:新竹頭前溪全部測站的河川重金屬平均背景值 P.66 一百零五年七月
- [3]蘇亮誌 鐵氧化物吸附與鐵氧磁體法處理重金屬溶液之研究 P.54 九十四年七月
- [4]鄭汝真 改質多壁奈米碳管吸附水溶液中重金屬離子之探討 P.23 九十七年十月
- [5]蔡正國 複合奈米碳管吸附水溶重金屬污染物之應用研究 P.66 九十六年八月
- [6]周澤川 利用分子模板之技術自中國傳統藥材提煉異黃酮素之防癌藥劑 P.36 九十五年六月
- [7]王季蘭 奈米，不是啥稀米 九十五年七月 天下文化 P.55.58.69
- [8]陳秋炳 選修化學(下) 一百零一年八月 翰林出版 P.124-127
- [9]黃得勝 選修化學(下) 一百零二年七月 龍騰文化 P.7-49
- [10]卓靜哲、施良垣、黃守仁、蘇軾剛、何瑞文 物理化學 三民書局 修訂初版 第二章 氣體及液體 P.11 八十六年九月
- [11]陳建添、張一知、洪偉修 基礎化學(三) 一百零四年九月 康熹文化 P.46-66
- [12]陳立軒、蕭伊琳、林啓文 評估以 HCl 與 EDTA 處理受重金屬污染土壤之效率研究 科技與工程技術期刊 第二卷 第四期 P.43-44 九十五年
- [13]葉名倉 選修化學(上) 一百零三年三月 南一書局 P.165-171