

行政院環境保護署

「99 年度土壤及地下水污染研究與技術提昇計畫」

利用磁性奈米鐵氧磁體尖晶石移除水體砷污染之研究

期末報告

EPA-99-GA103-03-A236-18

主 辦 單 位：



行政院環境保護署

受 託 單 位：

國立成功大學地球動力系統研究中心

計 畫 主 持 人：

游鎮烽

協 同 主 持 人：

王尚禮

計 畫 執 行 人 員：

涂耀仁、林佩穎、陳秋芸

計 畫 執 行 期 間：

99/12/31 ~ 100/12/30

中 華 民 國 100 年 12 月

行政院環境保護署計畫成果中英文摘要（簡要版）

一、中文計畫名稱：利用磁性奈米鐵氧磁體尖晶石移除水體
砷污染之研究

二、英文計畫名稱：Removal of arsenic in aqueous solution using
magnetic spinel ferrite Fe_3O_4

三、計畫編號：EPA-99-GA103-03-A236-18

四、執行單位：國立成功大學地球動力系統研究中心

五、計畫主持人(包括協同主持人)：游鎮烽、王尚禮

六、執行開始時間：99/12/31

七、執行結束時間：100/12/30

八、報告完成日期：100/12/20

九、報告總頁數：99

十、使用語文：中文

十一、報告電子檔名稱：EPA-99-GA103-03-A236-18.DOC

十二、報告電子檔格式：WORD 2003

十三、中文摘要關鍵詞：

磁性奈米鐵氧磁體、磁性分離、五價砷

十四、英文摘要關鍵詞：

Magnetic nano-ferrite, Magnetic separation, Arsenate

十五、中文摘要

“砷(Arsenic)”，在自然水體及飲用水的污染事件中長久以來一直危害著人體生命安全，由於其廣泛被應用於除草劑、殺蟲劑、殺菌劑、乾燥劑和木材防腐劑、玻璃器皿製造、木材防腐劑、陶瓷製造業、冶金工業、製革廠、紡織業、染料廠、煉油工業、稀土金屬工業等用途，

若不適當管制含砷廢棄物之流向，所造成的危害將導致環境與生態之浩劫，尤以飲用水及地下水汙染問題最令人頭痛，台灣雲林地區地下水即遭受嚴重威脅。“磁鐵礦(Magnetite, Fe_3O_4)”，又稱“鐵氧磁體(Ferrite)”，近年來被應用於吸附含砷污染之水體在國際上已漸受重視，國內相關研究則寥寥無幾。本研究團隊即以水熱合成法(hydrothermal synthesis)自行合成奈米級之鐵氧磁體尖晶石，測試其對水體中含砷污染之吸附效能。相關之研究成果為：1.完成磁性奈米鐵氧磁體生成條件之最適化研究；2.完成磁性奈米鐵氧磁體基本特性分析；3.完成鐵氧磁體(Fe_3O_4)吸附砷之最適化研究；4.五價砷之脫附及鐵氧磁體再生特性測試；5.完成等溫吸附曲線及反應動力參數之求得；6.以磁性奈米鐵氧磁體處理受砷污染之地下水。

研究成果顯示，在酸性環境下(pH 2 ~ pH 7)，吾人自製的奈米級鐵氧磁體吸附劑對砷有較佳的吸附移除效能，於不到 5 分鐘的時間內，即可有效的將液相中的五價砷吸附移除達 95 % 以上，尤其在 pH 3 ~ pH 4 的條件下，吸附移除效率更可達 99.99 % 以上。由等溫吸附曲線得知，pH 3、7、11 的飽和吸附量分別可達 14.35 mg/g、10.12 mg/g 及 4.88 mg/g，在 pH 3 至 pH 11 的操作區間，pH 愈低，As(V)的吸附移除效率有明顯增加的趨勢，吸附平衡參數結果顯示以 Langmuir Model 有較佳之模擬結果，反應動力部分，自製鐵氧磁體吸附五價砷較適合以擬二階動力模式來表示。此外，由 As K-edge XANES 研究結果發現，被吸附於鐵氧磁體上的五價砷並不會被其晶格內的二價鐵還原成更具毒性的三價砷，進而對水體環境產生更大的危害。

在五價砷之脫附及鐵氧磁體再生特性測試方面，本研究測試常見的六種酸類及鹽類作為五價砷之脫附劑，於脫附條件為五價砷初始濃度 10 mg/L、溫度 25 °C、脫附劑濃度 0.1 M、鐵氧磁體 0.05 g、脫附劑體積 10 mL、脫附時間 30 分鐘的情況下，進行鐵氧磁體之砷脫附測試，結果顯示吾人測試之六種脫附劑的脫附效能以磷酸(H_3PO_4)最佳，磷酸鈉(Na_3PO_4)次之，硝酸(HNO_3)最差，脫附效能之排序為 $\text{H}_3\text{PO}_4 > \text{Na}_3\text{PO}_4 > \text{H}_2\text{SO}_4 > \text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{HCl} > \text{HNO}_3$ ，其相應之五價砷脫附效率分別為 83.52 %、63.26 %、52.80 %、43.34 %、1.56 %、0.61 %。再生特性測試結果發現，在初始五價砷濃度 500 $\mu\text{g/L}$ ，溫度 25 °C、磷酸濃度 0.02 M、鐵氧磁體 0.002 g、磷酸體積 10 mL、鐵氧磁體吸附時間 30 分鐘、磷酸脫附時間 30 分鐘的情況下，連續三次的吸脫附實驗發現，於吾人設定之操作環境下，鐵氧磁體隨著再生次數的增加對五價砷的吸附移除率有些微的降低，但移除效率仍可達 93 % 以上，顯示自製磁性奈米鐵氧磁體具再生之可行性。

為評估自製鐵氧磁體應用於實際受砷污染地下水之整治，吾人以磁性奈米鐵氧磁體處理受砷污染之地下水體。結果發現所採集之六口井砷的濃度範圍從 21.6 $\mu\text{g/L}$ 至 84.3 $\mu\text{g/L}$ ，皆高於世界衛生組織(WHO)對砷所規定的飲用水標準值 10 $\mu\text{g/L}$ ，若不經適當處理，則嚴重影響民眾健康。吾人於操作條件為吸附劑 Fe_3O_4 重量 0.05 g，地下水體積 10 mL，吸附時間 4 小時的條件下，測試處理六口受砷污染之地下水水樣，結果發現，不論於中性(pH 6.84-7.65)或酸性(pH 1.61-3.30)吸附環境下，砷的移除效率皆達 91.7 % 以上，所有地下水水樣之砷濃度均可降

低至 WHO 所規定的飲用水標準值 10 $\mu\text{g/L}$ 以下(最高的殘餘砷濃度為 7.0 $\mu\text{g/L}$)。此外，雖然鐵氧磁體於酸性環境下($\text{pH} < 2$)有些許鐵的溶出，仍然顯示吾人自製之鐵氧磁體吸附劑有應用於受砷污染地下水整治之潛力。

十六、英文摘要：

Arsenic (As) in groundwater and contaminated drinking water has been a major health risk impact in Taiwan and southeast Asia countries. Arsenic has been a common added ingredient in production of various industries, including herbicide, pesticide, antiseptic, wood preservative, glass and ceramic-ware, metallurgy, leather, textile, dye, and rare metals. This can easily cause serious impacts on surrounding environments, in particular groundwater and drinking water contamination, and ecological systems if no proper waste managing strategy or controlling policy. Similar high level of As in groundwater has been reported in the Yun-Lin county in central and Chia-Nan costal plan in southwestern Taiwan.

Magnetite (Fe_3O_4), so-called Ferrite, is a common Fe oxide with spinel structure. It has received wide attention internationally in recent year for its capability to adsorb As in aqueous solutions. However, paucity effort was dedicated to related researches in science community in Taiwan. In this proposal, we apply well developed hydrothermal method to synthesize nano-particle size of ferrite and to conduct a series of batch experiments to evaluate its capability to remove As in aqueous solution under various pH, T, solution/ferrite ratio and ion concentration conditions. Our major efforts in the past year are: (1) accomplish the optimal synthesizing conditions of

magnetic nano-ferrite; (2) accomplish the characteristics analysis of magnetic nano-ferrite; and (3) accomplish some adsorption experiments for As removal by magnetic nano-ferrite. The preliminary results showed the synthesized magnetic nano-ferrite has a great potential for removal of As even under acidic conditions, where the As(V) removal efficiency could reach more than 95 % in five minutes. In pH 3-4, the As(V) removal efficiency could reach than 99.99 %. From the adsorption isotherm, As(V) adsorption capacities were determined to be 14.35, 10.12 and 4.88 mg/g at pH 3, pH 7, and pH 11, respectively. In order to investigate the feasibility of magnetic nano-adsorbents in natural groundwater, six As contaminated groundwaters were sampled and tested for As removal in the laboratory. The total dissolved As concentration ranges from 21.6 to 84.3 $\mu\text{g/L}$, indicating all of the these groundwaters were potentially As contaminated groundwater (WHO limit: 10 $\mu\text{g/L}$). Our synthesized nano-ferrite were applied to remove As in these samples in the laboratory and found As removing efficiency of more than 91.7 % in all cases. Currently we are further evaluating the feasibility in ferrite treatment of the polluted groundwaters in natural sites.

行政院環境保護署委託研究計畫成果報告摘要(詳細版)

計畫名稱：利用磁性奈米鐵氧磁體尖晶石移除水體砷污染之研究

計畫編號：EPA-99-GA103-03-A236-18

計畫執行單位：國立成功大學地球動力系統研究中心

計畫主持人：游鎮烽教授(主持人)、王尚禮(協同主持人)

計畫期程：99 年 12 月 31 日起至 100 年 12 月 30 日止

計畫經費：990 仟元

摘要

“砷(Arsenic)”，在自然水體及飲用水的污染事件中長久以來一直危害著人體生命安全，由於其廣泛被應用於除草劑、殺蟲劑、殺菌劑、乾燥劑和木材防腐劑、玻璃器皿製造、木材防腐劑、陶瓷製造業、冶金工業、製革廠、紡織業、染料廠、煉油工業、稀土金屬工業等用途，若不適當管制含砷廢棄物之流向，所造成的危害將導致環境與生態之浩劫，尤以飲用水及地下水污染問題最令人頭痛，台灣雲林地區地下水即遭受嚴重威脅。“磁鐵礦(Magnetite, Fe_3O_4)”，又稱“鐵氧磁體(Ferrite)”，近年來被應用於吸附含砷污染之水體在國際上已漸受重視，國內相關研究則寥寥無幾。本研究團隊即以水熱合成法(hydrothermal synthesis)自行合成奈米級之鐵氧磁體尖晶石，測試其對水體中含砷污染之吸附效能。相關之研究成果為：1.完成磁性奈米鐵氧磁體生成條件之最適化研究；2.完成磁性奈米鐵氧磁體基本特性分析；3.完成鐵氧磁體(Fe_3O_4)吸附砷之最適化研究；4.五價砷之脫附及鐵氧磁體再生特性測試；5.完成等溫吸附曲線及反應動力參數之求得；6.以磁性奈米鐵氧磁體處理受砷污染之地下水。

研究成果顯示，在酸性環境下(pH 2 ~ pH 7)，吾人自製的奈米級鐵

氧磁體吸附劑對砷有較佳的吸附移除效能，於不到 5 分鐘的時間內，即可有效的將液相中的五價砷吸附移除達 95 % 以上，尤其在 pH 3 ~ pH 4 的條件下，吸附移除效率更可達 99.99 % 以上。由等溫吸附曲線得知，pH 3、7、11 的飽和吸附量分別可達 14.35 mg/g、10.12 mg/g 及 4.88 mg/g，在 pH 3 至 pH 11 的操作區間，pH 愈低，As(V)的吸附移除效率有明顯增加的趨勢，吸附平衡參數結果顯示以 Langmuir Model 有較佳之模擬結果，反應動力部分，自製鐵氧磁體吸附五價砷較適合以擬二階動力模式來表示。此外，由 As K-edge XANES 研究結果發現，被吸附於鐵氧磁體上的五價砷並不會被其晶格內的二價鐵還原成更具毒性的三價砷，進而對水體環境產生更大的危害。

在五價砷之脫附及鐵氧磁體再生特性測試方面，本研究測試常見的六種酸類及鹽類作為五價砷之脫附劑，於脫附條件為五價砷初始濃度 10 mg/L、溫度 25 °C、脫附劑濃度 0.1 M、鐵氧磁體 0.05 g、脫附劑體積 10 mL、脫附時間 30 分鐘的情況下，進行鐵氧磁體之砷脫附測試，結果顯示吾人測試之六種脫附劑的脫附效能以磷酸(H_3PO_4)最佳，磷酸鈉(Na_3PO_4)次之，硝酸(HNO_3)最差，脫附效能之排序為 $\text{H}_3\text{PO}_4 > \text{Na}_3\text{PO}_4 > \text{H}_2\text{SO}_4 > \text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{HCl} > \text{HNO}_3$ ，其相應之五價砷脫附效率分別為 83.52 %、63.26 %、52.80 %、43.34 %、1.56 %、0.61 %。再生特性測試結果發現，在初始五價砷濃度 500 $\mu\text{g/L}$ ，溫度 25 °C、磷酸濃度 0.02 M、鐵氧磁體 0.002 g、磷酸體積 10 mL、鐵氧磁體吸附時間 30 分鐘、磷酸脫附時間 30 分鐘的情況下，連續三次的吸脫附實驗發現，於吾人設定之操作環境下，鐵氧磁體隨著再生次數的增加對五價砷的吸附移除率有些微的降低，但移除效率仍可達 93 % 以上，顯示自製磁性奈米鐵氧磁體具再生之可行性。

為評估自製鐵氧磁體應用於實際受砷污染地下水之整治，吾人以磁性奈米鐵氧磁體處理受砷污染之地下水體。結果發現所採集之六口井砷的濃度範圍從 21.6 $\mu\text{g/L}$ 至 84.3 $\mu\text{g/L}$ ，皆高於世界衛生組織(WHO)

對砷所規定的飲用水標準值 $10\text{ }\mu\text{g/L}$ ，若不經適當處理，則嚴重影響民眾健康。吾人於操作條件為吸附劑 Fe_3O_4 重量 0.05 g ，地下水體積 10 mL ，吸附時間 4 小時的條件下，測試處理六口受砷污染之地下水水樣，結果發現，不論於中性($\text{pH } 6.84\text{--}7.65$)或酸性($\text{pH } 1.61\text{--}3.30$)吸附環境下，砷的移除效率皆達 91.7% 以上，所有地下水水樣之砷濃度均可降低至 WHO 所規定的飲用水標準值 $10\text{ }\mu\text{g/L}$ 以下(最高的殘餘砷濃度為 $7.0\text{ }\mu\text{g/L}$)。此外，雖然鐵氧磁體於酸性環境下($\text{pH} < 2$)有些許鐵的溶出，仍然顯示吾人自製之鐵氧磁體吸附劑有應用於受砷污染地下水整治之潛力。

Arsenic (As) in groundwater and contaminated drinking water has been a major health risk impact in Taiwan and southeast Asia countries. Arsenic has been a common added ingredient in production of various industries, including herbicide, pesticide, antiseptic, wood preservative, glass and ceramic-ware, metallurgy, leather, textile, dye, and rare metals. This can easily cause serious impacts on surrounding environments, in particular groundwater and drinking water contamination, and ecological systems if no proper waste managing strategy or controlling policy. Similar high level of As in groundwater has been reported in the Yun-Lin county in central and Chia-Nan costal plan in southwestern Taiwan.

Magnetite (Fe_3O_4), so-called Ferrite, is a common Fe oxide with spinel structure. It has received wide attention internationally in recent year for its capability to adsorb As in aqueous solutions. However, paucity effort was dedicated to related researches in science community in Taiwan. In this proposal, we apply well developed hydrothermal method to synthesize nano-particle size of ferrite and to conduct a series of batch experiments to evaluate its capability to remove As in aqueous solution under various pH, T, solution/ferrite ratio and ion concentration conditions. Our major efforts

in the past year are: (1) accomplish the optimal synthesizing conditions of magnetic nano-ferrite; (2) accomplish the characteristics analysis of magnetic nano-ferrite; and (3) accomplish some adsorption experiments for As removal by magnetic nano-ferrite. The preliminary results showed the synthesized magnetic nano-ferrite has a great potential for removal of As even under acidic conditions, where the As(V) removal efficiency could reach more than 95 % in five minutes. In pH 3-4, the As(V) removal efficiency could reach than 99.99 %. From the adsorption isotherm, As(V) adsorption capacities were determined to be 14.35, 10.12 and 4.88 mg/g at pH 3, pH 7, and pH 11, respectively. In order to investigate the feasibility of magnetic nano-adsorbents in natural groundwater, six As contaminated groundwaters were sampled and tested for As removal in the laboratory. The total dissolved As concentration ranges from 21.6 to 84.3 $\mu\text{g/L}$, indicating all of the these groundwaters were potentially As contaminated groundwater (WHO limit: 10 $\mu\text{g/L}$). Our synthesized nano-ferrite were applied to remove As in these samples in the laboratory and found As removing efficiency of more than 91.7 % in all cases. Currently we are further evaluating the feasibility in ferrite treatment of the polluted groundwaters in natural sites.

前 言

一般來說，砷進入水體的途徑可分為兩大類，其一乃從自然界的岩石或土壤溶解風化，另一則為人類活動所產生的工業廢水、農業廢水以及半導體光電業廢水。2010 年 6 月，長期致力於砷污染研究之美國學者指出，有多達七千七百萬的孟加拉人，長期飲用砷含量達有毒程度的遭污染地下井水，導致他們面臨早死危險。刊載於醫學期刊“刺絡針”（Lancet）的該研究引起世界衛生組織重視，世衛在聲明中，稱此為“史上最大規模的人口集體中毒”，而台灣早年曾發生過的烏腳病事

件，更廣泛被認為與飲水中的砷有關。Lin 等人於當時(2001)在台灣西南沿岸(布袋、義竹、北門、學甲)所進行地下水砷污染的調查發現，當地漁民抽取地下水進行養殖魚類的情形十分普遍，在採樣的 21 個養殖池中有 8 個養殖池超過當時的“二級水產用水標準($50\text{ }\mu\text{g/L}$)”，平均砷含量高達 $54.09\text{ }\mu\text{g/L}$ 。因此，飲用水、地下水或自然水體中含砷污染關係全球上億人口之生命安全，有鑑於此，如何快速且有效去除水中之砷污染乃成為刻不容緩之議題。

鐵為世界上分布最廣的金屬之一，易與氧反應生成鐵氧化物而具有較大的比表面積、微細孔洞、表面官能機及表面帶電特性，上述的性質使鐵氧化物對水中的污染物有良好的去除能力。鐵氧磁體(Fe_3O_4 , Ferrite)，又稱磁鐵礦(Magnetite)，乃一具磁性之尖晶石結構鐵氧化物，已被廣泛應用於導盲磚、磁性標誌、電波吸收體、觸媒及吸附劑等技術領域，由於其大小屬奈米尺寸規模，可大幅提升反應之比表面積，使得吸附劑表面的活性位址增加。此外，異相吸附反應中，擴散因子往往成為反應速率的限制步驟，藉由吸附劑粒子的奈米化不但提供了極大的表面積，同時也縮短了擴散距離，因此應可大幅增進反應速率。奈米粒子上佔極多比例的表面原子所帶有的表面能量，也可能使得奈米吸附劑有不同於一般吸附劑的吸附性能。

因此，本研究目的乃在發展一種新型態的磁性奈米級吸附劑，藉由其奈米性質及磁力特性，達到快速、有效吸附移除水中砷的污染，建立一套處理含砷污染水體之技術平台，期望解決區域性及全球性砷污染水體(飲用水及地下水)之嚴重危害。由於關係全球上億人口之生命安全，如能獲得成就貢獻必然重大，吾人將全力以赴。

研究方法

本研究共分四大階段進行，第一階段為鐵氧磁體尖晶石合成條件最適化研究，此階段乃在討論自製鐵氧磁體之最佳合成條件及製備流程，規畫之操作變因包含硫酸亞鐵添加量、反應溫度、pH 值及曝氣量，

此外，更以毒性特性溶出程序(Toxicity Characteristic Leaching Procedure, TCLP)之嚴苛條件測試自製鐵氧磁體之耐酸性，作為後續評選最佳鐵氧磁體為吸附劑之依據。

第二階段為自製鐵氧磁體尖晶石吸附劑基本特性研究，此階段乃在瞭解自製鐵氧磁體之基本物理特性，使用之儀器包含 X 光繞射儀(X-Ray Diffractometer, XRD, BRUKER D8 Advance, Germany)、超導量子干涉震動磁量儀(Superconducting Quantum Interference Device Vibrating Sample Magnetometer, SQUID VSM, USA)、掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscopy, SEM, JSM-6330, Japan)及比表面積分析儀(Brunauer, Emmett and Teller analyzer, BET analyzer)。

第三階段為鐵氧磁體尖晶石吸附砷操作條件之最適化研究，此階段探討之變因包括溶液之 pH、吸附劑重量、吸附反應之溫度與共同離子效應。另外，由於被吸附於鐵氧磁體上的五價砷很有可能被晶格內的二價鐵還原成更具毒性的三價砷，吾人嘗試以 X 光吸收近邊緣結構(X-ray absorption near-edge structure, XANES)圖譜探求五價砷被還原成三價砷之氧化態轉變情形。

第四階段為反應動力參數及等溫吸附曲線之求得，本階段乃藉由“擬一階動力模式(Pseudo-first order kinetic model)”及“擬二階動力模式(Pseudo-second order kinetic model)”來評估其吸附過程，作為將來程序設計之重要參考指標。等溫吸附曲線則以常用之 Langmuir model 及 Freundlich model 來模擬。

為瞭解自製鐵氧磁體之再生特性，吾人進行連續三次之“吸附-脫附”程序測試其五價砷之脫附效能及再生特性。測試之脫附劑為常見的六種酸類及鹽類 (H_3PO_4 、 Na_3PO_4 、 H_2SO_4 、 Na_2SO_4 、 HCl 、 HNO_3)，脫附操作條件為五價砷初始濃度 10 mg/L、溫度 25 °C、脫附劑濃度 0.0125 M-0.4 M、鐵氧磁體 0.05 g、脫附劑體積 10 mL、脫附時間 30 分鐘。此外，為評估自製鐵氧磁體應用於實際受砷污染地下水之處理效能，本

團隊透過經濟部水利署第六河川局之協助，取得大台南地區六口受砷污染影響之地下水水樣，於操作條件為吸附劑 Fe_3O_4 重量 0.05 g，地下水體積 10 mL，吸附時間 4 小時的條件下，進行相關吸附效能之研究。

結 果

1. 磁性奈米鐵氧磁體生成條件之最適化研究

包含奈米級鐵氧磁體之合成製作及耐酸性溶出實驗(以 TCLP 作為評判標準)，結果發現適當的反應時間對形成鐵氧磁體尖晶石結構乃必要條件，在本研究的實驗條件下(pH 6-8，溫度 60°C - 80°C ，鐵離子濃度 0.1 M-0.4 M)，80 分鐘的反應時間已經足夠；溫度效應部分則發現較高的反應溫度可確保鐵氧磁體尖晶石結構的形成；pH 效應則說明 pH 8-10 皆為鐵氧磁體適合的生成環境；曝氣量效應顯示 3 L/min 以上的曝氣量對鐵氧磁體尖晶石的生成已足夠，於實場應用時曝氣的均勻性可能比曝氣量更為重要。

2. 磁性奈米鐵氧磁體基本特性分析

包含以 XRD 確認其生成晶相為 Fe_3O_4 (Magnetite, JCPDS file number 19-0629)，並無其他晶相之生成；以超導量子干涉震動磁量儀(SQUID VSM)測得其最大飽和磁化量為 82.53 emu/g；以掃描式電子顯微鏡(SEM)及粒徑分布分析儀觀察得知自製鐵氧磁體之原始粒徑主要分布於 58-112 nm 之間，平均粒徑則為 80 nm；以比表面積分析儀(BET)求得其顆粒之表面積、孔洞體積與孔洞直徑分別為 $30.6 \text{ m}^2/\text{g}$ 、 $0.09 \text{ cm}^3/\text{g}$ 、 11.68\AA 。此外，藉由實驗求得自製鐵氧磁體之零電位點 pH_{zpc} 為 7.1，這印證了為何在酸性環境中(pH 3)，砷的吸附效果會大於在鹼性環境中(pH 11)。

3. 鐵氧磁體(Fe_3O_4)吸附砷之最適化研究

包含吸附反應之 pH 值最佳化、吸附劑重量及溫度效應之探討。結果發現在酸性環境下(pH 2 ~ pH 7)，吾人自製的奈米級鐵氧磁體吸附劑對砷有較佳的吸附移除效能，於不到 5 分鐘的時間內，即可有

效的將液相中的五價砷吸附移除達 95 % 以上，尤其在 pH 3 ~ pH 4 的條件下，吸附移除效率更可達 99.99 % 以上。溫度效應方面，在 25 °C 至 45 °C 的操作溫度區間，溫度的改變對 As(V) 的吸附率並無明顯效應，提升吸附之溫度並無法有效提升 As(V) 的吸附移除效能。由等溫吸附曲線得知，pH 3、7、11 的飽和吸附量分別可達 14.35 mg/g、10.12 mg/g 及 4.88 mg/g，等溫吸附曲線呈 L 型趨勢，在 pH 3 至 pH 11 的操作區間，pH 愈低，As(V) 的吸附移除效率有明顯增加的趨勢。此外，由 As K-edge XANES 研究結果發現，被吸附於鐵氧磁體上的五價砷並不會被其晶格內的二價鐵還原成更具毒性的三價砷，進而對水體環境產生更大的危害。

4. 五價砷之脫附及鐵氧磁體再生特性測試

本研究測試常見的六種酸類及鹽類作為五價砷之脫附劑，於脫附條件為五價砷初始濃度 10 mg/L、溫度 25 °C、脫附劑濃度 0.1 M、鐵氧磁體 0.05 g、脫附劑體積 10 mL、脫附時間 30 分鐘的情況下，進行鐵氧磁體之砷脫附測試，結果顯示吾人測試之六種脫附劑的脫附效能以磷酸(H_3PO_4)最佳，磷酸鈉(Na_3PO_4)次之，硝酸(HNO_3)最差，脫附效能之排序為 $\text{H}_3\text{PO}_4 > \text{Na}_3\text{PO}_4 > \text{H}_2\text{SO}_4 > \text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{HCl} > \text{HNO}_3$ ，其相應之五價砷脫附效率分別為 83.52 %、63.26 %、52.80 %、43.34 %、1.56 %、0.61 %。再生特性測試結果發現，在初始五價砷濃度 500 $\mu\text{g/L}$ ，溫度 25 °C、磷酸濃度 0.02 M、鐵氧磁體 0.002 g、磷酸體積 10 mL、鐵氧磁體吸附時間 30 分鐘、磷酸脫附時間 30 分鐘的情況下，連續三次的吸脫附實驗發現，於吾人設定之操作環境下，雖然鐵氧磁體隨著再生次數的增加對五價砷的吸附移除率有些微的降低，但移除效率仍在 93 % 以上，顯示自製磁性奈米鐵氧磁體具再生之可行性。

5. 等溫吸附曲線及反應動力之求得

本研究乃以 Langmuir Isotherm 及 Freundlich Isotherm 模擬實驗值線

性迴歸之結果，所得之吸附平衡參數結果顯示不論是 Langmuir Model 或 Freundlich Model 皆能描述自製鐵氧磁體吸附劑對五價砷之吸附平衡模式，但以 Langmuir Model 有較佳之模擬結果(以 R^2 作為評判標準)。反應動力部分，於吸附條件為 pH=3.0，溫度=25 °C，溶液體積=10 mL， Fe_3O_4 =0.05 g 之情況下，鐵氧磁體吸附五價砷之反應動力模式乃以擬一階動力模式 (pseudo-first-order kinetic model) 及擬二階動力模式 (pseudo-second-order kinetic model) 來模擬，結果發現，相較於擬一階動力模式之模擬($R^2=0.2662$)，擬二階動力模式有較佳之線性模擬結果($R^2=0.9999$)，說明自製鐵氧磁體吸附五價砷較適合以擬二階動力模式表示。

6. 以磁性奈米鐵氧磁體處理受砷污染之地下水

吾人所採集之六口井砷的濃度範圍從 21.6 $\mu\text{g/L}$ 至 84.3 $\mu\text{g/L}$ ，皆高於世界衛生組織(WHO)對砷所規定的飲用水標準值 10 $\mu\text{g/L}$ ，若不經適當處理，則嚴重影響民眾健康。吾人於操作條件為吸附劑 Fe_3O_4 重量 0.05 g，地下水體積 10 mL，吸附時間 4 小時的情況下，測試處理六口受砷污染之地下水水樣，結果發現，不論於中性(pH 6.84-7.65)或酸性(pH 1.61-3.30)吸附環境下，砷的移除效率皆達 91.7 % 以上，所有地下水水樣之砷濃度均可降低至 WHO 所規定的飲用水標準值 10 $\mu\text{g/L}$ 以下(最高的殘餘砷濃度為 7.0 $\mu\text{g/L}$)。此外，雖然鐵氧磁體於酸性環境下(pH < 2)有些許鐵的溶出，仍然顯示吾人自製之鐵氧磁體吸附劑有應用於受砷污染地下水整治之潛力。

結 論

1. 本研究已成功合成磁性奈米鐵氧磁體，由耐酸性溶出實驗結果發現，適當的反應時間、溫度及 pH 對形成鐵氧磁體尖晶石結構乃必要條件，3 L/min 以上的曝氣量對鐵氧磁體尖晶石的生成已足夠。
2. 求得自製鐵氧磁體吸附砷之最佳條件
在酸性環境下(pH 2 ~ pH 7)，吾人自製的奈米級鐵氧磁體吸附劑對

砷有較佳的吸附移除效能，尤其在 pH 3 ~ pH 4 的條件下，吸附移除效率更可達 99.99 % 以上。

3. 測試之六種脫附劑的脫附效能以磷酸(H_3PO_4)最佳，磷酸鈉(Na_3PO_4)次之，硝酸(HNO_3)最差，脫附效能之排序為 $\text{H}_3\text{PO}_4 > \text{Na}_3\text{PO}_4 > \text{H}_2\text{SO}_4 > \text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{HCl} > \text{HNO}_3$ 。
4. 再生特性測試結果發現，於設定之操作環境下，鐵氧磁體隨著再生次數的增加對五價砷的吸附移除率有些微的降低，但移除效率仍在 93 % 以上，顯示自製磁性奈米鐵氧磁體具優良之再生特性。
5. 完成等溫吸附曲線及反應動力之求得

研究結果顯示不論是 Langmuir Model 或 Freundlich Model 皆能描述自製鐵氧磁體吸附劑對五價砷之吸附平衡模式，但以 Langmuir Model 有較佳之模擬結果。反應動力部分則發現，擬二階動力模式有較佳之線性模擬結果($R^2=0.9999$)。

6. 以磁性奈米鐵氧磁體處理受砷污染之地下水

於設定之操作條件下，砷的移除效率皆達 91.7 % 以上，所有地下水水樣之砷濃度均可降低至 WHO 所規定的飲用水標準值 10 $\mu\text{g/L}$ 以下，顯示吾人自製之鐵氧磁體吸附劑有應用於受砷污染地下水整治之潛力。

建議事項

1. 本研究已成功建立實驗室規模之磁性奈米鐵氧磁體尖晶石吸附移除受砷污染地下水之技術平台，藉由磁性特性，於實驗室可有效及快速地將鐵氧磁體吸附劑回收，但應用於大量之地下水整治時，奈米尺度之鐵氧磁體恐有回收不易之疑慮，本研究團隊建議未來可進行磁性奈米顆粒之造粒化研究，並測試造粒後磁性奈米顆粒之回收特性及評估實際應用於現地處理地下水之研究。
2. 本研究乃針對水體中五價砷作吸附移除工作，於還原環境下，地下水體中往往含有相對多數的三價砷存在，由於三價砷的毒性更甚於

五價砷，因此，如何有效移除地下水體中之三價砷亦顯得格外重要，本研究團隊亦初步以自製磁性奈米鐵氧磁體用來移除水體中之三價砷，亦發現有不錯之吸附移除效能，建議未來可進行水體中三價砷之吸附移除研究。

3. 為提升飽和吸附量，吾人嘗試以水熱法合成雙金屬鐵氧磁體(銅鐵-鐵氧磁體)初步證實其對三價砷及五價砷有良好的吸附能力，在體積為 10 mL，初始濃度為 10 ppm 的含砷模擬廢水中，於 pH 為 5 的吸附條件下，僅需不到 0.01 g 的銅鐵-鐵氧磁體，於 1 分鐘內即可將水中的砷幾乎完全移除(去除率達 99.9 % 以上)。於相同吸附條件下，銅鐵-鐵氧磁體(Cu-ferrite)之吸附效能與飽和吸附量明顯優於單純的鐵系鐵氧磁體(Fe_3O_4)，建議未來可評估進行雙金屬鐵氧磁體吸附移除水體中之三價砷及五價砷之研究。

參考文獻：

1. P.L. Smedley, D.G. Kinniburgh. A Review of Source, Behavior and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17, 517-568, 2002.
2. S. Wang, C.N. Mulligan. Occurrence of arsenic contamination in Canada: 3127 sources, behavior and distribution. *Sci. Total Environ.* 366, 701-721. 2006.
3. C.W. Liu, C.S. Jang, C.M. Liao. Evaluation of arsenic contamination potential using indicator kriging in the Yun-Lin aquifer (Taiwan). *Science of the Total Environment*, 321, 173-188. 2004.
4. D. Mohan, C.U. Pittman. Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents-A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 142, 1-53. 2007.
5. J. Emsley. *Nature's Building Blocks: An A-Z guide to the elements*. Oxford: Oxford University Press, 2001.
6. A. Georges. The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties. *Nuclear Physics A. Atomic Mass Data Center*, 729, 3-128. 2003.
7. B. J. Alloway. *Heavy metals in soils*. Halsted press, NY. 1995.
8. WHO (World Health Organisation), <http://www.who.int/en/>
9. WHO. *Guidelines for drinking-water quality. Vol. 2: Health criteria and other supporting information*. World health organization, Geneva. 1996.
10. C.J. Chen, C.W. Chen, M.M. Wu, T.T. Kuo. Cancer potential in liver, lung, bladder, and kidney due to ingested inorganic arsenic in drinking water. *Br. J. Cancer*, 66, 888-892. 1992.
11. C.J. Chen, Y.C. Chuang, S.L. You, H.Y. Wu. A retrospective study on malignant neoplasms of bladder, lung, and liver in the blackfoot disease endemic area in Taiwan. *Br. J. Cancer*, 53, 399-405. 1986.
12. C.J. Chen, Y.C. Chuang, T.M. Lin, H.Y. Wu, Malignant neoplasms among residents of a blackfoot disease endemic area in Taiwan: high arsenic artesian well water and cancers. *Cancer Res.*, 45, 5895-5899. 1985.
13. M.C. Lin, C.M. Liao, C.W. Liu, S. Singh. Bioaccumulation of arsenic in aquacultural large-scale mullet *Liza macrolepis* from the blackfoot disease area in Taiwan. *Bull.*

- Environ. Contamin. Toxicol., 67, 91-97. 2001.
14. O.X. Leupin, S.J. Hug. Oxidation and removal of arsenic(III) from aerated groundwater by filtration through sand and zero-valent iron. *Water Res.*, 39, 1729-1740. 2005.
 15. M. Bissen, F.H. Frimmel. Arsenic- a review. Part II. Oxidation of arsenic and its removal in water treatment. *Acta Hydrochim. Hydrobiol.*, 31, 97-107. 2003.
 16. T.M. Gihring, G.K. Druschel, R.B. McCleskey, R.J. Hamers, J.F. Banfield. Rapid arsenite oxidation by *Thermus aquaticus* and *Thermus thermophilus*: field and laboratory investigations. *Environ. Sci. Technol.*, 35, 3857-3862. 2001.
 17. P.K. Dutta, S.O. Pehkonen, V.K. Sharma, A.K. Ray. Photocatalytic oxidation of arsenic(III): evidence of hydroxyl radicals. *Environ. Sci. Technol.*, 39, 1827-1834. 2005.
 18. H.K. Hansen, P. Núñez, R. Grandon. Electrocoagulation as a remediation tool for wastewaters containing arsenic., *Miner. Eng.*, 19, 521-524. 2006.
 19. X.G. Meng, G.P. Korfiatis, S. Bang, K.W. Bang. Combined effects of anions on arsenic removal by iron hydroxide. *Toxicol. Lett.*, 133, 103-111. 2002.
 20. S.R. Wickramasinghe, B. Han, J. Zimbron, Z. Shen, M.N. Karim. Arsenic removal by coagulation and filtration: comparison of groundwaters from the United States and Bangladesh. *Desalination*, 169, 231- 244. 2004.
 21. P.R. Kumar, S. Chaudhari, K.C. Khilar, S.P. Mahajan. Removal of arsenic from water by electrocoagulation. *Chemosphere*, 55, 1245-1252. 2004.
 22. J.R. Parga, D.L. Cocke, J.L. Valenzuela, J.A. Gomes, M. Kesmez, G. Irwin, H. Moreno, M. Weir. Arsenic removal via electrocoagulation from heavy metal contaminated groundwater in La Comarca Lagunera México. *J. Hazard. Mater.*, 124, 247-254. 2005.
 23. D.A. Clifford, Ion-exchange and inorganic adsorption, in: *Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies*, 5th ed., American Water Works Association, McGraw-Hill, New York, 1999.
 24. J. Kim, M.M. Benjamin. Modeling a novel ion exchange process for arsenic and nitrate removal. *Water Res.*, 38, 2053-2062. 2004.
 25. R. Baciocchi, A. Chiavola, R. Gavasci. Ion exchange equilibria of arsenic in the presence of high sulphate and nitrate concentrations. *Water Sci. Technol.: Water Supply*,

5, 67-74. 2005.

26. A.M. Nurul, K. Satoshi, K. Taichi, B. Aleya, K. Hideyuki, S. Tohru, O. Kiyohisa. Removal of arsenic in aqueous solutions by adsorption onto waste rice husk. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 45, 8105-8110. 2006.
27. Y. Zhang, M. Yang, X. Huang. Arsenic(V) removal with a Ce(IV)-doped iron oxide adsorbent. *Chemosphere*, 52, 945-952. 2003.
28. M.L. Ballinas, E. Rodriguez de San Miguel, M.T.J. Rodriguez, O. Silva, M. Munoz, J. de Gyves. Arsenic(V) removal with polymer inclusion membranes from sulfuric acid media using DBBP as carrier. *Environ. Sci. Technol.*, 38, 886-891. 2004.
29. S. Velizarov, J.G. Crespo, M.A. Reis. Removal of inorganic anions from drinking water supplies by membrane bio/process. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, 3, 361-380. 2004.
30. R.Y. Ning. Arsenic removal by reverse osmosis. *Desalination*, 143, 237-241. 2002.
31. Y.H. Weng, L.H. Chaung-Hsieh, H.H. Lee, K.C. Li, C.P. Huang. Removal of arsenic and humic substances (HSs) by electro-ultrafiltration (EUF). *J. Hazard. Mater.*, 122, 171-176. 2005.
32. M.M. Gholami, M.A. Mokhtari, A. Aameri, M.R. Alizadeh Fard. Application of reverse osmosis technology for arsenic removal from drinking water. *Desalination*, 200, 725-727. 2006.
33. J. Chung, X. Li, B.E. Rittmann. Bio-reduction of arsenate using a hydrogen-based membrane biofilm reactor. *Chemosphere*, 65, 24-34. 2006.
34. J. Iqbal, H.J. Kim, J.S. Yang, K. Baek, J.W. Yang. Removal of arsenic from groundwater by micellar-enhanced ultrafiltration (MEUF). *Chemosphere*, 66, 970-976. 2007.
35. D.H. Kim, K.W. Kim, J. Cho. Removal and transport mechanisms of arsenics in UF and NF membrane processes. *J. Water Health*, 4, 215-223. 2006.
36. W. Yantasee, C.L. Warner, T. Sangvanich, R.S. Addleman, T.G. Carter, R.J. Wiacek, G.E. Fryxell, C. Timchalk, M.G. Warner. Removal of heavy metals from aqueous systems with thiol functionalized superparamagnetic nanoparticles. *Environ. Sci. Technol.*, 41, 5114-5119. 2007.

37. J.F. Liu, Z.S. Zhao, G.B. Jiang. Coating Fe_3O_4 magnetic nanoparticles with humic acid for high efficient removal of heavy metals in water. *Environ. Sci. Technol.*, 42, 6949-6954. 2008.
38. X. Wang, C. Zhao, P. Zhao, P. Dou, Y. Ding, P. Xu. Gellan gel beads containing magnetic nanoparticles: An effective biosorbent for the removal of heavy metals from aqueous system. *Bioresource Technology*, 100, 2301-2304. 2009.
39. J.G. Parsons, M.L. Lopez, J.R. Peralta-Videa, J.L. Gardea-Torresdey. Determination of arsenic(III) and arsenic(V) binding to microwave assisted hydrothermal synthetically prepared Fe_3O_4 , Mn_3O_4 , and MnFe_2O_4 nanoadsorbents. *Microchemical Journal*. 91, 100-106. 2009.
40. S. Zhang, H. Niu, Y. Cai, X. Zhao, Y. Shi. Arsenite and arsenate adsorption on coprecipitated bimetal oxide magnetic nanomaterials: MnFe_2O_4 and CoFe_2O_4 . *Chemical Engineering Journal*. 158, 559-607. 2010.
41. Z. Liu, F.S. Zhang, R. Sasai. Arsenate removal from water using Fe_3O_4 -loaded activated carbon prepared from waste biomass. *Chemical Engineering Journal*. 160, 57-62. 2010.
42. 賴進興，氧化鐵覆膜濾砂吸附過濾水中銅離子之研究，國立台灣大學環境工程研究所博士論文，1995。
43. R.M. Cornell, U. Schwertmann. *The iron oxides: structure, properties, reactions, occurrence and uses*, Wiley-VCH, New York, 1996.
44. 孫嘉福，駱尚廉，氧化鐵之特性與應用，自來水會刊雜誌，第 49 期，pp. 47-56，1994。
45. N. Sahai, D.A. Sverjensky. Evaluation of internally consistent parameters for the triple-layer model by the systematic analysis of oxide surface titration data. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61, 2801-2826, 1997.
46. L.M. Zelazny, V.C. Baligar, K.D. Ritchey, D.C. Martens. Ion strength effects on sulfate and phosphate adsorption on γ -alumina and kaolinite : Triple-Layer Model. *J. Soil Sci. Am.*, 61, 784-793, 1997.
47. R.A. McCurrie. *Ferromagnetic materials structure and properties*, Academic Press Inc., San Diego. 1994.

48. 金重勳，軟磁技術簡介，實用磁性材料，117-132，2002。
49. 唐敏注，通訊用軟磁材料之特性及應用，工業材料，42-50，1995。
50. 林正雄，鐵氧體軟磁材料，磁性技術手冊，133-158，2002。
51. 余樹楨，晶體之結構與性質，國立編譯館，2003。
52. M. Sciban, B. Radetic, Z. Kevresan, M. Klasnja. Adsorption of heavy metals from electroplating wastewater by wood sawdust. *Bioresour. Technol.*, 98, 402-409. 2007.
53. Y.H. Li, Z. Di, J. Ding, D.Wu, Z. Luan, Y. Zhu, Adsorption thermodynamic, kinetic and desorption studies of Pb^{2+} on carbon nanotubes. *Water Res.*, 39, 605-609. 2005.
54. L. Fang, Q. Huang, P. Cai, W. Liang. Application of XAFS technique in interface absorption of heavy metals. *Chin. J. Appl. Environ. Biol.*, 14, 737-744. 2008.
55. G. Ona-Nguema, G. Morin, Y. Wang, A.L. Foster, F. Juillot, G. Calas, G.E. Brown, Jr. XANES evidence for rapid Arsenic(III) oxidation at magnetite and ferrihydrite surfaces by dissolved O_2 via Fe^{2+} -mediated reactions. *Environ. Sci. Technol.*, 44, 5416-5422. 2010.
56. S.L. Wang, C.H. Liu, M.K. Wang, Y.H. Chuang, P.N. Chiang. Arsenate removal from water by Mg/Al- NO_3 layered double hydroxides with varying the Mg/Al ratio. *Applied Clay Science*, 43, 79-85. 2009.
57. Y.F. Chao, J.J. Lee, S.L. Wang. Preferential adsorption of 2,4-dichlorophenoxyacetate from associated binary-solute aqueous systems by Mg/Al- NO_3 layered double hydroxides with different nitrate orientations. *Journal of Hazardous Materials*, 165, 846-852. 2009.
58. M. Kiyama. Conditions for the formation of Fe_3O_4 by the air oxidation of $Fe(OH)_2$ suspensions. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*. 47, 1646-1650. 1974.
59. Y. Tamaura, P.Q. Tu, S. Rojarayanont, H. Abe. Stabilization of hazardous materials into ferrites. *Water. Sci. Tech.*, 23, 399-404. 1991.
60. 張健桂，以鐵氧磁體程序處理含重金屬實驗室廢液之研究，國立中山大學環境工程研究所碩士論文，2002。
61. 涂耀仁，以多段式磁鐵化法處理重金屬系實驗室廢液，國立中山大學環境工程研究所碩士論文，2002。

62. 陳文泉，重金屬廢水鐵氧磁體法處理之基礎研究，成功大學碩士論文，1992。
63. 吳在賢、蔡敏行等，電鍍廢水Ferrite化處理之研究，國科會專題研究計畫研究報告，1992。
64. Z.Y. Ma, Y.P. Guan, H.Z. Liu. Synthesis and characterization of micron-sized monodisperse superparamagnetic polymer particles with amino groups. J. Polym. Sci. Polym. Chem., 43 3433-3439. 2005.
65. I.D. Smiciklas, S.K. Milonjic, P. Pfendt, S. Raicevic. The point of zero charge and sorption of cadmium(II) and strontium(II) ions on synthetic hydroxyapatite. Sep. Purif. Technol. 18, 185-194. 2000.
66. S. Lagergren. Zur Theorie der sogenannten Adsorption gelöster Stoffe. Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar, 24, 1-39. 1898.
67. Y.S. Ho, G. McKay. The kinetics of sorption of divalent metals ions onto sphagnum moss peat. Water Res. 34, 735-742. 2000.

附 錄 一

預定進度及查核點

利用磁性奈米鐵氧磁體尖晶石移除水體砷污染之研究

預定進度及查核點

工作項目	年月												備 註
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1.鐵氧磁體尖晶石合成條件最適化研究	●	●	●	●									
2.自製鐵氧磁體尖晶石吸附劑基本特性研究		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
3.鐵氧磁體尖晶石吸附砷操作條件之最適化研究		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
4.反應動力參數及等溫吸附曲線之求得							●	●	●	●	●	●	
5.報告撰寫										●	●	●	
預計進度累積百分比 (%)	5 %	10 %	15 %	20 %	30 %	45 %	60 %	70 %	80 %	90 %	95 %	100 %	
查核點	預定完成時間				查核點內容說明								
1	100.3.31				1.鐵氧磁體尖晶石合成條件最適化研究								
2	100.6.30				2.自製鐵氧磁體尖晶石吸附劑基本特性研究 (繳交期中報告)								
3	100.9.30				3.鐵氧磁體尖晶石吸附砷操作條件之最適化研究								
4	100.12.30				4.反應動力參數及等溫吸附曲線之求得 (繳交期末報告)								

附 錄 二

實際進度及查核點說明

利用磁性奈米鐵氧磁體尖晶石移除水體砷污染之研究

實際進度及查核點說明

契約書之預定進度累積百分比(%)		100 %			實際執行進度(%)	100 %	
工作內容項目	實際執行情形	差異分析(打√)			落後原因	困難檢討及對策	預計改善完成日期
		符合	落後	超前			
鐵氧磁體尖晶石合成條件最適化研究	按照進度執行	√					
自製鐵氧磁體尖晶石吸附劑基本特性研究	按照進度執行	√					
鐵氧磁體尖晶石吸附砷操作條件之最適化研究	按照進度執行	√					
反應動力參數及等溫吸附曲線之求得	按照進度執行	√					
查核點		完成時間		查核點內容說明			
第一季		100.3.31		1.鐵氧磁體尖晶石合成條件最適化研究			
期中報告		100.6.30		2.自製鐵氧磁體尖晶石吸附劑基本特性研究			
第二次進度報告		100.9.30		3.鐵氧磁體尖晶石吸附砷操作條件之最適化研究			
期末報告		100.11.15		4.反應動力參數及等溫吸附曲線之求得			