

土壤處理與毒化物類

過硫酸鈉及過碳酸鈉與催化劑組合 對地下水重質非水相液體污染物降解力 實驗評估

王昱翔*

摘 要

重質非水相液體 (Dense Non-aqueous Phase Liquid, 以下簡稱 DNAPL) 造成土壤及地下水的污染問題為台灣甚至全球的棘手難題。現地化學氧化法 (In situ chemical oxidation, ISCO) 為長久以來降解土壤及地下水 DNAPL 的整治方法之一，其優點為反應速率快且可同時處理水相、吸附相與非水相的污染物，但化學氧化劑包括過硫酸鈉及過碳酸鈉降解 DNAPL 能力常常受到本身及催化劑調配濃度比例的影響，且廣為使用的催化劑亞鐵離子經 ISCO 程序後也會有沉澱現象，反而造成催化能力下降及堵塞管節的問題。為解決此問題，本實驗使用不同濃度的檸檬酸及抗壞血酸來穩定催化劑亞鐵離子，希望由過碳酸鈉及過硫酸鈉降解地下水中 DNAPL 實驗的結果得到降解效率高的化學藥劑組合比例。

試驗結果顯示還原性物質檸檬酸及抗壞血酸能穩定亞鐵離子的濃度，也減少含鐵物質的沉澱，但其潛在的問題是會造成過硫酸鈉氧化力的些微下降。過硫酸鈉及過碳酸鈉搭配催化劑組合的氧化作用皆能降解 DNAPL 物質，整體來看過硫酸鈉降解能力優於過碳酸鈉，在最佳藥劑組合比例下，氯乙烯能被完全降解，1,2- 二氯乙烷降解程度大約為 40%，優於不含催化劑組合之氧化劑，能更有效率的降解地下水中的 DNAPL。

【關鍵字】DNAPL、現地化學氧化法、過碳酸鈉、過硫酸鈉

* 台灣塑膠工業股份有限公司

環保工程師

一、前言

氯乙烯及 1, 2- 二氯乙烷為製造聚氯乙烯塑膠的單體及中間體，在早期塑膠工業製程及設備不如現今如此完善，偶爾會有洩漏發生，再加上地面並未鋪設防滲漏材質，或是清洗管線設備時並未妥善收集廢水，含氯有機物就因上述原因滲入土壤及地下水中，並隨時間不斷累積，造成環境及生態的危害 (Xiaomin Wang, 2019)。

含氯有機物屬於重質非水相液體 (DNAPL)，因其疏水性及密度大於水之性質，一旦長期滲入地下則會積累於含水層的最底部，其蓄積的深度造成整治上的困難及增加整治成本，且隨著地下水水流的流動，溶解相的含氯有機物會不斷擴散，造成污染區域的擴大 (賈儀平, 2009)。針對含氯有機物所造成之土壤及地下水的污染，現地化學氧化法為現今廣泛使用的整治方法 (環保署, 2019)，其特色為在不移動土壤及地下水的基礎下，直接在污染範圍內鑽設注藥井後，灌入化學氧化藥劑，使有機污染物就地進行降解，常見使用的氧化劑包含過氧化氫、高錳酸鹽及過硫酸鹽 (陳呈芳)，也有使用過碳酸鹽進行整治的文獻 (Xin Liu, 2021)。

本實驗使用之氧化劑過硫酸鈉及過碳酸鈉降解 DNAPL 能力會受到本身及催化劑調配濃度比例的影響，本公司在現地施作時常使用的催化劑亞鐵離子會因氧化劑過強造成沉澱造成催化能力下降及堵塞管節的問題 (環保署, 2019)，這同時造成降解地下水計畫期程拉長，且花費更多成本於疏通注藥井及添購更多化學藥劑，若為解決上述問題而加入過量的檸檬酸或抗壞血酸作為穩定亞鐵離子的試劑則會造成氧化劑之氧化力大幅下降 (Yang Lei, 2015)。爰此，為了減少沉澱發生及追求最大的整治效率，本實驗試以加入不同比例之檸檬酸及抗壞血酸作為穩定催化劑亞鐵離子的試劑，延長催化劑的存留時間 (Zhouwei Miao, 2015)，並由降解地下水中的氯乙烯及 1, 2- 二氯乙烷的結果檢驗穩定試劑之成效。本實驗之目標包含：(1) 穩定試劑 (檸檬酸、抗壞血酸) 的存在是否會影響亞鐵及氧化劑的氧化效力；(2) 比較過碳酸鈉及過硫酸鈉在地下水中對氯乙烯及 1, 2- 二氯乙烷的降解能力；及 (3) 由降解氯乙烯及 1, 2- 二氯乙烷結果來推斷氧化劑、催化劑與穩定試劑之最佳添加比例 (Liang, C., 2003)。

二、實驗材料與方法

2.1 實驗材料與裝置

2.1.1 實驗材料

實驗使用之試劑水以逆滲透 (Reverse osmosis, RO) 淨水系統製備，pH 值約為 7.0 ± 0.5 ，導電度約為 $10 \sim 30 \mu\text{S/cm}$ 。所使用的藥劑包含：過硫酸鈉 (Sodium persulfate, SPS, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$, >99%)、過碳酸鈉 (Sodium percarbonate, SPC, $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$)、硫酸亞鐵 (Iron(II) sulfate, FeSO_4)、檸檬酸 (Citric Acid, $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$, CA)、抗壞血酸 (ascorbic acid, $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$, AA) 與過硫酸根 ($\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$)。污染物濃度分析時使用以下藥品：硫酸 (Sulfuric acid, H_2SO_4)、硫酸亞鐵銨 (Iron(II) ammonium sulfate, $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$) 與硫氰酸銨 (Ammonium Thiocyanate, NH_4SCN)。此外，亞鐵離子 (Fe^{2+}) 分析使用：1,10-鄰二氮菲 (1,10-phenanthroline, $\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2$)。本次實驗使用現地受污染的地下水為試驗標的，地下水含氯乙烯 (Vinyl chloride, VC, $\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$) 濃度約為 16.23 mg/L ，地下水也含有 1,2-二氯乙烷 (1,2-dichloroethane, EDC, $\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$) 濃度約為 51.86 mg/L ，除了 VC 與 EDC 之外，該受污染的地下水並無其他揮發性有機化合物 (Volatile Organic Compound, VOCs) 存在。

2.1.2 實驗裝置

為了避免光線直射樣品產生化學反應，及避免接觸空氣造成揮發性有機氣體蒸散，本實驗使用之反應器具為 50mL 棕色血清瓶，大體積藥品或樣品定量使用定量瓶，小體積則使用可調式微量移液器。

2.2 實驗設計與流程

2.2.1 穩定試劑與氧化劑相容性試驗

本階段實驗以過硫酸鈉及過碳酸鈉為氧化劑，濃度皆為 0.5 mM，並分別加入相同濃度之檸檬酸及抗壞血酸作為穩定試劑，並比較無加入穩定試劑及有加入穩定試劑所產生之四項水質參數之變化：(1) 氧化還原電位 (Oxidation-Reduction Potential, ORP, mV)，(2) 溶氧 (Dissolved Oxygen, DO, mg/L)，(3) 導電度 (Electrical Conductivity, EC, $\mu\text{S}/\text{cm}$) 與 (4)pH 值。4 項參數皆使用儀器在混合氧化劑及穩定試劑後 30 min 於室溫下 (20°C) 進行量測，待數值穩定後進行紀錄。

另外，針對過硫酸鈉利用分光法分析 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 濃度，其實驗步驟為：過硫酸鈉空白組、過硫酸鈉分別加入檸檬酸或抗壞血酸 50mL，在血清瓶反應 30min 後，取 10mL 水樣檢測。分析時加入 10mL 2.5N 硫酸、0.1mL 0.4N 硫酸亞鐵銨溶液，經混合後靜置 40min，之後再加入 0.2mL 0.6N 硫氰化銨使溶液呈色，再以波長 450nm 測定水樣吸光值 (須製作檢量線 0 ~ 1.0mM)，試驗穩定試劑是否會造成過硫酸鈉之耗損 (Yang Lei, 2015)。

2.2.2 穩定試劑與催化劑相容性試驗

本階段實驗以硫酸亞鐵中的亞鐵離子分別與穩定試劑檸檬酸或抗壞血酸進行混合，藉以評估在檸檬酸或抗壞血酸的存在下，亞鐵離子是否能穩定存在於水溶液中。本試驗使用 0.4mM 硫酸亞鐵分別加入 0.2mM、0.4mM、0.8mM 檸檬酸或抗血酸中，加入 50mL 血清瓶均勻混合後，反應 30 分鐘，後取 10mL 樣品加入 1,10- 鄰二氮菲 (0.15%) 2mL，以定量瓶稀釋至 100mL，靜置 20 分鐘，在 509nm 下使用分光光度計測吸光值，以吸光值配合事先配置之檢量線 (0 ~ 0.05 mM) 求出濃度，藉此評估穩定試劑是否會造成亞鐵離子之耗損，造成催化能力減弱。

2.2.3 氧化劑搭配催化劑及穩定試劑對地下水中氯乙烯及 1,2- 二氯乙烷降解試驗

於 50 mL 棕色血清瓶中加入受污染的地下水、氧化劑、催化劑及穩定試劑並定量至 50 mL，添加比例為以下 15 組所示 (Sixia Yu, 2018):

- (1) 地下水 (B)。
- (2) 地下水 / 過硫酸鈉 0.5 mM / 硫酸亞鐵 0.4 mM (S0)。
- (3) 地下水 / 過硫酸鈉 0.5 mM / 硫酸亞鐵 0.4 mM / 檸檬酸 0.2 mM (SC1)。
- (4) 地下水 / 過硫酸鈉 0.5 mM / 硫酸亞鐵 0.4 mM / 檸檬酸 0.4 mM (SC2)。
- (5) 地下水 / 過硫酸鈉 0.5 mM / 硫酸亞鐵 0.4 mM / 檸檬酸 0.8 mM (SC3)。
- (6) 地下水 / 過硫酸鈉 0.5 mM / 硫酸亞鐵 0.4 mM / 抗壞血酸 0.2 mM (SA1)。
- (7) 地下水 / 過硫酸鈉 0.5 mM / 硫酸亞鐵 0.4 mM / 抗壞血酸 0.4 mM (SA2)。
- (8) 地下水 / 過硫酸鈉 0.5 mM / 硫酸亞鐵 0.4 mM / 抗壞血酸 0.8 mM (SA3)。
- (9) 地下水 / 過碳酸鈉 0.5 mM / 硫酸亞鐵 0.5 mM (C0)。
- (10) 地下水 / 過碳酸鈉 0.5 mM / 硫酸亞鐵 0.5 mM / 檸檬酸 0.2 mM (CC1)。
- (11) 地下水 / 過碳酸鈉 0.5 mM / 硫酸亞鐵 0.5 mM / 檸檬酸 0.5 mM (CC2)。
- (12) 地下水 / 過碳酸鈉 0.5 mM / 硫酸亞鐵 0.5 mM / 檸檬酸 1.0mM (CC3)。
- (13) 地下水 / 過碳酸鈉 0.5 mM / 硫酸亞鐵 0.5 mM / 抗壞血酸 0.2 mM (CA1)。
- (14) 地下水 / 過碳酸鈉 0.5 mM / 硫酸亞鐵 0.5 mM / 抗壞血酸 0.5 mM (CA2)。
- (15) 地下水 / 過碳酸鈉 0.5 mM / 硫酸亞鐵 0.5 mM / 抗壞血酸 1.0 mM (CA3)。

前述組合試驗乃在受污染地下水與添加藥劑均勻混合再靜置 1hr 後，測量 (1) 氧化還原電位 (Oxidation-Reduction Potential, ORP, mV)、(2) 溶氧 (Dissolved Oxygen, DO, mg/L)、(3) 導電度 (Electrical Conductivity, EC, $\mu\text{S}/\text{cm}$) 及 (4)pH 值，共 4 項水質參數。另外，再經 18hr 後另取 10mL 各組樣品加入棕色瓶以試劑水定量至 40mL，分析氯乙烯及 1, 2- 二氯乙烷之濃度，後再回推稀釋前之濃度。此外，針對過硫酸鈉氧化劑組別，於反應 1hr 後同時進行降解後之過硫酸根濃度殘留分析，分析步驟與前述同。

2.3 分析方法

2.3.1 化學分析

地下水樣品中過硫酸根濃度採用分光光度計法進行分析，其吸收波長設定為 450nm，所有樣品反應 40 分鐘，使其充分呈現淡黃色方進行量測。另外，亞鐵濃度採用分光光度計法進行分析，其吸收波長設定為 509nm，所有樣品反應 20 分鐘，使其充分呈現紅色方進行量測 (Liang, C., 2008)。

氯乙烯及 1, 2- 二氯乙烷降解試驗之萃取液樣品利用氣相層析儀搭配火焰離子化偵測器 (Gas chromatography/Flame ionization detector, GC/FID) 進行定量分析，進樣方式採用自動進樣，進樣體積為 1 μ L(Xin Liu, 2021)。

2.3.2 水質參數分析

為了評估加入氧化劑組合降解 DNAPL 污染物是否會對地下水環境造成變動，或穩定藥劑是否能讓氧化劑維持其在地下水中之氧化力，分別以氧化還原電位檢測計量測 ORP; 以攜帶型溶氧度計量測 DO; 以導電度分析儀測量 EC; 以酸鹼度計測量 pH 值。4 項水質參數皆在樣品穩定且不被擾動下測量，待測量數值穩定後，再進行記錄。

三、結果與討論

3.1 穩定試劑與氧化劑相容性試驗

表 1 為 0.5 mM 過硫酸鈉及過碳酸鈉空白組及分別加入特定濃度之檸檬酸及抗壞血酸 30 min 後之氧化還原電位、溶氧、電導度及 pH 值的水質參數。試驗結果顯示，加入穩定試劑後，溶氧數值無太大變動。在氧化還原電位部分，不論是過硫酸鹽或是過碳酸鹽，加入檸檬酸後皆會造成電位 ORP 值上升，此結果顯示地下水樣品呈現更強的氧化環境；加入抗壞血酸則恰好相反，因其本身的還原力造成氧化還原電位的下降，但未呈現負值。這也在表 2 測量過硫酸根的濃度顯示出，抗壞血酸的存在，因其還原力會造成具有氧化力的過硫酸根濃度有大約降低 10%；而檸檬酸造成過硫酸根濃

度下降趨勢並不明顯。電導度在兩種氧化劑則呈現截然不同的結果，檸檬酸或抗壞血酸加入過硫酸鈉會使電導度提升，推論是 3 者同為酸性不會互相反應，穩定增加離子的濃度；加入過碳酸鈉則正好相反，因過碳酸鈉為鹼性，兩穩定試劑為酸性，酸鹼中和的結果造成電導度下降，而這也顯示在 pH 值的變動上，過硫酸鈉原為弱酸性，加入穩定試劑呈現較強的酸性；過碳酸鈉原為鹼性，加入穩定試劑後，溶液呈現弱酸性或中性。

表 1 不同試劑組合的水質參數變化

實驗組別	ORP(mV)	DO(mg/L)	EC(μS/cm)	pH
0.5 mM過硫酸鈉空白組	254	4.68	153.4	6.26
0.5 mM過硫酸鈉+0.4 mM檸檬酸	441	5.28	241	3.47
0.5 mM過硫酸鈉+0.4 mM抗壞血酸	197	5.08	207	3.54
0.5 mM過碳酸鈉空白組	92	5.10	139.6	10.02
0.5 mM過碳酸鈉+0.5 mM檸檬酸	266	5.28	113.6	5.64
0.5 mM過碳酸鈉+0.5 mM抗壞血酸	37	4.86	95.5	7.04

表 2 加入檸檬酸或抗壞血酸對過硫酸鈉濃度的影響

實驗組別	吸光值	過硫酸根濃度(mM)
過硫酸鈉空白組	0.213	0.262202
過硫酸鈉+檸檬酸	0.210	0.257583
過硫酸鈉+抗壞血酸	0.195	0.234488

3.2 穩定試劑與催化劑相容性試驗

圖 1 為 0.4mM 硫酸亞鐵及分別加入 0.2、0.4、0.8mM 檸檬酸或抗壞血酸反應 30 分鐘後，先進行溶液稀釋 20 倍後，再檢測吸光值分析亞鐵離子的濃度，由結果顯示除了 C3 組亞鐵離子濃度較控制組大約低了 10%;A1 組低了 1%，其他組別亞鐵離子濃度皆大於控制組。由此可知，在 C1、C2、A2、A3 之亞鐵離子與穩定試劑的比例下，可以穩定甚至提升亞鐵離子的濃度。推論此結果之原因為硫酸亞鐵控制組之溶液接觸到空氣或水中溶氧會造成亞鐵離子氧化為鐵離子，但若有適當之穩定試劑之存在亞鐵

離子溶液中，就能減緩亞鐵離子免於氧化之反應，此作用能在土壤及地下水現地化學氧化法施作時，穩定亞鐵離子之存在，使其催化氧化劑產生自由基之化學反應可以穩定進行。

表 3 亞鐵離子搭配穩定試劑之吸收度、稀釋濃度及原濃度

實驗組別	吸光值	稀釋後濃度	回推原濃度 (mM)
0.4 mM硫酸亞鐵(B)	0.190	0.017637	0.352747
0.4 mM硫酸亞鐵+0.2 mM檸檬酸(C1)	0.209	0.01938	0.3876
0.4 mM硫酸亞鐵+0.4 mM檸檬酸(C2)	0.195	0.018096	0.361919
0.4 mM硫酸亞鐵+0.8 mM檸檬酸(C3)	0.171	0.015895	0.317894
0.4 mM硫酸亞鐵+0.2 mM抗壞血酸(A1)	0.188	0.017454	0.349078
0.4 mM硫酸亞鐵+0.4 mM抗壞血酸(A2)	0.206	0.0192016	0.382097
0.4 mM硫酸亞鐵+0.8 mM抗壞血酸(A3)	0.198	0.018371	0.367422

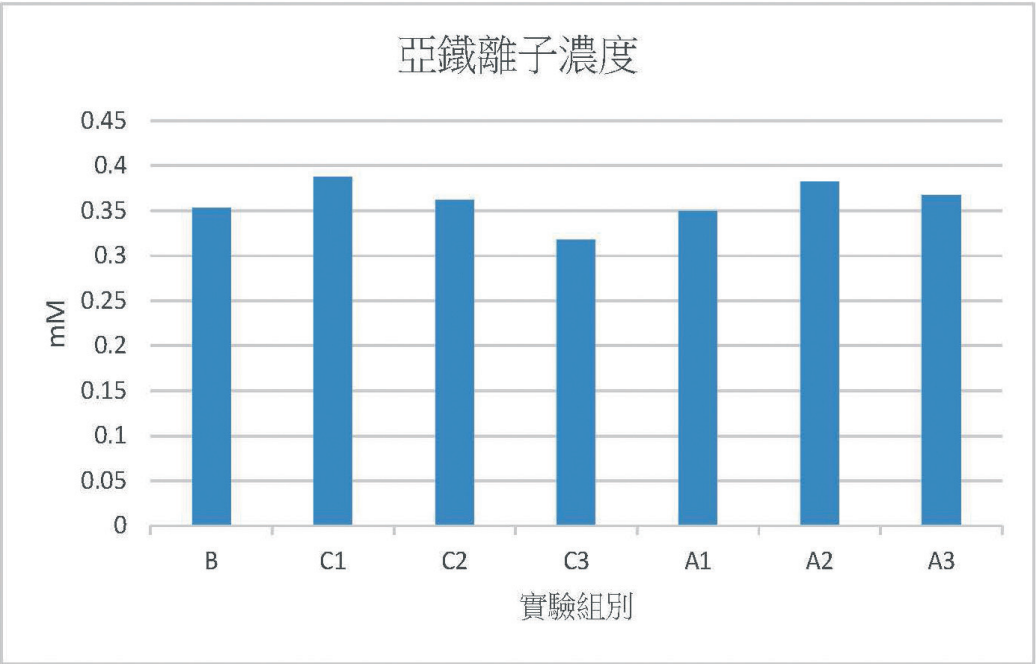


圖 1 亞鐵離子搭配穩定試劑之濃度變化

3.3 氧化劑搭配催化劑及穩定試劑對地下水中氯乙烯及 1,2- 二氯乙烷降解試驗

表 4 為地下水加入 0.5 mM 過硫酸鈉、0.4 mM 硫酸亞鐵及分別加入 0.2、0.4、0.8 mM 檸檬酸或抗壞血酸反應 1hr 後，進行 (1) 氧化還原電位 (ORP)、(2) 溶氧 (DO)、(3) 導電度 (EC) 及 (4)pH 值的水質參數量測結果。試驗結果顯示，加入藥劑後，EC 及 pH 值數值變動不大，此結果顯示，添加本試驗的藥劑可以避免重金屬從土壤中溶進地下水形成離子狀態造成重金屬污染。由表 4 及圖 2 可以發現 ORP 及 DO 之變動趨勢則較為一致，原本較偏向還原環境之地下水加入過硫酸鈉後，ORP 由負轉正形成氧化環境，DO 值也隨之增高。但在分別加入 2 種穩定試劑後，ORP 增加的趨勢較 S0 組 (對照組) 低，特別是隨著穩定試劑濃度的增加，增加的趨勢就越低，甚至在 SA2、SA3 兩組之 ORP 呈現負值；DO 值的部分除了 SC1 組仍高於空白組 (B)，其餘低於 B 組數值。該數值顯示加入穩定試劑似乎使氧化環境變弱及溶氧降低，似乎不利於 VC 及 EDC 之降解。但搭配表 5 的反應 1hr 後的 $S_2O_8^{2-}$ 濃度及降解 18 hr 後之 VC 及 EDC 濃度可以發現，SA2、SA3 組皆讓 $S_2O_8^{2-}$ 快速消耗 (SA2: 地下水 / 過硫酸鈉 0.5mM/ 硫酸亞鐵 0.4 mM / 抗壞血酸 0.4mM，SA3: 地下水 / 過硫酸鈉 0.5 mM/ 硫酸亞鐵 0.4mM / 抗壞血酸 0.8 mM)，且在降解 VC 及 EDC 有相當不錯的成效，優於 S0 組，表示此 2 組藥劑中穩定試劑的調配比例有助於降解 VC 及 EDC。

表 4 地下水加入 0.5 mM 過硫酸鈉、0.4 mM 硫酸亞鐵及分別加入 0.2、0.4、0.8 mM 檸檬酸或抗壞血酸後的水質參數變化

實驗組別	ORP(mV)	DO(mg/L)	EC(mS/cm)	pH
地下水(B)	-90	3.44	15.22	7.19
地下水+過硫酸鈉(S0)	238	4.26	14.42	7.04
地下水+過硫酸鈉+0.2 mM檸檬酸(SC1)	162	3.99	14.39	7.05
地下水+過硫酸鈉+0.4 mM檸檬酸(SC2)	129	3.09	14.34	7.06
地下水+過硫酸鈉+0.8 mM檸檬酸(SC3)	125	2.25	14.76	6.94
地下水+過硫酸鈉+0.2 mM抗壞血酸(SA1)	29	3.05	14.39	7.04
地下水+過硫酸鈉+0.4 mM抗壞血酸(SA2)	-68	1.84	14.31	7.04
地下水+過硫酸鈉+0.8 mM抗壞血酸(SA3)	-52	2.12	14.32	7.17

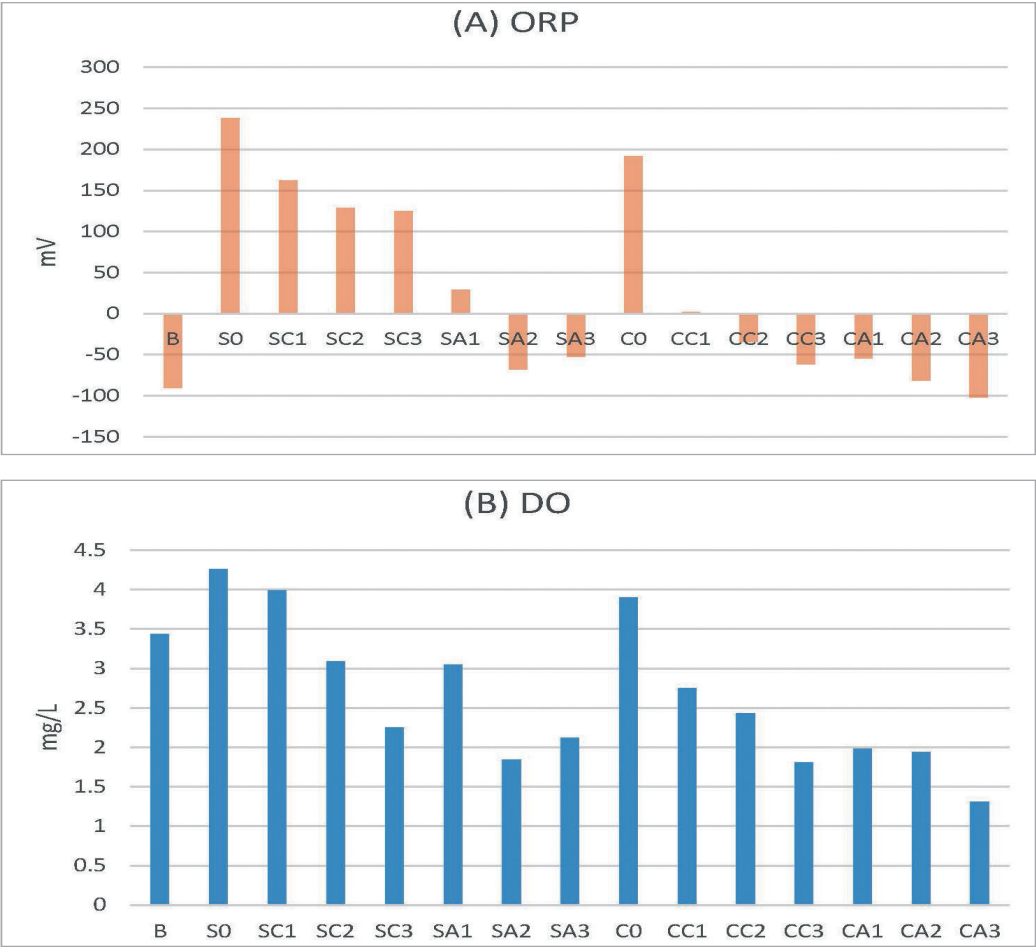


圖 2 14 組樣品反應後的 (A) ORP 測值及 (B) DO 測值

表 5 不同試劑組合的過硫酸根與氯化有機物 (VC & EDC) 濃度變化

實驗組別	吸光值	過硫酸根 (mM)	VC濃度 (mg/L)	EDC濃度 (mg/L)
地下水(B)	x	x	16.23	51.86
地下水+過硫酸鈉(S0)	0.620	0.889	<0.00016	38.55
地下水+過硫酸鈉+0.2 mM檸檬酸(SC1)	0.584	0.833	<0.00016	43.56
地下水+過硫酸鈉+0.4 mM檸檬酸(SC2)	0.606	0.867	<0.00016	40.84
地下水+過硫酸鈉+0.8 mM檸檬酸(SC3)	0.573	0.816	<0.00016	46.80
地下水+過硫酸鈉+0.2 mM抗壞血酸(SA1)	0.291	0.382	2.36	48.44
地下水+過硫酸鈉+0.4 mM抗壞血酸(SA2)	0.104	0.0944	<0.00016	35.04
地下水+過硫酸鈉+0.8 mM抗壞血酸(SA3)	0.065	0.0343	<0.00016	36.88

表 6 為地下水加入 0.5mM 過碳酸鈉、0.5mM 硫酸亞鐵及分別加入 0.2、0.5、1.0 mM 檸檬酸或抗壞血酸反應 1hr 後，進行 (1) 氧化還原電位 (ORP)、(2) 溶氧 (DO)、(3) 導電度 (EC) 及 (4)pH 值水質參數變化。試驗結果顯示，加入藥劑後，如同加入過硫酸鈉組別一樣，EC 及 pH 值數值變動不大。由表 6 可以發現原本較偏向還原環境之地下水加入過碳酸鈉後 (C0)，ORP 由負轉正形成氧化環境，DO 值也隨之增高。但在分別加入兩種穩定試劑後，ORP 隨著穩定試劑濃度的增加而直線下降，甚至在 CA3 組之 ORP 值低於地下水之值；DO 值的部分低於 B 及 S0 組數值。該數值顯示加入穩定試劑使氧化環境變弱及溶氧降低，不利於 VC 及 EDC 之降解，且由表 7 也顯示經降解 18hr 後之 VC 及 EDC 濃度，除 CA3 組降解成效優於 S0 組外，其餘組別加入穩定試劑後皆成效不彰，且對過碳酸鈉負面影響較過硫酸鈉顯著，其原因為穩定試劑的還原力太高導致過碳酸鈉的氧化力被抵消，導致其降解能力下降。至於 CA3 組的降解能力明顯優於其他組的原因推測為抗壞血酸的還原性主導了該組地下水溶液的化學反應，以還原性的反應使兩種污染物降解。

表 6 加入 0.5 mM 過碳酸鈉、0.5 mM 硫酸亞鐵及分別加入 0.2、0.5、1.0 mM 檸檬酸或抗壞血酸後的水質參數

實驗組別	吸光值	過硫酸根 (mM)	VC濃度 (mg/L)	EDC濃度 (mg/L)
地下水(B)	x	x	16.23	51.86
地下水+過硫酸鈉(S0)	0.620	0.889	<0.00016	38.55
地下水+過硫酸鈉+0.2 mM檸檬酸(SC1)	0.584	0.833	<0.00016	43.56
地下水+過硫酸鈉+0.4 mM檸檬酸(SC2)	0.606	0.867	<0.00016	40.84
地下水+過硫酸鈉+0.8 mM檸檬酸(SC3)	0.573	0.816	<0.00016	46.80
地下水+過硫酸鈉+0.2 mM抗壞血酸(SA1)	0.291	0.382	2.36	48.44
地下水+過硫酸鈉+0.4 mM抗壞血酸(SA2)	0.104	0.0944	<0.00016	35.04
地下水+過硫酸鈉+0.8 mM抗壞血酸(SA3)	0.065	0.0343	<0.00016	36.88

表 7 過碳酸鈉在不同試驗組合條件下對對 VC 與 EDC 的氧化成效

實驗組別	VC濃度 (mg/L)	EDC濃度 (mg/L)
地下水(B)	16.23	51.86
地下水+過碳酸鈉(C0)	3.26	34.80
地下水+過碳酸鈉+0.2 mM檸檬酸(CC1)	2.65	47.32
地下水+過碳酸鈉+0.5 mM檸檬酸(CC2)	4.56	53.36
地下水+過碳酸鈉+1.0 mM檸檬酸(CC3)	3.95	51.80
地下水+過碳酸鈉+0.2 mM抗壞血酸(CA1)	3.84	46.00
地下水+過碳酸鈉+0.5 mM抗壞血酸(CA2)	4.04	50.08
地下水+過碳酸鈉+1.0 mM抗壞血酸(CA3)	<0.00016	32.76

四、結論

為了使現地化學氧化法中催化劑亞鐵離子能穩定存在於地下水中，發揮其催化效果，本研究嘗試於 SPS 及 SPC 溶液中添加穩定試劑，藉此降低亞鐵離子氧化或沉澱之機率，使氧化劑溶液能穩定地被催化成自由基，並得有效降解低地下水中之污染物 VC 及 EDC，達到降低地下水 DNAPL 污染之目的。穩定試劑與氧化劑相容性試驗結果顯示，雖然加入穩定試劑會對水質參數造成變動，但對於過硫酸根的濃度僅有微幅的負面影響。穩定試劑與催化劑相容性試驗結果顯示，在適當濃度的穩定試劑添加下，可以穩定甚至提升亞鐵離子的濃度。氧化劑搭配催化劑及穩定試劑對地下水中氯乙烯及 1, 2- 二氯乙烷降解試驗的結果顯示，在穩定試劑的添加下，整體來看，過硫酸鈉之降解 VC 及 EDC 能力優於過碳酸鈉，由數據結果也可以得知 S0、SA2、SA3 及 CA3 四組藥劑比例，能對 VC 完全降解，EDC 則有 30~40% 的降解效果，可作為現地化學氧化法施作藥劑比例之參考。

參考文獻

- Xiaomin Wang*, Christopher J. Neville, (2019), A semi-analytical solution for the transport of solutes with complex sequences of first-order reactions, Computers and Geosciences 2019, 123, 121-136.
- 賈儀平, (2009), 「地下水污染」, 台灣大百科全書, <https://nrch.culture.tw/twpedia.aspx?id=3426>
- 行政院環保署, (2019), 「現地化學氧化法整治技術參考指引」, 土壤及地下水污染調查與整治技術參考手冊, <https://pse.is/4wx3dv>
- 陳呈芳, 「土壤及地下水污染現地化學氧化整治技術及案例介紹」, 台灣產業服務基金會, <https://proj.ftis.org.tw/eta/epaper/PDF/ti045-1.pdf>
- Xin Liu, Sen He, Yuan Yang, Bin Yao, Yifei Tang, Lin Luo, Dan Zhi, Zhonghao Wan, Lei Wang, Yaoyu Zhou, (2021) A review on percarbonate-based advanced oxidation processes for remediation of organic compounds in water. Environmental Research, Volume 200, 111371.
- Yang Lei, Hui Zhang, Jiawen Wang, Jia Ai, (2015), Rapid and continuous oxidation of organic contaminants with ascorbic acid and a modified ferric/persulfate system, Chemical Engineering Journal, 270, 73-79.
- Zhouwei Miao, Xiaogang Gu, Shuguang Lu, Mark L. Brusseu, Xiang Zhang, Xiaori Fu, Muhammad Danish, Zhaofu Qiu, Qian Sui, (2015), Enhancement effects of chelating agents on the degradation of tetrachloroethene in Fe(III) catalyzed percarbonate system, Chemical Engineering Journal, 281, 286-294
- Liang, C., Bruell, C.J., Marley, M.C., Sperry, K.L., (2003) Thermally Activated Persulfate Oxidation of Trichloroethylene (TCE) and 1,1,1-Trichloroethane (TCA) in Aqueous Systems and Soil Slurries, Soil & Sediment Contamination, 12, 207-228.

Sixia Yu, Xiaogang Gu, Shuguang Lu, Yunfei Xue, Xiang Zhang, Minhui Xu, Zhaofu Qiu, Qian Sui, (2018), Degradation of phenanthrene in aqueous solution by a persulfate/percarbonate system activated with CA chelated-Fe(II), Chemical Engineering Journal, 333, 122-131.

Liang, C., Huang, C., Mohanty, N., Kurakalva, R.M., (2008) A rapid spectrophotometric determination of persulfate anion in ISCO, Chemosphere, 73, 1540-1543.

Yaoyu Zhou, Yujia Xiang, Yangzhuo He, Yuan Yang, Jiachao Zhang, Lin Luo, Hui Peng, Chunhao Dai, Feng Zhu, Lin Tang, (2018), Applications and factors influencing of the persulfate-based advanced oxidation processes for the remediation of groundwater and soil contaminated with organic compounds, Journal of Hazardous Materials, 359, 396-407