



合約編號 **LD 07/2014**

粒狀鐵技術控制佐敦谷箱形雨水渠中惡臭污染的實地研究

行政摘要

編寫人：

商啟、 孫建良、 **Gustaaf A. Kikkert**、 王超

香港科大學研究開發有限公司

香港科技大学

香港九龍清水灣

2016 年 12 月

行政摘要

為了在旱季更好地攔截污水，同時允許在雨季迅速排放雨水，近期在佐敦谷箱形雨水渠（JVBC）實施了升級改造工程。該截流工程項目被正式命名為“九龍灣污水截流站（KBSIS）”。KBSIS 主要包括可自動控制的截流水閘、淤泥隔除設施、連接截流設施和污水泵站的截流管道、以及將截流泵升至污水管網的污水泵站，截流最終得以被輸送至觀塘初級污水處理廠。當水閘關閉時，JVBC 內的污水將會被攔截並導入截流管道；水閘開啟時，則可直接迅速排放出大海。為了防止截流管道、泵站和下遊污水管網的淤塞，此次升級改造工程在雨水幹渠（水閘上遊）和截流管道的交匯處建造了一淤泥隔除設施。由於大量淤泥被集中截留在此隔除設施內，以及淤泥長期浸沒於因渠管錯誤接駁而引入富含有機物的污水和富含硫酸鹽的潮水，促進了由硫酸鹽還原細菌主導的生物硫酸鹽還原過程，產生惡臭硫化氫，在地面上勢必會導致嚴重的惡臭污染。

為了解決箱形雨水渠中的硫化氫惡臭問題，由香港科技大學（HKUST）商啟教授領導的科研團隊，在創新科技署（ITC）的資助下，已經開發了一項創新的、低成本的、長效的粒狀鐵技術。為了進一步發展這項新技術，香港科技大學研究開發有限公司開展合約編號為 LD 07/2014 的“粒狀鐵技術控制佐敦谷箱形雨水渠中惡臭污染的實地研究”協定研究項目，以考察驗證該技術對 KBSIS 淤泥隔除設施中硫化氫惡臭的控制效果。

本項目考察粒狀鐵技術控制 KBSIS 惡臭污染的效果，側重於評估新制備的生銹廢鐵屑及利用高潮位時人工開啟水閘產生液壓沖洗進行再生後的廢鐵屑對硫化氫控制的性能。本項目開始於 2014 年 9 月，結束於 2016 年 1 月，並完成以下主要任務：

- 1) 考察基準狀況
- 2) 考察新制備的生銹廢鐵屑的效果（分別於階段 1A 及 1B 投加或重新投加）
- 3) 考察利用水閘開啟過程中的潮汐能量對廢鐵屑進行再生（階段 2）
- 4) 考察再生後廢鐵屑的惡臭控制效果（分別於階段 3A 及 3B 進行第一次及第二次再生）

該實地研究項目的主要研究結果和結論如下：

- a. 如圖 1 所示，在階段 1A 內，投加量為每平方米 0.32 公斤的新制備生銹廢鐵屑嵌入淤泥表層下約 10 厘米後，稍微降低了淤泥孔隙水中溶解態硫化氫的濃度。然而，約一週後，投加鐵屑的區域和參考區域內的硫化氫濃度基本接近。這可能是由於目標區域內的 Fe(III) 的濃度過低，它們接近上遊參考區域內的本底濃度。如圖 3 所示，雖然在採樣點 c 平鋪覆蓋了更高投加量的生銹廢鐵屑（每平方米 2.82 公斤），但是，約兩周後，這些富含 Fe(III) 的生銹廢鐵屑在位置 c 上也很快被消耗完（圖 2）。

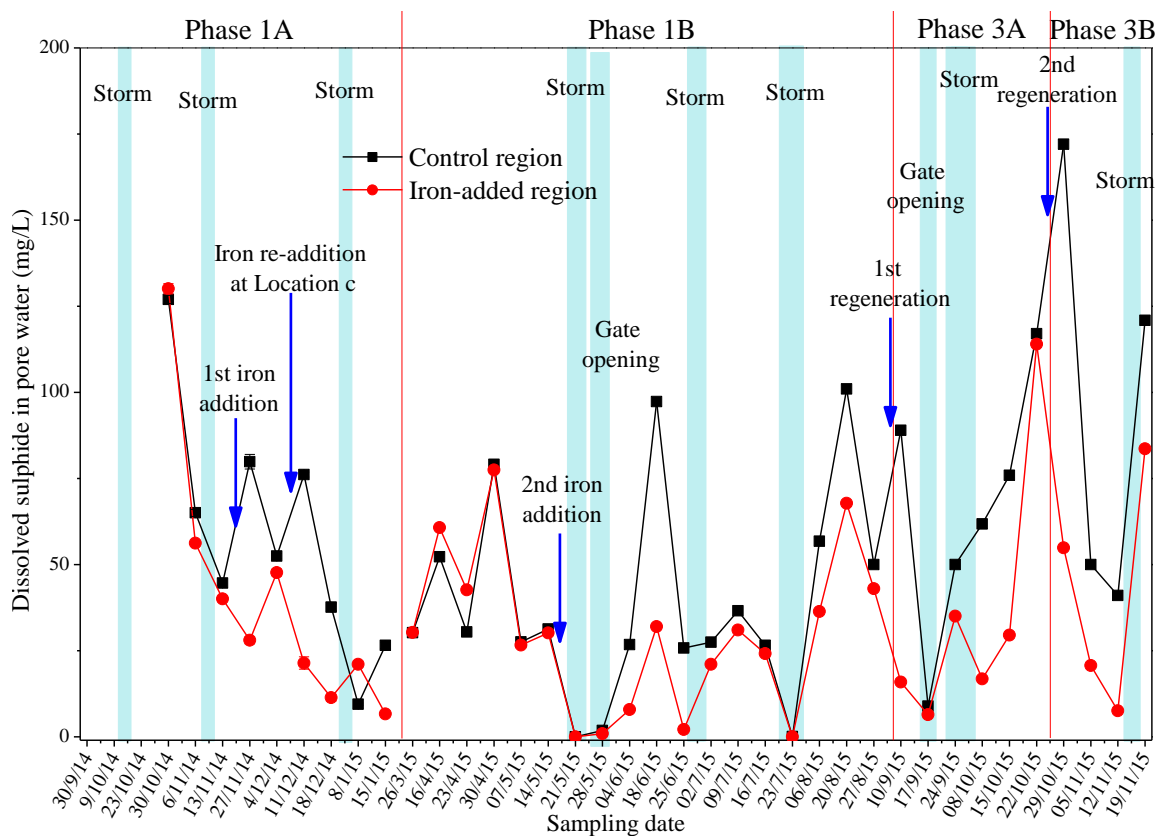


圖 1. 實地研究各階段內淤泥孔隙水中溶解態硫化氫的濃度。

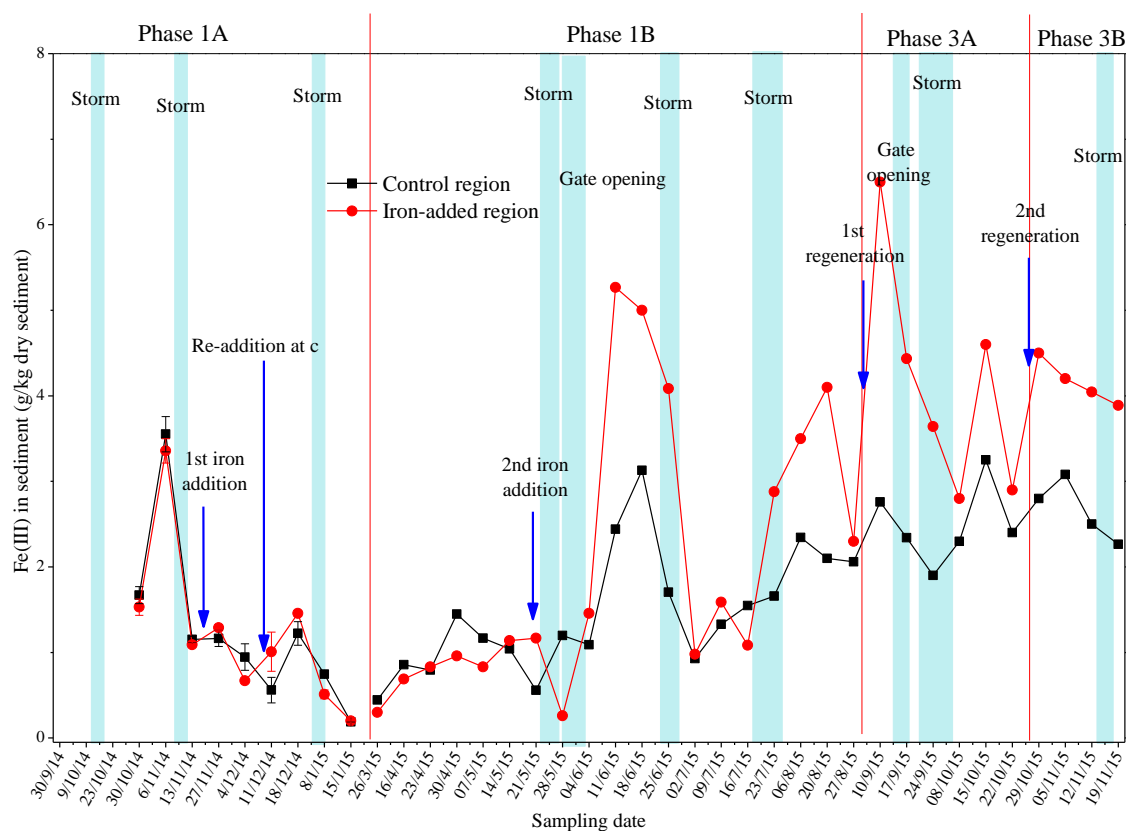


圖 2. 實地研究各階段內淤泥中固態 Fe(III) 的濃度。

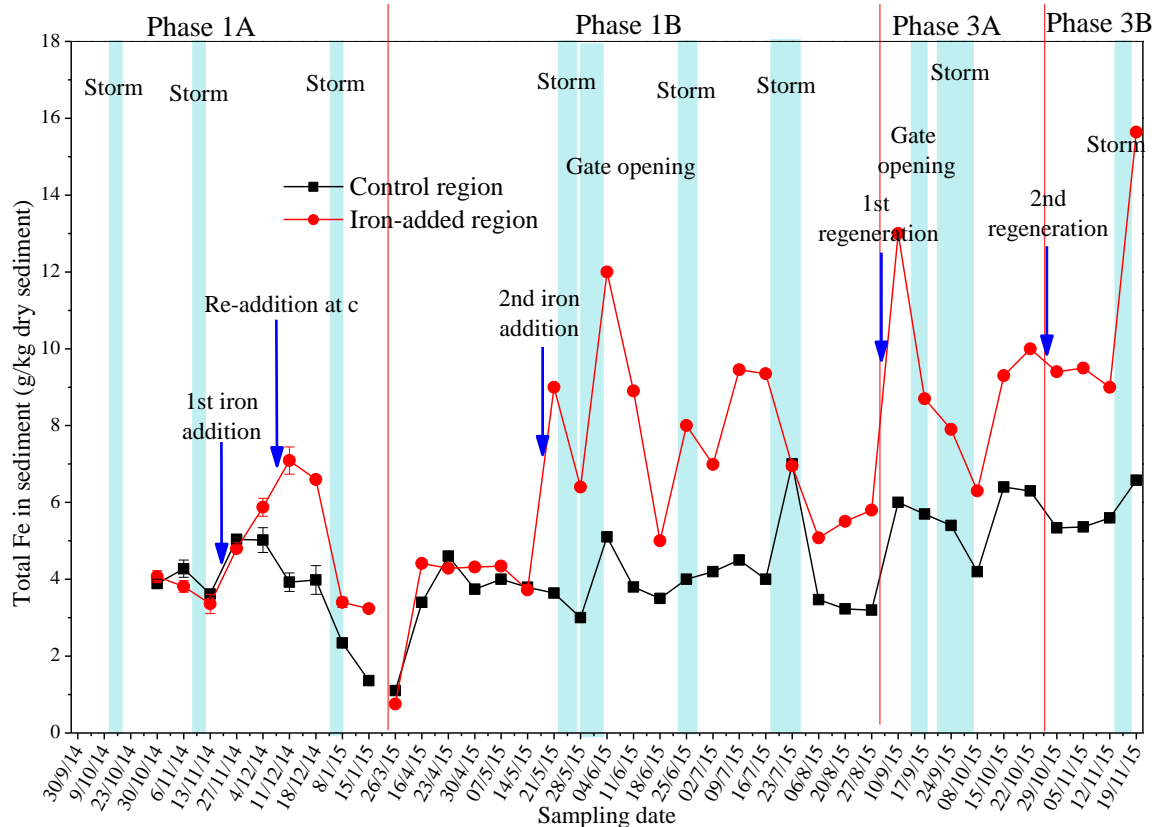


圖 3. 實地研究各階段內淤泥中固態總鐵的濃度。

- b. 如圖 1 所示，在階段 1B 內，即使在極度惡劣的測試條件下，在 KBSIS 淤泥隔除設施的投加鐵屑區域內之淤泥表面，投加每平方米 8.33 公斤的生銹廢鐵屑，仍然能在約 4 周（計入暴雨期則為 7 周）的時間內有效地控制硫化氫的釋放。該階段內檢測到的淤泥中較高的 Fe(III) 和總鐵濃度（分別如圖 2 和圖 3 所示）也印證了這一結論。這些投加的 Fe(III) 被逐漸消耗於硫化氫的控制，同時生成 Fe(II) 產物，並最終導致了生銹廢鐵屑的失效（圖 2）。
- c. 在階段 2 內，由於遭遇到水閘前端（淤泥隔除設施一側）的高水位的情況、以及緩慢開啟水閘產生的潮水沖洗效應，產生了不同於瞬時潰壩引起的沖洗效應。然而，即使水閘兩側水位差僅為 1.17 m，沖洗效應也可以直接使覆蓋在淤泥表面的廢鐵屑懸浮並與潮水中的溶解氧充分混合。並且沖洗後，富含溶解氧的海水淹沒含有廢鐵屑的淤泥，允許溶解氧通過擴散緩慢地滲透進入淤泥上層。上述的兩個過程都為廢鐵屑表面 Fe(II) 產物氧化回 Fe(III) 的反應提供了溶解氧，使得在階段 1B 內失效的廢鐵屑得到再生。
- d. 階段 3A 內投加鐵屑的區域內淤泥中 Fe(III) 濃度的顯著增加（圖 2），以及該點較參考區域內的溶解態硫化氫濃度為低（如圖 1 所示）也證明了廢鐵屑的成功再生。投加鐵屑的區域內的再生廢鐵屑能夠在惡劣測試條件下，有效地控制淤泥孔隙水中硫化氫濃度於低水平約 4 周（計入暴雨期則為 6 周）（圖 1），直至 Fe(III) 的濃度降低到接近本底水平（圖 2）。

- e. 在第二次再生試驗中（階段 3A 和 3B 之間），水閘兩側更大的水位差（2.25 m）引發了更強勁的潮水沖洗效應，進而成功地再生了失效的廢鐵屑。然而，強勁的潮水沖洗效應同時也加劇了再生廢鐵屑的遷移，增加了參考區域內 Fe(III) 和總鐵的濃度。第二次再生並使用 4 周後，在投加鐵屑的區域內的再生廢鐵屑仍然沒有失效。此外，相較階段 3A，在階段 3B 更少量的廢鐵屑卻具有更長的有效使用時間，這可能是由於第二次再生中形成更強的潮水沖洗效應。根據上述比較，我們可以估計第一次和第二次再生後的廢鐵屑的性能應該接近甚至優於新制備的生鏽廢鐵屑。
- f. 有趣和意想不到的，在整個實地研究中不時發生的暴雨不僅減少了硫化氫的生成，還無意中再生了廢鐵屑。與開啟水閘產生的潮水沖洗效應類似的是，暴雨期的雨水水流不僅使得廢鐵屑懸浮並與富氧雨水混合，還通過擴散效應將溶解氧輸送進入淤泥上層，從而再生廢鐵屑。在大部分暴雨後，可以重複檢測到淤泥中 Fe(III) 濃度的顯著增加（圖 2）和淤泥孔隙水中溶解的硫化物濃度明顯下降（圖 1）。這種自發的再生過程延長了廢鐵屑的硫化氫控制有效期約 1 至 2 周。另一方面，暴雨水流也引起了廢鐵屑在淤泥隔除設施內的遷移和再分布。在暴雨發生後，較高的 Fe(III) 和總鐵濃度經常在某些採樣點被檢測到。這種廢鐵屑的不均勻再分布和選擇性富集，導致了不同區域內硫化氫控制效果上的差異。
- g. 圖 4 揭示了孔隙水中去除溶解態硫化氫濃度與淤泥中固態 Fe(III) 濃度之間的聯繫。投加鐵屑的區域和參考區域內硫化氫濃度的差值 ($\Delta[\text{H}_2\text{S}] = [\text{H}_2\text{S}]_{\text{control}} - [\text{H}_2\text{S}]_{\text{iron-added}}$) 大體上與固態 Fe(III) 濃度的差值 ($\Delta[\text{Fe(III)}] = [\text{Fe(III)}]_{\text{iron-added}} - [\text{Fe(III)}]_{\text{control}}$) 成正比例。這進一步驗證了粒狀鐵技術在控制雨水管渠中硫化氫的效果是起因於新生及再生廢鐵屑所提供的固態 Fe(III)。

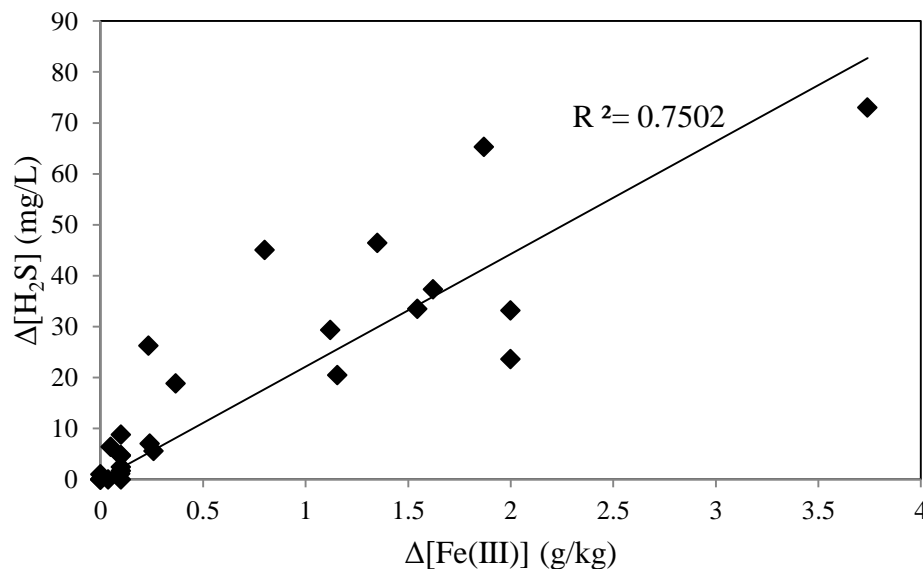


圖 4. 孔隙水中去除溶解態硫化氫濃度與淤泥中固態 Fe(III) 濃度之間的聯繫。

- h. 此實地研究的結果表明，除了將廢鐵屑完全嵌入淤泥層外，在淤泥層表面覆蓋廢鐵屑也可以作為將粒狀鐵技術應用於箱形雨水渠淤泥隔除設施內硫化氫控制的另一種選擇。此實地研究中已發現完全嵌入的方式難以在真實的箱形雨水渠淤泥隔除設施內實施；相比之下，通過表面覆蓋的方式投加廢鐵屑在操作上更容易實現。此外，我們還發現，即使在水閘兩側水位差較小的情況下，開啟水閘產生的潮水沖洗效應

也更容易再生覆蓋在淤泥表面的廢鐵屑。然而，這也意味著需要進行相對頻繁的再生操作，以實現良好的硫化氫控制效果。而且，也需要更好的控制暴雨和潮汐水流，從而防止廢鐵屑的不均勻再分布和選擇性富集。

基於此中游實地研究中發現的粒狀鐵技術在箱形雨水渠淤泥隔除設施內硫化氫控制方面的優越性和局限性，並結合先前上游 ITF 研究項目中取得的成果，我們提出了一些進一步開展下游應用研究的建議。在大規模應用該粒狀鐵技術於實際箱形雨水渠及淤泥隔除設施中之前，還需要開展以下研究：

- a. 建議在下一步的實地研究中開展一套模擬實際箱形雨水渠及淤泥隔除設施的嚴格控制的物理模型，這一模型可以建造在 **KBSIS** 的地面或其他適合的地方。模型的尺寸為：長 6 m，高 2.5 m（包括 1 m 深填充來自實際雨水渠中的淤泥樣品的淤泥層和 1.5 m 的自由界面），寬 30 cm，用來模擬在水渠沿水流方向上一段真實箱形雨水渠的薄單元。該模型還包括一套水泵系統，水泵可以從實際雨水渠中抽取一小部分旱季污水進入到模型中，允許硫化氫在可控的條件下形成。水泵系統也可以提供不同預設流量的雨水和海水，以模擬不同暴雨水流和緩慢開啟水閘產生的海潮沖洗水流。因為用於再生覆蓋淤泥層表面的廢鐵屑的水流形式實際上已經不再是理想的潰壩水流，此可以調整進出水高度、流速和水閘開啟前淹沒淤泥層的水深的物理模型將可以對代表淤泥隔除設施、箱形雨水渠不同部分等各種情形進行模擬。利用該模型，我們可以開展如下研究：
 - a) 對比不同的廢鐵屑投加方式。這些投加方式包括將廢鐵屑平鋪覆蓋在淤泥層表面、嵌入到淤泥表面下 5 至 10 cm 表層內、以及完全嵌入到整個淤泥層內。比較不同投加方式下的生銹廢鐵屑的硫化氫控制性能及採用液壓沖洗進行再生的效果。在香港地區的雨水管渠體系中，實際的情況與該實地研究中 **KBSIS** 的截然不同。在不同的情況下，可以選用不同的方式投加鐵屑。例如，在觀塘地區的封閉雨水管渠中，可以在淤泥清理過程中投加鐵屑。而在元朗地區的開放式雨水明渠中，可以輕易將鐵屑平鋪覆蓋在淤泥層表面，或嵌入到淤泥層中。
 - b) 在不同的水閘開啟方式和暴雨情形下，考察水流速度及浸沒在淤泥層上的水深，對廢鐵屑再生效果及負面遷移的影響，以求在廢鐵屑的再生和遷移之間實現平衡，從而檢驗和優化在模擬各種香港地區感潮區內不同雨水管渠的下遊段的各種狀況中的再生方式。
 - c) 在以下兩種可能的情形下，優化廢鐵屑投加和再生的方式。第一種情形代表感潮區的下遊段箱形雨水渠及 **KBSIS** 淤泥隔除設施，此情形大量淤泥將積累在靠近水閘的小範圍區域內。第二種情形代表長箱形雨水渠的中上遊段，這些區域潮汐能量相對較弱。
- b. 考慮到在實際中制造潰壩效應的難度以及尋求最佳再生效果和最小廢鐵屑遷移之間的平衡，考察其他的再生方式。第一種全新的再生方式是利用化學強氧化劑，比如氯、雙氧水等，周期性地再生失效後的廢鐵屑。由於具有更高的氧化能力，合適濃度的氧化劑應該可以最佳的氧化廢鐵屑表面 **Fe(II)** 產物，進而更有效地再生廢鐵屑。雖然這種再生方式需要像常規控制硫化氫的方法一樣投加藥劑，但是藥劑的投加頻率可以大大降低，因為氧化劑的投加僅僅在需要進行廢鐵屑再生時進行，而且再生

後的廢鐵屑可以在很長一段時間內持續發揮硫化氫控制效果，再者不需要擔心溶解態化學藥劑被雨水和潮水輕易沖走或稀釋。因此整體成本可以大大降低。對於可以輕易再生的覆蓋在淤泥層表面的廢鐵屑，另外一種再生方式是最大化地利用富氧的雨水再生廢鐵屑，這可以通過在封閉雨水管渠、雨水明渠中或淤泥隔除設施的下遊設置小型的橡皮充氣水壩，以截留富氧雨水，增大在雨水渠內的停留時間。在此次實地研究中，我們發現暴雨水流經常可以在一定程度上再生覆蓋在淤泥層表面的廢鐵屑。然而，接觸時間不夠長，而且暴雨水流會造成廢鐵屑的遷移。通過利用充氣后的橡皮水壩截流富氧雨水，使廢鐵屑在更長時間內淹沒在足夠深度的富氧雨水中，廢鐵屑可以被更好地再生和截留。在香港地區內具有良好基礎的封閉雨水管渠或雨水明渠中，可充氣的橡皮水壩可以被輕易安裝。此外，考慮到封閉雨水管渠或雨水明渠的平緩坡度（如 1‰）和再生所需的較小水深（約 1 m），少量的橡皮充氣水壩即可滿足要求（例如，每千米一個水壩）。因而，利用可充氣的橡皮水壩再生廢鐵屑將會是一種經濟有效的途徑。以上推薦的兩種再生方式，可以在上述的物理模型中進行驗證，並通過其他的序批式和連續流實驗進行深度研究。在潮汐能量相對較弱甚至沒有潮汐的雨水灌渠的中上游段內，預期這兩種再生方式為廢鐵屑再生的最經濟有效的途徑。