

油污染土壤之綠色整治技術

程淑芬，朝陽科技大學環境工程與管理系教授
林舜隆，台灣中油股份有限公司探採研究所研究員
蕭因秀，台灣中油股份有限公司探採研究所研究員
黃金源，朝陽科技大學生化科技研究所博士
胡育誠，朝陽科技大學環境工程與管理研究所碩士班研究生
林旻秀*，朝陽科技大學生化科技研究所博士生

一、前言

石油一直是人類相當重要的能源，石油的提煉、儲存、運輸及使用過程，意外洩漏常造成土壤污染。石油成分中主要包括脂肪族(aliphatic)、環狀族(cycloaliphatic)及芳香族(aromatic)碳氫化合物，統稱為總石油氫化合物(total petroleum hydrocarbons，簡稱 TPH)。土壤石油污染可分為高揮發性之低碳數油品污染，如汽油；以及低揮發性高碳數油品污染，如柴油、重油、潤滑油等。土壤受高揮發性油品污染普遍採用物理性的方法如土壤蒸氣萃取法(SVE)、空氣注入法(AS)等進行整治。對於低揮發性油品污染的土壤，化學、生物或熱處理技術較常被應用。生物修復技術(Bioremediation)具安全、經濟、低耗能及對土壤特性影響小等優點，被認為是一種環境友善的綠色整治技術(Zahed et al., 2021；Sui et al., 2021)。

生物復育包括應用微生物分解以及植生復育。以微生物進行處理常見的工法如土耕法(landfarming)、生物通氣法(bioventing)等。為提升微生物對油品的分解速率，許多研究從油污染場址中篩選對石油具有高分解效率的菌株來加速生物分解效率。假單胞菌屬(*Pseudomonas* sp.)、不動桿菌屬(*Acinetobacter* sp.)以及紅球菌屬(*Rhodococcus* sp.)被證實對石油具有高分解能力(Sui et al., 2021)。研究指出(Sui et al., 2021)，不動桿菌屬有多種基因具分解不同鍊長烷烴的潛力。威尼斯不動桿菌(*Acinetobacter venetianus*)，簡稱 A.V.菌，為對烷烴類具有高分解潛力的細菌，是 TPH 污染土壤生物復育熱門研究的議題。以植物進行整治稱為植生復育(phytoremediation)，是一種結合陽光、植物及自然界微生物特性的整治技術，植生復育能同時擁有綠色景觀與污染整治功效，為較受歡迎之整治技術。對於石油污染土壤，植生復育之主要作用機制包括：(1)植物體內的代謝作用，將 TPH 轉換、分解或合成植物細胞組成，稱為植物轉換(phytotransformation)或植物分解(phytodegradation)作用；(2)植物根部釋放出低分子量有機酸，提供根圈土壤中的微生物做為碳源或營養源，促進根圈微生物對污染物的分解，稱為植物根圈微生物的促進作用(rhizosphere bioremediation)；(3)植物葉面的蒸發散作用使污染物蒸發至大氣，稱為植物蒸發作用(phytovolatilisation)等。植生復育篩選之植物首要條件為必須能忍受污染環境並生長良好。培地茅(*Vetiveria zizanioides* L.)是一種多年生草本植物，能在各種惡質環境中生長(Kiamarsi et al., 2020)。研究指出，培地茅具有修復石油污染土壤的潛力。Saeideh and Seyedi (2018)研究指出，培地茅具有分解新鮮及受風化(aged)油污染土壤的能力。種植培地茅之主要作用為增加了土壤中 TPH 的生物有效性，提高土壤中碳氫化合物的生物降解程度。

生物炭具有多孔性、高比表面積特性，施用於土壤可增加土壤通氣性，提高土壤肥力，對於生物復育，可做為微生物載體，有助於微生物的生長。研究指出，將生物炭應用於油污染土壤的整治，可提高油污染的分解速率(Michael et al., 2021; Chinyere et al., 2021)，主要歸因於生物刺激以及生物放大的協同作用(Zhang et al., 2019)。生物炭的應用可達到農業廢棄物回收再利用以及土壤固碳的功效，為土壤油污染整治可應用的良好資材。

為了提升油污染土壤的生物復育效率，本研究採取台灣中部一處油污染場址土壤，進行不同生物復育方式的試驗，包括使用原生菌、嗜油菌、培地茅，以及培地茅結合嗜油菌、生物炭等方式，比較各種生物復育方式對油污染土壤之分解效率，藉此找出最經濟有效之生物整治技術。

二、研究方法

本研究試驗土壤採自台灣中部某油庫污染場址，標的污染物為高碳數(C10~C40)之石油碳氫化合物。採取不同濃度污染土壤均勻混合成高、低二種濃度土壤，高濃度土壤 TPH 濃度大約為 8,000 mg/kg；低濃度土壤 TPH 濃度大約為 3,000 mg/kg。試驗採用盆栽試驗，每盆土壤約 30 公斤重，共分為 A-E 五種試驗組，每一試驗組別進行三重複試驗。A 組為土壤原生菌試驗組，為對照組，以土壤中原本存在之原生菌來分解 TPH。B 組為油分解菌試驗組，選擇已被證實的嗜油菌 *Acinetobacter venetianus* (簡稱 A.V. 菌) 進行試驗，A.V. 菌由台灣中油公司培養提供。菌液分為 2 次添加，第一次於試驗前 1 星期添加，每盆添加 1 公升原液，以自來水以 1:1 稀釋後拌入試驗土壤。於 3 個星期後追加第二次菌液，每盆亦添加 1 公升原液，同樣以自來水以 1:1 稀釋後直接澆灌於土壤。C 組為種植培地茅試驗組，D 組為添加 A.V. 菌並種植培地茅試驗組，E 組為土壤添加 2.5% 生物炭並種植培地茅試驗組。生物炭以培地茅植體製作，培地茅植體取自中油公司油污染場址所種植，採取培地茅地上部，將植物體風乾後以 550°C 炭化 1 小時製備而成。於培地茅種植前，每盆加入約 750 克生物炭均勻混拌。培地茅購自彰化田尾園藝行，種植培地茅之試驗組，每一盆栽種植 2 叢。

三、結果與討論

本研究試驗土壤 TPH 濃度分為高濃度及低濃度二種，高濃度土壤 TPH 初始濃度大約為 8,000 mg/kg；低濃度約為 3,000 mg/kg。土壤 TPH 生物分解試驗共分為 A 至 E 五個試驗組。試驗過程每 2 個月採集根圈土壤分析 TPH 濃度，分析結果如圖 1 所示。圖 1(a) 為低濃度污染土壤各試驗組 TPH 濃度平均變化情形。A 組經過 2 個月後土壤 TPH 濃度為 1,455.3±226.4 mg/kg，降解率 52.0%；四個月時土壤 TPH 濃度為 904.7±178.0 mg/kg，降解率 70.1%；經過六個月試驗後，土壤 TPH 濃度為 826.3±296.5 mg/kg，降解率 72.7%。B 組經過兩個月後土壤 TPH 濃度為 1,765.3±352.6 mg/kg，降解率 41.7%；四個月時土壤 TPH 濃度為 1,781.3±512.0 mg/kg，降解率 41.2%；經過六個月試驗後，土壤 TPH 濃度為 878.3±186.0 mg/kg，降解率 71.0%，土壤添加 A.V. 菌對 TPH 之分解效率與對照組並沒有顯著性差異。C 組種植培地茅兩個月時根圈土壤 TPH 濃度為 897.2±456.8 mg/kg，已低於管制標準 1,000 mg/kg，降解率 70.4%。四個月時濃度為 691.3±265.2 mg/kg，降解率 77.2%；種植六個月後，土壤 TPH 濃度只剩下 278±33.8 mg/kg，降解率高達 90.8%。D 組為添加 A.V. 菌並同時種植培地茅試驗組，兩個月後，根圈土壤 TPH 濃度為 656.9±303.2 mg/kg，降解率 78.3%；四個月時濃度為 531.7±496.4 mg/kg，降解率

82.5%；到六個月時，土壤 TPH 濃度為 263.0 ± 102.8 mg/kg，降解率 91.3%。種植培地茅並添加 A.V.菌可提高 TPH 分解效率，試驗時間 2 個月時去除效率增加 7.9%；4 個月時增加 5.3%；6 個月時增加 0.5%，隨試驗時間越長 A.V.菌所提升的效率越少。E 組為土壤添加 2.5% 生物炭後並種植培地茅試驗組，經過兩個月時根圍土壤 TPH 濃度為 713.0 ± 227.9 mg/kg，降解率為 76.5%；四個月時土壤 TPH 濃度為 436.4 mg/kg，降解率 85.6%；經過六個月試驗後，土壤 TPH 濃度為 128.7 ± 23.3 mg/kg，降解率 95.8%。與試驗組 C 比較，種植培地茅時若土壤再添加生物炭，可增加 TPH 去除率約 5~8.5%。

圖 1(b) 為高濃度污染土壤各試驗組 TPH 濃度平均變化情形。A 組在兩個月時土壤 TPH 濃度為 $5,125.7 \pm 870.3$ mg/kg，降解率 34.8%；四個月時土壤 TPH 濃度為 $4,243.3 \pm 176.0$ mg/kg，降解率 46.1%，經過六個月試驗後，土壤 TPH 濃度為 $3,893.0 \pm 292.3$ mg/kg，降解率 50.5%。B 組兩個月時土壤 TPH 濃度為 $3,665.0 \pm 504.1$ mg/kg，降解率 53.4%；四個月時土壤 TPH 濃度為 $3,479.7 \pm 58.2$ mg/kg，降解率 55.8%；經過六個月試驗後，土壤 TPH 濃度為 $3,269.0 \pm 502.5$ mg/kg，降解率 58.4%。添加 A.V.菌較對照組約增加 8% 去除率。C 組兩個月時土壤 TPH 濃度為 $4,478.3 \pm 947.5$ mg/kg，降解率 43.1%；四個月時濃度為 $3,125.0 \pm 402.7$ mg/kg，降解率 60.3%；六個月後，土壤 TPH 濃度為 1615.7 ± 844.9 mg/kg，降解率接近 80%。D 組兩個月時土壤 TPH 濃度為 $3,929.7 \pm 941.4$ mg/kg，降解率 50.0%；四個月時平均濃度為 $2,432.0 \pm 396.0$ mg/kg，降解率 69.1%；經過六個月後，土壤 TPH 平均濃度為 $1,468.7 \pm 567.1$ mg/kg，降解率 81.3%。與試驗組 C 只種植培地茅相比，在 2-4 個月時，試驗組 D 土壤 TPH 之去除效率可增加 6.98~8.81%；到 6 個月時只增加 1.87%。E 組添加生物炭並種植培地茅試驗組，兩個月時土壤 TPH 濃度為 $2,728.7 \pm 757.1$ mg/kg，降解率 65.3%；四個月時土壤 TPH 濃度為 $2,442.3 \pm 577.9$ mg/kg，降解率 69.0%；經過六個月試驗後，土壤 TPH 濃度為 $1,588.3 \pm 389.3$ mg/kg，降解率將近 80%。

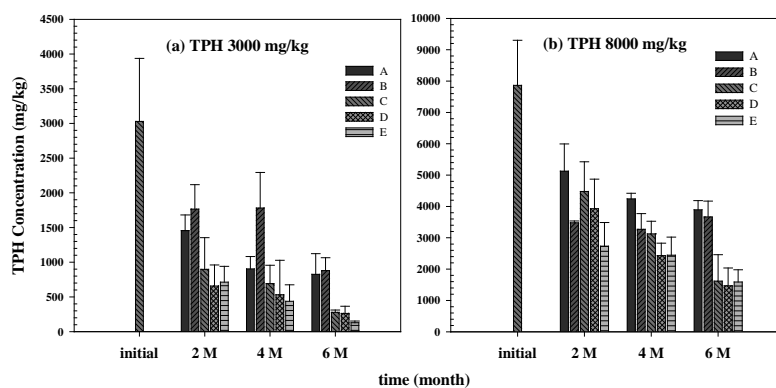


圖 1 高、低濃度土壤不同生物復育試驗組 TPH 濃度變化情形

TPH 分解試驗結果，對低濃度土壤，原生菌組在 4 個月時去除效率已經達到 70%，後面 2 個月的去除效率只微幅增加 2.6%，顯示低濃度土壤中原生菌容易分解之 TPH 比例大約 70%。添加 A.V.菌在前四個月對 TPH 的分解效率較原生菌慢，顯示 A.V.菌的添加有抑制原生菌的分解作用，且 A.V.菌在初期亦未發揮功效，到 6 月時，A.V.菌試驗組之 TPH 分解率也達到 70% 左右，與原生菌接近。高濃度土壤，原生菌組在 4 個月時去除效率約 46%，6 個月時的去除效率 50.5%，只增加 4.5% 左右，與低濃度土壤的變化情況相似，顯示 4 個月時原生菌容易分

解的 TPH 幾乎都已分解。高濃度土壤添加 A.V.菌對 TPH 的分解效率在前 2 個月時有明顯較佳的情況，去除率可達 50% 以上，但在後面的 4 個月，TPH 未有明顯增加情形。從 A、B 組試驗結果顯示，土壤中原生菌及 A.V.菌容易分解之 TPH 比例相近，低濃度土壤約佔 70%；高濃度約佔 50%。對高濃度土壤，添加 A.V.菌較能發揮作用，但在足夠的分解時間下，添加 A.V.菌與原生菌的去除效率差異不大。

將試驗組 C、D 之 TPH 分解效率分別比對試驗組 A、B，可以了解培地茅植生復育之功效。低濃度土壤，種植培地茅之試驗組 C 比試驗組 A，TPH 分解效率平均增加 18.1%；試驗組 D 比試驗組 B 平均增加 20.3%。對於高濃度土壤，種植培地茅之試驗組 C 比試驗組 A，TPH 分解效率平均增加 29.0%；試驗組 D 比試驗組 B，平均增加 23.0%。從研究結果顯示，植生復育可以有效提升 TPH 污染土壤之復育成效。針對微生物較難分解的 TPH，透過植生復育可再提升 18.1%~29% 之分解效率。培地茅的代謝作用有助於 TPH 分解產物的吸收、分解及蒸發散，使種植培地茅試驗組土壤之 TPH 加速降解。

四、結論

本研究所試驗的高、低濃度 TPH 污染土壤，原生菌及 A.V.菌容易分解之 TPH 比例分別大約佔 50% 及 70%，透過培地茅的植生復育，TPH 的去除效率可增加 18.1%~29%。種植培地茅有穩定土壤 pH 及導電度的功效，也可增加場址的景觀綠化。添加 A.V.菌與原生菌的去除效率差異不大，建議針對油污染土壤的生物整治，可透過原生菌搭配種植培地茅進行植生復育。

參考文獻

- Zahed, Mohammad Ali, et al. "Biochar as a sustainable product for remediation of petroleum contaminated soil." *Current Research in Green and Sustainable Chemistry* 4 (2021): 100055.
- Sui, Xin, et al. "Remediation of petroleum-contaminated soils with microbial and microbial combined methods: Advances, mechanisms, and challenges." *Sustainability* 13.16 (2021): 9267.
- Kiamarsi, Zahra, et al. "Conjunction of *Vetiveria zizanioides* L. and oil-degrading bacteria as a promising technique for remediation of crude oil-contaminated soils." *Journal of Cleaner Production* 253 (2020): 119719.
- Rajaei, Saeideh, and Seyed Mahdi Seyedi. "Phytoremediation of Petroleum-Contaminated Soils by *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash." *CLEAN—Soil, Air, Water* 46.8 (2018): 1800244.
- Nkereuwem, Michael E., et al. "Biostimulatory Influence of Biochar on Degradation of Petroleum Hydrocarbon Impacted Soil." *Indonesian Journal of Social and Environmental Issues (IJSEI)* 2.3 (2021): 227-234.
- Dike, Charles Chinyere, et al. "Can biochar be an effective and reliable biostimulating agent for the remediation of hydrocarbon-contaminated soils?." *Environment International* 154 (2021): 106553.
- Zhang, Bofan, Liang Zhang, and Xiuxia Zhang. "Bioremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil by petroleum-degrading bacteria immobilized on biochar." *RSC advances* 9.60 (2019): 35304-35311.