

國軍營區小範圍土壤油品污染整治技術探討



作者簡介

作者林芸中校，畢業於陸軍官校 91 年班、化校正規班 96 年班、中興大學化學研究所，歷任排長、副連長、教官、隊長、化學分析官，現為陸軍核生化防護研究中心組長。

提要

- 一、國軍戰演訓、廠庫運作、後勤補保作業，可能肇生油品洩漏，油品總石油碳氫化合物等揮發性有機化合物會造成人員健康傷害，或直接污染土壤造成長期累積、污染擴散之高複雜性環境污染問題，污染整治曠日費時。
- 二、國軍遵循國家環保法規與政策，積極主動執行營區污染管理，成效已獲主管機關肯定，擴大國軍污染自主管理範疇。
- 三、國軍現行土壤油污自主整治以採委商實施，而二級廠類型的小範圍油污污染其污染物較易移除，建議針對本類型污染場址建置自主整治能力，過程須考量部隊特、弱點，選擇適合可行工法，以達整治成效。
- 四、研究建議國軍小範圍油品污染整治，建議採開挖處理法，搭配土耕法實施，另搭配生物優植方式提高整治成效，待土壤污染濃度降至管制標準後，再視需求以植物復育法執行整治作業。

關鍵字：軍事場址自行管理、土壤油污污染整治技術

前言

國軍營區因天然災害或早年管理觀念不足，發生多次土壤污染事件，成為國家污染防治重點對象。行政院環境保護署(以下簡稱環保署)於民國 95 年至 105 年間執行「軍事油槽設施土壤及地下水污染預防調查計畫」等數個國軍營區污染調查專案計畫；國軍亦積極主動配合與解決營區污染，成效獲主管機關認可。國軍自民國 105 年起推動土壤污染自主管理，藉由實施污染自主調查，期能早期發覺污染源頭，並落實污染預防措施，後續再實施自主整治，以達到國軍營區土壤無污染目標。

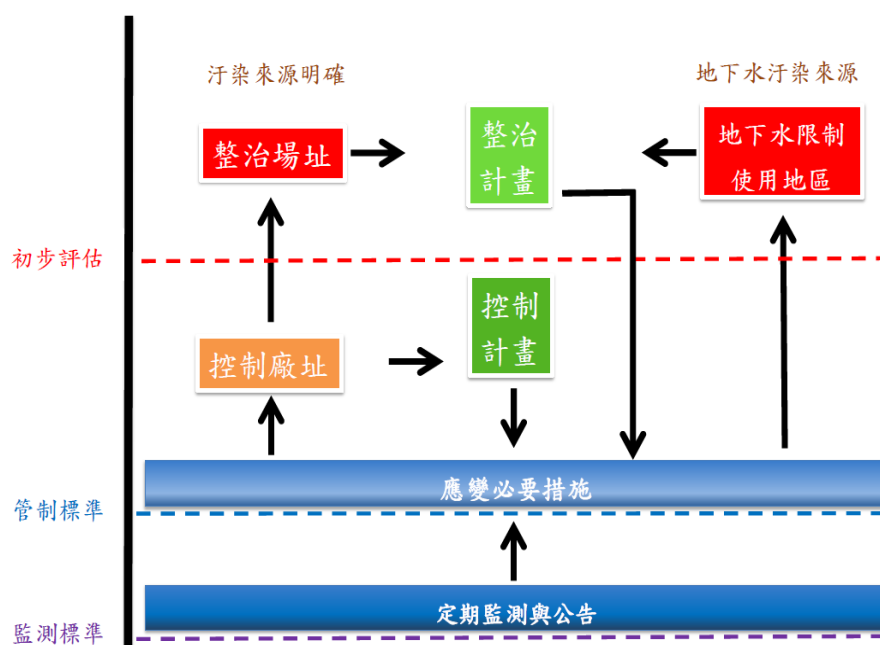
近年自主污染調查結果顯示，部分加油站、油庫、二級廠土壤遭油品污染。油品土壤污染因各營區使用性質，其特徵各異。以地下式油槽與二級廠為例，因地下式油槽與管線皆位於地面下方，一旦破損或洩漏，除不易發覺外，更易造成大面積土壤及地下水污染；而二級廠較屬於人員操作不慎或疏失所造成之小範圍污染，兩者所造成污染深度及範圍差異極大。地下設施與管線洩漏整治難度高，目前國軍各單位皆未具備整治能量，僅能委商整治以協助場址復原。但針對二級廠類型之小範圍油品污染地面表土者，其油品污染土壤範圍小，屬淺層污染型態，故若能針對此小範圍油污污染類型執行自主整治，將可減輕國防預算負荷與加速整治進程，故本文藉分析現行油品污染整治技術，以為部隊

自行整治小範圍土壤油污方法參考。

土壤污染管理規範

民國 50 年起，我國經濟繁榮起飛，卻環境保護觀念不足，至 70 年代陸續爆發多起土壤及地下水污染事件，促使於民國 89 年 2 月 2 日「土壤及地下水污染整治法」正式公布施行。此法以嚴格罰則管制污染改善作為，從污染發現、查證、緊急應變、整治改善等各步驟，均明確律定執行項目及期限，如污染場址之污染行為人或污染責任人未依期限提送控制計畫或整治計畫者，處新臺幣一百萬元以上五百萬元以下罰鍰，並限期改善，否則按次處罰。且就算在非故意情形下造成污染，亦要接受處罰新臺幣十萬元以上五十萬元以下罰鍰，污染事件處理流程如圖 1 所示。國軍即有訓場遭惡意棄置廢棄物，而被公告為甲級非法棄置場址¹，除遭處分外，後續整治經費更高達 1 億 3 千餘萬元之案例。²

圖 1 污染場址判斷與整治流程圖



資料來源：行政院環境保護署土壤及地下水污染整治網

網址：<http://Sgw.epa.gov.tw/public>，下載時間民國107年3月4日。

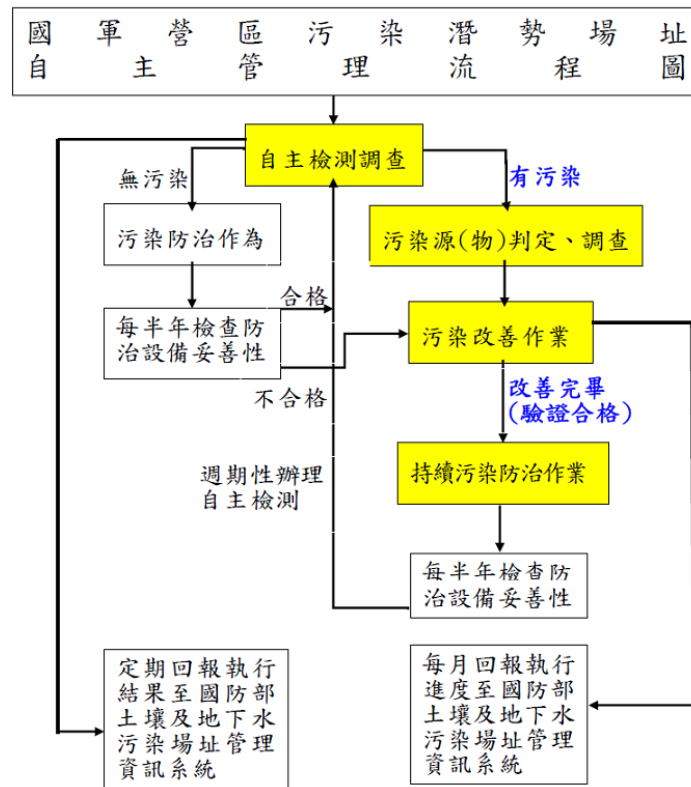
國軍經歷多次污染處理案，深知污染事件耗費眾多人力與鉅額經費，故國防部於民國 99 年即令頒「國軍軍事營區土壤及地下水污染預防調查及改善整治綱要計畫」，不待環保主管機關查證，即針對高污染潛勢營區實施污染調查與整治作業，環保署亦肯定國軍積極自主管理的努力與成效。現行營區污染自主管理方式由各軍司令部規劃，並督導污染高風險營區自行執行污染評估與整治，污染評估與整治可選擇自主或委商方式實施，待查證合格後方可解除管制，自主管理流程如圖 2 所示。³

1.行政院環境保護署，《土壤及地下水污染整治雙年報》，民國 93 年 4 月，頁 98。

2.審計部 99 年度中央政府總決算審核報告，頁 164。

3.國防部頒，《國軍軍事營區土壤及地下水污染預防調查及改善整治綱要計畫》，民國 99 年。

圖 2 國軍土壤及地下水污染自主管理作業流程圖



資料來源：國防部國軍軍事營區土壤及地下水污染預防調查及改善整治綱要計畫，民國99年頒。

國軍營區土壤油污型態

一、污染物類型

依環保署 95 至 102 年期間進行軍事場址調查所歸納出高污染潛勢營區類型為基礎，針對可能造成油污污染者進行污染潛勢區域及污染物分析如下⁴：

(一)兵工、設備、維修工廠與保修廠

兵工與二級廠等維修廠，其油品類污染，多發生於作業區、物料儲存區及廢棄物/廢油/廢溶劑儲存區，分述如下：

1.作業區

兵工、設備廠製程區之車、銑、鑽、沖床等機具，在執行鑽銑或切削製程時，使用之切削油加熱或冷卻裝置(油槽、管線、冷凝管)二級等維修廠，執行車輛與發動機等機油、潤滑油油品更換，有可能因維修處鋪面裂縫或廢水排水溝、截流溝與集水坑結構破損而導致油品洩漏。

2.車輛停放、物料儲存區

待修(後送)車輛停放區及油料儲存區，因室外或露天存放，致容器銹蝕破損，使油品外洩，當未設不透水鋪面或鋪面破損時，可能污染至土壤。

(二)油料儲存與供油設施

4.行政院環境保護署，《軍事場址土壤及地下水污染調查評估及整治技術參考指引》，頁 30-33。

國軍供(儲)油之油料分庫污染多發生於輸油管線、儲槽、加油島與灌裝台、盤管區等，茲就各污染潛勢區分別說明如下：

1.輸油管線

輸油管線存在於加油站、灌裝台、油庫等場址，分為地上式與地下式兩種，管線易因鏽蝕或接合處鬆脫等原因造成油品洩漏。

(1)地下式

多設置於地面下 1 公尺內，洩漏時不易即時發現，且早期管線多數無管溝，油品洩漏後直接接觸土壤，污染風險高。

(2)地上式

可以目測方式觀察管線有無洩漏或鏽蝕風險，且多數位於不透水鋪面上，洩漏時可即時應變，故污染潛勢相對較低，但仍可能因不透水層龜裂而造成土壤污染。

2.儲槽

加油站、油庫與加壓站或泵站設置儲油槽，分為地上式與地下式兩種：

(1)地下式

多置於地面下 5 公尺內，因洩漏時不易發現，早期加油站常未設置二次阻隔層；或某些地區地下水位過高，使儲槽長期接觸地下水，更易發生鏽蝕情形，造成油品洩漏後直接接觸土壤甚至地下水，污染潛勢較高。

(2)地上式

地上式儲油槽多設置於水泥鋪面或以掩體型式存在，易於檢視外觀有無鏽蝕以進行保養修護，或設有防溢堤等設施，污染土壤及地下水之風險相對較低。

3.加油島與灌裝台

加油島多設置於單位車輛用油，灌裝台則多設置於軍用機場及加壓站加油島與灌裝台設有加油機及加油槍，下方與輸油管相連，其接點如發生鏽蝕或鬆脫，即會造成油品外洩。

4.盤管區

盤管區多設於油庫與加壓站，以地上式居多，故污染風險相對較低，然盤管區之輸油進、出口處轉為地下管線的附近區域為高污染潛勢區。

二、污染特性研析

(一)油品污染途徑

土壤地質以地下水位面為界⁵，地下水位面以上為未飽和層⁶(unsaturated

5.行政院環境保護署,《土壤污染評估調查人員訓練班講義-地下水文及地質判視概論》,頁 19。

6.方彥程,《柴油降解菌應用於土耕法及結合細胞固定化技術降解水中柴油之研究》,國立成功大學環境工程學系碩士論文,頁 11,民國 96 年 6 月。

zone)，而水位面以下為飽和含水層(saturated zone)，未飽和層依飽和度與深度變化，可再區分環水帶(pendular)、絡水帶(funicular)及毛細帶(capillary fringe)。而地下水層底部為不透水層或滯水層。儲槽、管線或地面油品洩漏至土壤，會因油品性質而有不同移動分布。國軍油品主要用途為燃料與保修用，種類為汽油、柴油、潤滑油等，屬輕質非水相溶液(LNAPLs)⁷類型，部分清除作業使用有機溶劑則屬 LNAPL 與重質非水相溶液(DNAPLs)類型。

(二)污染範圍分析

1.兵工、設備、維修工廠與保修廠

油品屬 LNAPL，較不易污染至飽和層土壤，污染物型態可能為氣相、浮油相、溶解相，但位處地下水位高的地下油槽，若洩漏則將污染地下水，可能隨地下水水流移動擴散，造成大範圍污染。

(1)廠庫作業區：

作業使用油品屬 LNAPL，經廠庫地面鋪面阻絕，較不易污染至飽和層土壤。但設備製程與維修過程所使用之含鹵素溶劑，若因使用或廢液回收過程洩漏，則會造成 DNAPL 類型污染，可能污染飽和層土壤，整治難度高，屬深度大範圍污染。

(2)車輛停放、物料儲存區：

車輛維修非長期停放，而物料儲存亦須經常清點推陳，故應屬洩漏量較少之污染狀況。而具混凝土鋪面性質者，經鋪面隔阻後，污染深度應較淺層。而未具混凝土鋪面隔阻者，若有洩漏狀況時，油品將直接污染土地，此類污染型態屬淺層、小範圍者，整治技術限制較低，此類污染多存在於二級廠廢油存放區或待修(後送)車輛停放區。

2.油料儲存與供油設施

油品屬 LNAPL，較不易污染至飽和層土壤，污染物型態為氣相、浮油相、溶解相，但位處地下水位高的地下油槽，若洩漏則將污染地下水，可能隨地下水水流移動擴散。

(1)地下式設施

輸油管線多位於地下 1 公尺，而儲槽多位於更深層處，甚可能會隨地下水而擴散，故若有洩漏，屬較深層且大範圍污染。

(2)地上式設施

加油島與灌裝台、盤管區、地上式儲槽設施，均以混凝土鋪面阻絕。單位若確依維管規定檢視，則可於洩漏初期立即反應，則洩漏量較少，且經鋪面隔阻污染深度應亦較淺層。

7.行政院環境保護署，《土壤污染評估調查人員訓練班講義-地下水文及地質判視概論》，頁 13，土壤及地下水常見有機污染物以非水相溶液(nonaqueous phase liquid, NAPL)為主，NAPL 非水相溶液依其密度可以分為輕質非水相溶液(LNAPLs)與重質非水相溶液(DNAPLs)。

由前述分析，可知國軍油品排除單一大量洩漏事件外，其污染態樣肇因於平日作業失慎累積而成，如廢油集中作業過程溢漏而造成之少量土壤污染。一般此類污染型態為單點式洩漏，其污染深度應約於地表下 1 公尺以內，故估計污染土壤量總體積約數十立方公尺土方量以下，較地下式油槽洩漏污染所須整治土方量明顯較少。

油品污染整治技術研析

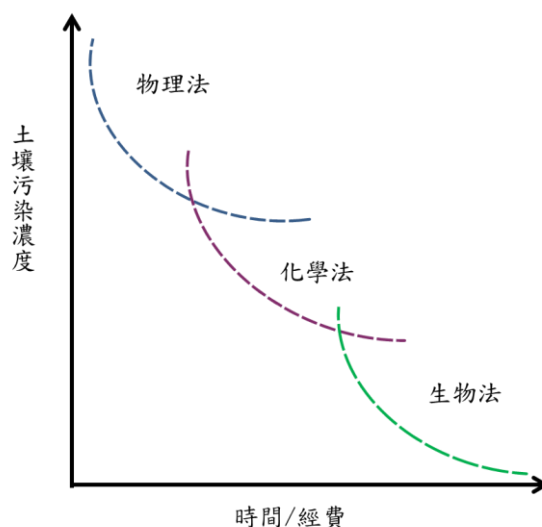
土壤污染整治技術⁸區分為現地、離地及離場等三類，而處理機制可分為生物、物理、化學法，如表 1，視油品污染場址、污染物種類、濃度、範圍與周遭環境，選擇單一或綜合性方法執行整治，如物理法可針對污染濃度高者迅速處理，但其處理費用高，而生物法整治經費較低但其整治期相對較長，整治方法與效益示意如圖 3。

表1 整治技術表

處理機制	名稱
生物法	生物通氣法、生物堆法、土耕法、監控(測)式自然衰減法、生物曝氣法、加強好氧生物整治法。
物理法	土壤氣體抽除法、低溫加熱脫附法、開挖處理法、雙相抽除法
化學法	化學氧化法、介面活性劑沖排法

資料來源：作者自行整理。

圖3 整治方法與效益示意圖



資料來源：行政院環境保護署土壤污染評估調查人員訓練班，《土壤及地下水污染整治技術簡介》，頁7。

8.行政院環境保護署，《油品類儲槽系統土壤及地下水污染整治技術選取、系統設計要點與注意事項參考手冊》，頁 50，現地(in situ)整治技術為直接於土壤污染區進行整治作業，土壤不予挖除；離地(ex situ)整治技術為先將遭受污染土壤挖出至地表上，於現地經整治處理受污染土壤至安全標準；離場(off situ)整治技術為將污染土壤由地表下挖掘出經運輸系統運離受污染場址再處理。

一、整治技術比較

國軍營區小範圍油污污染型態可能為氣相、浮油相、溶解相皆存，目前無單一技術可直接處理各種型態污染土壤，須整合相關方法分階段實施。參考環保署「油品類儲槽系統土壤及地下水污染整治技術選取、系統設計要點與注意事項參考手冊」比較各整治方式優缺點，提供自力執行小範圍油污整治選用參據⁹：

(一)土壤氣體抽除法 (Soil Vapor Extraction)

1.方法概述：

利用真空抽氣，使土壤中污染物揮發，用抽氣井使污染區土壤產生負壓，使污染物隨土壤氣體抽出回收或處理後排放。

2.自主執行可行性評估

此法適用於地面下數公尺之污染深度者，非屬小範圍油品污染土壤類型，且須設抽氣井與廢氣處理設施，須地質調查與專業設置能力，宜由環保工程機構執行。

(二)低溫加熱脫附法(Low-Temperature Thermal Desorption)

1.方法概述：

為離地或離場處理型態，將受污染土壤挖除後，送入加熱脫附機加溫至150至540℃，使得污染物和土壤分離。

2.自主執行可行性評估

本法須設置與操作熱脫附機，且前端須實施土壤粒徑篩分與水分含量測定，宜由環保工程機構執行。

(三)開挖處理法(Excavation)

1.方法概述：

直接以開挖設備，將受污染土壤直接由現地挖除，並將其運送至適當處理設施進行後續處理。

2.自主執行可行性評估

為避免污染物於現地持續擴散，國軍小範圍污染應將污染土壤挖除集中，且因污染型態以二級廠未鋪設隔絕層的廢油存放區或裸露草地，為國軍小範圍油污污染場地，其執行開挖作業方便，故本法可以配合其他整治方式於國軍自主整治作業實施。

(四)雙相抽除法(Dual-phase Extraction)

1.方法概述：

於污染區土壤上方，挖設回收整治井，由井泵抽除土壤及地下水中各不同型態的污染物，包括液態之地下水自由相、溶解相，以及不飽和土壤層中以氣相存在之揮發性有機物等物質，同時藉通氣現象，如此亦可加

⁹ 同註8，頁63至頁365。

強不飽和層土壤層生物降解作用。

2. 自主執行可行性評估

此法適用於地面下數公尺之土壤與地下水污染型態，非屬小範圍油品污染土壤類型，且須設回收整治井與複雜的操作、控制以及監測計畫，須由環保工程機構執行。

(五)化學氧化法(Chemical Oxidation)

1. 方法概述：

係利用臭氧、過氧化氫等氧化劑，注入土壤或地下水污染層，氧化油品污染形成的化合物，成為二氧化碳及水。

2. 自主執行可行性評估

此法可直接針對小範圍油污污染整治，但氧化油污之化學藥劑種類選用與濃度調劑，須依污染物種類與場址地質型態判斷與操作施藥，國軍現不具相關能力，且操作氧化劑過程具危安顧慮，故不建議採此法自力執行。

(六)介面活性劑沖排法(Surfactant Flushing)

1. 方法概述：

使用介面活性劑或醇類等共溶劑，使污染物從土壤顆粒中脫附，並易溶解分散於水中，再抽除處理。

2. 自主執行可行性評估

此法將油污溶於地下水後回收處理，適合大範圍土壤污染型態者，非屬小範圍油品污染土壤類型。若採用此法，可能造成污染擴大，且須確認地下水流向與設置抽水井網，建議由環保工程機構執行。但針對地面隔絕層為水泥或高分子環氧樹脂者，且具廢水處理設施的污染場所，可依本法精神，以介面活性劑清洗地面，並將廢水回收處理。

(七)生物通氣法(Bioventing)

1. 方法概述：

於現地抽取移除不飽和層土壤間隙的有機污染物，似土壤氣體抽除法，但多添加營養鹽至土壤，強化土壤原有生物分解作用，使分子量較大不易抽離的污染物，藉生物降解水解或分解成小分子中間產物，藉抽氣引力離開土壤排出。

2. 自主執行可行性評估

此法為不移除污染土壤之現地整治方式，不適合國軍將污染物移除集中處理規劃，且須執行土壤鹽類含量確認與抽氣井設置的專業能力，宜由環保工程機構執行。

(八)生物堆法(Biopiles)

1. 方法概述：

在場址原處或其他空地地面，鋪以一層不透水層等阻隔材料，以為整治

區，再將受污染的土壤挖起放置於整治區，堆成一個土堆，之後將空氣(氧氣)、營養鹽、水分等，利用管線系統輸送至土堆內部，馴養好氧性微生物，以利微生物生長代謝油品類污染物質，轉化成代謝產物二氧化碳及水。

2. 自主執行可行性評估

國軍營區多具一定規模與腹地，有足夠場地可設置獨立整治空間，符合本法運用要求。惟生物堆法須設置管線系統，以加壓方式額外傳送氧氣、營養鹽、水分至土壤，並須裝設抽氣過濾設備，相關設置專業性高，且管線系統易阻塞維護不易，故不建議採此法實施自主整治。

(九) 土耕法(Landfarming)

1. 方法概述：

將污染的土壤挖除，分開散灑於地表上，形成土壤薄層，然後澆灑營養鹽、礦物質、水分等成份，藉翻土動作供給氧氣至土壤顆粒間隙，以提供微生物良好生長環境，使得微生物大量利用土壤有機物質代謝分解。

2. 自主執行可行性評估

本法同生物通氣法，須獨立整治區，國軍營區有足夠空間可供設置，且可以人力或簡單機具撒布營養鹽、水分，並以編組人員翻堆方式供給土壤微生物所需之氧氣，故本法可為國軍自主整治作業參考。

(十) 監控(測)式自然衰減法(Monitored Natural Attenuation)

為消極式之污染場址管理方式，亦即不對土壤或地下水污染區域進行主動的處理，僅定期性進行監測。但為避免行為人規避責任，採用本項方法前，須符合嚴密確認污染無擴大、場址未來無開發利用需求等 4 點要求，環保主管機關立場並不鼓勵採用本方法，故不建議國軍採用此法。

(十一) 植物復育法(Phytoremediation)

1. 方法概述：

係將植物栽種於污染場址土壤上，利用植物吸收、固定以及轉化分解土壤中的污染物。

2. 自力執行可行性評估

本法適合於淺層土壤整治，國軍小範圍油污污染挖除後，可鋪設淺薄土層，且不須特殊技術及機具，可為國軍整治方式參據。

二、小範圍土壤油品污染整治技術選用建議

綜合上述各整治技術分析，小範圍土壤油污污染型態為氣相、浮油相、溶解相皆存，但現行欠缺整治技術與機具，故不建議過於繁複工法，且營區具一定規模與腹地，可設置獨立整治空間，不受空間侷限之特點，且為避免污染於現地持續擴散，規劃選用挖除、集中污染土壤再處理的離地整治方式，並考量物理與化學處理方式須特殊的機器設備、操作經驗、費用高、技術不易、污染物後續處理等因素，建議採開挖處理法搭配生物處理法實施，生物整治法雖整

治期程較長，但因大多數油品均可被生物分解，除污染土壤現存微生物可行油品分解代謝外，另可購置可代謝碳氫化合物的嗜油菌種，以生物優植方式加強整治成效，待土壤污染濃度降低後，再視需求以成本更低之植物復育法接續整治作業。

小範圍油品污染整治作業概述

一、污染範圍界定與移除

單位可依現有土壤污染潛勢調查結果或針對本文分析之油品易洩漏污染處理實施觀察，遇明顯油漬或油品區周圍土壤呈濕潤狀態且有油品氣味者可列為污染區，而污染區移除建議如下：

(一)地面隔絕層完整者

地面隔絕層為水泥或高分子環氧樹脂者且具廢水處理設施的污染場所，可以清潔劑清洗地面，並將廢水回收處理，以免因隔絕層破裂而導致污染擴散至下方土壤，若無處理設施者，可以吸液棉將廢液集中吸除，如圖 4 即為具污水處理設施之油品儲存庫。

圖4 具污水處理設施之油品儲存庫



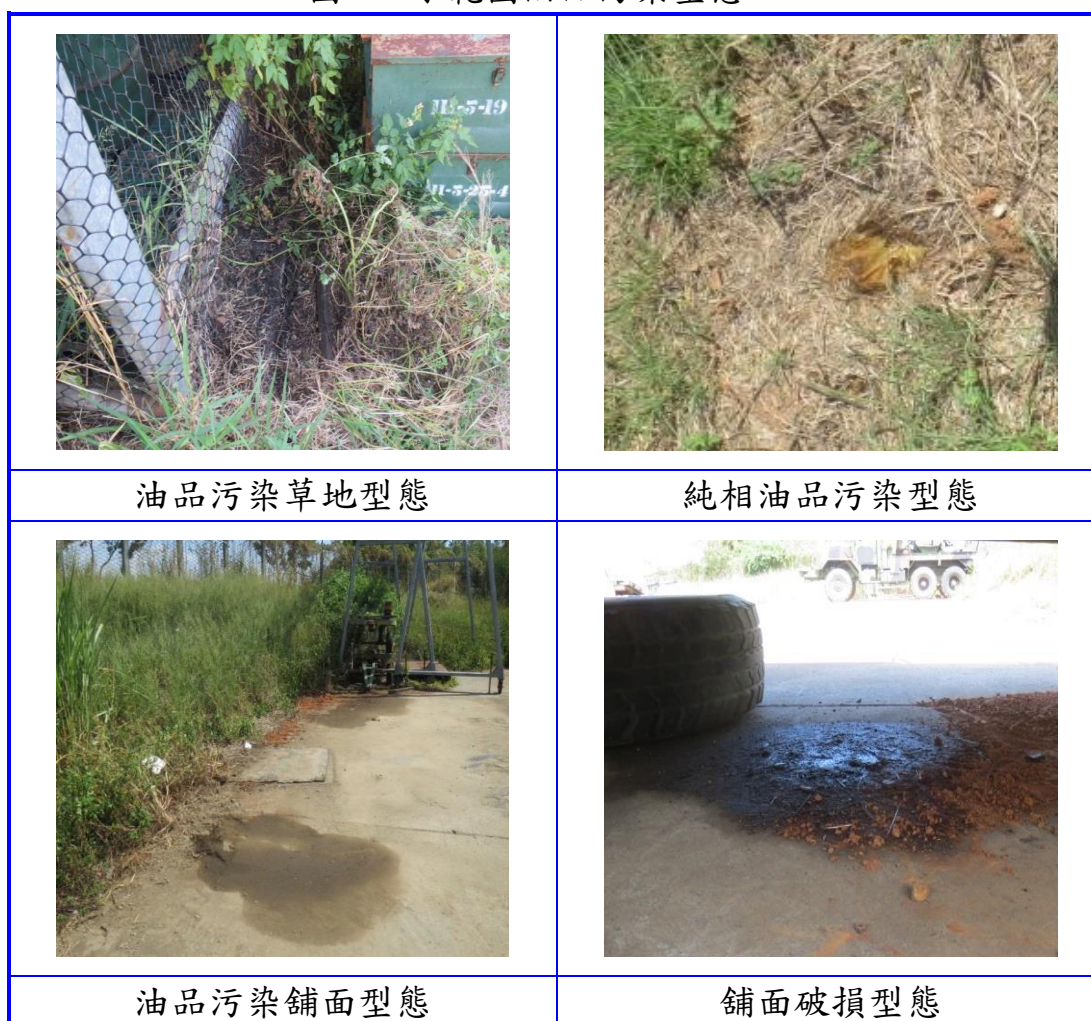
資料來源：作者自行拍攝。

(二)不具地面隔絕層或破裂者

地面不具隔絕層或破裂者，若具明顯油污，不可以清潔劑清理，以防止油污及清潔劑污染土壤，而須挖除遭油品污染的土壤，而深度與範圍可以油品快篩儀器¹⁰、目視或氣味先行判斷。因小範圍土壤油品污染其範圍不大，應皆於 1 公尺內，故可以土工器具或工兵機具挖掘。作業間須注意人員安全，而移除過程如有純相油品者應單獨收集，並依油料補給作業手冊實施送繳作業；而挖除之鋪面則依廢棄物實施清運，如圖 5 所示。

10油品現場快篩方式：可以濁度計檢驗法或免疫分析檢驗法實施現場污染範圍或深度判定。

圖 5 小範圍油品污染型態



資料來源：作者自行拍攝

二、污染土壤生物整治實施

生物整治法整治期程較長，為加速整治成效，建議區分二階段實施，第一階段屬積極整治，利用土耕併生物優植法提供土壤原有嗜油微生物良好生長繁殖環境，或直接添加嗜油微生物於污染土壤，以加速土壤中油污微生物代謝效率，待土壤 TPH 濃度降至 700 毫克/公斤，此時雖土壤 TPH 濃度低於管制標準 (1,000 毫克/公斤)，但因土壤油污污染非均值分布，為避免可能測出超標狀況，建議進行第二階段植物復育法，以經濟、持續的進行污染改善，待後續檢驗合格，土壤即可再使用。

(一)第一階段：土耕併生物優植法執行情序

1. 整治場地位置選擇

土耕法乃將污染的土壤挖除後，分開散灑於地表，形成一個土壤薄層，然後澆灑水分等成份，並藉由翻土動作供給氧氣至土壤顆粒間隙內，藉此提供微生物良好的生長環境，使得微生物能大量利用土壤中有機物質進行代謝分解。故場地選擇儘量以能遮蔽風雨處為主，以避免降雨破壞土堆結構，或提高土壤含水量；另亦避免風力可能造成土堆表層產生封

閉性結構之風蝕作用，致使土壤層的通氣效果下降，圖 6 為一般通風且防雨之油料存放區，即符合場地要求。

圖6 油料存放區



資料來源：作者自行拍攝。

2. 污染場地設置步驟

(1) 器材、試劑準備

選擇適當大小容器運送污染土壤至整治區，人員挖掘與覆土可以圓鋤、十字鎬等制式裝備實施，而生物優植部分則為添加外來具分解能力的微生物，市面及販售油品通用性嗜油菌，平時以粉狀保存，其遇水、空氣、油污共存狀態即開始作用，將油污代謝為二氧化碳及水，故僅需簡單裝呈容器，供人員方便撒佈即可，另丈量、標示用具亦須備齊。

(2) 現場安全防護

依行政院勞工作業環境空氣中有害物容許濃度標準¹¹，規定總石油碳氫化合物管制標準為 300ppm，單位可以原有的氣體偵測器實施監控，而為維人員安全，作業全程均須著安全帽、安全手套、護目鏡與活性碳口罩，並於現場準備濾罐式防護面罩、乾粉式滅火器、急救箱等。¹²

(3) 整治區面積計算

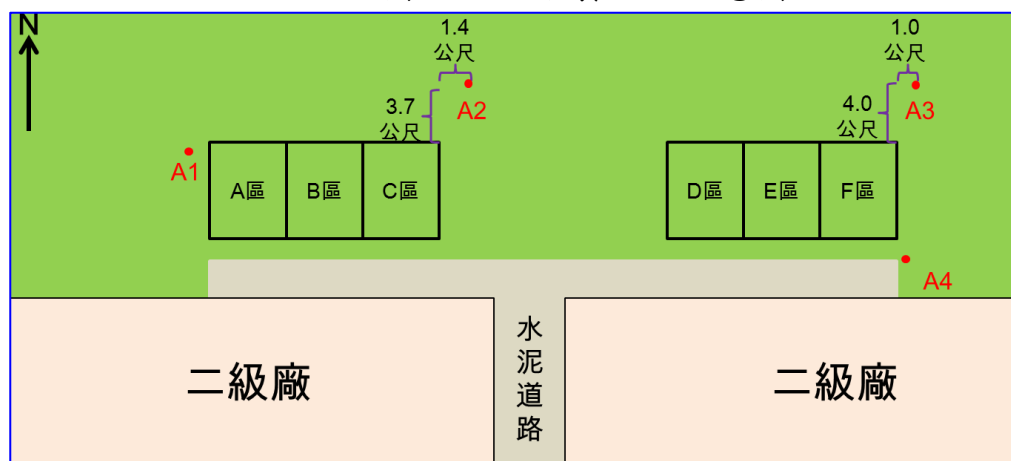
一般土地需求面積取決於待處理的土壤總量與土層高度，業界以耕土機整治，其翻土層高約 30 至 45 公分。國軍小範圍污染其整治量少，可採人力翻堆作業方式，亦可視單位人力改採小型機具實施，而翻土層高度設計為 10 至 15 公分，以利人員能使土壤均勻混合及提供氧氣。故以二級廠小範圍土壤油污污染為例，假定某單位二級廠廢油區計 A 區至 F 區，經污染調查後得知 A1、A2、A3 點至 A4 點土壤遭因作業失慎而溢漏的油品污染，總共 500 毫升(重量約 400 克)，如圖 7 所示，因屬小範圍污染，故以單點為中心向外 30 公分，而深度約 100 公分(單

11.勞工作業環境空氣中有害物容許濃度標準，民國 107 年 3 月修訂。

12.行政院環境保護署，《土壤污染評估調查人員訓練班講義--環境管理系統與勞工安全衛生》，頁 35

點挖除量為長、寬均 60 公分、深 100 公分)，應可涵蓋污染範圍。故單點挖除體積約 0.36 立方公尺，故總體積為 1.44 立方公尺，翻土層高度設 10 公分，則土耕區面積為 3.6 平方公尺，故可規劃長 3 公尺、寬 1.2 公尺、高 10 公分之土耕區，當確定開挖體積後於營區他處準備乾淨客土，以進行後續回填作業。

圖7 二級廠廢油區示意圖



資料來源：作者自行繪製。

(4) 不透水層鋪設

土耕區須鋪設不透水布以阻絕污染土壤，防止污染擴大，而鋪設面積須大於土耕區面積。以上述二級廠範例而言，建議以長 5 公尺，寬 3 公尺的不透水布，再將土壤以長 3 公尺、寬 1.2 公尺、高 10 公分方式撒布於其上，而不透水布四周須墊高，以防滲出水流出土耕區。

(5) 土耕區設置

土耕區完成不透水層設置後，以均質化土壤薄灑，達成長 3 公尺、寬 1.2 公尺、高 10 公分之土耕區。

(6) 土壤水分含量調整

視土質狀態撒布些許水分，至濕潤狀即可，不可澆灌過多水分，過多水分可能會造成油污隨水流出，造成微生物死亡。

(7) 生物優植作業

市售眾多嗜油微生物產品如 Ultra-Microbes¹³ 及 Oppenheimer Formular¹⁴ 嗜油菌。以 Ultra-Microbes 為例，資料指出 1 克菌可處理 10 克油品，本範例洩漏油品為 400 克，故需 40 克菌處理。作業方式可利用國軍使用之金超耘噴灑器 (如圖 8)，其容量為 20 公升，故將 40 克嗜油菌溶解於 20 公升清水後，均勻噴灑土耕區，而噴灑後須實施翻堆動作，以使菌種與土壤均勻混和，噴灑的水量不可過多，造成土壤滲水溢流。

13BRI 株式會社， <http://www.bri.co.jp>，檢索日期：2018 年 3 月 7 日。

14亞新環保科技有限公司， <http://www.ecoequipments.com.tw>，檢索日期：2018 年 3 月 7 日。

故若受污染土壤過於潮濕，可先靜置數日，待水分蒸發後再執行優植作業。

圖 8 金超耘噴灑器

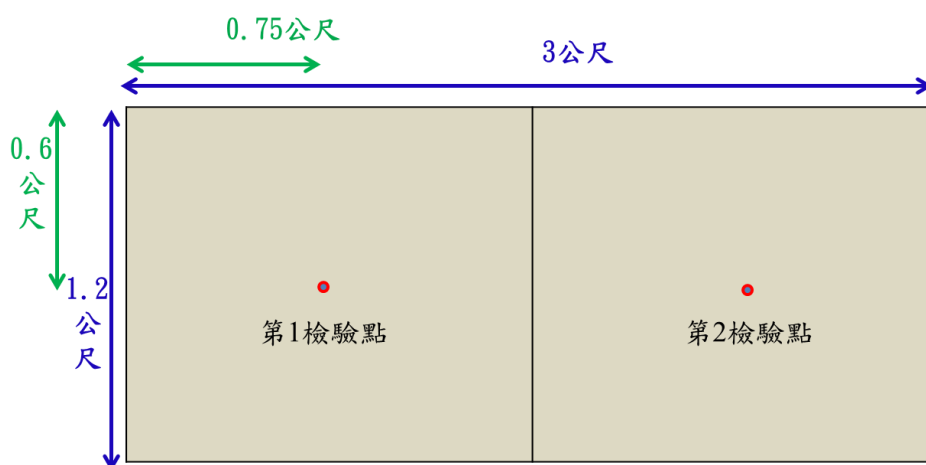


資料來源：作者自行拍攝。

(6)定期檢視

- A.每週：翻土並檢視土壤濕度是否足夠，翻土過程不可造成不透水布破損。
 - B.每月：執行撒菌作業，此時併同實施翻土與土壤濕度檢查，以加強整治成效。
 - C.半年：可將土耕區分 2 區，將各區中央處土壤樣品進行實驗室土壤中總石油碳氫化合物濃度分析，以確認整治成效，如圖 9 所示。
- 以上步驟可以視成效反覆執行，待 TPH 濃度降至 700 毫克/公斤以下，再進行植物復育作業。

圖 9 檢驗點示意圖



資料來源：作者自行繪製。

(二)第二階段：植物復育法

1.復育植物選擇

植物復育法乃將植物於受污染土壤中生長過程，其根部吸收水分與土壤中營養成分，同時將污染物攝入，達去除污染物目的。故復育植物宜選擇台灣常見、易生長者，且因須利用根部吸收油污，故根部生長狀態旺盛的品種愈佳。依研究¹⁵指出假儉草¹⁶其栽種 60 日可降解柴油污染量 50%，若再施肥則可增加降解率至 60 至 70%，如圖 10 所示，故建議可選用本植物作為復育植物。

圖10 假儉草示意圖



資料來源：作者自行拍攝。

2.復育區設置步驟

(1)移土

承前，本案例假設污染土壤總體積為 1.44 立方公尺，將其移置於長、寬各約 100 公分，高度大於 30 公分的塑膠等不透水容器，將土壤均勻鋪平，而土壤厚度不超過 20 公分，因若土層太厚植物根深度不易遍及，整治效果不佳。

(2)撒種

假儉草建議種植密度為每平方公尺 10 至 15 克種子。¹⁷本範例若土層厚 20 公分，則面積為 0.72 平方公尺，建議約 10 克，並可以適度施肥，有助整治效果。

(3)定期檢視

A.每 2 週：檢視植物生長狀態，與土壤濕度是否足夠，適時補充土壤水分、肥料或重新種植。

B.半年：將復育區分 2 區，將各區中央處土壤樣品進行實驗室土壤中總石油碳氫化合物濃度分析，以確認整治成效。

以上步驟可以視成效反覆執行，待 TPH 濃度降至 500 毫克/公斤以下即可完成整治作業，土壤可再使用，或使用復育區種植景觀花草。

15.許鳴翔，《利用百慕達草及假儉草復育受柴油污染土壤之植生復育》，朝陽科技大學環境工程與管理學系碩士論文，頁 95，民國 101 年 7 月。

16 假儉草別名蜈蚣草，為營區常見草地植栽，其生長容易、耐旱性強。

17 kplant.biodiv.tw，檢索日期：2018 年 3 月 7 日。

結語

保護環境是每個人的責任，環保法規施行，非妨礙國軍執行任務，而是期藉法規要求，達成預防土壤及地下水污染，確保土地永續利用及維護軍民健康目標。故若能建置成功自主整治技術，協助需求單位迅速完成整治作業，將提升整治效率。除讓中央主管機關肯定國軍環保管理成效外，亦可促進軍民和諧，故期透過本文，使國軍瞭解土壤油污污染整治技術與提供整治方式參考。

參考文獻

- 一、行政院環境保護署，《土壤及地下水污染整治雙年報》，民國 93 年 4 月。
- 二、行政院環境保護署，《土壤及地下水污染整治法》，民國 99 年 2 月。
- 三、林啟燦，《USEPA 9074 濁度快速檢驗法應用於土壤中 TPH 污染篩檢之探討》，台灣土壤及地下水環境保護協會簡訊，第 19 期，2006 年。
- 四、行政院環境保護署環境檢驗所，《土壤中總石油碳氫化合物篩檢方法—免疫分析法 NIEA S701.60C》，2006 年。
- 五、行政院環境保護署，《土壤及地下水污染整治法》，民國 89 年 4 月。
- 六、李芳胤、陳士賢，《土壤分析實驗手冊》，新文京開發出版股份有限公司，民國 96 年。
- 七、古景宇，《土壤及地下水污染整治實務油品類場址整治工程案例教材》，業興環境科技股份有限公司。
- 八、行政院環境保護署，「以網格法辦理事業用地土壤污染檢測參考指引」，民國 91 年。
- 九、行政院環境保護署，《軍事場址土壤及地下水污染調查評估及整治技術參考指引手冊》。
- 十、行政院環境保護署，《油品類儲槽系統土壤及地下水污染整治技術選取、系統設計要點與注意事項參考手冊》，2006 年。
- 十一、行政院環境保護署，《油品污染調查與查證參考作業手冊》，2006 年。
- 十二、方彥程，《柴油降解菌應用於土耕法及結合細胞固定化技術降解水中柴油之研究》，國立成功大學環境工程學系碩士論文，2007 年。
- 十三、許鳴翔，《利用百慕達草及假儉草復育受柴油污染土壤之植生復育》，朝陽科技大學環境工程與管理學系碩士論文，2012 年。
- 十四、網路資料：土壤及地下水管理資訊系統公告，「環保署持續查證軍事營區的土壤及地下水污染，確保環境乾淨」，<http://www.cdc.gov.tw>。
- 十五、網路資料：森品環境科技股份有限公司，「油品類之加強式好氧生物整治-釋氧化合物(EOx)」，<http://www.jletco.com>。