



Online Journal

**Southern California Chinese American
Environmental Protection Association
(SCCAEPA)**

Editor in Chief

Yue Rong, Ph.D.

yrong@waterboards.ca.gov

Managing Editor

Jian Peng, Ph.D.

Jian.peng@ocpw.ocgov.com

Editorial Board

Charles Cheng, Ph.D., PG

ccheng@waterboards.ca.gov

Eddy Huang, Ph.D., PE

eddy.huang@tetrattech.com

Gensen Kai

gkai@waterboards.ca.gov

Jim J. Kang, Ph.D., PE

Jim_kang@URSCorp.com

Jeff Kuo, Ph.D., PE

jkuo@fullerton.edu

J.J. Lee, Ph.D. PE

jjlee@usc.edu

Weixing Tong, Ph.D., CHG

wtong@waterboards.ca.gov

Jason Wen, Ph.D., PE

jwen@downeyca.org

Volume 3, No. 2,

June 2010

(ISSN 1944-8945)

Posted at: www.sccaepa.org

Online Journal

**Southern California Chinese American
Environmental Protection Association (SCCAEPA)**

Volume 3, No. 2

June 2010

(ISSN 1944-8945)

Table of Contents

A Few Words from Editor	Page 3
1. 美國加利福尼亞州地下水水資源管理簡介 (作者: 童衛星)	Page 4
2. 保護地下水資源: 地下汽油儲油罐的安全管理與污染治理 (作者: 容躍 陸誼)	Page 13

A Few Words from Editor

Dear SCCAEPA Online Journal Readers:

In this issue of the Southern California Chinese American Environmental Protection Association (SCCAEPA) Online Journal (ISSN 1944-8945), we published three peer-reviewed articles in Chinese. We again dedicated this issue to water resources management. To sustain the journal, we need members' contributions. I invite you to submit your work and written materials from your experience. To make things easier, I would like to suggest short articles that can be modified from your conference presentations and slides. The Journal is also open to outside of our association.

Enjoy!

Sincerely,

Yue Rong, Ph.D.
Editor-in-Chief
SCCAEPA Online Journal
June 2010
board@sccaepa.org

Disclaimer

The company names and any trade names of a product mentioned in the articles of this journal do not reflect the endorsement of the Southern California Chinese American Environmental Protection Association (SCCAEPA).

Copyright © SCCAEPA. All rights reserved.

美國加利福尼亞州地下水水資源管理簡介

童衛星 博士 (美國加利福尼亞州洛杉磯水質管理局)

引言

人們將儲藏於地表以下的所有水體統稱為地下水。人類開發利用地下水資源已有上千年的歷史，地球上儲藏的地下淡水資源是地表淡水總量的約 60 倍左右，地下水不僅是非常重要的飲用水水源，另外也被大量的用於灌溉，為地表水體和濕地提供補給水源，同時它也是地球上主要的淡水儲備。如今地下水資源已經成為世界上很多國家和地區不可或缺的寶貴財富，在有些地區甚至成為唯一的供水來源。人類對地下水的利用是隨著現代技術的進步而不斷提高的，從早期的由自流泉水的簡單獲取，到現在的深井多層開發，同時人類對地下水的形成，運移，循環及受所處環境的影響等方面的認識也已達到了相當深入的階段。科學地開發與利用地下水資源已經成為很多水源缺乏的國家和地區所必須面對的挑戰。筆者在過去的十幾年裡，主要從事美國南加州地區地下水的開發利用，管理及水質保護執法方面的工作，在此希望通過這篇短文介紹一些有關美國南加州地區地下水開發管理方面的親身體驗和資訊，供讀者參考。

美國及加州地下水資源利用現狀

美國對地下水的利用已有相當長的歷史，早期來到美洲大陸的開拓者就開始使用自流的泉水（地下水在一定的水壓下流出地表）作為飲用水和灌溉用水，但是美國對於地下水的大規模開發利用也隻是從上世紀初才開始的，一方面是因為人口的不斷增加，地表水資源逐漸虧缺，人們不得不尋找其它的水源，另一方面由於現代鑽井技術和水泵的發明和不斷改進，使得大型抽水井和深層井變成可能，並且成本越來越低，美國有些地區上世紀初建造的水井目前仍在使用中。

根據美國地質調查局 2000 年的統計數據，美國目前每天所使用的淡水約為 3,460 億加侖（約 13 億立方米），其中 833 億加侖（約 3.2 億立方米）來自地下水，佔總淡水量的 24%。另外，據美國國家地理協會(National Geographic Society, NGS)的數據，美國全國的地下水總儲量約為 330 兆億加侖（約 1.25 萬億立方米），是全國地表水總量的 20 至 30 倍。美國全國總共有 66 個主要含水層系統（USGS, 2008）。美國全國約有 46% 的人口依賴地下水作為飲用水源，美國全國公共供水系統中地下水約佔 37%。美國全國約有大小抽水井一千六百萬口，另外每年約有 50 萬口新井建成，這些新井是由全國約八千多家鑽井公司的近一萬九千個鑽機完成，全美國約一千兩百萬戶家庭擁有抽水井。美國使用地下水最多的是農業灌溉，全國約有 38 萬口井每天提供農業灌溉用水約 2.2 億立方米。

美國及加州 2000 年全年日平均用水量統計（單位：百萬立方米）

	地下水		地表水		總用水量					
	淡水	咸水*	總量	淡水	咸水	總量	淡水	咸水	總量	
美國	315	5	320	992	231	1223	1306	236	1545	
加州	57.6	0.6	58.3	87.8	47.7	135.5	145.4	48.5	193.9	

* 咸水主要用於熱力發電和採礦用水

在全國 50 個州中，加利福利亞州（以下簡稱加州）的地下水抽取量為最多，每天約五千八百萬立方米（是位於第二位的德克薩斯州的三千二百萬立方米的近一倍），加州的地下水抽取量約佔全國總量的六分之一。加州的地下水儲藏於 515 個大小不等的地下水盆地中，總量約 10,485 億立方米，其中一半以上的盆地可以提供一定量的水源，有 30 多個盆地的地下水是所在地區的公共供水的主要來源。但有些沿海岸的地下水盆地儘管儲水量很大，不過由於海水侵入使之含鹽量過高（咸化），未經處理前不能作為淡水使用。加州有關部門估計全州可利用的地下水總量在 1,764 億立方米和 5,551 億立方米之間。加州地下水使用最多的也是農業灌溉，位於州中部的中央谷地地區是重要的蔬菜和水果生產基地（為全國提供近一半的水果和蔬菜供應），地下水是該地區主要的灌溉用水來源。

加州位於美洲大陸西部，濱鄰太平洋，全州呈狹長形，南北向長達 1 千 4 百公裡。其年降雨量分布極不均勻，位於州南部的南加州洛杉磯地區年降雨量僅 350 毫米左右，南加州洛杉磯地區包括洛杉磯等六個縣約有 1 千 8 百萬人口（佔全加州人口的一半），由於地表水的缺乏，該地區主要依靠外引水源和地下水（地下水的用量約佔總量的 40%）。

加州地下水水資源政府管理機構的設置及運作

主要負責加州水資源計劃與開發的機構是加州水資源局(Department of Water Resources)，這個機構是在 1956 年 7 月 5 日由州議會批准成立的，在其成立初期，重點是放在發現加州供水中的問題，預測未來供水需求，評估和核查現有水資源及其可用來滿足人口日益增長需求的潛力。加州水資源局目前的職員約 2,700 人，年預算 10 億美元。該局負責的範圍現在包括：1) 中央大谷地區的防洪，2) 全州 1,200 多座水壩安全，3) 地方輔助工程，4) 全州供水管理戰略規劃，5) 水質改善，6) 供水數據收集與研究等。加州水資源局同時還向各級地方供水部門提供技術與財政支持，與各級地方政府合作開展有關環保工程，廢水利用及有關水資源的公共教育等工作。

另一個與水資源有關的部門是隸屬於加州環保署的水資源(質量)控制局(California State Water Resource Control Board)，該局成立於 1967 年，它的前身是加州水權局，其功能除了管理與協調屬下九個地區水質量控制局(Regional Water Quality Control Boards)從事水質量保護的執法工作以外（童衛星，2007），該局還專門設立了負責水權事務的水權管理部，其職責主要是建立與保證加州穩定的水權體系，在

保護水權，水質量與水環境的同時，最大限度地利用和開發水資源來滿足社會大眾的需求。

需要指出的是，除了以上兩個州政府部門以外，還有很多准政府機構和水公司直接參與和負責地下水管理計劃的具體執行。在南加州地區，如大都會供水局(MWD)，地下水回灌局(WRD)，橙縣水公司(OCWD)。

地下水盆地管理的必要性及其要素

簡單地說，地下水管理就是通過一系列與地下水抽取和回灌相關的綜合措施（自然的和人工的）來達到對有限的地下水資源的有效而永續地利用。地下水管理的必要性是顯而易見的，因為地下水是有限的自然資源，其儲量取決於降雨量（地表水）的多少，補給水源的充裕程度，及現有抽水量的多少。由於農業灌溉用水，工業和城市生活用水的不斷增加，對水資源的需求越來越大，這種日益增長的需求和有限資源的矛盾使得人們不得不採取各種措施，以維持需求與供應的平衡。也因此就有了地下水管理的概念。

地下水管理是一個非常復雜的系統工程。首先需要制定綜合的管理計劃，明確管理目標，地下水管理是多層面的，主要包括：政治，法律，制度，技術，經濟等幾個層面。

1) 政治層面：是制定地下水盆地管理的最關鍵的一環，它是在充分評估各種選項和其價值情況下，來共同選擇最合理的方案的一個過程。在加州沒有一個統一的州地下水管理法，各個地下水盆地的管理都是由盆地內各用水單位共同參與，在充分考慮各方利益和權力的基礎上，所達成的妥協。政治層面的考量對相關制度的建立和所採用的策略都起到決定性的作用。

2) 法律層面：如果說政治層面是決定地下水管理的大方向和基本原則的話，那法律層面則是其核心與保障，它涉及到最容易引起爭議的水權問題。因此，無論什麼形式的地下水管理都不可避免地要充分考慮及妥善處理地下水水權（有些情形下，還包括地表水水權）問題。由於不同形式的水權的存在及其相互的影響，從而決定了地下水盆地管理規劃的形式和內容。通常，地下水盆地管理規劃中還要面對其它法律問題：如環境影響評估，抽水井區之間的干擾，地下水盆地儲水量減少，地下水污染區的擴散等。

3) 制度層面：如何具體執行地下水盆地的管理，必須有一套完整配套法案，管理機構，實施規則，以保障管理計劃各層面的協調和統一。盆地管理機制可以有不同形式：A) 經各方協商的協議，B) 經法庭的仲裁協定，C) 依據已有的法規，如專屬區權法，地下水回灌權法，地下水管理法案等。

4) 技術層面：地下水盆地的有效管理是基於對所在盆地各種水文地質特征的充分認識的基礎上。每個盆地管理計劃必須要了解：A) 盆地補給水區的位置，B) 補給水量，C) 各種抽水設施的位置，D) 抽水量及其空間分布，E) 地下水水質量，F) 地下水儲水量，G) 所抽水的用水位置，H) 含水層邊界及地質結構，I) 含水層特征，J) 可能造成地下水污染的污染源，K) 咸水侵入，等。

5) 經濟層面：資金來源是地下水盆地管理的基本保障，最好的規劃如沒有足夠

的資金支持等於一紙空文。當然，規劃中也應該包括對其因資金原因而無法實施所付出的代價做出評估。好的管理規劃都必須是在政治和政策容許範圍內有經濟保障的。同時，區域性工程與地方性工程，新增基礎設施與現有設施改造的資金來源應有所區別。

地下水水權的爭議與法律約束

由於地下水的儲量是有限的，大量無限制地抽取地下水會導致地下水水位下降，儲水量減少，地面沉降，海水侵入等一系列問題，並且隨著儲水量的不斷減少，為更多地開發水源而產生的競爭必然導致惡性循環，同時也會引發大量為爭奪地下水水權的糾紛。因此，就必須有一整套的法律及規定來制約與規範地下水資源的開發與利用，以致達到科學和永續的良性循環。

地表水與地下水，盡管都是水源，但在加州其管理的方式卻截然不同。加州的水法對加州境內的地表水使用的申請過程有著明確的規定，而加州境內的地下水，其使用的規範卻相當複雜，五花八門，有如下六種形式：

1. 上伏地產權：上伏地產權容許任何人抽取其地產以下所蘊藏的地下水，其抽水量沒有限制（除非其地下水盆地已由法庭裁定了抽水量）。歷史上，土地擁有者最初通過抽取地下水以發展當地的經濟，隨著經濟的成長，對供水量的需求增加，通常所在的社區大都通過興建大型供水工程。這種形式的管理在不同用水單位或個人之間不容易緊密協調，經常會產生糾紛，但在水源較充分地區和開發程度較低的地區，是一種有效的管理形式。
2. 法定管轄權：加州水法確定了 22 個具有專門職能的管理地表水部門和專屬區，其中有些部門也兼有管理地下水的職權。
3. 法庭裁定取水量的地下水盆地：加州部分的地下水盆地已由法庭裁定各用水單位的取水量（通常都是因為由於有水權糾紛，而導致法庭裁決）。通過法律訴訟，法庭裁定一個地下水盆地內所有用水單位的年取水量，並指定專門機構（地下水總管）負責監督該判決的日常執行。地下水總管負責匯總各單位取水量資料，定期匯報給法庭。法庭所規定的抽水量可由地下水總管按當年的降雨量及地下水儲量按比例增加或減少。全加州共有 20 個法庭裁定取水量的地下水盆地，其中絕大部分位於南加州洛杉磯地區。
4. 地下水管理局：加州的部分地區的地下水是由州法指定的專門管理機構來管理，在加州有 9 個這樣的專門局，另外還有三個機構也被賦予了專門局的權力。
5. 地下水管理計劃：加州政府規定了一套系統的程序，允許地方政府根據需要制定地下水管理計劃。州水法的第 10750 條款（又稱 AB3030 州議案）規定，制定計劃的地方政府一旦批准，就具有地下水回灌局的功能，可以依法籌款用於興建地下水開發管理方面的設施（如抽水，回灌，輸水管線，及水質等方面），全州有 160 個機構有類似的 AB3030 地下水管理計劃。
6. 地方政府（縣，市）的規定：加州的法庭允許縣市政府對其地下水行使行政管轄權。迄今為止，有 12 個縣制定了有關地下水的管理規定。但是這些規定的權力範圍及性質還不是十分明確。

地下水盆地的系統研究

地下水因其儲藏於地表以下，其產生，運移，補給，儲藏受諸多因素所控制，因此，要想科學地利用與有效的管理地下水，必須對其產生，循環，及空間分布等方面有非常深入的了解，這也是地下水盆地管理的必要的前提條件。

水文地質學家通常將地下水儲藏的地區稱為地下水盆地，有時可將一個較大的盆地細分為若干個亞（次）盆地。這些盆地的確定是根據其水源區水域，邊界地質條件，含水層物質分布等要素，盆地之間有明顯的分隔界線，或分水嶺，盆地之間通常通過局部的出入口彼此相通。地下水盆地的補給水來源主要來自地表雨雪水由地表直接滲入地下，鄰近山區地帶的山前盆地由地表和地下徑流對地下水補給，地表水(灌溉用水，河流，湖泊，水庫，輸水管線滲漏等)滲透補給，上游相鄰地下水盆地流入的地下水等。一個地下水盆地地儲水量多少取決於該盆地內含水岩土層物質的顆粒大小，結合形式和程度，及含水層厚度。水文地質學家可以根據地下水盆地的含水層厚度，儲水率，地下水儲藏狀態（承壓或非承壓），計算出該盆地的地下水儲水量。同時，結合對其鄰近地下水盆地的輸入和輸出量，地表滲入水量，以及該盆地內所有抽水量的估算，及地下水水位的定期檢測，就可以估算出該盆地的安全取水量（在保持盆地永續可循環前提下的最大抽水量），所有上述法庭裁定取水量的地下水盆地，都是在對盆地安全取水量進行仔細估算后才做出的判決。

地下水的共同利用與交易

位於同一地下水盆地的地下水可以在盆地範圍內不同地區流動，同一盆地內各抽水井所抽地下水經常來自同一含水層（或相通的多個含水層），這時各抽水井之間就會產生影響和干擾，為了減少這種干擾和更有效的利用地下水資源，有些時候，不同用水單位之間可根據實際需要和用水特點，相互間在各自法定的取水量基礎上進行協調甚至交易。另外，在經法庭仲裁過取水量的盆地內，各抽水單位的抽水量都已明確界定，如某用水單位因某種原因其法定取水量當年沒有用完，這一多余部分可以交易給其它用水單位，這些交易大都在用水單位之間協商進行，成交後隻需報備負責地下水管理的水總管即可。

地下水水質檢測及其保護

地下水水資源的管理，除了數量以外，另外一個很重要的環節就是對水質的監測和保護，如果水質達不到用水的標準，再多的水也無法使用。美國地下水水質的監測主要分幾個層級：1）區域性水質監測網-由美國聯邦地質調查局在主要地下水盆地通過專門研究項目設置的監測水井網；2）地區性的水質監測網-由各大供水機構（如南加州大都會供水局，地下水回灌局，水公司等）對所在抽水區的盆地水質監測，以保證所抽的地下水的水源質量；3）各抽水井監測-由各個抽水單位對每一口抽水井（尤其是飲用水井）進行定期水質監測，並將結果上報州公共健康局。另外，地下水水源保護的執法工作及污染清理恢復工作，是由州環保署下屬的州水資

源控制局及區域水質管理局具體負責（童衛星，2007）。

地下水盆地的水源補充原理及安全取水量計算

地下水盆地如同一個巨型的盆狀容器，其大部分邊緣及底部都是不透水的隔水邊界，中間為具有大量空隙的含水層（鬆散沉積物層或含大量裂隙的岩石層），由水井抽取的地下水都是來自這些含水層，當大量地下水被抽出，其盆地的儲水量就隨之減少，反映儲水量的地下水水位就會隨之下降，為了保證水井的抽水量，隻好鑽更深的井來抽水，當地下水水位下降到一定極限，水井就無法再抽出更多的地下水（水井干枯），最終導致地下水盆地的儲水量因此而枯竭。所以，人們在抽取地下水

的同時，必須保證所抽的地下水能得到及時的補充，通常大部分的地下水盆地本身都有自然補給的能力，通過地表雨雪水滲透到地下，地表水體（河，湖，水庫等）底部的滲透，以及上游地下水盆地的地下水流入等得到有效補充，因此地下水水位可以保持在一定範圍。但這種自然補充是有限的，一旦水井抽取量超過一定限度，這種平衡就會被打破，“過量抽取”的現象就會出現，其后果非常嚴重，除了儲水量枯竭外，還會導致地面沉降，海水入侵，濕地消失等一系列次生的環境影響，右圖展示的是位於加州中部聖華金谷地上個世紀中由於過量地下水抽取導致的地面沉降，圖中數字的位置代表當年的地平面高程，該地區在短短的 52 年中，下沉約 9 米多，是全美國因地下水抽取導致的地面沉降最大的地區，該案例舉世聞名，被許多專業教科書引用。因此，為了最大限度地提高可抽取的水量，人工補給的方法被用來提高儲水量，其做法是通過各種回灌設施（如回灌井，回灌池，部分河床等）將地表水有效地滲透補給到含水層中（詳細過程見下文）。

（引自 Galloway and Riley, 1999）



地下水盆地管理的一個重要的環節就是安全取水量的計算。關於這一名詞有多種提法，有人稱“可能的可持續取水量”，“容許的可持續取水量”，“盆地最大取水量”。這一名詞的定義也經過不斷的演化和修改，最初的定義是“能經常固定而不至於盆地儲水量枯竭的最大取水量”，最新的定義是“在不影響當地的地下水水質或造成環境影響前提下，經濟上和法律上允許的，可持續抽取的自然出現的地下水總量”。安全取水量的計算是一個費時，費力，昂貴的工程，在美國通常都是由專門的技術諮詢公司的水文地質學家來完成，其原理是通過對歷史資料的收集和整理，包括水文地質，含水層及隔水層特征（物質特征，組合

特征，和分布特征等)，區域降雨雪量，地下水水位監測資料，地表水變化，周邊地下水盆地資料，所研究盆地內所有水井的分布和取水量資料等，再進行儲水量，取水量，補給量等計算，同時考慮氣候變化周期（濕年，干旱年，正常年），有時還需借助於計算機模擬，最終得出該盆地的安全取水量範圍。

南加州地區地下水利用與補償機制

如上所述，要想最大限度的保證抽取地下水而不至於造成盆地儲水量枯竭，最有效的方法就是人工回灌。基於這一理念，在南加州地區，很多用水單位修建了不同形式的回灌設施，其中規模最大最具有代表性的，就是南加州地下水回灌管理局，該局是在 1959 年由選民投票批准成立的機構，其宗旨就是通過積極有效且環境友好的方式為南加州兩大地下水盆地提供高質量的地下水水源。該局服務的范围約 1100 平方公里，涵蓋位於洛杉磯縣的西岸盆地和中央盆地，服務區人口約三百五七十萬，大小城市 43 個，抽水單位約 110 家總共 590 口抽水井。其職能就是通過將再生廢水，回收的雨水，外引的地表水等水源回灌來補給地下水。位於盆地上游的蒙地倍羅兩個地下水回灌區（由若干個回灌池組成）直接將地表水通過滲透為地下水盆地提供補給，同時該局與洛杉磯縣公務局共同管理三個沿岸海水屏障工程，每年耗資七千五百萬美元通過一百多口回灌井注入三千七百萬立方米的淡水以防止海水入侵。該局每年使用的回收廢水量為七千四百萬立方米，收集的雨水量為六千二百萬立方米。另外，該局通過全區範圍內二百多口地下水監測井和所有的抽水井，跟蹤監測區內水位，水質和儲水量的變化，定期分析的化合物達近百種，所有資料集中於資料庫和計算機模型中，並出版年度報告供各用水單位和社會大眾使用，該局的地下水監測系統是全加州所有地下水管理機構中最為完善的系統之一。

為了保證地下水盆地有足夠的儲藏水提供使用，因此必須有一個有效的機制來保證地下水的補給。以洛杉磯縣的西岸盆地和中央盆地為例，南加州地下水回灌管理局向所有抽水單位收取回灌費，目前的標準是每一英畝尺（相當於 1233.5 立方米）收取 153 美元（該費用不斷有所調整），這些費用主要用來保證回灌局的各項工程正常運作，同時回灌局還用部分經費購買外引水源以補充回灌水源的不足。另外一個南加州的主要地下水用水管理單位，橙縣水公司向所有抽水單位收取回灌費為每一英畝尺收取 250 美元，該公司於 2008 年耗資 4.8 億美元完成一座日處理 27 萬立方米的回灌水深度處理廠，該廠將來自廢水處理廠經過二級處理的廢水進行微過濾，逆滲透，紫外線，臭氧，過氧化氫等深度處理后，用來作為回灌水源。加州法律規定處理后的廢水回灌到地下水后，在一年內不許抽取使用。

南加州地區地下水利用所面臨的挑戰及應對措施

1) 地下水盆地補給減少：這種現象在干旱年份（年降雨量低於平均水平）尤其突出，各個管理部門都在積極開發新的補給來源，興建海水淡化廠（如長灘市日處理三十萬加侖的海水淡化廠），對回收廢水深度處理（如西部盆地水公司興建了全美最大的廢水深度處理廠，使用三級處理，微纖維，逆滲透等技術，同時提供五種品質的再生水供各種民用，及商用和工業用途）。

2) 地下水水質下降：由於南加州的人口不斷增加，城市化不斷加劇，越來越多的污染物被排放到環境中，其中很多被滲透到地下水中，同時由於現代科技的發展，對一些化學物質的毒性的最新認識，分析儀器靈敏度的提高，現在可以測出以往測不到的微量污染物成分，所有這些因素都對地下水質量產生影響。因此，除了通過水質監測網及時掌控水質變化，並採取相應措施以保證含水層不受污染。同時，對於已確定的局部污染，採用井口處理，和污染區控制等手段，從水中清理污染物並防止其擴散。

3) 地下水抽水量增加：尋找替代水源（如外引水和海水），調整抽水周期，最大限度地增加地下水回灌量。

4) 地下水開發對環境的影響：加強地下水盆地的深入研究，科學規劃地下水開發的每個環節，充分細緻的評估可能造成的各種環境影響，並制定相應的措施最大限度地降低這些影響。

參考文獻：

Arthur L. Littleworth and Eric L. Garner, 1994, "California Water," Solano Press Books
California Department of Water Resources, 2000, Groundwater Management in California, Water Facts, No. 8

California Department of Water Resources, 2004, 7-Steps for Managing Groundwater Supplies, Water Facts, No. 2

California Department of Water Resources, 2004, Groundwater Management Districts and Agencies in California, Water Facts, No. 3

California Department of Water Resources, 2004, Adjudicated Groundwater Basins in California, Water Facts, No. 4

Galley, Devin, and Riley, F.S., 1999, San Joaquin Valley, California, in Galley, Devin, Jones, D.R., and Ingebritsen, S.E., eds., Land subsidence in the United States: U.S., Geological Survey Circular 1182, p. 23-34

Hutson, S.S., Barber, N.L., Kenny, J.F., Linsey, K.S., Lumia, D.S., and Maupin, M.A., 2004, Estimated use of water in the United States in 2000: U.S. Geological Survey Circular 1268, 46 p.

Steve Bachman, Carl Hauge, Kevin Neese, and Anthony Saracino, 1997, "California Groundwater Management," Groundwater Resources Association of California

童衛星，2007，美國聯邦環境保護署及各級地方環保政府機構簡介，《科學對社會的影響》，2007年增刊第一期

U.S. Geological Survey, 2008, Ground-Water Availability in the United States: U.S. Geological Survey Circular 1323, 70 p.

作者聲明：本文所陳述的觀點和意見僅代表作者個人的看法，與作者工作單位加州環保署洛杉磯水質管理局無關。

致謝：本文撰寫中，作者得到容躍博士，溫俊山博士，李珍博士，盧軍博士對文章內容提供的寶貴意見，在此表示衷心的感謝。

作者簡介

童衛星博士

現工作於美國加利福尼亞州環境保護署洛杉磯水質量管理局，擔任高級工程地質師及部門主管職務，並兼任局長及董事會專家顧問，主要從事於地下水狀況評估和污染治理等相關項目的管理工作。童衛星博士同時還進行地下水污染區狀況計算機分析模擬的研究，已發表數篇論文於國際專業雜誌。童衛星博士曾任職於美國洛杉磯一諮詢公司擔任高級水文地質師，主要從事於地下水勘探，開發及管理諮詢工作，協助各種用水部門及水公司進行地下水盆地的評估和利用，曾多次擔任地下水水井設計建造，地下水盆地綜合研究，地下水抽取與地層沉陷，大型工程(地鐵，水庫)興建與地下水的影響等項目負責人。童衛星博士另外兼任加州州立大學(California State University, Dominguez Hills)授課教授並從事美國國家自然科學基金會項目研究工作。童衛星博士現任南加州華人環保協會會長 (2010-2011)。

童衛星博士祖籍安徽省肥東縣，於 1978 年至 1984 年就讀於合肥工業大學地質系，分別獲地質學學士和碩士學位，曾任合肥工業大學地質系講師，1994 年畢業於加利福尼亞大學聖塔克魯斯分校並獲地學博士學位。童衛星博士持有美國加利福尼亞州專業地質師,註冊水文地質師及註冊工程地質師執照。童衛星博士現兼任加州註冊水文地質師考試委員會特聘專家。

保護地下水資源：地下汽油儲油罐的安全管理與污染治理

容躍 陸誼 (美國加利福尼亞州洛杉磯水質管理局)

California Regional Water Quality Control Board – Los Angeles Region
320 West 4th Street, Room 200
Los Angeles, CA 90013 U. S. A.
yrong@waterboards.ca.gov
ylu@waterboards.ca.gov

引言

中國的經濟快速發展也使得汽車數量迅速增加。有汽車就有加油站。有加油站就有汽油儲油庫。加油站的汽油儲油庫一般都是埋在地下的儲油罐。而埋在地下的東西日久就會被腐蝕，汽油儲油罐因此也會滲漏。一旦滲漏，汽油儲油罐就變成了一個地下水的污染源。

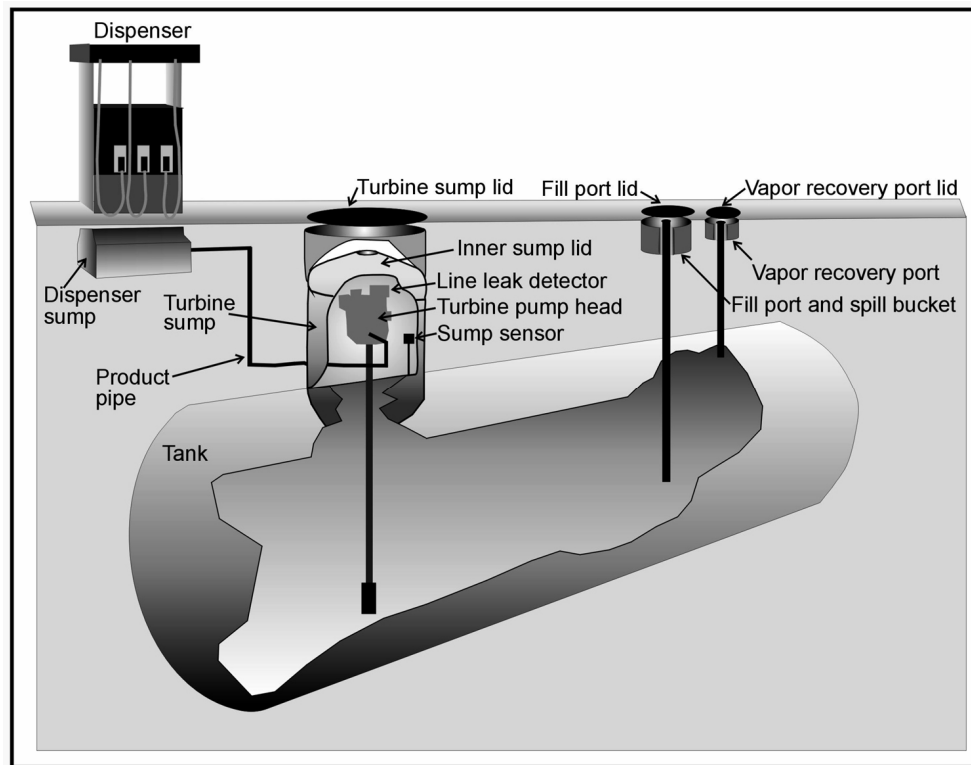
地下水資源是一個很重要的水資源。一旦被污染，就要花加倍的努力和精力去清理。地下水通常看不見摸不著。正所謂“眼不見，心不煩”。因而地下水的污染很容易被忽視。

美國是一個汽車大國，加油站的地下汽油儲油罐歷史長，滲漏管理與污染治理經驗豐富。本文面對日益增長的地下汽油儲油罐滲漏與保護地下水資源的矛盾，回顧美國聯邦政府對地下汽油儲油罐滲漏管理，以美國加利福尼亞州(加州)地下汽油儲油罐的安全管理與污染治理為例，給從事保護地下水資源的同行們一點參考和啟示。加州是美國人口最多的州。以經濟實力來算,如果加州是一個獨立國家,在世界排名前六位。在 2008 年，州年度預算大約是一千五百億美元。因此,加州的環保法律及管理辦法在全國也是在領先地位。所以,了解加州,也就容易了解美國今日環保。今日美國汽油加油站與保護地下水資源之間的矛盾或許會在明日汽車數量日益增加的中國看到。所以,希望今天在美國積累的經驗能夠有助於日后中國在經濟發展和地下水資源保護挑戰中的環境管理決策。

地下儲油罐問題透視

一九八三年十二月，美國哥倫比亞廣播公司在其“60 分鐘”的節目時段，播出了一個名為“檢查一下你的飲用水是否安全”的電視短片。短片介紹了一個令人心悸的故事場景——羅德島州 (Rhode Island State) 堪那布公園市(Canob Park)部分居民們家裡的水龍頭流出的自來水由於含有強烈的汽油味而無法當做生活用水！隨後的

調查發現，該地區的飲用水源被附近汽車加油站泄漏的汽油所污染。該短片首次向全美公眾報道了地下儲油罐泄漏的汽油對環境和公眾飲用水資源的影響。短片播出后，迅速引起美國公眾對地下儲油罐的安全管理和環境影響的極大關注。一年后，國會通過了極具歷史意義的“資源保護與恢復法案”（全名為：**Resource Conservation and Recovery Act**，簡稱**RCRA**）。法案中的有關條款，要求聯邦環保署盡快制訂和頒布法規，全面規範地下儲油罐的安全管理和環境影響。一九八八年，聯邦環保署頒布了地下儲油罐的有關法規。根據該法規，所謂地下儲油罐包括掩埋於地下的儲油罐和相關的連通管道。最常見的為汽車加油站儲存汽油的地下儲油罐，連接管道，及加油槍（下圖一）。



據聯邦環保署的研究和統計，截至二零零六年九月，全美國總計約有近兩百萬個地下儲油罐。大部分的地下儲油罐為鋼材料制造（早期甚至有用木材制作的地下儲油罐），單層結構。上世紀八十年代起，廣泛採用玻璃纖維材料制造，內外雙層結構。

早期地下儲油罐因材料和結構所限（多為鋼材料制造，易受腐蝕），加上不當安裝，不當使用等因素，容易造成油罐損壞，引起汽油泄漏事故。汽油加油站常見的泄漏方式主要有兩種，一是地下儲油罐或連接管道因損毀造成的汽油泄漏；二是在補充油料時滿溢或駕駛員加油時不慎造成的潑洒。

由於汽油具有很強的揮發性和易燃性，漏出的汽油極易引起燃燒和爆炸，造成人員傷亡和財產損失。然而，更大的問題是地下儲油罐泄漏的汽油對環境的污染和對飲用水資源的影響。

地下儲油罐泄漏對飲用水資源的影響實例

1996 年夏季，加州海濱城市聖塔莫尼卡 (Santa Monica) 兩個民用供水井區名叫“世外桃源”(Arcadia) 和“查那個”(Charnock) 受汽油添加劑 MTBE 污染，不得不從此水井井區停止供水。這個汽油添加劑是一種有機化學物質叫作甲基三丁乙醚 (methyl tertiary butyl ether) (簡稱 MTBE)。它的作用是使汽油燃燒更完全，進而使空氣污染降低。這兩個供水井區提供大約聖塔莫尼卡市總用水量的百分之四十五。這樣大比例的停止用水對這個遊覽城市打擊不小。從經濟角度看，每年要花約三百三十萬美金買水補救。以“世外桃源”為例，目前為止，已用六百萬美金做水污染環境評估和清理。加上飲水處理廠運作和管理，最后大概要花費兩千萬美金。以“查那個”為例，光污染評估就花了一億美金，建飲水處理廠又需要另加兩億美金。因此聖塔莫尼卡的 MTBE 污染案例在美國是鼎鼎有名的。

中國目前汽車數量增加很快，這就意味著汽油需求量的增加，進而面對空氣污染的壓力。據筆者所知，中國有些地區目前已經開始在汽油中使用 MTBE。所以美國 MTBE 造成的水污染問題幾年以後也有可能在中國重現。希望此例能把美國 MTBE 教訓介紹給讀者。(甲基三丁乙醚細節的討論請見參考文獻(容躍, 2007(1))。

聯邦政府有關地下儲油罐的安全管理和污染治理措施

1. 聯邦政府有關法規實施的簡要回顧

聯邦政府有關地下儲油罐法規的制訂和實施(請見文末參考文獻)，大致經歷以下幾個階段：

一九八零年代，地下儲油罐泄漏及其對環境和飲用水資源的影響開始引起全社會關注，促使聯邦政府作出迅速反應。美國國會於一九八四年通過 RCRA 法案，法案中的有關條款，要求聯邦環保署盡快制訂和頒布法規，全面規範地下儲油罐的安全管理和環境影響。國會於一九八六年設立地下儲油罐信貸基金 (LUST Trust Fund)，籌集用於規範地下儲油罐的資金。聯邦環保署也於一九八八年頒布了地下儲油罐的有關法規。此一階段，聯邦政府的主要工作重點是制訂和頒布法規，清查全美各地地下儲油罐數目(尤其是已經或者正在泄漏的地下儲油罐數目)。

一九九零年代，在前期清查工作的基礎上，聯邦政府的工作重點轉為加速核准符合資格的地方執行機構(如州一級政府)，授予其獨立執行聯邦政府的相關法規權力。一九九零年七月，密西西比州首先得到聯邦環保署授權，全面實施聯邦政府法規，治理地下儲油罐泄漏對環境和公眾飲用水資源的污染。一九九五年，聯邦環保署重新修訂規範地下儲油罐的法規。修訂后的法規一個顯著的特點是強調汽車加油

站業主必須採取切實措施，預防地下儲油罐泄漏的發生。聯邦一九八八年法規明確規定，全美所有汽車加油站必須在一九九八年底以前，將其地下儲油罐更換或升級為雙層結構。

進入二十一世紀，聯邦政府的工作重點是進一步強化預防泄漏措施。二零零五年，國會通過能源政策法案。法案中有關地下儲油罐管理的核心內容包括：

- 所有新裝油罐必須為雙層結構，否則追究業主責任。
- 強制性每三年檢視所有地下儲油罐。
- 強化油罐業主培訓。
- 禁止向不符合要求的汽車加油站提供油料。

2. 聯邦政府法規具體執行

聯邦環保署從一開始就意識到規範全美國的地下儲油罐不是一件容易的事。一方面，數以百萬計的地下儲油罐分布於全美各地。另一方面，已經開始規範地下儲油罐的部分州和地方政府各行其是，規範標準和法律依據不盡相同。全面查清全美地下儲油罐的數目（尤其是清查已經或者正在泄漏的地下儲油罐），整合各州或地方政府的規範標準和法律依據，需要耗費大量聯邦政府人力和物力，而且必須得到各州或地方政府的支持與配合。

有鑒於此，聯邦環保署於 1988 年出台的法規，有別於其他的環境保護法規。其中最明顯的兩點，莫過於地下儲油罐信貸基金的設立，和法規實施伙伴關係的建立。

聯邦地下儲油罐信貸基金。美國國會於 1986 年設立地下儲油罐信貸基金。其資金來源是在每加侖售出的汽油中，征收 0.1 美分的聯邦稅。此一聯邦稅收，將持續至 2011 年 9 月 30 日。由於汽油銷售量的持續升高，聯邦地下儲油罐信貸基金的總額不斷增加。至 2006 年 9 月，基金總額已達 260 億美元。每年產生的利息，高達九千八百萬美元。

地下儲油罐信貸基金的設立，幫助聯邦政府全面管理和保障地下儲油罐污染問題所需巨額經費的來源。同時它也為大批汽車加油站業主採取有效措施，預防和治理地下儲油罐泄漏及其造成的環境污染，提供了必要的資金支持。每位符合資格的汽車加油站業主，最高可獲得一百五十萬美元的財務支持，清理地下儲油罐泄漏及其造成的環境污染。

地下儲油罐信貸基金對汽車加油站業主的財務支持，並非由聯邦政府單純提供資金。為了避免聯邦政府的資助成為加油站業主的變相收益，聯邦政府的財務支持，主要是以提供財務擔保的方式達成。換句話說，聯邦地下儲油罐信貸基金的作用相當於一個保險公司，向汽車加油站業主提供相應的承保服務。

法規實施伙伴關係。聯邦環保署意識到，僅憑其一個機構的力量，無法達到全面規

范全美國的地下儲油罐的目標。因此，上世紀八十年代，聯邦環保署開始推行地下儲油罐管理法規時，大膽採用了當時尚屬新穎的“連鎖店經營”理念。也就是說，聯邦環保署的作用相當於總公司，負責制訂全國性的統一政策和標準。符合資格的地方執行機構（如州一級政府），如同一個單一的連鎖店，與聯邦環保署簽訂協議，執行其制訂的政策和標準。有意思的是，此一連鎖店經營式的伙伴關係，並非僅限於聯邦環保署與地方執行機構。它還將其他利益相關者，譬如加油站業主，汽油供應商，環保團體，環境諮詢公司等包括在內。在此一法規實施伙伴關係的框架下，地方執行機構享有極大的自主權，可制訂和執行符合當地實際情況的地方法規，甚至可以執行比聯邦政府更嚴格的政策和標準。聯邦政府除了制訂全國性的統一政策和標準外，僅在宏觀層面，提供適當的財政支持，技術指南，並負責行政執法和監督，確保此一法規實施伙伴關係的順利運行。

法規實施伙伴關係在規範全美地下儲油罐過程中的成功實施，成為聯邦政府在隨後推行的其他環境保護法規（譬如一九九二年實施的雨水污染治理法案和二零零二年實施的大氣污染治理法案）時的典范。

3. 聯邦政府法規的有關規定

為了應對地下儲油罐的安全隱患和環境污染問題，聯邦環保署於一九八八年頒布有關法規，要求地下儲油罐業主採取有效措施，預防地下儲油罐受損，洩漏，減輕地下儲油罐洩漏對環境的污染。該法規於一九九五和二零零五年兩次重新修訂。總體來看，聯邦政府法規著重在以下幾個方面規範地下儲油罐業主。

地下儲油罐的安裝。地下儲油罐的不正確安裝，很容易造成油罐的損壞而導致洩漏事故的發生。最常見的問題是油罐安裝時底部支撐不當，油罐投入使用後發生沉降，損壞連接管道或接口。此外，安裝過程中的不當操作，也有可能造成油罐的結構性損毀，或損壞油罐的防腐保護塗層，影響其使用壽命。因而聯邦環保署法規要求油罐業主在安裝油罐時嚴格執行有關規定，雇用符合資格的安裝公司，按照行業標準操作（圖二）。

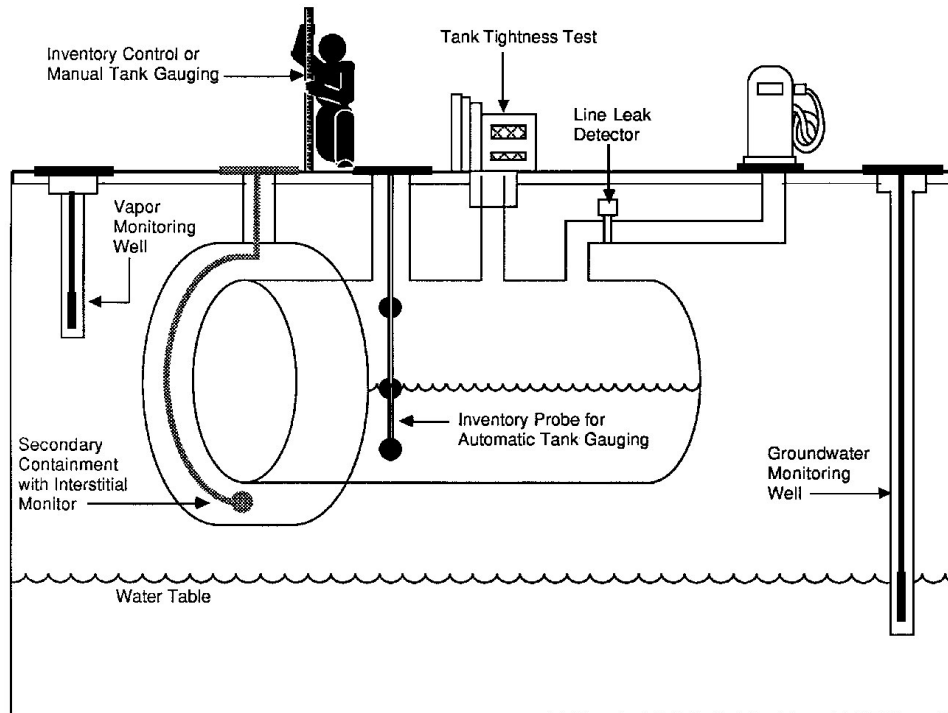
地下儲油罐洩漏檢測。聯邦環保署法規要求汽車加油站地下儲油罐必須具備以下洩漏檢測裝置或檢測手段（圖三）：

- 油罐內外層之間安裝洩漏檢測儀器，及時發現檢測油罐洩漏。
- 在油罐周圍裝設



地下氣井，監測油罐附近揮發性氣體濃度異常，及時發現油罐泄漏事件。

- 在油罐周圍裝設地下水井，定期（季度）監測附近地下水水質，及早發現油罐泄漏事件。
- 在油罐內安裝自動油量儀，隨時監測油量變化，及早發現油罐泄漏事件。
- 定期（年度）測試地下油罐及其連接管道的密閉性。
- 定期（月度）比較油罐內油量的輸入輸出平衡，及時查找油量輸入輸出不平衡的原因。



地下儲油罐的防腐蝕。聯邦環保署法規要求汽車加油站業主必須採取措施，防止地下儲油罐受到腐蝕而引起汽油泄漏。常見的措施包括：

- 要求盡量採用不易腐蝕的材料（如玻璃纖維）制作地下油罐。
- 在鋼結構油罐外層噴塗防腐塗料（普通瀝青不可用作此類塗料）。
- 在鋼結構油罐外層加覆一層特殊防腐材料層。

地下儲油罐泄漏造成的環境污染治理。一旦發生汽油泄漏，溢洒，或潑洒事故，聯邦環保署法規要求汽車加油站業主採取以下措施：

- 立即採取措施，停止汽油的進一步泄出。
- 對於較大量的汽油瀉出（大於 25 加侖），須於 24 小時內向有關部門報告。
- 立即採取應急措施，初步清理瀉出汽油，降低其對人類安全，健康，和環境

造成的負面影響。並於 20 天內向有關部門報告事故及污染清理進展。

- 盡速提交污染治理方案，按有關部門規定，限期清理瀉出汽油造成的污染。

汽油儲油罐滲漏與地下水資源保護有直接的矛盾。美國因此制定了一系列嚴格的地下汽油儲油罐及其地下工程系統法律和法規。這些法律和法規還會定期更新。現在立法盡量想在污染發生的前面，作為防范。一般修正案都是對新類型污染或可能會污染情況而來。例如上面提到加州的汽油添加劑 MTBE 水污染問題。MTBE 其作用是降低汽車引起的空氣污染。不幸的是，由於 MTBE 水溶性高和在水中流動性高，使其成為一個地下水污染物。因此，加州首先立法禁用 MTBE。聯邦政府也在 2005 年修訂"能源法"中對 MTBE 加以管制。

聯邦政府授權，州政府執行

聯邦政府制定地下汽油儲油罐法律和法規。然後授權於州政府去執行。同時每年都有預算，分給州政府。其中一個原因是漏汽油的加油站數量太大，只好由地方政府管理。據最近統計，美國全國大約有十一萬三千多漏油的加油站，其中加州佔一萬四千多個(約 12%)。州政府的管理方法也是與地方政府合作。以加州為例，州政府與許多市縣政府有合同管理地下汽油儲油罐。一部分管理責任送置市縣政府。州政府執行法律和法規主要分兩大方面。其一是防止污染源，從防滲漏著手。其二是清理污染，是個補救之計。目前第一方面，即防止污染源的責任基本上是由市縣政府承擔。第二方面牽涉到清理污染的程度，則由州政府承擔。另外，加州政府在管理地下汽油儲油罐方面還有兩項貫穿全州的項目，一是加州地下儲油罐清理基金，二是加州地下儲油罐數據資料庫。

加州地下儲油罐清理基金

上面提到聯邦政府有設立地下儲油罐信貸基金。加州亦有設立地下儲油罐清理基金。清理基金是由汽油銷售稅收而建立的。此項基金隻用於污染清理。業主需要自付頭款，先花費於清理，再到基金報銷費用。基金會有權評估花費的合理性。目前，加州地下汽油儲油罐清理基金大約支付每年兩億美金左右。因為基金來源於汽油銷售稅收，所以國際石油價格對於基金每年的來源會有直接影響。

加州地下儲油罐數據資料庫

加州地下儲油罐數據資料庫是一個公眾共享的數據資料庫，包括全州的滲漏地下汽油儲油罐的資料。這些資料包括滲漏地下汽油儲油罐的地址和地圖，土壤和地下水採樣位置及分析結果，地質，土壤，地下水文資料，等。加州政府負責管理和更新數據資料庫。不過，法規要求汽油儲油罐的業主負責收集有關資料，電匯入資料中心。州政府負責檢驗再公布於公眾資料庫。整個過程是一個"無紙運作"過程。現在，公眾可在網直接查到近期資料。加州地下儲油罐數據資料庫的網址是 www.geotracker.waterboards.ca.gov。

防止污染源是上策

理論上來講,如果地下汽油儲油罐不漏,就無污染地下水資源之慮。所以美國的經驗是地下汽油儲油罐滲漏的法規來的太遲了。等有了十一萬多漏油的加油站影響地下水資源后,才來考慮防止污染源。這似乎再次驗證工業發展中的"先污染,后治理"的老路。現在發現已遲,所以亡羊補牢式地制定出非常嚴格的防范要求和措施。具體說來,自 1998 年后,所有地下汽油儲油罐都要求雙層鋼玻璃材料儲油罐(見圖 2 與圖 3),同時要求裝配地下儲油罐監測系統。這監測系統是用電子敏感器來監測地下儲油罐系統是否漏油。所謂系統是指包括儲油罐在內的管路,抽油泵,分油器,及管路的接頭,接合部等。這些地下系統底下還要再裝配一個"接漏盆",即所謂二線保護(Secondary containment)。現有的資料顯示,不起眼的小小管路接頭和系統組裝的接合部往往是主要滲漏的地方。監測系統連線到地表監測屏幕,並裝有警鈴,一旦監測到漏油,便鈴聲大作。擅自切斷監測系統業者,不僅被罰加油站關門,在法律刑事上定為輕罪,或許還有民事訴訟。另外,加州有個法規,如有滲漏,修好之前,禁止給有漏油的加油站輸油和送油。也就是說,漏油的加油站不能買油。

防止污染源還在於加強人員的培訓和檢控。其一是由州政府培訓加油站業者和操作人員,如何操作油站,操作監測系統,減少漏溢。培訓后,業者和操作人員會被頒發執照。無照不可經營。其二是定期專業人員檢查制度。一年一次。通常是地方消防員來當定期檢查員。再者,任何法律和法規的修訂都是經過檢查員定期到站推行。

綜上所述,防止地下汽油儲油罐污染源包括加強地下儲油罐系統(硬件)的防漏和操作人員(軟件)的教育和正確執行。

清理污染的幾個步驟

如果儲油罐滲漏不幸發生了,那就要採取適當的污染清理措施。污染清理措施包括清理被污染的土壤和地下水。清理有以下幾個步驟。

首先,確定污染源。加油站的污染源一般比較明顯,即地下儲油罐系統。一般都有準確的位置。一旦確定污染源,需要立即採取行動排除污染源。

第二,採樣分析及調查。採樣分析包括取土壤樣品,地下水樣品和土壤氣體樣品。取樣的目的是確定污染的范围。土壤樣品通常取在地下土壤剖面上每五英尺(約 1.7 米)深度間隔。地表位置由污染源位置而定。因為地下水通常會流動,所以地下水樣通常取在污染源區及其上下源位置,以便比較。地下水取樣水井地表位置由濃度分布決定。地下水不同深度採樣時有發生,不過不常用。土壤氣體樣品通常用於土壤吸氣淨化法清理過程,或用於健康風險評估中了解高氣態揮發性污染物的氣體分布。取樣地表位置同樣由其濃度分布決定。

第三,了解和分析污染物。汽油環境污染物包括汽油代表有機化合物(即苯,甲苯,乙基苯,二甲苯)及汽油氧化添加劑的代表化合物(即甲基三丁乙醚,三丁乙醇酒精,

等)(甲基三丁乙醚細節的討論請見參考文獻(容躍,2007(1))。另外,由於汽油囊括兩百多種有機化合物,不便一一全做分析,人們就用一種綜合性指數叫作汽油碳水化合物總計(即碳 C4-碳 C12)當作一個總計污染物指標。這個分析化合物參數實際上就是估計從碳 C4 到碳 C12 化合物的總濃度。從而對汽油滲漏在地下環境中的總體數量有個估計。表 1 是這些典型代表化合物的比較。這些物理和化學性質參數對了解污染物在地下遷移和轉化有指導性作用。如水溶性較高就意味著污染物較容易溶解於土壤水份中,向下滲透入到地下水,再隨地下水遷移。再比如說,氣體和水體分離常數高(也叫亨利定律常數(Henry's law constant),即化學物質的氣和水兩物之間的分布性質,常溫下應是常數)意味著污染物較容易從水中氣化及吸取出來,即更適合於用吸氣淨化法來清理。再來看有機碳吸附系數(即化學物質的有機碳固體顆粒和水兩物之間的分布性質,常溫下應是常數),如果此值比較低就意味著污染物較難吸附在土壤顆粒上,即更容易留在水中隨之遷移。另外除了污染物的物理和化學性質外,污染物在地下遷移和轉化也受到其它變數的影響,例如自然環境,土壤性質,地層地質結構,水文特質,自然微生物群體類型和生長,等等。例如,對於有機碳吸附系數高的有機化合物,容易陷入細粒土壤或粘土層而不易跑出來。如果是粗沙土壤層,高揮發性污染物就相對比較容易吸出來。就地質結構來講,任何斷層,裂層,地質層面傾斜度,河道沖積物層,不規則的粗中有細混合地質堆積層面等都會給污染物從地表到地下水提供一個遷移和流動的捷徑。而土壤水份也是影響污染物遷移和轉化的主要指數。

表 1: 汽油有機化合物的物理/化學性質比較

均在攝氏 20 度值 (@20°C)	水溶性(毫克/升) S (mg/L)	氣體和水體分離 常數(無單位) H (--)	有機碳吸附系 數(毫升/克) Koc (mL/g)
甲 基 三 丁 乙 醚 (MTBE)	42000	0.023	11-38
三丁乙醇酒精 (TBA)	全部溶解	0.00048	37
苯 (benzene)	1750	0.229	65
甲苯 (toluene)	1550	0.275	120
乙基苯 (ethylbenzene)	153	0.351	220
二甲苯 (xylene)	198	0.293	238

MTBE=methyl tertiary butyl ether

TBA= tertiary butyl alcohol

除了自然環境的影響外,生物作用也是一個因素。人們發現一些自然存在的微生物群在有氧情況下,會生化分解轉化汽油中的碳水化合物。所以清理汽油污染物又多了一招,加氧到土壤和地下水去促進那種微生物生長進而分解污染物。

第四,化學分析方法及檢測極限值。聯邦政府通過環保署制定分析方法,但不定分析方法檢測極限值。此值各州自定。汽油環境污染有機化合物常見的化學分析方法為

氣相色譜分析法(Gas Chromatography,簡稱(GC))。這種方法是利用有機化合物不同的揮發度和儀器的柱相親合度結合從而分辨出不同的化合物。環境樣品被送入 GC 后,將會有不同類型的檢測器分析鑒定出是哪種化合物。常見的檢測器包括火焰離子化檢測器(Flame ionization detector,簡稱(FID))和劑量質譜儀(Mass spectrometer,簡稱(MS))。FID 用燃燒的方法使不同的化合物呈現不同的離子光譜,然後測量離子光譜來確定是哪種化合物。因此,FID 最適用於汽油和甲烷之類的易燃化合物。MS 用電子能量攻擊化合物使其分裂而產生不同的質譜,然後測量分裂質譜類型來確定是哪種化合物。既然質譜類型是每一個化合物的唯一特性,幾乎不會錯判,因此 MS 是正確地分析出哪種化合物的最好方法。化學分析方法及檢測極限值討論的細節請見參考文獻(容躍,2007(2))。表 2 是加州洛杉磯水質管理局的汽油環境污染化合物化學分析方法及檢測極限值的一例,僅供參考。其中 EPA 方法 8260 是氣相色譜分析法加上劑量質譜儀(即 GC+MS 方法), EPA 方法 8015 是氣相色譜分析法加上火焰離子化檢測器(即 GC+ FID 方法)。

第五,清理方法。如果採樣確定污染發生,下一步就是清理。土壤清理最直接的方法當然是把受污染的土壤挖出來運到垃圾處理場。這種方法一般價錢上比較貴,較適用於污染物濃度較高分布較集中的情況。因為汽油屬於高氣態揮發性有機化學污染物,土壤吸氣淨化法,即用減低氣壓增加吸力的方法從土壤孔隙中吸出那些高揮發性污染物的方法,亦很有效。有時為增加效率,也可在土壤和地下水毛細作用帶及地下水面同時吸起污染的氣和水兩態。有時還會用打氣入水的方法加強揮發性污染物(例如苯)的蒸發效率。地下水清理以往最常用的是抽水處理淨化法,即把污染的水抽到地表,用加溫再抽吸蒸氣法把高揮發性污染物從水中攝取;或用傳統的活性炭吸附方法把污染物從水中吸附到碳顆粒上。除了這些傳統性的清理方法外,目前還有加入氧化劑,例如過氧化氫(雙氧水)(H₂O₂),臭氧(O₃)或高錳酸鉀(KMnO₄)之類,把汽油污染物化學氧化掉。還有用外加物理能量例如紫外線加速污染物的化學分解。最後還有微生物分解法。即有目的的在污染的土壤和水中加入氧氣,促氧化合物或其它微生物營養物質促進特種微生物生長進而分解污染物。當污染物濃度低到一定程度時,還可以用所謂的”自然減退法”,即用自然界的微生物自助分解污染物,而不是靠人為的行動。有時幾種清理方法合起來用以提高效率。綜上所述,清理汽油污染物可歸納為物理方法(即吸,抽,變壓,加溫,等),化學方法(即加氧化劑,紫外線,等)和生物方法(即加氧,加微生物養料,等)。這些清理方法通常要經過一個時間上漫長的過程並且價錢上昂貴。這些方法可以在環境中有效地減低污染物的濃度,不過不能完全清除到最後一個污染物分子。

第六,風險評估。上面提到污染清理方法還不可以把百分之百的污染物分子都從地下粹取出來。這樣在清理結束之前,就要評估一下這些在環境中的遺留污染物是否會對人體和環境造成傷害和負面影響,即風險評估。對人體風險評估包括人們生活中和環境中遺留污染物接觸的可能性,不外乎評估人體呼吸進入,直接攝取進入,及皮膚接觸進入的可能性。聯邦政府有濃度參考標準。對環境風險評估不外乎檢驗環境中遺留污染物濃度與現存政府參考標準。風險評估也要考慮到社區居民的顧慮,和未來土地利用類型及用途。

表 2: 加州洛杉磯水質管理局對汽油分析方法和最小分析檢測極限值要求(2006)

分析的汽油化合物	分析方法	要求的最小分析方法檢測極限值	
		土壤樣品 (微克/公斤) ($\mu\text{g}/\text{Kg}$)	水樣品 (微克/升) ($\mu\text{g}/\text{L}$)
苯(benzene)	EPA方法8260	1	0.5
甲苯(toluene)	EPA方法8260	1	0.5
乙基苯(ethylbenzene)	EPA方法8260	1	0.5
二甲苯(xylene)	EPA方法8260	1	0.5
甲基三丁乙醚 (methyl tertiary butyl ether) (簡稱MTBE)	EPA方法8260	2	1
三丁乙醇酒精 (Tertiary butyl alcohol) (簡稱TBA)	EPA方法8260	20	10
甲醇(Methanol)	EPA方法8015	1000	500
乙醇(Ethanol)	EPA方法8015	500	250
汽油碳水化合物總計 (碳C4-碳C12)	加州GC/FID方法*	100	50

*GC 即氣體色層分析法(Gas Chromatography 的簡稱), FID 即火焰離子化檢測器(Flame ionization detector 的簡稱)。

此表英文可在上網得到:

www.waterboards.ca.gov/losangeles/docs/LABREQ9-06.pdf

第七,清理后檢測鑒定及結案。州政府決定清理標準。清理標準是以整體環境保護及不侵害人體健康為考量,而不是以完全清除到最後一個污染物分子為目標。清理標準的制定是一個環保與所需資金的平衡問題。要清理到什麼程度? 花這樣多的錢值得嗎? 州政府就要在每一個清理地點做出這樣的決定。清理完成后,再要經過驗証,州政府頒發結案証明書。這証明書被用於銀行業,不動產業,及新張行業,等,去驗明此地沒有環境問題了。驗証有兩步,一是實地取樣証明土壤,地下水和土壤氣體濃度降低到可以接受的標準。二是報告論証。報告由加油站業者提供,再由州政府職員和官員審查批准。清理完成結案証明書頒發后,整個環保清理案子就此結束。

結束語

中國日益增長的汽車和汽油加油站的數量一定會對環境污染增加壓力。本文介紹了一些美國就加油站的滲漏管理與污染治理經驗。美國有一個名人說過一句話: "所謂好的領袖, 是在事情發生前,能做出適當判斷的人"。希望本文提到的美國經驗能在滲漏的汽油加油站影響到地下水資源發生之前,提供給各位讀者在其中做出"

適當的判斷”。

作者聲明: 在此表達的觀點和意見由作者本人負責,不代表作者所工作單位,美國加利福尼亞州洛杉磯水質管理局的觀點和政策。

致謝: 作者對童衛星博士和程群博士對此文的審閱及建議表示感謝。

參考文獻

容躍(1), 汽油和地下水污染: 美國汽油中 MTBE 的爭議和教訓,科學對社會的影響,2007年增刊第1期,67頁。

容躍(2), 水污染評估和清理中化驗分析檢測極限值在決策中的作用,科學對社會的影響,2007年增刊第1期,76頁。

Musts for USTs: A Summary of Federal Regulations for UST Systems. EPA 510-K-95-002 (July 1995).

Dollars and Sense: Financial Responsibility Requirements for USTs. EPA 510-K-95-004 (July 1995).

Straight Talk on Tanks: Leak Detection Methods for Petroleum USTs and Piping. EPA 510-B-97-007 (September 1997).

Financing UST Work: Federal and State Assistance Programs. EPA 510-B-99-002 (March 1999).

Underground Storage Tanks: Building on the Past to Protect the Future. EPA 510-R-04-001 (March 2004).

Operating and Maintaining Underground Storage Tank Systems: Practical Help and Checklists. EPA 510-B-05-002 (September 2005).

FY 2007 Annual Report on the Underground Storage Tank Program. EPA 510-R-08-001 (April 2008).

作者簡介

容躍博士

現任職於美國加利福尼亞州水質控制管理局洛杉磯分局,是地下水污染防治和清理部的項目經理,主管汽油地下儲存庫滲漏污染防治和清理。容躍博士畢業於北京師範大學地理系環保專業,獲學士學位。之後獲美國威斯康星州州立大學環境科學碩士學位,再獲美國加利福尼亞州州立大學洛杉磯分校(UCLA)環境健康科學博士學位。容躍博士專業專長是有機化學污染物在土壤和地下水中的遷移和轉化及清理。他的專長還包括有機物分析化學及試驗室分析品質控制和確保步驟,環境統計數學,環境風險評價,及土壤和地下水環境污染評估。容躍博士有 20 年在環保行業的工作經驗。曾獲加州水質控制管理局洛杉磯分局的“優秀成就獎”和“最佳主管表現獎”。現任“土壤和沈積物污染(Soil and Sediment Contamination)”和“環境偵破分析(Environmental Forensics)”兩本專業同行審閱型美國雜誌的副主編。在 2004 年,容躍博士曾擔任加州州立大學洛杉磯分校(UCLA)校友會“優秀在校研究生提名委員會”主席。在 2006 年和 2008 年,連任當選為南加州華人環保協會主席。並擔任南加州華人環保協會網上專業雜誌的主編。

陸誼博士

祖籍江蘇太倉, 出生地廣西壯族自治區柳州市。1978至1984年就讀廣州中山大學地質系, 分別獲學士和碩士學位。1984至1986年任教廣州中山大學地質系。1993年畢業於美國南加州大學(USC)地質科學系, 獲博士學位。擁有美國加利福尼亞州政府核發的“職業地質師”執照。2000至2002年, 擔任“美國南加州華人環保協會”理事。2005至2007年, 受聘擔任“廣西柳州市科學技術協會”科技顧問。2007至2009年, 受聘擔任“廣西柳州市人民政府”科技顧問。2006年起, 擔任“廣州市環保局決策諮詢專家委員會”顧問專家。

1990至1994年, 任職美國IT 環境諮詢公司, 從事環境調查與評估。1994年起, 任職加州州政府環境保護署洛杉磯地區水質管理局。目前擔任該局高級地質師及部門主管職務。在加州環保署任內, 主要從事流域綜合管理及環境法規實施等工作。具體工作項目包括: 1) 流域環境質量評估, 2) 流域地下水污染源調查與治理, 3) 城區降雨污染物排放控制, 4) 環境污染案件調查與執法, 5) 受污染流域治理, 6) 汽車加油站汽油洩漏引發的環境污染治理等。

近二十年在美工作經驗。熟悉美國各項環保法律的建立和實施, 專長地下水污染源調查與治理, 環境污染案件的調查與執法。經常受邀在專業會議上作報告。近年來, 多次接待國家環境部及中國各地環保部門代表團訪美。曾應邀赴深圳, 海南, 廣州, 柳州, 南寧, 北海, 合肥, 黃山, 上海等地作學術報告及交流。