

美国科学院 第四届国际环境会议 2014 年 6 月

休斯敦 Houston, 得克萨斯州, 论文编号 768

原位电动修复土壤和水中的危险废物 彻底的绿色环保修复

教授罗怀涛 美国环保技术服务公司

温俊山博士 唐尼市 Downey 洛杉矶

顾伟德 David Koo 农田土壤及水质专家
洛杉矶地区水质控制委员会, 加州

摘要

电动 (EK) 的修复过程已被美国国防部, 美国能源部和美国环保局确认为处理危险废物的潜在的低成本的有效修复方法。最近, 就危险废物处理, 电动 (EK) 处理法引起了陶氏化学, 杜邦, 通用电气和孟山都的关注。电动修复过程包括电渗透和电解法两种。电解法通常用于生产铝, 氯处理, 金属电镀, 焊接, 防腐蚀等工业生产过程; 电渗透则是一种非常完善的用于建筑物基础的粘土脱水和稳固的过程。这些过程能非常有效地对土壤、污泥和水里面的有害金属和有机化合物进行分别处理修复。电解法可以应用于可渗透和不可渗透的介质。它作为一种中和过程可以被用来控制 pH 值。它也可以被用于隔离或捕获游离状态的金属元素, 包括在阴极电极上及周边的

正电荷离子，或阳极电极上及周边的负电荷离子。电解也被用来氧化石油烃和苯系有机化学物质如多氯联苯，农药和多环芳烃。电渗法可以用于淤泥粘土中的危险化学品的处理。电渗法的工作机制是通过打破粘土中的电荷的平衡，从而导致粘土的压实和化学解吸。粘土的压实和解吸过程会减少清理时间，特别是能成功地解吸黏土质原料里的有机化学物和金属。这将有助于加快和改善低效泵的性能来完成工程项目。电动过程既可离地处理也可原位修复。绝大部分的危险化学物质可以通过电动增强电离/氧化过程得到有效的治理。实验室规模的测试和实地完成的完整

项目将在最后的文件里展示。

环保的绿色原位修复可以做到“十不（No）”：包括不开挖，不回填，不焚烧，不抽水，不丢弃土壤和水，无有毒气体排放，不使用有毒添加剂，无残留的有毒物质，不稀释，无需风险评估（RBCA）。

关键词---环保绿色修复，原位，电动，离子化，氧化，有机化学物，氯化溶剂，农药，多环芳烃，石油烃，有毒金属，土壤，地下水

引言

经过 30 多年的土壤和地下水的修复经验，科学的、工程的绿色土壤原位修复的时代终于来临。这是不容易的。作出实践的科学家和工程师们必须学习许多其他学科的知识，以使这一过程平稳、徐缓，对生态环境无副作用。同时，我们必须确保投

资于环境清理要有经济回报，即绿色修复的费用必须低于目前低效或无效的土壤和地下水主流修复方法，如（水）先抽运，后处理，或（土壤）先挖掘，后异地处置，或焚烧、或干脆非法排放或倾倒。此外，绿色修复将不允许污染物被留下，然后不负责任的对被留污染物或未经处理的污染物作风险评

（RBCA）。绿色修复的土壤和水必须能够重新利用，即成为可种植的农田土壤和可用的饮用水或生活用水。地面被污染的土地经过绿色修复后，该土地价值会提升好几倍，且没有使用限制。这些都是对绿色修复的回馈，将能使废弃的土地变成丰富的有机农田或商业、住宅的房地产用地。

绿色的原位修复的“十不（No）”原则

绿色的原位修复可以做到“十不（无）”：包括不开挖，不回填，不焚烧，不抽水，不丢弃土壤和水，无有毒气体排放，不使用有毒添加剂，无残留的有毒物质，不稀释，无需风险评估（RBCA）。

这将对所有类别的有机化学品提供完美的解毒方案，包括农药，多氯联苯，多环芳烃，氯化溶剂，苯和甲基叔丁基醚。绿色的修复也将隔离有毒金属并捕捉他们（包括铬，砷，镉，汞等），并把他们隔绝在土壤深处，以避免进一步与人接触危害人类。

绿色的修复也对高氯溶剂进行解毒，并隔离以氮为基础的营养品，如氨，硝酸盐和亚硝酸盐，捕捉他们再用作肥料。

下面的段落将会提供绿色修复的过程，以及基础科学和工程学

的原理。此外，也会陈述如何控制目前存在的失控问题，如垃圾填埋场气体和渗滤液，污水处理厂，喂养动物的抗生素剩余物，臭味控制。

绿色土壤修复流程

地下水文学

在设计任何原位修复之前，必须彻底了解被污染介质的地下水文学，以做到在泄漏现场最小扰动土壤和地下水。任何盲目挖掘的做法会让现场工作人员面临暴露在化学物质面前的风险。为什么要冒这样的风险？90%以上的泄露污染物或依附或被类似粘土的材料吸收。所以早期主流的修复方法，是由专业的工程师或科学家拍板决定通过挖掘土壤和泵取地下水进行处理。但他们往往没有经过培训或对地质或水文学了解甚少。粘土材料可以通过电动过程得到有效的修复。抽取被污染水进行处理已被证明是不切实际的，这是因为困在粘土中的污染物不能被泵出。不是所有的地质学家和工程师了解什么是电动。

电动法除污过程

电动除污是一种丢失了的粘土脱水的土力学方法。这是20世纪20年代的伟大土壤力学的先驱卡萨格兰德（Cassagrande）提出的。二战期间，由于它被德国希特勒用于荷兰海岸稳定铁路路基（通过粘土材料脱水）而闻名。电渗透这个词仅在一些现代土壤力学的书中一笔带过。而电动法这个词也只有地下水教科书中略微提及。简单地说，就是让电流单方通过粘土

（一种良导体）将水和污染物挤出粘土矿物材料。1991年在阿纳海姆市(Anaheim)的前诺斯罗普(Northrop)公用设施用地上，笔者第一次尝试用这种电动方法在53英亩的粘土层渗流区挤出氯化溶剂，使其变成有机化合物的热空气而挥发，完成了5000万美元的房地产交易。在90天内只花了250万美元来修复含有挥发性有机化合物的15万吨被污染的土壤，无需挖掘，运输和处置。以传统方式挖掘受污染的土壤，并以1类垃圾填埋，加上其挥发性有机化合物的处置，将耗资每吨400美元。这将是一笔比房地产交易本身更加昂贵的费用（6千万美元）。

所施加的直流电流也将水从阳极推向阴极。无论是在渗流区或在地下水层，它被定义为电动梯度渐降。直流电流经粘土层比流经砂层好得多。

此外，还会发生电离作用。有毒金属（带正电荷的离子）和胺（如有）会向阴极移动。只要电流存在，这些物质就会吸附在粘土层的阴极上，如汞，铬，镉，砷，铅等有毒阴离子。而像硝酸盐，亚硝酸盐及高氯酸盐（如有）则移向阳极。在高氯酸中的氯最有可能沉淀或保持在阳极附近，钠或钙的无机氯化物溶液和氧则会以氧的气体形式释放在阴极处。

生化和化学氧化

对于大多数有毒的有机化合物，它们既可以通过氧化剂的存在被氧化或通过共代谢的生物化学氧化（氧化反应）。所有的有机化工原料的氯会矿化为无机盐或氯化物。

生物共代谢时会发生食品级添加剂引入土壤或地下水。碳原子会被氧化并形成二氧化碳，水和新的细菌细胞。无有毒物质会残留。

任何食品级添加剂与有机化学物质接触时，在适当的电动法的条件下可以成为氧化剂。电动和共代谢过程可以同时发生。大多数有毒金属和大量有机氯化学品（大尺寸的分子化合物，如多氯联苯和农药）不会渗透到超过 10 英尺的地表。

规则的例外是砷，砷酸和铬 6（铬酸），但这些物质很容易向下行到接近阴极的原生金属（就像在地层的电镀过程）。

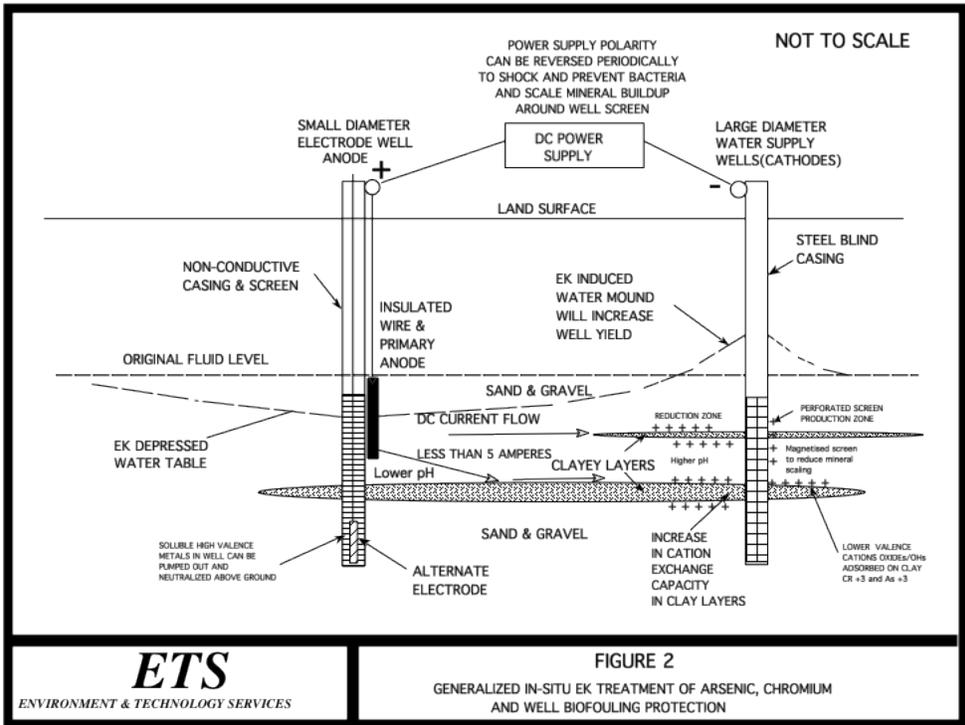
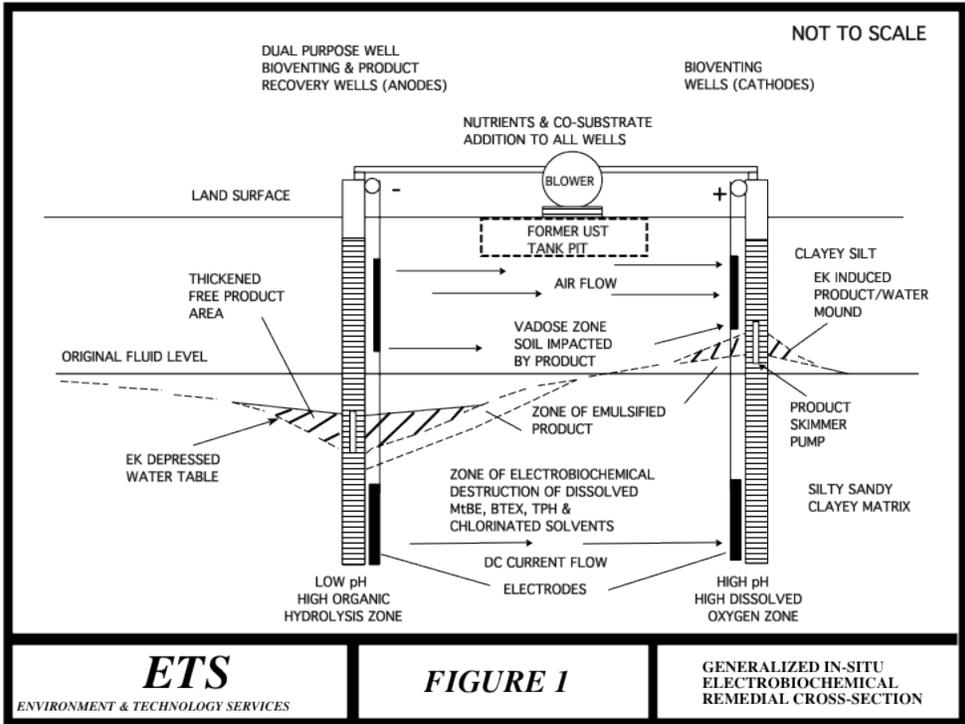
加强水分

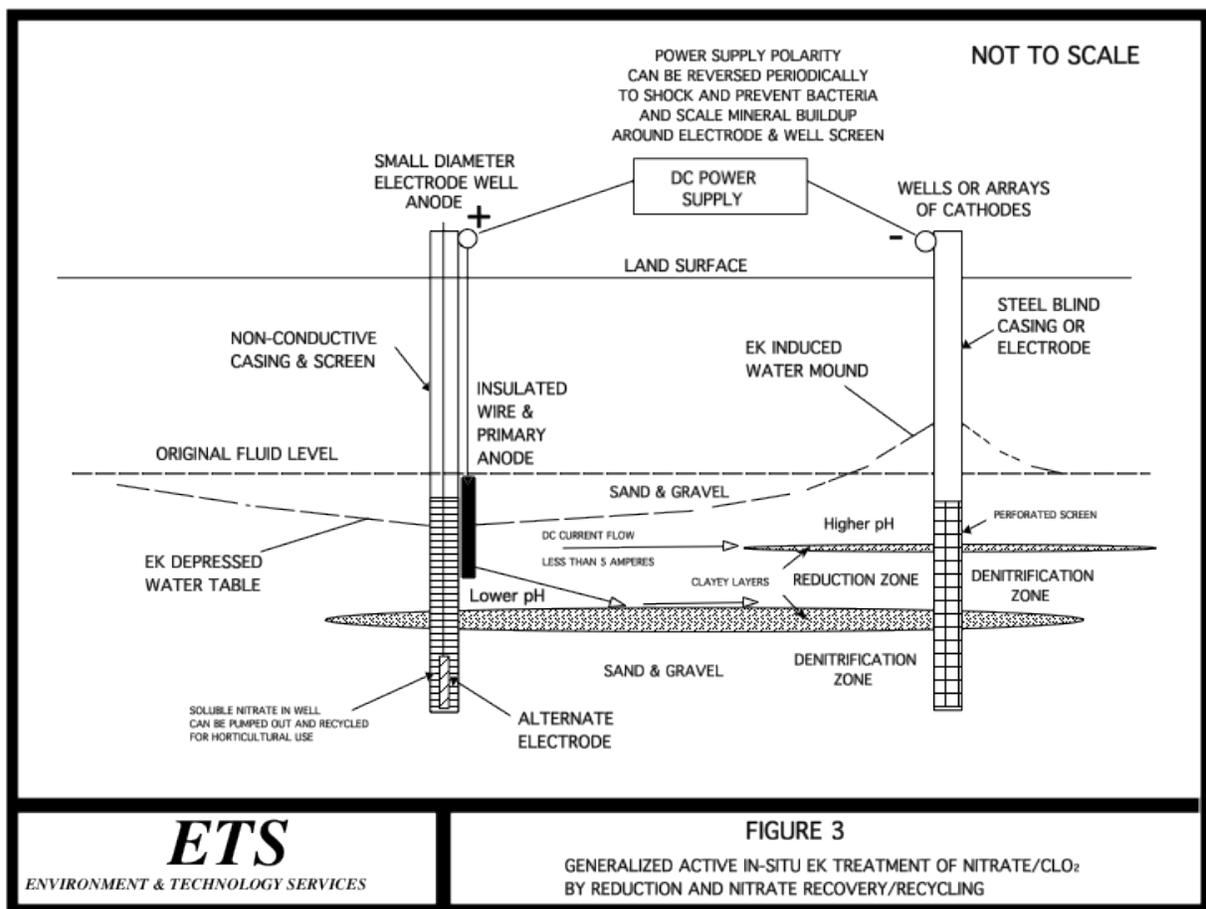
生物修复需要水或湿气。水分在土壤中可以在渗流区的闭环生物通风（非饱和土）内以热湿空气的形式传递。地下水中，加入具有养分和合作代谢物的温水将达到同样的修复效果。它随着温度上升形成水力梯度。有效温度范围为 85 ~95 度华氏。由于电动梯度，地下水会从阳极移向阴极。当极性切换方向亦会转换。无需泵来改变水力梯度。

热增强

为了加速生物化学氧化反应，如果在原地将温度从华氏 50 度增加到华氏 95 度，会增加约 400 % 的生物化学氧化反应；而低于华氏 40 度，细菌就会进入休眠状态，没有生物化学氧化反应。如果超过华氏 110 度，细菌就会死亡。电化学氧化亦是如此。勒查德里 (Le Chatelier) 原理描述了上升及下降温度的反应速率与可逆反应。这同样适用于增加的温度与氧化这是一个不可逆的反应。上述两种温度的机制被称为地下水中的热梯度。

图 1 ， 2 和 3 给出了就地处理危险废物。参考文献[1 ~9]
原位修复的至关重要的文件。





环保垃圾填埋场修复管理

世界各地的垃圾填埋场一直为填埋场产生的甲烷和垃圾填埋场渗透液的问题困扰着。大多数修复应用主流效果不佳的方法，排放气体和处理渗滤液。

没有人试图探讨这其中的最主要原因--是垃圾掩埋场中的有机物（纸张，浪费食物等）的生物细菌的生长产生的问题。要根本解决这个问题，就要冷冻垃圾填埋场，停止细菌的生长。正如上一节中所述，细菌低于 40 度华氏时会进入休眠。在寒冷的冬天的时候给垃圾填埋场注入零下的温度，周围垃圾填埋

地的材料使用优良的绝缘材料；或者在热带气候区，垃圾填埋场的底部注入冷的液氮气体。

为什么垃圾填埋场运营商不这样做呢？填埋场运营商通常是政府卫生署。他们的营运开支的 50% 都花费在垃圾填埋场的管理上。如果你能用 20,000 美元的液态氮解决这个问题，他们就将发生就业问题。减少 50% 的垃圾处理费？不可能的事。它是人的问题。

土地养护技术的地面冻结技术已经存在超过 40 年。图 4 给出了冻结垃圾填埋场管理。

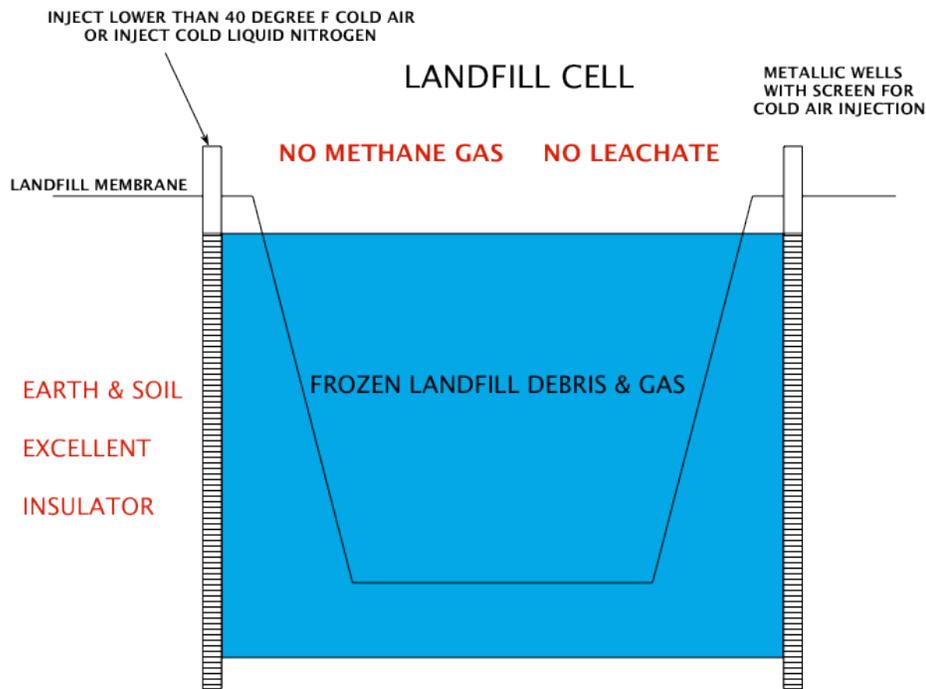


FIGURE 4 FREEZING MANAGEMENT OF LANDFILL GAS & LEACHATE

绿色废水管理

今天的污水处理厂的设计已经过时，效率低下不合格且设备昂贵，占用着大片土地。这些过时的设备的主要缺陷在于曝气的生物消化池无法克服突然的温度变化和化学变化。他们大多数是以 30% 的工作效率，而工作的人仍在拿全职薪水。调水和曝气马达对能源的需求是非常大的，但却效率低下。这些只是一堆陈旧的设备，过时的主流技术。

如今，高效率的电化学氧化 COD 处理系统可以是便携式的和车载的，即是可移动的。这对城市内部的排水沟渠和水道而言是完美的解决方案。此外，小村污水处理系统可以通过这些移动式处理系统进行。

湖泊，池塘，河流里的可溶性氮的化学物质可以通过先进的过滤系统进行过滤。含有营养的物质在使用了过滤介质后，可变成营养物质干燥土，也可成为液体或固体颗粒营养产品，用于温室或家用园艺。通常，处理后的干净水可以循环使用。

为什么废水运营商不这样做呢？因为运营商通常是政府的卫生部门。他们的营运开支的 50% 都花费在废物管理。如果你能通过一次性处理系统解决问题，他们的就业就会产生问题？减少废水费 50% ？这是不可能的，因为它是人的问题。

气味的环保管理

难闻的气味来自炼油厂，化工厂及动物养殖场的废弃尿粪，污水处理厂和垃圾填埋场不能对此进行管理和制约，因为没有既定的气味标准。

在难闻气味排放区域的上空喷洒经过稀释的食品级离子化工用水，会解决这个问题。

环保绿色整修复将会增加国内生产总值（GDP）

废弃的污染土地一旦完成修复就会变成环保的绿色土壤，可通过转换土地用途数倍地增加其价值。

被修复的地下水可以被用于家庭，工业以及农业灌溉。

修复的环保土壤和地下水将会给社会带来 GDP 的增长，完全符合可持续发展的理念。这样的发展将是充满活力的。

结论

我们必须确保环境的修复有经济效益，以获得投资者的青睐。绿色修复相较于现行的主流修复方法必须要有成本优势，即绿色修复的费用必须低于目前低效或无效率的土壤和地下水主流修复方法，如（水）先抽运，后处理，或（土壤）先挖掘，后异地处置，或焚烧、或干脆非法排放或倾倒。

此外，绿色修复将不允许污染物被留下，然后作所谓的风险评估（RBCA）。这是不负责任的。绿色修复的土壤和水必须能够重新利用，即成为可种植的农田土壤和可用的饮用水或生活用水。在被污染的土地经过绿色修复后，该价值会提升好几倍，在使用上没有限制。这些都是绿色修复的奖励，将能使废弃的土地变成丰富的有机农田或商业、住宅房地产用地。

参考文献：

- [1] 罗怀涛， 1995， 危险废物的电动诊治土壤和地下水， HAZMACON' 95 年获奖论文， HAZMACON' 95 论文集， 由湾区政府协会， 圣何塞会议中心， 加州。147-158 。
- [2] 罗怀涛， 2000a， 危险废物的生物处理， 环境科学与技术的手册， 麦格劳 - 希尔图书 McGraw-Hill， 编辑杰伊·莱尔博士 Jay Lehr 。
- [3] 罗怀涛， ， 2000b ， 电动处理危险废物， 环境科学与技术的手册， 麦格劳 - 希尔图书 McGraw-Hill， 编辑杰伊·莱尔(Jay Lehr)博士。
- [4] 罗怀涛&温俊山， 2005a， 砷， 铬和生物污染的供水井处理， 水百科全书， 卷 5 ， 地下水， John-Wiley。
- [5] 罗怀涛&温俊山， 2005b ， 硝酸盐的地下水水处理， 水百科全书， 卷 5 ， 地下水， 约翰·威利 John-Wiley。
- [6] 罗怀涛， 2005c ， 水文地质的性能与特点， 水百科全书， 卷 5 ， 地下水， 约翰·威利 John-Wiley。
- [7] 罗怀涛， 2005d ， 危险废物的电动增强生化处理， 水百科全书， 卷 5 ， 地下水， 约翰·威利 John-Wiley。

[8] 罗怀涛， 2013 年，危险废物的电动修复，世界科学院 2013 年 9 月 12 日 ICEST 修复会议，新加坡，论文编号 SG 79000 。

[9] 罗怀涛， 2013 年，有经济效益地修复农田的有毒物质，科学世界科学院 2013 年 11 月 20 日， ICEPR 会议，开普敦，Cape Town 南非，论文编号 ZA 83000 。

[10] 罗怀涛， 2014 年，环境修复和管理的理想国， 环境可持续性发展第 2 次国际会议， 2014 年 5 月，安科纳 Ancona， 意大利，威塞克斯 Wessex 研究院。

[11]] 罗怀涛， 2014 年，加强性原位电动修复危险废物的完整方案，美国科学院第四届国际 环境会议， 2014 年 6 月，休斯敦，得克萨斯州，论文编号 768 。

作者

罗怀涛教授是美国加州注册的地质学家，注册的工程地质学家和水文地质学家。他是已故的第三代地下水水力学大师马赫迪 Hantush 博士（新墨西哥技术大学，索科罗 Socorro，新墨西哥州）的学生（1972）。他是原位修复危险废物技术的开拓者和发明家。他 1995 年即赢得了危险废物修复 HAZMACON 最具创新奖。他是地下水水力学和水流动第四代大师，2011 年他接受了联合国环境和平大使奖。他是美国环境与科技服务公司总裁，亦是常州大学环境学院名誉院长。

电子邮件： etsloo @ yahoo.com

温俊山博士 Dr. Jason Wen，加州饮用水水质专家

City of Downey, 洛杉矶, 加州

鸣谢

以下为此文写成作出（贡献）协助的人士：

查尔斯 Charles Mercieca 博士, IAEWP 主席（联合国非政府组织）

陆人龙博士 Dr. Michael Luk, 名誉教授
前香港大学成人教育学院院长, 香港

Mr. Robert Bao, 副总裁环保教育和业务发展,
美国环境与技术服务公司