

自然环境中土壤修复技术的可行性研究

Mithun Chakrabartty, Gazi Mohammad Harun-Or-Rashid

拉杰沙伊工程技术大学 360001 孟加拉

摘要：当今世界依赖于工业。没有工业，一个国家的经济发展就无从谈起。世界范围内工业的快速增长提升了人类的生活水平。但是这种工业化也带来了一些环境污染的影响。工业废物处理、过量使用化肥以及其他人类活动造成了土壤污染，这是当今亟待解决的问题。保护环境和人类免受土壤污染的不良影响是一个重大问题。本文重点介绍了几种原位和异位去除土壤中污染物（碳氢化合物，如石油和燃料残渣、重金属、农药、挥发物或半挥发物）的修复技术及其特性和应用。本研究试图揭示土壤修复技术的真实情况。这种修复技术分为物理、化学、生物、热以及组合技术。为了选择最合适的技术，需要考虑各种因素。此外，本研究还讨论了各种修复技术的优缺点。据观察，任何单一修复技术的效率都不足以完全去除土壤中的所有污染物，而修复技术的组合可以带来更好的土壤净化效率。
关键词：土壤污染物；修复技术；原位；技术选择；技术组合

Feasibility Study of the Soil Remediation Technologies in the Natural Environment

Mithun Chakrabartty, Gazi Mohammad Harun-Or-Rashid*

Department of Civil Engineering, Rajshahi University of Engineering & Technology, Rajshahi, Bangladesh

Abstract: Today's world is dependent on industrialization and without it the economic development of a country can hardly be considered. Therefore, the rapid increase of industries around the world has upgraded the human life. But this industrialization has some impact of environment causing pollution. Industrial waste disposal, use of excessive fertilizer and other natural and human activities causes soil pollution, which is burning question nowadays. To protect environment and human beings from the bad effect of soil contamination is a great issue. This article focused on several remediation techniques for the removal of contaminants (hydrocarbons like- petroleum and fuel residues, heavy metals, pesticides, volatiles or semi-volatiles) from soil in situ and ex situ and their properties and applications. In this research it is tried to uncover the real scenario of the soil remediation technology. This remediation technology are classified as- physical, chemical, biological, thermal, and combined. For the selection of most suitable technique various factors are needed to be considered. Besides that, the research has discussed the advantages and drawbacks of each remediation techniques. It was observed that the efficiency of any single remediation technique is not well enough for the complete removal of all contaminants from soil whereas combination of remediation techniques brings better efficiency for soil purification.

Keywords: Soil Contaminants, Remediation Techniques, In Situ, Technique Selection, Combination of Techniques

1. 引言

环境污染伴随着现代社会的发展。土壤是环境中最重要的组成部分之一，因为它在植物的生长和生物量的降解中起着重要的作用。土壤污染是人类健康和粮食生产的一个紧迫的环境问题，这是由于许多污染场地的存在和化学品浓度过高造成的健康风险。土壤污染不仅造成土地资源的损失，也造成财产的损失。住宅建筑内的

空气污染，农场蔬菜和动物的污染，以及挖掘中不断增加的风险是土壤污染的一些其他影响。人们的房子、办公室、学校、公园和公众聚集进行日常活动的地方周围都被污染的土壤所包围，很有可能受到伤害。

土壤可能受到各种方式的污染，如工业废物处理、矿区、农业活动和家庭废物处理等。重金属存在于土壤层中，其有害的毒性作用是造成土壤污染的原因。除了

金属, 土壤和沉积物中最常发现有机污染物, 未经处理的有机污染物可能会与地下水混合[16]。其他无机污染物如金属, 如银、铝、砷、铍、镉、铬、铜、汞、铁、镍、铅、锑、硒、锌和放射性元素也是造成污染的原因[17]。正在进行或过去的工业活动、居民生产的产品、汽车排放物都会污染城市地区的土壤。这些活动伤害了接触污染土壤的人类, 也伤害了土壤中的生物。土壤污染的一些其他具体原因是—储罐泄漏或操作缺陷, 产品或废物保存不当, 污水污染物, 以及在田间过度使用杀虫剂和化肥。人类也对污染土壤负有责任, 因为他们在土壤中倾倒入一些严重的化合物(如重金属, 挥发性化合物, 和半挥发性化合物)。因此, 为了保护人类健康和环境, 应采用环境污染修复程序。环境污染补救程序包括清理、减少、纠正、最小化、废除、管理和防止污染物排放到环境中, 其中包括检查、研究和评估实际或可能排放的行动。

许多研究人员正在探索污染土壤的修复方法。Faisal等人(2004年)对被碳氢化合物产品污染的土壤进行了研究, 并审查了该场地修复技术的分析[11]。Ralph等人(2006)分析了原位污染土壤的热修复技术, 得出的结论是, 热修复技术对于重新开发和控制异质土壤以及修复有出入限制的场地来说已经足够好了[26]。Mitchell和Thomas(2012)对原位热修复技术进行了评估, 评估认为热提取是一种可行的技术, 尽管传统提取技术失败, 但仍可促进和清理许多污染场地[20]。Mohammad等人(2008)致力于受重金属污染的土壤和水的植物修复[21]。这项工作的成果指导了对植物修复当前研究和实际应用进展的审查。Raymond和Felix(2011年)发现了一些重要因素, 如从污染土壤中去除重金属的来源、化学、可行性和适当程序[27]。Paulo等人(2014)致力于矿区金属和准金属污染土壤的植物修复[25]。Suthersan(1999)发现, 采用空气喷射法修复污染土壤的场地存在差异[29]。

随着时间的推移, 污染土壤的强度和性质在不断变化。我们将面临新的挑战。通过先进和更有效的技术来应对这一挑战是当今的需求。首先, 必须对污染范围和所有可能的替代补救技术进行彻底研究。其次, 应根据环境因素、相关技术因素和经济因素选择合适的修复技术。第三, 必须做出补救活动的最终决定[6]。本研究的主要分析自然环境中污染土壤修复的现有技术, 并找出最合适的技术。

2. 土壤修复技术的分类

根据污染土壤或污染地区的位置, 主要有两种类型

的修复技术: 原位技术和非原位技术。被污染土壤的处理是在它的原产地进行的, 被称为原位修复技术。在这种技术中, 污染物可以从受污染地区的土壤或沉积物中去除, 而无需更换。而受污染土壤的处理是在原产地以外的其他地方进行的, 这被称为非原位技术。不需要挖掘污染区域进行处理的原位技术可分为以下几类:

(a) 生物处理: 强化生物修复, 植物修复

(b) 物理/化学处理: 化学氧化、电动分离(ER)、土壤冲洗、土壤蒸汽提取、固化/稳定化(S/S)

(c) 热处理

在异地技术中, 处理需要挖掘被污染的土壤。除此之外, 在用未污染土壤进行处理和回填之后, 污染土壤被处理到其他地方。异位技术(假设挖掘)可分为以下几类:

(a) 生物处理: 生物堆处理、泥浆相生物处理

(b) 物理/化学处理: 化学提取、脱卤、分离、土壤洗涤、固化/稳定化

(c) 热处理: 热气净化、焚烧热解、热解吸

被严重污染的土壤需要多种修复技术的结合。影响适当修复技术的选择和应用的一些指导因素有: 对较高金属浓度的可操作性、效率和性能的持久性、费用、商业可用性、在不同废砂中的可操作性、体积减少、流动性和毒性[27]。在这项研究中, 特别是那些在自然环境中可能的技术将被讨论。

3. 不同的土壤修复技术

3.1 表面覆盖

表面覆盖是一种减少土壤污染的简单技术。在这种技术中, 污染区域用渗透性相对较低的材料覆盖。受污染场地的这种表面处理阻碍了污染物在土壤中的通过或移动, 从而降低了与受污染地区的人们接触的风险。隔离和限制污染可以在这种封盖技术中通过各种方式完成, 如建一个由钢、水泥、膨润土和灌浆墙等更细颗粒制成的物理障碍物。水平和垂直限制降低了废物或污染土壤的渗透性, 并提高了污染土壤的承载能力。在应用了这一点之后, 由于环境功能的丧失, 该场地可用作停车场、车库等用途。

3.2 包装

封装是一种补救技术, 类似于表面覆盖原理。在这种技术中, 使用低渗透帽、泥浆墙、灌浆方法或截水墙来隔离污染土壤。除此之外, 可以在污染区域覆盖低渗透性层(如合成织物层或粘土层), 减少了降水的渗透和渗漏, 从而阻止了污染物从污染区域的浸出和迁移, 并

与地下水混合[2]。虽然封装技术抑制了污染物向未污染土壤的扩散，但是这种技术不能将污染物从土壤颗粒中分离出来[5]。因此，这种封装技术在利用土壤进行农业生产时存在风险。此外，该技术不能作为污染物的任何永久补救措施，因为其效率随着时间的推移而降低。但如果整个过程比较经济，封装是人类健康和保护环境的一个合适的方式。

3.3 土壤蒸汽提取 (SVE)

原位蒸汽萃取是从污染土壤（通常是不饱和土壤）中去除挥发性污染物（VOCs）和亚挥发性有机污染物（SVOCs）的有效技术。它也被称为土壤通风或真空抽取技术。污染物的蒸气压和溶解度控制着SVE技术的效率。应用SVE技术需要评估的一些其他因素是湿度、有机物数量、孔隙度和土壤渗透性。这种技术也被称为空气喷射，可用于去除气体中的蒸汽，有助于地下水中污染物的挥发甚至降解[33]。

垂直和/或水平井被安装在受污染的土壤区域，用SVE技术提取蒸汽。在将这些蒸汽释放到大气中之前，对提取的蒸汽进行处理（通常为碳吸附）[30]。由于SVE技术[31, 32]中地下气流的增加，污染物（尤其是挥发性较低的污染物）发生生物降解。



图1 将蒸汽从地下SVE井输送到处理站的典型管道[34]

土壤蒸汽提取技术修复污染物所需的时间较短（在最佳条件下通常为几个月到2年），是一种经济的技术。它减少了污染土壤包气带中的挥发性有机化合物（VOC），也减少了VOC可能的迁移[30, 11]。尽管是原位技术，但这种SVE技术可以处理大量的土壤，对场地的干扰较少。对工人来说，它几乎没有执行风险[31]。SVE技术有一些局限性。土壤的高含水量降低了渗透性，阻碍了空气通过土壤空隙/孔隙的流动，从而降低了SVE技术从土壤中清除污染物的有效性[11, 30, 31]。土壤湿度的降低增强了这项技术的有效性[34]。一般来说，SVE的适用性仅限于地下水位较低的挥发性有机化合物污染的土壤。从短期收集的数据中很难开发出准确的SVE修复时间预测模型[3]。细粒土壤适用于SVE修复技术[31, 32]。

3.4 电动修复

电动修复是一种通过电吸附去除土壤中有机和无机污染物的原位修复技术。在该修复过程中，允许低密度电流通过电极在土壤中流动，通过建立的电场将阳离子从土壤诱导到阴极，将阴离子诱导到阳极。最有利的土壤条件是饱和土壤、部分饱和土壤和低导电性土壤或低盐度和阳离子交换容量[9]。非经济区、军事靶场、左工业区都适合应用这种技术。

电动技术可以应用于受污染的可以处理难以挖掘的场地的土壤。该技术适用于饱和带和非饱和带的土壤，也适用于低水力传导性土壤（高粘土含量）和无机污染物。但是土壤基质中的可溶性和解吸污染物会限制该技术的有效性。低离子浓度和高非目标离子浓度（背景）可能不是电动过程应用的有利条件。这种技术需要存在导电孔隙流体来移动污染物，如果现场发现不均匀或异常情况，如水下地基、大量铁或氧化铁以及大尺寸岩石或砾石，则效率可能会降低[9]。

3.5 固化和稳定化

固化过程是一种封装过程，将污染物转化为具有高度结构完整性的整体固体。这项技术的主要技术是防止污染物的移动，而不是将污染物从土壤中清除，并将污染物转化为溶解性和毒性较低的形式，这可能会造成土壤浪费。

水泥、沥青、灰色方向盘和热塑性塑料是用于固化技术的主要成分。可以通过高压或推土机将固井泥浆原位注入污染层的土壤中，堵塞土壤层的孔隙，降低渗透性，限制污染物的移动。固化后的基体会受到风化作用的影响，需要进行适当的监测。固化过程中最常用的化学品是碳酸盐（石灰）、粘土和含铁矿物（例如铝矾土、针铁矿、硅胶、蛭石和沸石）、磷酸盐（例如骨粉、磷酸铵、磷灰石和羟基磷灰石）、碱性试剂（例如灰飞轮和氢氧化钙）和有机物（例如壳聚糖、淀粉黄原酸盐、泥炭、粪肥、活性炭和生物质煤）[28]。用于土壤固化过程的化学试剂刺激与污染物的物理化学反应，形成沉淀、复合或吸收它们，降低迁移率。

原位和异位固化工艺更适用于重金属污染物、放射性污染物、其他无机化合物或剧毒污染物。同时，稳定化/固化技术更适用于有机成分含量低的污染土壤，也适用于挥发性化合物[7]。原位稳定和凝固技术包括三个主要部分：（1）现场混合污染土壤的方法；（2）化学试剂的正确储存、制备和进料系统；以及（3）将准备好的化学试剂运输到土壤混合地点的方式。稳定过程对有机物

和杀虫剂的效率较低,但对沥青配料和玻璃化的效率较高,因为大多数有机污染物都被消毒[10]。通过稳定/固化技术处理的土壤具有最小化的能力在原地支持植物和微生物。

3.6 土壤淋洗

土壤淋洗是一种从土壤和环境提取污染物的异位土壤修复技术。使用水溶液或液体(通常是水,偶尔与溶剂结合)和机械过程从土壤上去除污染物,形成提取液[11]。在这一过程中,水溶液与挖掘出的污染土壤(非原位)混合,用于清洗土壤,处理后,干净的土壤可以放回其原始位置。如果洗涤液可以通过挖掘的井与土壤混合,溶解污染物并形成提取溶液[27],这种修复过程也可以原位应用(土壤冲洗)。在处理之前,必须在地面收集和处理这种提取液。如果受污染区域达到地下水位,应处理地下水,则将受污染区域就地过滤到周围的饱和区域。用于污染土壤洗涤的合适溶剂的选择取决于它们溶解特定污染物的能力、对污染物的亲和力以及它们对环境和健康的有害影响。在土壤洗涤技术中,碳氢化合物倾向结合较细颗粒的土壤(粘土和淤泥),并从较粗颗粒的土壤(沙子和砾石)中分离出来,这减少了被污染土壤的体积。这种细粒土壤(粘土和淤泥)可以以适当的方式处理,或者通过焚烧或生物修复处理。除了清洗干净之外,更大体积的较粗的土壤颗粒可以用于回填,因为它是无毒的[31]。土壤洗涤原理包括从土壤中提取金属污染物的物理和化学处理[27]。物理土壤洗涤技术因素(如颗粒粒度差异、沉降速度、比重、表面化学性质和磁性)被认为是将主要容纳颗粒与污染物排出颗粒分开。然后,将处理过的干净土壤颗粒分离到其原产地,并在处置之前通过一些合适的方法(如活性炭吸附、离子交换)对受污染的水溶液进行处理[27]。这种土壤清洗能够清洗含有半挥发性有机化合物(SVOCs)、石油和燃料残渣、重金属、多氯联苯、多环芳烃和杀虫剂的土壤[15],也能够清洗含有大量有机和无机污染物的粗粒土壤。

土壤洗涤技术在大多数方面产生可回收的物质或能量,并且其清洗过程是快速的,因此可以消除污染物。这种技术提供了短期可靠性[27]。与应用溶液混合的提取水需要在最终处置前进行额外处理,因此该技术具有成本效益。复杂废物混合物需要混合溶剂和含有腐殖酸的土壤,在这种技术中需要预处理[11]。吸附在粘土颗粒上的有机物不容易消除,且含有大量细颗粒如淤泥和粘土的土壤对于土壤洗涤技术是无效的。

3.7 生物通风或生物换气

生物通风是一种通过向土壤中引入氧气来促进微生物生长的污染土壤修复技术。氧气流入土壤,增加了微生物对有机污染物的新陈代谢,起到了基质的作用。土壤中氧的存在增强了生物降解能力,并且从新陈代谢开始,它就可以接受电子来发电。这种技术的效率取决于土壤中空气流通的难易程度,这是土壤颗粒的粒径和渗透性的函数。注入含溶解氧的未污染水增强了这一技术的有效性[4]。氧气注入设施的安装取决于一些因素,如土壤气体渗透性、污染物扩散和分布以及环境因素(如pH值、含水量、温度和电子接收器条件)[33]。对于饱和土壤生物通风,耗时较短,不需要对废气进行任何额外处理。因此,这种方法可以很容易地与其他一些补救技术相结合[11]。

生物通风技术仅将氧气/空气引入非饱和区或渗流区,而生物隔离法也将空气和营养物引入饱和区[32]。在生物通风过程中,能够降解少量的挥发性有机污染物,因为它提供了更多的空气,适用于低渗透性土壤的原位条件[10]。生物通风技术更适合于生产不同类型的石油,中等重量的石油产品,如柴油,往往挥发很快,可以用SVE处理得更好,而较重的产品一般需要更多的时间来生物降解。设备很容易使用且安装过程简单。这一过程所需时间短(6个月至2年),并且可以很容易地与其他技术相结合。该技术不需要尾气处理。污染土壤的生物通风限制了在低渗透性和高粘土含量的现有场地中的应用。它不能稳定达到低净化极限,只能用于非饱和土壤,不能处理饱和区。

3.8 土地耕作

填埋是一种地上技术,其中挖掘出的污染土壤以薄层(不超过1.5米)铺在地面上进行处理,并通过通风和/或在营养物、矿物质和水分含量的帮助下,在污染土壤中激发好氧微生物活性,减少石油成分[12, 32]。为了分解碳氢化合物和加速降解过程,细菌被添加到污染的土壤中。通过增强微生物活性可以加速吸附的石油产品的降解。污染土壤的适当混合增加了有机物和微生物之间的相互作用,有助于获得好氧生物降解所需的氧气。如果被石油污染的土壤降解程度较高,那么更多的土壤可用于该场地,这有助于补充碳氢化合物的供应并维持生物活性[12]。

在土地耕作技术中,需要大面积的土地,污染物可以从处理场地到达未受干扰的场地[12]。在这种技术中,挥发性污染物需要预处理,因为它们挥发到大气中后会

污染空气[10]。但是较重的石油组分不能被有效降解, 较低的微生物生长和代谢速率以及温度降低了较轻的石油组分的降解(最佳温度: 25–40℃)不能用这种技术处理。难以减少浓度低于0.1 ppm和浓度高于95%的成分。对于成分浓度大于50000 ppm TPH的土壤, 这种方法无效[32]。

3.9 玻璃化

玻璃化是一种从土壤中去污染物的技术, 其中利用高温将土壤稳定/固化成玻璃基质。玻璃化或熔融玻璃是指在高温(1600–2000℃)下熔化土壤或泥土材料以及固定的无机物成分, 并通过高温分解破坏有机污染物的过程[10]。有机成分在加热时会产生气体。玻璃化是一种既适用于原位又适用于异位的技术。玻璃化法挥发掉大部分污染物, 其余部分转化为化学惰性的结晶产品和稳定的玻璃。对于被剧毒和放射性成分污染的土壤, 可以应用这种玻璃化技术。但对于被高百分比有机质或高湿度污染的土壤, 玻璃化技术成本较高。后续土壤主要可用于农业[18]。像重金属和放射性核素这样的无机物被转化成坚固、耐用和耐浸出的玻璃结构[10]。

污染物深度可能限制玻璃化技术, 并且为了确保污染物的固定, 通常需要长期监测。在玻璃化技术中, 高温需要固定有机成分并破坏这些成分, 某些污染物不适合这些技术[10]。

3.10 生物降解和植物修复

生物修复是一种通过种植等生物手段修复污染土壤中污染物的技术。该技术包括在受污染的土壤上种植, 通过植物的根系渗透污染物, 并在不同部位(叶、根、茎等)。这项技术可以利用细菌(需氧和厌氧物种)分解和吸收碳氢化合物。为了成长和发育中的植物会从土壤或水中消耗必需的重金属(铁、锰、锌、铜、镁、钼和镍)[23]。观察了几种不同金属在土壤中的迁移性和生物降解过程的影响。半胱氨酸能够从污染的土壤中释放一些金属, 土壤保留金属的能力受到活性微生物的影响[13, 14]。

从一个地点彻底清除污染物需要几个培养周期, 并且必须以适当的方式处理受污染的植被[22, 23]。该技术有利于通过植物去除、收集和/或降解土壤和水环境的成分。植物从环境中带走各种成分, 包括营养物质、有机物和重金属, 这些成分在植物的功能中可能会用到, 也可能不会用到。

植物修复/生物降解是一种美观的、太阳能驱动的技术, 对场地和环境的干扰最小, 产生的二次废物较少。

可以处理大量的污染物, 并且有机污染物转化为CO₂和水, 而不是转移毒性。处理后, 土壤保留在场地上, 污染场地的表层土壤可用于农业目的。这项技术对于处理距离地表1米以内的土壤和3米以内的地下水更有效。这项技术需要一个以上的生长季节, 恶劣的气候和水文条件(洪水、干旱)阻碍了植物的生长。如果动物吃了这项技术中使用的植物, 污染物可能会影响食物链, 使用过的植物应该以适当的方式处理。对于大型污染场地, 这种技术具有成本效益(污染物浓度低)。

4. 讨论

土壤污染是全世界都非常关注的问题, 污染有不同的形式。本研究旨在评价不同土壤修复技术的有效性。重要的是, 每种修复技术都有一些独特的性质、优点、缺点和局限性。所有这些都适用于去除不同/或相同的污染物, 但没有一种技术能够完全满足所有要求[8]。此处对修复技术进行了概述。表面覆盖和封装过程限制了污染物与干净土壤的混合, 但不能完全去除污染物。土壤稳定化过程通过一些添加剂固化土壤和污染物, 对环境影响较小, 同时也为土壤提供了一定的强度。生物通风工艺对含有汽油等轻污染物的土壤效果良好, 但对油类等重污染物效果不佳。此外, 生物通风工艺的设备也很容易获得。土壤蒸气提取是一种常用的技术, 效果好, 时间短, 成本低。但是SVE工艺限制了其在被垃圾渗滤液污染的粘土和淤泥场地的应用, 垃圾渗滤液含有挥发性有机污染物、重金属和其他污染物。原位玻璃化是一种有效的复杂水文地质方法, 可以去除各种污染物, 但不能在土壤深度增加的情况下正常工作, 并且该技术需要长时间监测。土地耕作是治疗产后出血的一种有效和经济的技术。填埋工艺能清除垃圾渗滤液中的有机污染物, 但不能清除无机污染物、重金属。土壤淋洗法是一种修复被垃圾渗滤液污染的土壤的适宜方法, 垃圾渗滤液中含有有机、无机污染物和重金属。植物修复是一种越来越被接受的污染物修复方法, 它对土壤的扰动较小, 并且使用太阳能(可在温度升高时使用)。这种技术可以去除重金属(镉、铬、锌、汞、铁、砷和铅)、放射性核素、氯化溶剂和石油烃, 但它不能在1米以上的土壤中正常工作, 而且这是一个缓慢的过程, 需要很多时间。

5. 小结

作者研究了不同的技术适用于不同的污染物去除和不同的现场条件。在这项研究中, 发现任何一个技术还不足以净化任何受污染地区的土壤。因此, 要获得更好的补救, 需要将两种或两种以上的技术结合起来。例如,

填埋过程清除挥发性有机化合物，而土壤蒸汽提取过程可以清除垃圾渗滤液中的无机挥发性化合物。同样，任何去除重金属的技术都可以与生物通风相结合，任何仅从土壤中去挥发有机化合物的技术（如土壤洗涤）都可以与土壤蒸汽提取相结合。由于一种或多种修复技术的选择取决于多种因素，因此决策对土壤修复和环境系统起着非常重要的作用。在未来的研究中，应更多地关注土壤修复技术，以评估其有效性，并建立新的原位修复技术。

参考文献：

- [1] Acar, Y. B., Alshawabkeh, A., 1993. Principle of electrokinetic remediation. *Journal of Environmental Science and Technology* 27 (13), 2638 – 2647.
- [2] Anderson, A., Mitchell, P., 2003. Treatment of mercury contaminated soil, mine waste and sludge using silica micro- encapsulation. TMS Annual Meeting, Extraction and Processing Division, Mar 2 – 6 2003, San Diego, CA, pp. 265 – 274.
- [3] Barnes, D. L., 2003. Estimation of operation time for soil vapor extraction systems. *Journal of Environmental Engineering* 129 (9), 873 – 878.
- [4] Bronze, O. E. New developments in hazardous materials research. Nova Science Publishers, N. Y., 2006. Environmental Protection Agency (EPA). Contaminants. Retrieved November 18, 2009, from Clean-Up Information: <http://www.clu-in.org/contaminantfocus/>
- [5] Cascade, A. Deeper Look at Permeable Reactive Barriers. Available online: <https://www.cascade.env.com/resources/blogs/archive/a-deeper-look-at-permeable-reactive-barriers/> (accessed on 4 September 2020).
- [6] Conway R. A., Cordle S., Mercer J. W., Miller D. W., Rao P. S. C. Overview. In: *Ground Water and Soil Contamination Remediation: Toward Compatible Science, Policy, and Public Perception*. Report on Colloquium Sponsored by the Water Science and Technology Board. Colloquium 5 of a Series, National Academy Press, Washington, D.C., 1990, p. 1–16.
- [7] Druss, D. L., 2003. Guidelines for Design and Installation of Soil – Cement Stabilization, *Geotechnical Special Publication*, Feb 10 – 12 2003, New Orleans, LA, Number 120, pp. 527 – 539.
- [8] Dunea D, Iordache S, Pohoata A, Frasin LBN (2014) Investigation and selection of remediation technologies for petroleum-contaminated soils using a decision support system. *Water Air Soil Pollut* 225: 1 – 18.
- [9] Emerging Technologies for the Remediation of Metals in Soils. *Electrokinetics. Technology Overview*. Interstate Technology and Regulatory Cooperation Work Group. December, 1997, 19
- [10] FRTR, (1999). Soil flushing. *Federal Remediation Technologies Roundtables*, USEPA, Washington, DC.
- [11] F. I. Khan, T. Husain, R. Hejazi. (2004). An overview and analysis of site remediation technologies. *Journal of Environmental Management*. Vol. 71, 95–122.
- [12] Hejazi, R. F., 2002. Oily Sludge Degradation Study Under Arid Conditions Using a Combination of Landfarm and Bioreactor Technologies. PhD thesis, Faculty of Engineering and Applied Science, Memorial University of Newfoundland, St John's, Canada.
- [13] K. T. Jarvinen, E. S. Melin, and J. A. Puhakka. (1994). High rate bioremediation of chlorophenol contaminated groundwater at low temperatures. *Environmental Science & Technology*. Vol. 28, 2387–2392.
- [14] K. W. Tsang, P. R. Dugan, R. M. Pfister. (1994). Mobilization of Bi, Cd, Pb, Th, and U ions from contaminated soil and the influence of bacteria on the process. In: *Emerging Technologies in Hazardous Waste Management IV*. Washington, DC: American Chemical Society.
- [15] Lin, H. K., Man, X. D., Walsh, D. E., 2001. Lead removal via soil washing and leaching. *JOM* 53 (12), 22 – 25.
- [16] Liu Y, Zeng G, Zhong H, Wang Z, Liu Z, Cheng M, Liu G, Yang X, Liu S (2017). Effect of rhamnolipid solubilization on hexadecane bioavailability: enhancement or reduction? *JHazard Mater* 322: 394 – 401.
- [17] Meagher, R. B. (2000). “Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants.” *Curr. Opin. Plant Biol.*, 3, 153 – 162.
- [18] Meuser H (2013) *Soil remediation and rehabilitation: treatment of contaminated and disturbed land*. Springer, Dordrecht.
- [19] Mihopoulos F. I. Khan et al., 2004. An overview and analysis of site remediation technologies. *Journal of Environmental Management* 71 (2004) 95 – 122.
- [20] Mitchell, E. D. and Thomas, W. E. (2012). In- situ

thermal remediation. Technical Guidance Document, Indiana Department of Environmental Management: 1 – 9.

[21] Mohammad, I. L., Zhen, L., Peter, J. S. and Xiao, Y. (2008). Phytoremediation of heavy metals polluted soil and water: progresses and perspectives. *Journal of Zhejiang University*, 9 (3): 210 – 220.

[22] Mulligan, C. N., Yong, R. N., and Gibbs, B. F. (2001). “Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: an evaluation.” *Eng. Geol. (Amsterdam)*, 60, 193 – 207.

[23] O. Schacht, K. Ajibo. (2002). *Soil Bioremediation: In-Situ vs. Ex-situ. (Costs, Benefits, and Effects)*. WSP and Göteborg Energi.

[24] Pavel, L.; Gavrilescu, M. (2008). Overview of ex situ decontamination techniques for soil cleanup. *Environ. Eng. Manag. J.* 7, 815 – 834.

[25] Paulo, J. C., Favas, J. P., Mayank, V., Rohan, D. and Manoj, S. R. (2014). Phytoremediation of soil contaminated with metals and metalloids at mining areas: Potential of Native Flora. *INTECH Open Science*: 486 – 515. <http://dx.doi.org/10.5772/57469>.

[26] Raphl, S. B., John, C. L. and Gorm, H. (2006). Application of thermal remediation techniques for in situ treatment of contaminated soil and water. NATO Advanced Research Workshop, Athen, Greece.

[27] Raymond, A. W. and Felix, O. (2011). Heavy metals in contaminated soil: A review of sources, chemistry, risk and best available strategies for remediation. *International Scholar Research*. <http://dx.org/10.5402/2011/402647>.

[28] Reddy KR, Yaghoubi P, Yukselen-Aksoy Y (2015). Effects of biochar amendment on geotechnical properties of landfill cover soil. *Waste Manag Res* 33 (6): 524 – 532.

[29] Suthersan, S. S. (1999). *In situ air sparging. Remediation engineering*, CRC Press.

[30] USEPA (1995). How to evaluate alternative clean up technologies for underground storage tank sites. Office of Solid Waste and Emergency Response. EPA 510 – B – 95 – 007, Washington, DC.

[31] USEPA (1996). *In situ soil vapour – extraction*. Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC.

[32] USEPA (1998). *Soil vapour extraction*. Office of the underground storage tank, EPA 510 – B – 95 – 007.

[33] USEPA (2006). *In Situ Treatment Technologies for Contaminated Soil*, Solid Waste and Emergency Response. EPA 542/F– 06/013.

[34] USEPA (2012). *A Citizen’ s Guide to Thermal Desorption* Office of Solid Waste and Emergency Response– EPA 542–F– 12–020. www.epa.gov/superfund/sites. Accessed 2 June 2018.