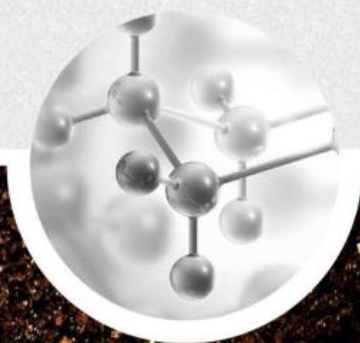


修复物

# 修复和再生 被微量元素污染的土壤

熊 剑◎著



AMENDMENTS FOR  
THE REMEDIATION AND  
REGENERATION OF TRACE  
ELEMENT CONTAMINATED SOIL

ENMIENDAS PARA LA  
RECUPERACIÓN Y  
REHABILITACIÓN DEL  
SUELO CONTAMINADO CON  
ELEMENTOS TRAZA



云南出版集团

YNP

云南科技出版社



# 修复和再生 被微量元素污染的土壤

第二版



本书详细阐述了土壤修复和再生技术，包括物理、化学和生物修复方法。作者通过丰富的案例分析和实验数据，探讨了不同污染物的修复策略和效果。本书是环境科学、土壤学及相关领域的研究人员、学生和从业人员的必备参考书。

本书全面介绍了土壤修复和再生领域的最新进展，涵盖了从污染识别到修复效果评估的完整流程。书中还讨论了政策法规、经济成本以及社区参与在土壤修复项目中的重要性。本书不仅具有理论深度，还具有很强的实践指导意义。

环境科学出版社

图书在版编目 ( C I P ) 数据

修复物修复和再生被微量元素污染的土壤 =  
Amendments for the remediation and regeneration of  
trace element contaminated soil : 汉、英、西 / 熊  
剑著 . -- 昆明 : 云南科技出版社 , 2023  
ISBN 978-7-5587-4868-4

I . ①修… II . ①熊… III . ①微量元素—土壤污染—  
修复—研究—汉、英、西 IV . ① X53

中国国家版本馆 CIP 数据核字 (2023) 第 048077 号

修复物修复和再生被微量元素污染的土壤

*Amendments for the remediation and regeneration of trace element contaminated soil*  
*Enmiendas para la recuperación y rehabilitación del suelo contaminado con elementos traza*  
XIUFUWU XIUFU HE ZAISHENG BEI WEILIANG YUANSU WURAN DE TURANG

熊 剑 著

---

出 版 人 : 温 翔  
策 划 : 李 非  
责任编辑 : 杨志能 刘浩君  
封面设计 : 长策文化  
责任校对 : 张舒园  
责任印制 : 蒋丽芬

书 号 : ISBN 978-7-5587-4868-4  
印 刷 : 云南金伦云印实业股份有限公司  
开 本 : 787mm × 1092mm 1/16  
印 张 : 10  
字 数 : 240 千字  
版 次 : 2023 年 4 月第 1 版  
印 次 : 2023 年 4 月第 1 次印刷  
定 价 : 59.00 元

出版发行 : 云南出版集团 云南科技出版社  
地 址 : 昆明市环城西路 609 号  
电 话 : 0871-64101969

---

版权所有 侵权必究



<b>1 前言</b>	<b>1</b>
1.1 微量元素的定义和起源	1
1.2 被微量元素污染土壤的修复	2
1.3 施加修复物到被污染土壤	5
1.4 被污染土壤自然生植被的发展	7
1.5 目 标	7
<b>2 材料与方法</b>	<b>9</b>
2.1 Aznalcóllar尾矿泄漏	9
2.2 研究区域和前期结果	11
2.3 新采样品	15
2.4 统计分析	19
<b>3 结 果</b>	<b>20</b>
3.1 土壤pH	20
3.2 土壤总有机碳和水溶性有机碳	21
3.3 土壤凯式氮、奥森磷和有效钾	24
3.4 土壤微量元素含量（微量元素伪全量和CaCl <sub>2</sub> 提取含量）	26
3.5 植物覆盖估计和野草地上部微量元素含量	30

<b>4 讨论</b> .....	<b>32</b>
4.1 指标间相互关系 .....	34
4.2 多变量方法分析（主成分分析和雷达图分析） .....	36
<b>5 结论</b> .....	<b>43</b>

---

# 1 前言

---

## 1.1 微量元素的定义和起源

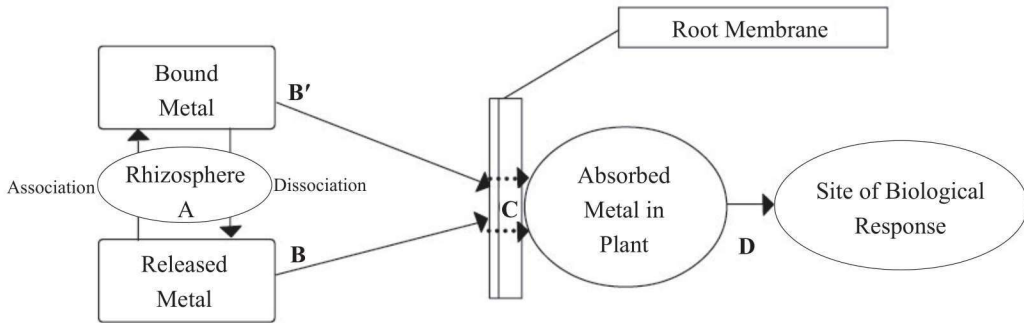
“微量元素”一词在文献中被广泛使用，在不同的科学学科中可能有不同的含义。微量元素通常是指在自然和扰动环境中少量存在的元素，当存在于过量的生物可利用浓度中时，对活生物体有毒。它通常定义为对微生物和动植物有机体（包括人类）至关重要或少量有毒的元素。然而，它通常包括没有已知生理功能的元素。通常用作大多数“微量元素”同义词的其他术语包括：“微量或重金属”“微量元素”“微量无机物”（Blum, 1998; Adriano, 2001; Carrillo-González, et al., 2006）。在环境研究中，后一个术语中使用最多的是重金属，指的是密度大于 $5.0\text{g/cm}^3$ 的元素，表示与污染和毒性有关但也包括必需元素的金属和类金属。然而，一些作者强调了“重金属”一词在包含哪些元素方面的不精确性，以及对给定元素的任何化合物使用该术语缺乏化学一致性（Duffus, 2002; Hodson, 2004; Madrid, 2010）。

在地质学中，微量元素是与主要元素（O、Si、Al、Na、Mg、Ca和Fe）和次要因素（H、C、S、K、P、Ti、Cr、Mn）不同的元素。其中，土壤科学这一术语适用于浓度 $<1000\text{mg/kg}$ 的元素。这些元素包括：Mn、Cr、Ni、Pb和Zn（ $1\sim 1500\text{mg/kg}$ ）；Co、Cu和As（ $0.1\sim 250\text{mg/kg}$ ）；Cd和Hg（ $0.01\sim 2\text{mg/kg}$ ）。在生物化学和生物医学研究中，微量元素被认为是通常存在于植物或动物组织中的那些元素，其浓度小于 $100\text{mg/kg}$ 的生物体干物质。在食品和营养科学中，微量元素可以被定义为一种常见的元素，但其在食用的食品中的浓度很少超过 $20\text{mg/kg}$ （Blum, 1998; Adriano, 2001; Carrillo-González, et al., 2006）。

微量元素在农业生态系统中无处不在。微量元素通过自然和人为过程进入农业生态系统。一些土壤中的某些微量元素背景值较高，这些元素对植物和野生动物有毒，因为这些元素在母体材料中的浓度极高。人为过程包括通过使用肥料、石灰材料、有机肥料（作为污水槽的城市废物和用作土壤改良剂的其他废物）、灌溉水和其他工业废物输入微量元素。其他人为来源包括金属矿石的开采和冶炼、煤炭和其他化石燃料的燃烧、农业和木材工业中农药的使用、制造业、垃圾填埋场等。这些过程为农业生态系统贡献了不同数量的微量元素。微量元素，特别是重金属在土壤中的积累有可

能限制土壤的功能，对植物造成毒性，并污染食物链（Blum, 1998; Senesi, et al., 1999; Adriano, 2001; He, et al., 2005; Carrillo-González, et al., 2006）。

## 1.2 被微量元素污染土壤的修复



**Bioavailability processes (A, B, B' and C)**

Metal interactions between phases (A)	Transport of metals to plant(B, B')	Passage across root membrane (C)	Circulation within plant, accumulation in target tissue and toxic effects (D)
---------------------------------------	-------------------------------------	----------------------------------	---

图 1.1 土壤-植物系统中的生物有效性过程。从 US-NRC (2003) 中修改的, (Adriano, et al., 2004)

微量元素污染土壤是一个具有挑战性的环境问题，因为：①无机元素的不可降解特性；②通过径流和淋滤将其转移到非污染区域的相关风险性；③通过植物吸收或直接摄入进入食物链的可能性。然而，暴露在外的生物体和生态系统中的有害影响并非由释放到环境中的全部微量元素引起的，而只是由生物可利用部分引起的（图1.1）。微量元素的流动性和有效性受许多化学和生化过程（沉淀溶解、吸附-解吸、络合-解离和氧化-还原等）的控制（图1.2）（He, et al., 2005）。因此，关于微量元素污染的研究已经从一种旧的思维方式（污染物的总浓度一直是风险评估的主要基础）演变成为一种现代思维方式，主要考虑总质量中的生物可利用部分（US-EPA, 1993; Adriano, et al., 2004）。

## Biogeochemical Cycle of trace elements

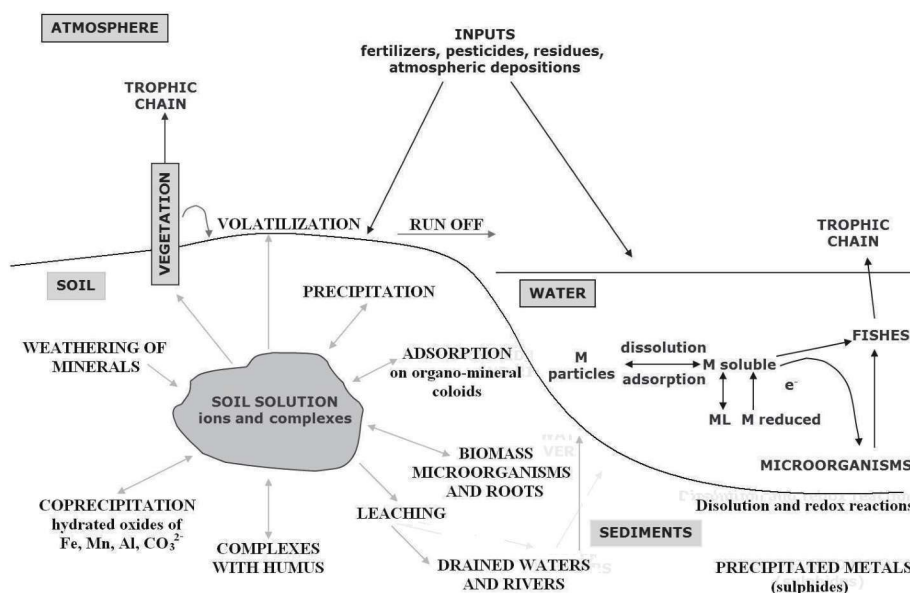


图 1.2 微量元素生物地球化学循环 (Alloway, 1990)

然而，生物利用度的定义及其所依据的概念仍不清楚。其测量方法各不相同，因此没有单一的标准技术来评估污染物的植物有效性或其对土壤生物群的生态毒理学影响。土壤中的生物可利用污染物分数代表土壤生物的相关暴露浓度（图1.3）（Tobias, et al., 2003）。根据Adriano, et al. (2004)，微量元素的生物可利用部分指的是容易获得的部分（可溶性和弱吸附部分的总和），通常指的是最不稳定的部分。

污染土壤的修复是通过破坏污染物或将其从土壤中清除，或通过降低其毒性或生物有效性来完成的。环境修复技术使用物理、化学或生物过程来消除、减少、隔离或稳定污染物。土壤修复技术有许多分类：①根据处理完成的地点，处理是就地（土壤就地处理）或迁地（土壤就地开挖和处理或运输至处理厂）；②根据处理类型：物理、化学或生物；③技术方面：分离、固定化、减毒、物理分离和提取；④根据目标：清除土壤中的污染物（“现场净化”）或通过减少暴露（“现场稳定”）降低污染物造成的风险。

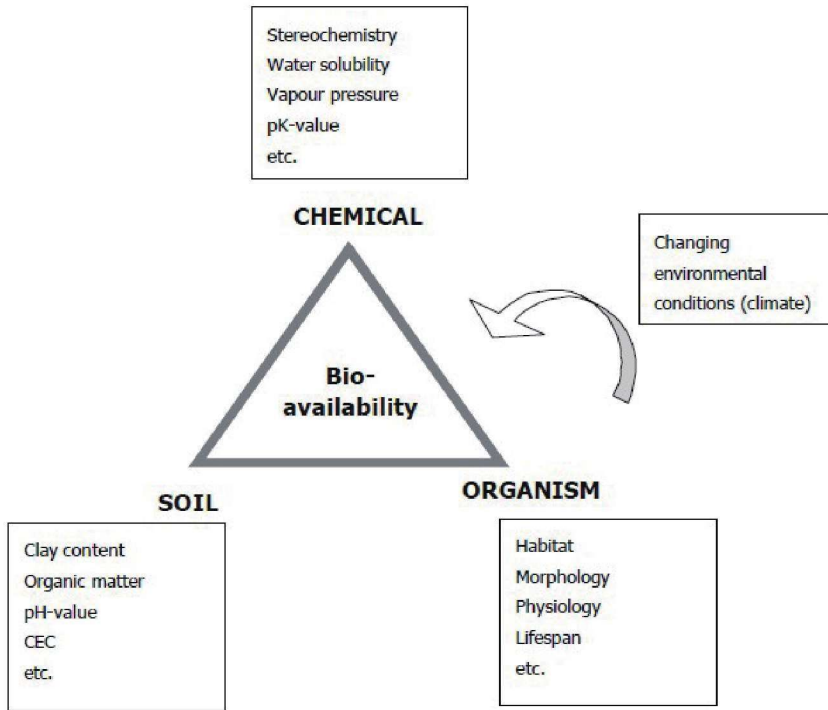


图 1.3 生物利用度——参数和过程的复杂性 (Tobias, et al., 2003)

每种修复技术都有一定的局限性和缺点。因此，必须进行现场评估，以确保采用适当的技术。如果涉及多种污染物，可能需要使用多种技术组合，将污染物浓度降低到可接受的水平。补救的经济成本是需要考虑的最重要因素之一。另一个因素是污染物的性质和浓度。最后清洁目标非常重要。在“原位”技术（隔离、移除/提取和稳定）中，迄今为止，很少有技术得到充分开发，可以被认为是大规模污染区土地处理的成本效益高且可靠的技术。

在各种修复技术中，生物修复技术由于其成本低、技术要求低，以及在原位发生的潜力，在过去十年中得到了极大的重视 (Baker & Brooks, 1989; Ensley, 1995)。生物修复试图利用植物和微生物来增强去除或分解有害物质的自然过程。一旦为选定的植物或微生物的繁衍创造了有利的环境条件，选定的植物或微生物就可以以大大减少的能量投入维持生物修复过程。通过生物方法去除污染物后，土壤将保持生物活性，其作为植物生长介质的能力不会受到损害。

因此，虽然应适当注意建立过程和设计技术，以尽可能快地减少或消除土壤中的污染物，但应同样重视了解处理过程对去污土壤的影响。土壤修复的目标不仅是消除土壤污染，而且是恢复土壤质量。

与物理和化学修复相比，生物修复具有以下优点：①保留了土壤的自然性质；

②它主要从阳光中获取能量；③可以在根际获得高水平的微生物生物量；④成本低；⑤它具有快速发展的潜力（Huang, et al., 2004）。

原位生物修复方法包括：

当物理、化学和生物过程降低污染物的毒性和流动性时发生的自然衰减。构成自然衰减的主要过程包括生物降解、化学转化、稳定和挥发。

强化生物修复，旨在通过为微生物创造有利环境，刺激微生物生长并将污染物用作食物和能源。

植物修复是指利用植物处理污染土壤的技术。植物修复是一种应考虑用于污染场地修复的技术，因为它具有成本效益、美学优势和长期适用性。植物修复非常适合在其他修复方法不具成本效益或不可行的大型现场使用；在污染物浓度较低的现场，仅需长时间进行“抛光处理”；结合其他技术，植被被用作场地的最终封顶和封闭（Schnoor, 1997）。

植物已显示出承受相对高浓度有机化学品的能力，而不会产生毒性影响，在某些情况下，它们可以吸收并迅速将化学品转化为毒性较小的代谢物。此外，它们通过释放根分泌物、酶和土壤中有有机碳的积累，刺激根际有机化学物质的降解。对于金属污染物，植物表现出植物萃取（将污染物吸收并回收到地上生物量中）、将水中的金属过滤到根系（根过滤）或通过侵蚀控制（植物稳定）和大量水分的蒸发（植物挥发）来稳定废土场的潜力（Schnoor, 1997）。

加强植物修复过程（Wenzel, et al., 1999）。基本上，可以使用三种方法来增强植物再分化过程：

（1）提高植物的遗传潜力。一些具体目标是：改善根系形态、参与污染物动员/固定的根系分泌物、对污染物解毒、氧化/还原、转运、降解或挥发至关重要的植物酶，以及生物量。

（2）栽培/管理实践，如作物管理、杂草/植物病害控制和收获技术。

（3）土壤调节旨在为植物生长、根系/微流纹性系统的发育提供最佳的物理和营养条件，并通过调整控制污染物流动性和生物有效性的土壤物理、化学和生物特性来加强植物修复过程。从这个意义上讲，使用一些废物和副产品作为修正品可以加强补救过程。

### 1.3 施加修复物到被污染土壤

应用土壤修复物可能是一种环境友好且成本效益高的方法，可以恢复污染程度适中的大片区域。这些“原位”处理旨在增强土壤中发生的自然衰减机制（吸附、沉淀和络合反应），从而降低污染物的流动性和生物有效性，而不是微量元素的总浓度

(Adriano, et al., 2004)。此外, 修复物可能有助于在此类退化土地上建立植物, 并增强微生物活性(图1.4)(Mora, et al., 2005; Madejón, et al., 2006a; Bolan, et al., 2011)。

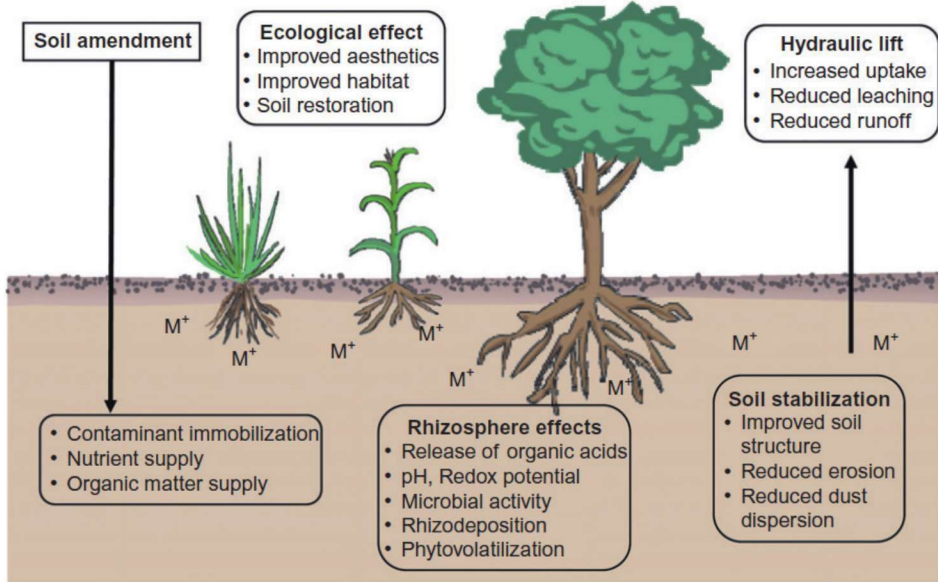


图 1.4 植物稳定对土壤中污染物的潜在作用示意图 (Bolan, et al., 2011)

使用副产品作为土壤修复物, 如石灰或堆肥, 也可以减少废物处置, 并重新评估这些废物的价值 (Lombi, et al., 2002a; Lombi, et al., 2002b)。然而, “原位”处理的真正潜力仍不清楚, 因为它需要长期稳定的数据来验证 (Pérez-de-Mora, et al., 2007)。许多修复物被用来固定污染土壤中的微量元素 (Knox, et al., 2001)。其中包括石灰、沸石、磷灰石、铁锰氧化物、碱性固体生物堆肥、黏土矿物和白云石等工业副产品。欧洲和北美已经在野外试验规模上证明了某些修复物在土壤中的应用, 这些修复物可以增强土壤中有效固定金属的关键生物地球化学过程 (Adriano, et al., 2004)。使用石灰、磷酸盐和生物固体修复物的案例研究表明, 在现场条件下, 增强了自然修复, 大大改善了植被生长, 活跃了微生物种群和多样性, 减少了运输金属到场外。根据土壤/水文地球化学性质、来源条件和金属形态/种类, 以及土地利用情况, 此类辅助自然修复诱导的固定效果可能是持久的。除稳定微量元素外, 在土壤复垦中使用这些材料还实现了两个目标: ①回收副产品, 因为在现代社会中, 对残留物和废物的充分管理至关重要; ②土壤再生。在第二个目标中, 这些修复措施在恢复微量元素污染土壤功能方面的有效性研究较少 (Burgos, et al., 2010)。

使用修复物和(或)植物生长使土壤pH碱化, 并增加总有机碳和水溶性碳浓度。

尤其是施用石灰和稳定堆肥似乎对改变土壤pH非常有效。添加有机修复物有助于增加土壤有机碳，但对于易溶碳源而言，根系的存在可能同样重要，甚至比有机改良剂更重要（Pérez-de-Mora, et al., 2006）。此外，修复物的施加可以作为有效养分的长期来源，因为其释放是渐进的，从而改善土壤肥力（Alburquerque, et al., 2011）。

#### 1.4 被污染土壤自然生植被的发展

植被在这些退化地区的恢复中起着至关重要的作用，因为它可以防止受污染颗粒被风吹走，减少水污染（Tordoff, et al., 2000）。然而，植物吸收微量元素意味着几种危害，如进入食物链（McLaughlin, 2001）。因此，有必要对土壤性质和植被发育进行研究，以评估修复措施对生态系统的有效性和微量元素带来的风险（Madejón, et al., 2006a）。

在半干旱地区，受微量元素影响的土壤中的先锋植物群落由于污染物的存在，以及营养和水的可用性差异，能够很好地适应这些胁迫（Freitas, et al., 2004；Madejón, et al., 2009）。自然植被还提供物理保护，防止风蚀和水蚀（Norland & Veith, 1995）。此外，蒸散作用限制了植被对土壤水分的蒸散作用对地下水的损失（Tordoff, et al., 2000）。先锋草本植被可能在污染区次生演替早期阶段的微量元素循环中起主要作用，尤其是在半干旱气候中。

最大限度地减少地上生物量中微量元素的积累是任何大规模植物管理计划的主要挑战（Domínguez, et al., 2008）。研究表明，添加修复物可以改善土壤特性，促进耐微量元素植物的定植和生长。例如，营养素可以对植物中的金属和类金属毒性发挥保护作用（Mengel & Kirkby, 1987）。

因此，有必要对这些自发生长的植物进行研究，以确定植物地上部中微量元素积累增加的相关风险，以及调查与受污染土壤相关的污染指标。

#### 1.5 目 标

为了评估辅助自然修复作为一种修复微量元素中度污染土壤的技术的真正潜力，有必要进行长期研究。这样的研究应该考虑这种技术的应用效果：①土壤的物理化学性质，特别强调微量元素浓度（总量和生物可利用的量）；②植被覆盖的发展和植物对微量元素的吸收和积累。

此外，有必要验证所应用修复物的充分性和效果，以及施加剂量，以确定修复物效果随时间的持续性。使用不同的工业副产品和废物作为修复物（例如：甜菜石灰、生物固体堆肥、城市堆肥等）具有额外的兴趣，因为这些副产品的回收和扩大使用，

不仅在农业上，而且在可持续发展框架下，在修复退化和污染土壤的田间和园林绿化中。

目前的工作有两个主要目标。第一个目标是评估对微量元素污染土壤应用各种修复物的效果：①微量元素迁移率和植物有效性；②土壤化学性质；③对植物定植、生长和组成的影响。第二个目标是评估反复施用修复物对降低土壤中不稳定微量元素浓度的效果。

本研究是在三种修复物首次应用于中度污染土壤8年后进行的。

## 2 材料与方法

### 2.1 Aznalcóllar 尾矿泄漏

Aznalcóllar尾矿泄漏发生在1998年4月25日，大约600万立方米的泥浆淹没了Agrio and Guadiamar河的两岸（图2.1）。泥浆由富含重金属和其他有毒元素的酸性水和由细金属硫化物组成的污泥组成：黄铁矿和毒砂（75%~80%）以及闪锌矿和方铅矿（5%）。这篇文章（Cabrera, et al., 1999）里面有污泥中微量元素的浓度。沿着这两条河流，一条长约40km、宽300m的狭长地带被一层（2~30cm厚）污泥覆盖（IGME, 1998）。约4500hm<sup>2</sup>用于旱地农业、水果园和橄榄园的农业用地受到污染的影响（CMA, 1998）。洪水过后，事故发生后，法律禁止在受泄漏影响的地区种植粮食作物（Madejón, et al., 2006a）。

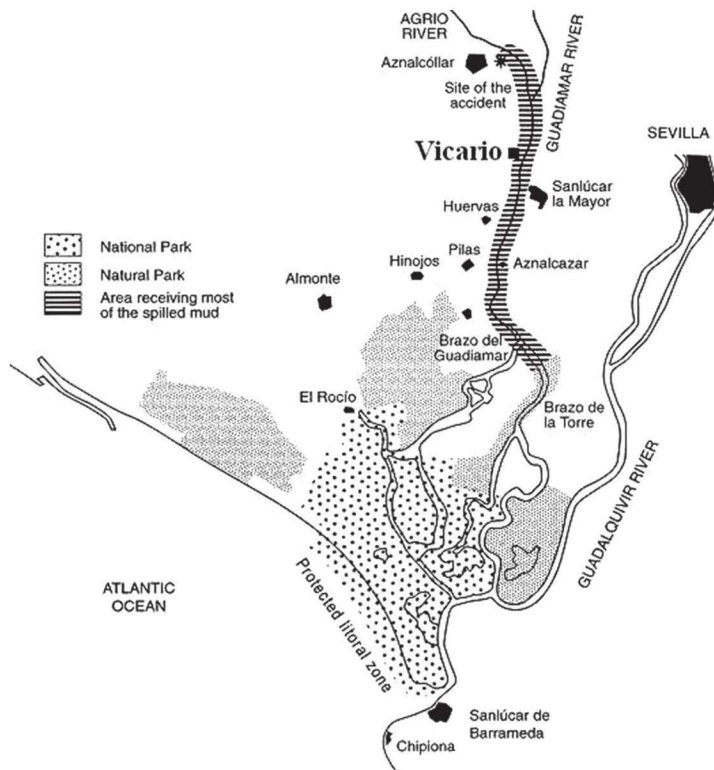


图 2.1 Aznalcóllar 矿场泄漏地图和“El Vicario” 试验区的位置，从（Grimalt, et al., 1999）中修改得到

受洪水影响的土壤显示, 0~50cm土层中总砷、铋、镉、铜、汞、铅、镉、铊和锌的浓度高于Guadamar河谷土壤的背景水平 (Cabrera, et al., 1999; López-Pamo, et al., 1999; Simón, et al., 1999; Cabrera, et al., 2008a; Cabrera, et al., 2008b)。在大多数受影响的土壤中, 在表层 (0~20cm) 观察到严重的微量元素污染, 其在土壤剖面中向下减少。一般来说, 在20cm以下黏土含量超过25%的土壤中, 微量元素浓度降低到接近背景值, 而在较粗糙的土壤中, 重金属污染渗透到该深度以下, 在至少50~80cm的深度下是明显的重金属污染 (Cabrera, et al., 1999)。

受影响区域的修复工程包括: ①清除表面的污泥和一层约10cm厚的土壤; ②修复物的施用; ③圆盘耙耙地 (20cm), 在犁耕深度内混合土壤。紧急土壤清理程序于1998年5月初迅速启动。这次清理行动历时约6个月, 清除了污泥和大部分受污染的土壤表面。覆盖在土壤上的有毒污泥被机械清除, 并在露天矿中处理掉。同年10月, 大部分计划工作完成。这些工程中使用的机械设备在土壤表层留下了一些污泥 (Grimalt, et al., 1999)。所施用的修复物包括: 甜菜石灰、富含铁的红壤、堆肥和粪肥。甜菜石灰的施用量取决于土壤污染程度, 范围为20~60mg/hm<sup>2</sup>。根据土壤的砷浓度施用红壤, 范围为500~900mg/hm<sup>2</sup>。堆肥或粪肥以15~20mg/hm<sup>2</sup>的用量施加到整个受影响的土壤中, 以恢复去除污泥和受污染土层过程中的有机物损失 (OTCVG, 2000; Antón Pacheco, et al., 2001)。

地方政府购买了受影响的土地, 这些土地是拥有一些支离破碎的森林和类似热带草原的林地的农场, 任何农业活动都被禁止。实施了“Guadamar绿色走廊”方案, 目的是为野生动物提供一个连续的植被带, 以便它们沿着Doñana (南部) 和Sierra Morena 山脉 (北部) 之间的Guadamar河流域迁徙。冲积阶地的植被重建始于1999年, 包括种植 $3 \times 10^6$ 株以上的灌木和树木 (种植密度480~980株/平方公里)。根据当地栖息地条件, 选择用于绿化的目标乔木和灌木物种是典型的河岸森林 (如white poplar和willow) 或典型的干旱山地森林, 如holm oak、wild olive、rosemary、broom brush和lavender oleander (Arenas, et al., 2008)。

污泥从土壤表面清除和进行修复活动后, 受污泥影响的土壤中微量元素的总含量仍高于该区域的背景值, 偶尔也高于恢复前的值。这是由于土壤表面残留的污泥在修复作业期间被掩埋 (Cabrera, 2000; Cabrera, et al., 2008a; Cabrera, et al., 2008b)。IRNAS的研究人员在Guadamar河谷沿线的代表性区域进行了几项研究 (Madejón, et al., 2002; Madejón, et al., 2004; Madejón, et al., 2006a; Madejón, et al., 2006b; Cabrera, et al., 2007) 来评估修复土壤中微量元素的流动性和有效性。研究表明, 施加修复物后, 用EDTA从受影响的清洁土壤中提取的微量元素的平均值高于未受影响的土壤 (Madejón, et al., 2002; Madejón, et al., 2004), 但

低于施加修复物前的清洁后的土壤 (Madejón, et al., 2006a)。

尽管有这些结果, Madejón, et al. (2002) 报道称, 事故发生18个月后, 在污泥覆盖的土壤中生长的野草含有高浓度的砷、镉、铜、铁和铅, 高于毒性水平, 而在修复的土壤中, 只有镉在草组织中达到毒性水平。Murillo, et al. (2005) 在事故发生五年后 (2003年) 对野生橄榄植物中的微量元素进行了研究, 报道称, 尽管土壤中的微量元素浓度通常高于被认为是植物中毒的浓度, “绿色走廊” 内的残余污染似乎因所分析的不同物种中的微量元素浓度较低而趋于稳定。只有willow (*Salix*) 幼树达到了较高的镉和锌浓度。根据Murillo, et al. (2005), 事故发生后, 用于恢复土壤的修复物以及土壤中微量元素的自然动力学 (保留可能是主要过程) 可能导致这些元素的活化程度明显较低, 这一点可以通过植物吸收反映出来。

## 2.2 研究区域和前期结果

Aznalcóllar采矿事故的规模、受影响的大面积土地、垃圾填埋场的特点, 以及在尽可能短的时间内采取行动的必要性, 不允许根据污染物的性质和含量, 采取具体措施修复受影响的土壤, 以及土壤的物理化学特性。另一方面, 由于污染区域的巨大规模、土壤的多样性、污染程度的不同, 甚至由于每个区域使用的修复物类型和剂量的不确定性, 对修复土壤的监测并不容易。鉴于这些情况, 并利用受污染土壤区域的存在, 唯一的修复工作是清除土壤表面的污泥, IRNAS的研究人员设计了实验, 以评估①几种修复物的应用效果以及对重建自然植被的影响; ②几种修复物的潜力和 (或) 植被覆盖及其相应根际的发展, 以修复被各种微量元素污染的土壤; ③修复物稳定效果的持久性。

这项研究是在一个实验区域 (“El Vicario”) 进行的, 该区域受到有毒Aznalcóllar矿场泄漏的影响, 位于Guadamar河右岸 (北纬N 37°26'21", 西经06°12'59"), 距离西班牙南部Aznalcóllar矿场下游10km (图2.1)。在该区域进行的唯一修复工作是从土壤表面以及10~15cm的下层土壤中初步清除污泥。在最初的污泥清除工作之后, 确定了几个相关的土壤特性。对土壤参数的初步测量表明, 该地块非常不均匀 (表2.1) (Madejón, et al., 2006a)。这可能是因为清理作业后, 污泥残留在土壤中 (Cabrera, 2000)。此外, 表面水坑中积累的酸性水可能导致pH、总S和微量元素分布的不均匀 (Clemente, et al., 2003)。

表2.1 平均值, 标准偏差 (SD), 变异系数 (CV), 修复前某些土壤化学性质的最小值和最大值 ( $n=48$ ) (Madejón, et al., 2006a)

Variable	Mean	SD	CV (%)	Min.	Max.
pH	3.86	1.32	34.2	2.45	7.28
TOC (%)	0.92	0.16	17.6	0.62	1.33
S (mg/kg)	8693	5740	66.0	529	25663
Total (mg/kg)					
As	211	103	48.8	58.9	421
Cd	4.44	1.16	26.1	1.79	8.26
Cu	119	26.6	22.3	84.2	193
Pb	471	216	45.9	159	1100
Zn	381	136	35.6	134	812
Available (EDTA) (mg/kg)					
As	3.58	4.88	136	0.26	24.2
Cd	0.57	0.29	51.0	0.07	1.50
Cu	34.1	9.55	28.0	17.0	60.3
Pb	5.21	4.24	81.3	0.55	15.9
Zn	96.3	35.0	36.4	26.9	187
Soluble (CaCl <sub>2</sub> ) (mg/kg)					
Cd	0.37	0.26	70.3	0.00	1.05
Cu	15.0	12.2	81.3	0.92	47.0
Zn	98.6	64.6	65.5	0.23	233

该地区属于半干旱的地中海气候, 表现出复杂的空间和季节变化模式, 每年都有广泛且不可预测的降雨波动 (Martínez-Casasnovas, et al., 2002)。年平均气温为19°C (1月最低9°C, 7月最高27°C), 年平均降雨量为484mm (Madejón, et al., 2010)。

### 2.2.1 土壤

西班牙这一地区的土壤通常具有水分含量低的特点, 这会改变微量元素的可用性。土壤为黏壤土 (21.1%为黏土、29.1%为粉土、49.8%为砂), 分类为Typic Xerofluent (USDA, 1996), 在修复前0~15cm深度的主要特征如表2.1所示。