增值型土壤修复的理念与可行性研究\*

The Idea and Feasibility of Value-added Remediation of Soil

摘 要 在深入理解重金属性质的基础上，结合实际案例和对不同类型的增值型修复，指出在某些复合重金属污染土壤分 布区和选矿厂，可利用选择性稳定剂、功能微生物和EK-SS等技术形成“抑害扬益"的新工艺，生产出富硒、富锌、富 锗等高附加值农产品而获利，也可通过提高产出、改进工艺和节省开支等手段，将污染物转化为资源，实现增值型修复， 将赔本的治污难题变成有利可图，形成新的投资方向，吸引市场资金进入土壤修复领域等。

关键词 增值型土壤修复 ；土壤修复 ；重金属 ；土壤

■文/陈明 孙春美 刘冠男 李小赛 王蕊

DOI:10.14026/j.cnki.0253-9705.2016.20.006

\*基金项目：国土资源部行业专项（201411089-3）；中国地质科学院基本科研业务费项目（YK1606）

ENVIRONMENTAL PROTECTION Vol. 44 No.20 2016

增值型修复的含义

随着土壤污染环境事件的升级，公众关注度 的不断提高，我国对土壤污染治理的重视程度不 断加强，并于2016年发布了“土十条”，开启了中 国土壤修复元年。但是，土壤修复所面临的难题仍 不容忽视，修复所需巨额资金如何解决、土壤污 染治理到底应该采取怎样的发展模式值得探讨。

目前，土壤修复的投融资模式主要有PPP、 BT、BOT和EMC等，然而，它们均是从资本运作的 角度出发的。苏州农药厂的土地修复，因其特殊 的地理位置和商业价值，使得开发商可以通过土 壤修复获得可观利润，这是因土地的天然禀赋而 获得“增值”的效果。那么对于地处偏僻、商业 利用价值低的污染土壤，或者对于重金属污染泛 滥的矿山环境，是否也有可能实现“增值型修 复”？这正是本文想要探讨的，并希望通过新技 术进展和“增值型修复”获得新的投融资模式， 解决部分土壤修复的资金来源问题。

所谓“增值型修复”，就是利用污染场地、 污染土壤或污染介质的特殊性质，通过抑制负面 效应和强化正面效应，营造增值条件，生产出高 附加值的产品。由于此类修复的投入可以快速从 后继的产品中收回成本，因此被称为“增值型修 复"（value-added remediation, VAR）。

深入理解重金属

要进行增值型修复，还涉及对“有害重金 属”的内涵的限定。在《中华人民共和国国家标

准土壤环境质量标准（GB 15618—1995）》中，

认定镉、汞、砷、铜、铅、铬、锌和镍8个元素为 重金属污染物。在未正式发布的、拟替代的“农 用地土壤环境质量标准”中，则进一步将总锰、 总钴、总硒、总钒、总锑、总铊和总钼列为评价 指标。

表1是国内外主要土壤质量标准中涉及的重金 属种类一览表，由表可见，国内外关注的重金属 包括砷（As）、钡（Ba）、铍（Be）、镉（Cd）、 钻（Co）、铬（Cr）、铜（Cu）、汞（Hg）、铅 （Pb）、钼（Mo）、锰（Mn）、镍（Ni）、锑 （Sb）、硒（Se）、锡（Sn）、铊（Tl）、铀 （U）、钒（V）和锌（Zn）共19个元素。

这19个重金属元素是否都一无是处？实际 上，生物地球化学将微量元素分成有益元素、有 益害元素和有害元素。在自然界中，不存在绝对 的有益元素，任何元素在人体中过量都会中毒， 例如铁是人体必需元素，但人体内铁的含量不能 过于富集。绝大部分元素是有益害元素，只有绝 少数元素是有害无益元素。

人体常因缺乏某个或某些微量元素而健康 受损，如人体缺硒与克山病高度相关，缺锌与发 育不良和少儿智力低下有关，缺铬容易得糖尿病 等。因此，富硒和富锌农产品的附加值很高，而 富铬中草药和酵母可用于辅助治疗糖尿病。值得 注意的是，硒、锌和铬在大多数国家的土壤环境

质量标准中被列为重金属污染物。

|  | CHN1 | CHN2 | AUS | BLG | CZE | FIN | ITL | LTU | NLD | POL | SVK | UKB | DMK | GER | SWD | USA | JPN | AST | CAN |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| As | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V |
| Ba |  |  |  |  | V |  |  | V | V | V | V |  |  |  |  |  |  | V | V |
| Be |  |  |  |  | V |  |  | V | V |  | V |  |  |  |  |  |  | V |  |
| Cd | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V |
| Co |  | V |  |  | V | V | V | V | V | V | V |  |  |  | V |  |  | V | V |
| Cr | V | V | V |  | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V |
| Cu | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V |  | V |  |  | V | V | V | V |
| Hg | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V |
| Pb | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V |
| Mo |  | V |  |  | V |  |  | V | V | V | V |  |  |  |  | V |  | V |  |
| Mn |  | V |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | V |  | V |  |
| Ni | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V |  | V | V | V | V |  | V | V |
| Sb |  | V | V |  | V | V | V | V | V |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Se |  | V |  |  |  |  | V | V | V |  | V | V |  |  |  | V | V |  | V |
| Sn |  |  |  |  | V |  | V | V | V | V | V |  |  |  |  |  |  | V |  |
| Tl |  | V | V |  |  |  | V |  | V |  |  |  |  |  |  |  | V |  |  |
| U |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | V |
| V |  | V |  |  | V | V | V | V | V |  | V |  |  |  | V |  |  | V | V |
| Zn | V | V |  | V | V | V | V | V | V | V | V |  | V |  | V | V |  | V | V |

表1 国内外主要土壤质量标准中涉及的重金属种类一览表

注：CHN1-GB 15618 1995;CHN2-GB15618 201x;AUS-奥地利；BLG-比利时；CZE-捷克；FIN-芬兰；ITL-意大U;LTU-立陶宛；NLD-荷兰；POL-波兰；

SVK-斯洛伐克；UKB-英国；DMK-丹麦；GER-德国；SWD-瑞典；USA-美国；JPN-日本；AST ；澳大利亚；CAN-加拿大；"-标准中认为是有害重金属；空白-没有 限定。

这样的例子还有很多。砷的氧化物是有名的 毒物，但中国医学工作者首先发现少量氧化砷可 用于治疗癌症。维生素b12只有在金属元素钻参 与的情况下才能发挥造血功能。 钴缺乏易导致贫 血、阿尔茨海默病、脊髓炎、青光眼、性功能障 碍和心血管疾病等。

一般认为，真正有害无益的重金属主要是 钡、铍、镉、汞、铅、锑、铊和铀等少量几个元 素。 其他金属元素被列为“污染物”的原因主要 有三：一是人体必需的剂量不清楚；二是安全剂 量范围窄，不易控制；三是相关科研成果不足。 目前的土壤环境质量标准选取的重金属污染物是 经过严格甄别的，有“宁可错杀一千，不可放过 一个”的意味。 但至少在硒、锌和锗等元素上已 经取得了共识：它们的安全剂量范围广，是有益 元素。

需要特别说明的是，有机硒有较宽的安全剂 量范围，而无机硒的安全剂量范围非常窄。 目前 市场上一些不良商贩在蔬菜叶面或米麦上喷洒无 机硒来假冒富硒农产品，是极其有害的。

铅、锌复合污染耕地的增值型修复 用化学试剂来稳定土壤重金属是基于“植物 吸收重金属必须通过水”的认识，因此，若重金 属的化合物或盐不溶于水，则它们难以向食物链 迁移，因而具有较小的风险。 有较多的重金属的 磷酸盐、硅酸盐、碳酸盐和硫化物难溶于纯水， 因此，有学者甚至公司直接用磷酸盐和硫化物或 它们的混合物作为稳定化剂。

此技术发源于欧美，但不问地质背景、地表 条件和重金属种类而千篇一律地使用磷酸盐、硫 化钠和硫代硫酸钠来修复重金属污染耕地被证明 是失败的。 失败的原因是致命的。

用户期望重金属与磷酸盐、硫化钠或硫代硫 酸钠反应生成硫化物或亚硫酸盐而发生沉淀，减 少重金属的可交换态，从而阻止重金属被农作物 吸收，以减小重金属污染的风险。但事实上，虽 然有许多重金属的磷酸盐、硫化物和亚硫酸盐是 难溶于水的，例如：钡、锰、锌、铬、锡、铅、 铜和汞的磷酸盐，锰、锌、锡、铅、铜、汞的硫 化物以及锰、锌、铅、铜、汞的亚硫酸盐。但 是，这些硫化物和亚硫酸盐在地表条件下，都极 容易在数个月、数日乃至数小时内被氧化生成硫 酸盐，而上述元素的硫酸盐只有硫酸钡和硫酸铅 是难溶于水的，其他的均为易溶。不仅如此，氧 化过程产生的硫酸，还会造成原本在土壤中稳定 的重金属重新溶解，造成更严重的重金属污染。 这就是为什么有的土壤修复工程出现“越修复越 坏”的情况的原因。同时，植物根际对磷酸盐 “情有独钟” ，会快速分解磷酸盐以获取其生长 所需的磷。硫化物、亚硫酸盐和磷酸盐的分解是 此类钝化剂的噩耗。

对于只有铅和锌两种元素污染的土壤，上 述硫化物法则是可行的。无论是硫化铅、亚磷酸 铅还是硫酸铅，都难溶于水，不怕被氧化后成为 活动态；而难溶的硫化锌和亚硫酸锌被氧化后形 成的硫酸锌则是溶解于水的。因此，在铅、锌复 合污染土壤中施加硫化钠或硫代硫酸钠可以起到 “抑害扬益”的效果，为增值型修复创造了良好 条件。

选择性钝化剂与增值型修复

已有不少文献论及粘土矿物的选择性吸附问 题。何宏平、郭九皋和谢先德等研究了粘土矿物 的选择性吸附和非选择性吸附；认为选择性吸附 属于化学吸附，受可变电荷表面的电量控制。层 状硅酸盐矿物边缘由断键产生的铝醇（A1OH）、 铁醇（FeOH）和硅烷醇（SiOH）以及1:1型层状硅 酸盐矿物的羟基铝层基面具有可变电荷，可以对 某些特定的重金属离子进行专性吸附。根据蒙脱 石、伊利石和高岭石对铜、铅、锌、镉、铬等重 金属离子的吸附选择性实验结果表明：3种粘土矿 物对5种重金属离子的吸附选择性明显。蒙脱石对 铬、铜有很好的选择性；高岭石和伊利石对铬、 铅有较好的亲和力；而这3种粘土矿物对锌的吸附 能力均很弱，参见表2。在多种污染物复合污染的 情形下，某些土壤修复剂或微生物可以对其中的 一部分污染物进行钝化而对另一部分则无效或钝 化效应足够弱，即所谓的“抑害扬益”（use the advantages and bypass the disadvantages, UABD）。这样的土壤修复剂我们称之为“选择 性稳定化剂”或“选择性钝化剂” （selective stabilizer）。

|  | Cd2+ | Co2+ | Cr2+ | Cu2+ | Hg2+ | Ni2+ | Pb2+ | Zn2+ |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 蒙脱石 |  |  | 强 | 强 |  |  |  |  |
| 伊利石 |  |  | 强 |  |  |  | 强 |  |
| 高岭石 |  |  | 强 |  |  |  | 强 |  |
| 氧化锰 |  | 强 |  | 强 |  | 强 | 强 | 强 |
| 氧化铁 | 强 |  |  |  | 强 |  | 强 |  |

表2 矿物成分对不同重金属元素的选择性吸附

Sverjensky等和Saha i等讨论了氧化物和硅酸 盐对水中污染物的选择性吸附常数问题以预测含 污染物的电解质吸附。谭科艳、刘晓端、黄园英 等讨论了固定配比的钠化膨润土与土壤在不同pH 条件下对重金属离子的吸附效果。谭科艳、刘晓 端、刘久臣等讨论了凹凸棒石用于修复铜、锌、 镉重金属污染土壤效果。上述研究也验证了选择 性钝化剂的存在与效果。

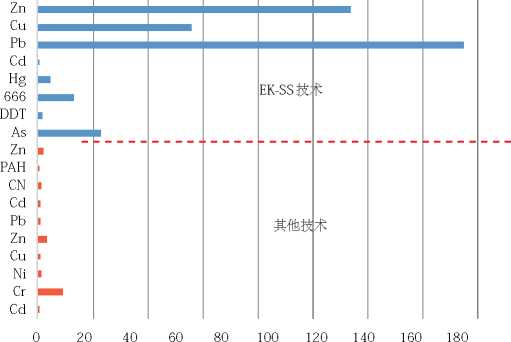
陈明等和王蕊等则利用粘土矿物的选择性吸 附特性分别研究了专门用于重金属Cr-Pb-Cd复合 污染、重金属汞污染和重金属Pb-Cd复合污染土壤 修复的钝化剂。这些选择性钝化剂为增值型修复 的实施提供了直接手段。

矿山环境的增值型修复

EK-SS技术 金属矿山污染问题十分复杂，污染物主要是 重金属和酸性矿井水。重金属的来源包括地质体 本身、采矿过程、选矿过程和运输过程等，影响 范围波及矿区、选矿厂、冶炼厂、运输道路及它 们的周边地区。如何最大程度地控制重金属污染 威胁，难度十分巨大。

EK-SS技术的出现为解决上述问题带来了曙 光。EK-SS技术是由陈明科研团队新近研发的一

ENVIRONMENTAL PROTECTION Vol. 44 No.20 2016

图1 EK-SS技术与其他电动修复技术修复效率的比较

效率指数

种电动修复技术。 与经典原位电动修复技术（例 如LasagnaTM等）不同，EK-SS技术属于“原地异 位”技术， 其原理类似于矿床学中的低温热液矿 床成矿理论， 以电动力替代地质动力， 以重金属 活化剂代替成矿热液， 以碱性带控制器模拟半开 放成矿系统， 以重金属捕获器模拟成矿的地球化 学障， 以重金属回收模拟矿床开采过程。

LasagnaTM法等原位电动修复技术完成一个周 期的修复需要1〜3个月，而EK-SS技术为2〜4天， 这得益于其“原地异位”模式。EK-SS电动修复技 术用于设计专门的、可移动大型装备。 使用时， 可将该大型装备运抵污染场地现场， 把待修复土 壤挖掘出来并装入装置， 修复后经简单处理即可 把土壤填入原位。 这样做的好处是：充分利用了 电动力和重金属活化剂， 几乎没有额外的电力和 活化剂损耗；不必为埋设、回收电极及其他设施 而反复挖掘；大大提高了修复效率——单位时间 内重金属浓度的平均下降速度。 通过7个中试试验 和试生产，验证了EK-SS技术具有比其他电动修复 技术更高的修复效率（图1）。

EK-SS技术提取残渣态金属 下面举例说明EK-SS技术的应用效果。受试 土壤来源于湖南省长株潭地区的某化工厂遗址， 为镉-铅复合污染土壤；将该污染土壤180千克并 混入20千克的贵州铜仁万山十八坑采坑口的汞污 染土壤， 共计200千克， 大约0.1米3。 经检测， 采自十八坑汞矿采坑口的污染土壤中汞浓度为 96.4ppm。

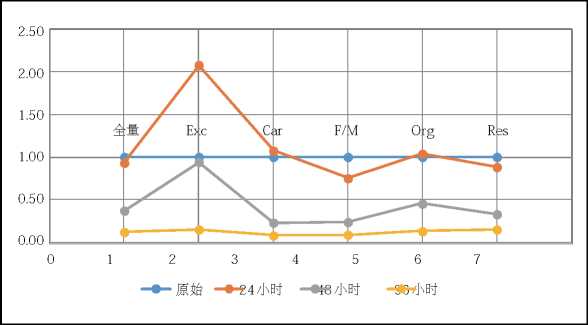
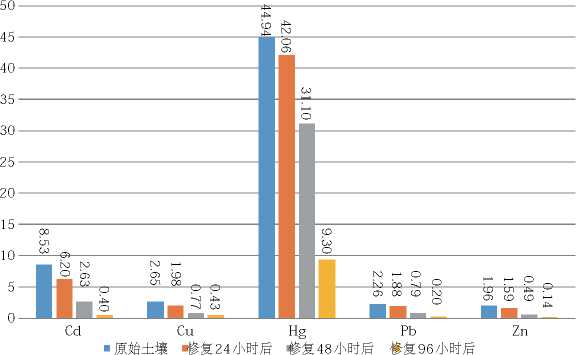
原始及修复24、48和96小时后土壤中重金属 元素的浓度见表3和图2。 由表可见， 受试土壤中 镉、铜、汞、铅和锌的初始浓度分别为二级土壤 质量标准的8.53倍、2.65倍、44.94倍、2.26倍和 1.96倍。 经过48小时后， 土壤中的铜、铅和锌的 浓度， 已经低于国家二级土壤质量标准。 经过96 小时的修复， 除了汞元素外， 其他元素的浓度均 小于国家二级土壤标准， 达到了修复的目的。

需要特别说明的是：尽管经过96小时修复 后， 汞元素还有较高的浓度和超标倍数， 但是去 除率已经接近85%。 贵州万山特区的总面积约230 平方公里， 其中近200平方公里受汞污染。 其中 20〜50ppm的土壤汞浓度具有典型代表性。目前 可用于汞污染土壤修复的技术主要有低温（约 230°C）热解法、稳定化法和EK-SS技术。稳定化 法不会降低土壤中的汞浓度；经低温热解法处理 的土壤中还会剩余10〜15ppm的汞；而EK-SS法处 理后剩余4〜5ppm。

更重要的是，EK-SS还能提取残渣态金属。 图3是受试土壤中各形态铅去除率与修复时间的关 系，其中X坐标为元素形态：1—6分别表示全量、 可交换态、 碳酸盐结合态、 铁锰氧化物结合态、 有机结合态和残渣态；Y坐标为修复一定时间后重 金属的去除率r=（初始浓度一剩余浓度）/初始 浓度X100%。由图中可见，经过24小时铅元素的 铁锰氧化物结合态浓度发生剧烈分解， 同时可交 换态大幅增加。 经过48小时处理， 除了可交换态 浓度较高外， 包括残渣态在内的其他形态的浓度 下降幅度大， 表明铅的其他形态均转化为可交换 态， 逐步被驱赶出土壤系统， 并被重金属捕获器 所锁定。 其他元素类似。

鉴于EK-SS可提取残渣态重金属，将它应用于 湖南浏阳某铜选矿厂原始矿石和尾矿砂的处理。 结果发现， 铜品位为1.03%的原矿石和剩余铜品位 为0.46%的尾矿砂经96小时处理后， 其残余铜浓度 为0. 040〜0. 081% （400〜810ppm）。也就是说， EK-SS技术可以发展成一种新的选矿技术。

从目前的技术条件看，EK-SS若能演进为选 矿技术， 至少有以下3方面的巨大优势： 一是选矿

仅有20%〜30%,几乎没有流淌的水，可为选矿厂 节约大量的污水处理费；三是环境效益和社会效 益十分明显。由于EK-SS可将矿石中以金属阳离子 形式存在的镉、钴、铜、汞、铅、钼、镍、锑、 锡、铊和锌等元素一次性全部提取，因此，对下 游的污染将极大地减小，有利于防止地方病的发 生和癌症村的形成。

| 元素 | Cd | Cu | Hg | Pb | Zn |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 原始土壤/ppm | 2.56 | 265.47 | 22.47 | 678.25 | 489.60 |
| 修复24小时后/ppm | 1.86 | 198.33 | 21.03 | 563.38 | 397.81 |
| 修复48小时后/ppm | 0.79 | 76.85 | 15.55 | 237.30 | 122.25 |
| 修复96小时后/ppm | 0.12 | 42.65 | 4.65 | 58.54 | 35.02 |
| 二级土壤标准/ppm | 0.30 | 100.00 | 0.50 | 300.00 | 250.00 |
| 初始超标倍数/倍 | 8.53 | 2.65 | 44.94 | 2.26 | 1.96 |
| 96小时后超标倍数/倍 | 0.40 | 0.43 | 8.30 | 0.20 | 0.14 |
| 24小时去除率 | 27.34 | 25.29 | 20.55 | 16.94 | 18.75 |
| 48小时去除率 | 69.14 | 71.05 | 41.25 | 65.01 | 75.03 |
| 96小时去除率 | 95.31 | 83.93 | 84.32 | 91.37 | 92.85 |

表3 受试土壤中各重金属元素的变化情况

图2 修复过程中各元素超标倍数随时间的变化

图3 各形态铅的去除倍数与修复时间的关系

回收率比常用的浮选法要高得多；二是EK-SS技术

处理过程虽然需要水，但处理后尾渣中的含水率

EK-SS的成本与效益

200千克级中试实验的土壤量大约为0.1米3， 重量约200千克，处理4天的总耗电量32度，纯成 本折合为320元/米3。国际上通常用纯修复成本 的2倍来估算总成本，因此，对于上述重金属元 素复合污染土壤的电动修复，总修复成本约为 640元/米3，对于矿石处理折合约260元/吨，与目 前浮选法的成本接近。按照污染耕地的工程修复 深度为20〜30厘米，相当于8.7〜13万元/亩。这 对于一般的耕地修复可能成本比较高；但对于矿 石处理，收益远远超过成本。下面以湖南浏阳某 小型铜矿为例说明。

该小型矿山现有职工约120人，所处理矿石主 要来自小型矿山，日处理量为600吨/天（年处理 约18万吨）的选矿厂职工人数约70人，污水处理 厂职工人数16人，平均工资5000元/ （人•月）。 扣除收购原矿石成本后，靠销售铜锌精粉获毛利 约4800万元/年，其中需支出人工工资约720万元/ 年，污水和活性淤泥的处理费约550万元/年，选 矿成本2700万元/年，年净收益约850万元。此规 模的选矿厂EK-SS技术改造的费用约4000万元，时 间18个月。如果采用EK-SS技术，将获得如下新增 收益：

第一，回收的金属元素种类增加，并极大 地提高金属回收率。选矿厂原矿石处理过程中， 原本只能回收铜和锌，而用EK-SS技术还可回收 品位较低的铅、金、银和镉等金属元素；用浮选 法铜回收率约为50%，而用EK-SS技术则有望达到 92%〜96%，金属产量将增加80%〜90%。预计精粉 销售额增值4000万元/年。

第二，节省污水处理费。虽然EK-SS处理 过程中需要水， 但处理后尾砂的含水率仅约 20%〜30%，没有浮选中必然产生的污水和活性淤 泥。此项可节省污水污泥处理费用约550万元/年，

ENVIRONMENTAL PROTECTION Vol. 44 No.20 2016

节省人员工资96万元/年， 合计增值646万元/年。

增值型修复的意义还体现在它可以最低限度地降低国 家、地方和企业对耕地土壤和场地的修复和/或恢复成 本，在特殊情况下可实现超值增值。

第三，节省选矿厂人力成本。使用EK-SS技术 可将选矿厂人数从70人减至15人， 可节省劳动力 成本330万元/年。

第四， 选矿成本略有增加。 选矿过程中要求 大块的矿石通过颚破、 粉碎、 破碎、 矿石磨得越 细， 难度越大， 成本越高。 浮选法要求将矿石球 磨至200 目,而EK-SS技术只要求磨至80〜100目 即可， 此项可降低矿石加工成本约400万元/年。 但EK-SS技术比浮选法贵，选矿成本高出约50元/ 吨， 因此， 选矿成本提高900万元。 两项相抵， 多 支出约500万元/年。

以上4项共计增值约4500万元/年。 即对于上 述情况的小型矿山，技术改造的费用在EK-SS技 术投产的当年基本收回； 第二年开始则每年增值 4500万元左右。 年增值量是该铜矿现有的年净收益 的5倍左右。经过EK-SS技术改造，预计该小型矿山 可获得中型矿山才能产出的经济效益。

结论

综上所述， 现有中试试验、 试生产试验和典 型示范证明， 通过增值型修复， 可以将污染物转化 为资源， 将“赔本买卖” 转化为可盈利的项目， 将 政府和企业“头疼的” 治污难题转化为新的投资方 向， 从而依赖超额利润打破技术、 企业和政府部门 之间的壁垒。

增值型修复的意义还体现在它可以最低限度 地降低国家、 地方和企业对耕地土壤和场地的修复 和/或恢复成本， 在特殊情况下可实现超值增值。 对于矿山环境， 增值型修复可以从矿石加工、 选 矿、 废水处理和尾砂处理等环节产生超额利润， 并且由于选矿过程中将各类金属物质做了充分提 取， 因此， 下游重金属污染将大大降低， 实现经 济效益、 环境效益和社会效益的全方面突破。 因 此， 增值型修复具有现实可行性， 并将对土壤修 复的可持续发展产生不可估量的促进作用。

主要参考文献

1. 武玫玲.土壤矿质胶体可变电荷表面对金属离子的专性 吸附.土壤通报[J], 1985(2): 89-94.
2. 武玫玲. 土壤矿质胶体可变电荷表面对金属离子的专性 吸附[J]. 土壤通报，1985(16): 138-141.
3. 何宏平 , 郭九皋 , 谢先德 , 等 . 蒙脱石 、 高岭石 、 伊利 石对重金属离子吸附容量的实验研究[J].岩石矿物 学杂志, 1999, 19(2)：231-234
4. Sverjensky D A and Sahai N. Theoretical prediction of single-site surface-protonation equilibrium constants for oxides and silicates in water[J]. Geochimica Cosmochimica Acta, 1996(60): 3773-3797.
5. Sahai N and Sverjensky D A. Solvation and electrostatic model for specific electrolyte adsorption[J]. Geochimica Cosmochimica Acta, 1997(61): 2827-2848.
6. 谭科艳, 刘晓端, 刘久臣, 等. 凹凸棒石用于修复铜 锌镉重金属污染土壤的研究[J].岩矿测试，2011, 30(4): 451-456.
7. 谭科艳 , 刘晓端 , 黄园英 , 等 . 固定配比的钠化膨润土 与土壤在不同pH条件下对重金属离子的吸附效果研究 [J]. 岩矿测试, 2010, 29(4): 411-413.
8. 陈明，王蕊，张佳文，等.一种修复重金属Cr-Pb-Cd污 染土壤的新材料及其制备方法和使用方法[P].北京： CN104927870A， 2015-09-23.
9. 陈明， 王蕊， 张佳文， 等. 用于被重金属汞污染土 壤的修复剂及其制备方法和使用方法[P].北京： CN105038805A， 2015-11-11.
10. 王蕊， 陈明， 张佳文， 等. 修复被重金属铅-镉复合污 染土壤的修复剂S-铅镉及其制备方法和使用方法[P]. 北京: CN104893732A， 2015-09-09.
11. 陈明. 热液成矿作用理论应用于重金属污染土壤修复 的实验验证.中国地质学会2015年学术年会[C].西 安， 2015-10-10.
12. 陈明， 刘晓端， 王蕊， 等. 发扬地学学科优势，形 成具有国土资源部门特色的土壤修复理论与技术体系 [J]. 地质通报， 2016， 35(8): 1217-1222.

陈明系中国地质科学院矿产资源研究所研究员；孙春美， 北京化工大学化学工程学院；刘冠男、李小赛、王蕊，中国 地质科学院矿产资源研究所)