土壤通报

Chinese Journal of Soil Science

聚氯乙烯行业汞污染场地土壤修复技术研究进展

晏闻博I,张雪峰h 2,熊 杰3,韩春媚3,王 军h 2

(1. 北京建工环境工程咨询有限责任公司，北京 100015；2. 北京建工环境修复股份有限公司，北京 100015；

3. 生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心，北京 100012)

**摘 要：**聚氯乙烯行业将成为我国汞公约履约的最重要领域，相关产业生产、升级、腾退转型导致的汞污染地块潜在数 量与风险巨大，需要提前开展相关修复技术储备和工程应用实践研究；通过调研总结我国聚氯乙烯行业产业特点、生产 工艺导致的汞污染途径与风险特征，对国内外汞污染地块土壤修复常用的修复技术有固化稳定化、热脱附和土壤淋洗等； 从污染源控制、污染扩散阻隔、污染土壤及地下水修复等多方面和技术特性、工程实施两个维度，选取修复技术指标， 提出多层次构建修复技术筛选矩阵标准；以期为聚氯乙烯行业汞污染地块环境评估与修复提供技术参考。

**关 键 词：**聚氯乙烯；汞污染；污染场地；土壤修复技术

**中图分类号：** S147.2 **文献标识码：** A **文章编号：** 0564-3945(2021)02-0485-08

DOI: [10.19336/j.cnki.trtb.2020081801](https://doi.org/10.19336/j.cnki.trtb.2020081801)

晏闻博,张雪峰,熊 杰，韩春媚,王 军.聚氯乙烯行业汞污染场地土壤修复技术研究进展［J］. 土壤通报,2021, 52(2):

485 - 492

YAN Wen-bo, ZHANG Xue-feng, XIONG Jie, HAN Chun-mei, WANG Jun. Research Progress on Remediation Technology of

Mercury Contaminated Soil in the PVC Industry［J］. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(2): 485 - 492

**收稿日期：** 2020-08-18；**修订日期：** 2021-01-27

**基金项目：**科技部国家重点研发计划“场地土壤污染成因与治理技术”重点专项(2019YFC1804900)资助

**作者简介：**晏闻博( 1990-),男，陕西省西安人，硕士，项目经理，主要从事土壤地下水生态环境研究。E-mail: [yanwenbo@bceer.com](mailto:yanwenbo@bceer.com)

汞具有易迁移性、持久性、高生物富集性、高 生物毒性等特性，可对人体健康和环境产生重大不 利影响，被全球视为一类重要的有毒有害环境污染 物［1］。中国作为首批签约国签署的《关于汞的水俣公 约》于2017年8月16日正式生效，公约的目标是保 护人类和环境免受人为排放的汞及其化合物的影响［2］。

电石法聚氯乙烯生产是我国用汞量最大的用汞 工艺，电石法聚氯乙烯行业汞使用量占全国汞使用 总量的60%左右［3］。氯化汞触媒作为聚氯乙烯单体 生产的催化剂，在生产过程中可产生废汞触媒、含 汞活性炭、含汞污泥和含汞盐酸等含汞废物，具有 非常大的环境污染风险［4］。废汞触媒、含汞废活性炭 和综合处置后产生的含汞废渣应由具有资质的危废 处理企业回收处置［5］，但仅20%左右的汞通过废汞 触媒进行回收，含汞废水、废盐酸和废碱液等仅有 30%得到处理，大部分含汞污染物未得到妥善处理［6］， 在行业产业结构发展、转型和退出过程中，大量行 业生产场地存在汞污染，需要进行污染土壤与地下 水治理。

本文通过调研我国聚氯乙烯行业产业特点，总 结生产工艺与流通导致的汞污染风险特征，开展对 国内外汞污染土壤修复技术的文献调研，结合修复 技术特点和工程应用情况，构建技术筛选方法路线、 确定修复技术筛选矩阵指标，综合评估汞污染场地 土壤修复技术的应用。

1. 聚氯乙烯行业汞污染场地特征

**1.1** 行业产业特点

**1.1.1**产能与产量 我国聚氯乙烯生产有乙炔法和 乙烯法两种工艺［7］。乙炔法以电石、煤炭为主要原料， 采用氯化汞触媒为催化剂生产氯乙烯单体［8］。国外聚 氯乙烯主要产地均已淘汰电石法用汞工艺，采用以 石油或天然气为主要原料的乙烯法工艺［9］。2009到 2016年，国内聚氯乙烯产能年均复合增长率为 5.23%［10］，2013年底产能达到2476万吨，其中电石 法产能为2033万吨，占国内总产能的82.1%［11］， 2017年后氯化汞和汞触媒每年总产能约10.23万吨， 其中低汞触媒产能约9.76万吨，占总产能的95.4%［12］

**1.1.2**潜在污染产业链在电石法聚氯乙烯生产过 程中使用氯化汞的活性炭触媒，在汞触媒失效废弃 后，废汞触媒、废活性炭等的处理存在潜在污染， 行业汞污染不仅涉及聚氯乙烯生产，还涉及氯化汞 触媒生产、废汞触媒回收处理等阶段［13］。

**1.1.3**潜在污染地块从[图1所](#bookmark9)示，聚氯乙烯产能

主要集中在西北、华北、华东和华中，分别占全国 产能的37%、27%、11% 和 11%，近几年聚氯乙烯 装置的退出集中在华东和华北地区，约占全国淘汰 总量的57%［14］。由于东部地区行业生产面临原料、 能源及环保等方面不利影响，不具有竞争优势的小 型聚氯乙烯生产装置成为淘汰和退出市场的主体， 造成大量退出企业地块存在潜在土壤汞污染风险。



图 1 电石法聚氯乙烯生产企业地理分布（2017年）

Fig.1 Geographical distribution of PVC production enterprises by using calcium carbide method （2017）

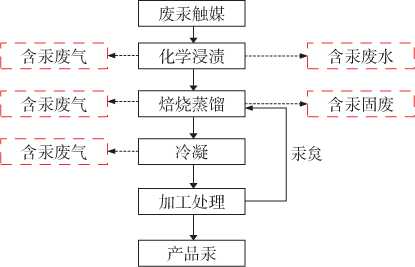
**1.2** 聚氯乙烯生产工艺污染特征

**1.2.1**汞触媒生产工艺 氯化汞触媒是目前电石法

聚氯乙烯生产所必需的催化剂，氯化汞触媒以氯化 汞为活性物质，使氯化汞通过物理吸附方式分布于 载体活性炭微孔的表面［15］。按照氯化汞含量不同，分 为低汞触媒（氯化汞质量分数4.0% ~ 6.5%）、中汞 触媒（6.5% ~ 10.5%）和高汞触媒（10.5%以上）。

目前多数企业生产汞触媒采用浸渍法，也有部 分企业采用气相吸附法，浸渍法是利用物理吸附的 方式将氯化汞和助剂吸附在活性炭内，吸附完成后 进行液固分离，滤液进入配料桶，固体物料即为湿 式氯化汞触媒催化剂［16］。

**1.2.2**汞触媒使用工艺 我国电石法聚氯乙烯生产 工艺通常分为电石生产、氯乙烯单体合成和聚合三 个部分［17］。其中电石生产部分不涉及汞的使用和排放， 汞的使用主要集中在氯乙烯单体合成工序，部分企 业存在多套氯乙烯单体合成装置，该工艺产生的含 汞三废最多，主要生产污染特征如表1所示。

氯化氢气体和湿电石气在氯化汞触媒作用下反 应生成氯乙烯，废汞触媒和汞触媒废水在此工序产 生，粗氯乙烯在高温下带出的氯化汞升华物在填装 活性炭的除汞器中除去，此过程会产生大量的含汞 废活性炭；除汞后粗氯乙烯依次进入泡沫脱酸塔和 水洗塔，将过量的氯化氢气体用水吸收成为废盐酸， 经酸洗、水洗后的氯乙烯气体再经碱洗塔除去残余 的微量氯化氢，此过程会产生含汞废碱［18］。

| 含汞废物  Type | 产生节点 Production node | 污染途径 Pollution route | |
| --- | --- | --- | --- |
| 含汞废水 | 抽汞触媒废水和沉淀池滤液等。 | 直接排放土壤和地下水； | 生产过程中的跑冒滴漏。 |
| 含汞固废 | 转化器产生的废汞触媒、除汞器产生的废活性炭； | 不规范填埋和堆存等处置过程中直接污染土壤和地下水。 | |
|  | 处理含汞废水产生的含汞锯末和泥渣等。 |  |  |
| 废酸 | 泡沫塔脱酸塔产生的废酸。 | 生产过程中的泄漏污染周边土壤水体；储存、回收、运输和处理的 | |
| 废碱 | 氯乙烯单体合成工序。 | 不规范泄漏污染。 |  |

表 1 聚氯乙烯生产污染特征

Table 1 Pollution characteristics of PVC production

**1.2.3**汞触媒回收工艺 目前行业普遍采用的废汞 触媒处理方法是蒸馏法回收汞，主要以失活的废汞 触媒为原料，最终产品是液汞或氯化汞触媒［19］。由 [图2所](#bookmark4)示，蒸馏法回收处理工艺与汞冶炼工艺相似， 仅增加废汞触媒的预处理环节即化学浸渍，化学浸 渍是利用化学方法使氯化汞脱离汞触媒，再通过焙 烧、冷凝等工序获得金属汞［20］。

1. 聚氯乙烯生产场地汞污染土壤修复 技术

目前，常见的有5种技术已被实际工程用于处 理汞污染的土壤等，主要包括固定化/稳定化、土壤

图 2 废汞触媒回收工艺（蒸馏法）流程和产污节点

Fig.2 Mercury catalyst recovery distillation process and pollu­tion production

淋洗、热脱附、植物修复和封闭阻隔等，同时，场 地修复过程中土壤修复技术经常需要结合地下水修 复技术使用，以达到对场地环境的安全使用要求。 **2.1** 固化稳定化

固化稳定化过程是将土壤或废弃物与粘结剂混 合，形成浆状、糊状或其它半流质状态，经一段时 间形成固体［21］。常用的粘结剂包括硅酸盐水泥、硫聚 合物水泥、硫化物、磷酸盐、水泥窑粉尘、聚酯树 脂、聚硅氧烷化合物、多硫化钙、键合磷酸盐陶瓷 等［22］。汞齐法常用于处理单质汞，将汞溶解在金属铜、 镍、锌或锡中，固化形成非液、半固态的汞合金［23］。 固化稳定化需要添加pH调节剂、磷酸盐或硫酸盐试 剂以降低固化时间、增强抗压强度、或降低污染物 浸出性［24］。

国内有五十多年生产历史的某氯碱化工场地， 土壤中汞的95%置信上限浓度为20.18 mg kg-1，修 复土方量8300 m3,应用固化稳定化处理后土壤的浸 出液浓度小于0.05 mg L-1；国外Brookhaven国家实 验室［25］在中试系统中分别使用二硫化氯基甲酸钠和 液态硫化物进行处理汞含量约4000 mg kg-1，初始的 汞浸出浓度为0.282 mg L-1的污染土壤，两种添加剂 都使汞的浸出浓度小于0.025 mg L-1。

**2.2** 热脱附

大部分的汞的化合物都是不稳定的，将蒸发分 解为单质汞［26］，在加热情况下几乎所有的汞都以单质 汞形式存在于烟气中［27］，过程中汞一部分直接存留于 飞灰中，另一部分随着含汞物质的分解，以单质的 形式释放到热脱附气中［28］。气态单质汞将会继续变化， 一部分单质汞被残留的飞灰通过表面吸附、化学吸 附和化学反应几种途径吸收，形成以颗粒存在的汞， 一部分在温度降低时，被气体中的其他物质氧化生 成气相二价汞 ［29］。在热脱附过程中，对污染土壤采 用基本隔绝空气的间接加热方式，避免了在热脱附 过程中的单质汞的氧化问题［30］；热脱附气在产生后快 速进入二级高温除尘设备，之后通过换热器冷却， 保证脱附出来的汞随水冷凝下来［31］。

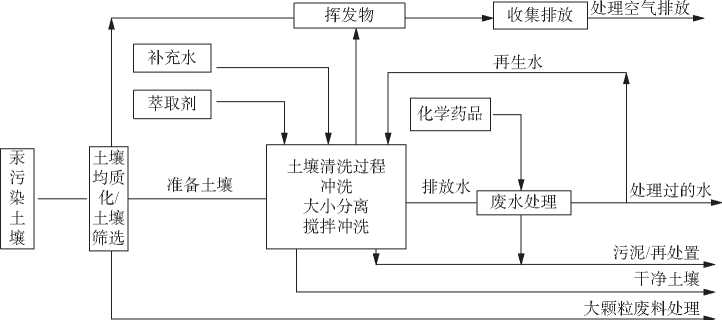
无机汞通常以元素汞存在于土壤中或无机汞化合 物中，当温度达到600〜800 r，这些汞化合物会被 转化成可回收的气态元素汞阳。Massacci等［33］发现土 样中汞浓度在700七、4小时焙烧后，从217 mg kg-1 下降到10 ng g-1。Taube等［34］在瑞典使用热脱附技术 修复氯碱工厂汞污染土壤，发现在460 r、20 min 处理条件下，汞去除效率高达99%。此外，国内在 贵州省某汞污染土壤热脱附中试中，汞浓度范围大约 为160〜190 mg kg-1，处理后汞浓度可达到 15 mg kg-1 以下［35］。

**2.3** 淋洗

根据淋洗过程的实施方式可分为异位淋洗和原 位淋洗［36］。酸萃取是一种常用异位淋洗处理技术，如 [图3通](#bookmark10)过将污染物溶解在萃取剂（如盐酸或硫酸） 中，萃取固体基质中的污染物，在酸萃取液和冲洗 水中加入沉淀剂（如氢氧化钠、石灰等）和絮凝剂 以去除重金属［37］，沉淀下的固体可能需要进一步处理 或进行填埋，通过沉淀还可以去除残留液中的单质汞。

图 3 汞污染土壤淋洗技术工艺流程

Fig.3 Technological process of leaching technology for mercury contaminated soil



美国普鲁士王市实际工程场地使用土壤淋洗技 术的处理系统包括水力旋流器、调节器和泡沫气浮 单元，土壤淋洗剂选用高聚物和表面活性剂，处理 后土壤中的无机汞浓度由100 mg kg-1降至1 mg kg-1［38］o 酸萃取曾用于美国相关氯碱厂处理含有氯化汞、氯 化亚汞、硫化汞、单质汞和多种吸附在活性炭上的 汞污染物［39］，该技术可去除约99%的污染物，处理

后的浓度小于0.025 mg L-1。低温萃取是在2种pH = 2和pH = 6条件下通过水相电解或在铁上沉积回收 单质汞，氯碱厂产生的废物如次氯酸钠、硫酸和浓 盐水还可做浸提剂添加剂［40］。

**2.4** 植物修复

汞污染土壤的植物修复技术主要包括：植物固 化、植物提取和植物挥发等，植物挥发技术基于汞 的挥发性，经植物根系的吸收，汞进入植物的维管 束中后最终通过挥发或蒸腾作用释放到大气中［41］。

关于汞的超富集植物目前未被发现，王建旭 等［42］发现在田间条件下添加硫代硫酸铵能显著提高 油菜中汞的含量以及其对土壤总汞和生物有效态汞 的生物富集系数；Damien等［43］发现联合微生物使用 不仅能促进植物根系对土壤汞的吸收而且能极大促 进根系汞向地上部分转运；Barnet等凹利用人工诱 导技术，发现羽扇豆(*Lupinus*)和芥菜(*B. juncea*) 在添加人工诱导剂后，可以有效地吸收矿山尾渣中 的汞，诱导植物在体内吸收汞的同时，其自身活化 了土壤中大量的汞，该部分汞会通过土气界面释放 到大气中。

**2.5** 封闭阻隔 封闭阻隔是将污染土壤置于防渗填埋场内，或 通过敷设阻隔层阻断土壤中污染物迁移扩散的途径， 避免污染物与人体接触和随土壤迁移进而对人体和 周围环境造成危害［45］，主要适用于重金属、有机物及 重金属有机物复合污染土壤，污染土壤原位封闭阻 隔技术早在20世纪80年代初期就已经开始应用， 该技术在国外已经应用30多年近千项工程，技术较 成熟且修复周期较短［46］。

**2.6** 地下水修复

汞污染场地地下水修复技术主要包括抽出处理、 水力控制、原位稳定化、可渗透反应墙、生物修复 等。抽出处理是根据汞污染地下水范围，在污染场 地布设一定数量的抽水井，通过水泵将污染地下水 抽取进行处理［47］；水力控制主要是联合抽出处理或设 置阻隔墙使场地水力坡度发生变化，从而控制污染 源或截获污染地下水将其控制在一定范围［48］；含汞地 下水污染原位稳定化技术主要利用反应墙对汞进行 沉淀、还原或者吸附［49］，适用于，地下水环境复杂不 宜异位修复处理的汞污染场地，不适用于承压含水 层，不宜用于含水层深度超过10 m的非承压含水层, 同时对反应墙中沉淀和反应介质的更换、维护和监 测要求较高［50］；沉淀/共沉淀是去除水中汞污染最常 用的工艺，该技术的处理效率受介质和污染物特性 影响较小［51］；此外，生物修复技术也被用于中试研究， 有利用微生物将汞离子还原为单质汞［52］，有利用一系 列好氧和厌氧生物处理过程去除废水中的汞［53］。

1. 修复技术筛选
   1. 技术筛选方法路线

汞污染地块土壤及地下水修复技术筛选，需分 修复阶段、逐步缩小适用技术数量，最终选出适合 于拟修复场地的工程技术。而每个阶段都需分初步 筛选、详细筛选及技术可行性评估三个阶段进行技 术筛选，筛选方法路线如图4所示。

* 1. 筛选程序

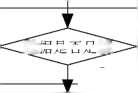
初步筛选针对含汞污染地块土壤及地下水的不 同特性，将含汞污染地块土壤及地下水分类筛选； 其次，结合场地污染特征、污染物特征及技术适用 性情况，从技术可行性角度进行考虑，建立土壤修 复技术初步筛选矩阵的指标主要包括土壤类型、污 染程度、是否含有机物和污染物形态等，地下水技 术初步筛选矩阵的指标主要包括埋深、厚度、渗透 系数、透镜体和污染面积浓度等。

详细筛选的目的是在初步筛选结果基础上，通 过技术筛选矩阵做比较，为日后的场地修复提供依 据；详细筛选矩阵所需数据可通过查阅国内外汞污 染场地修复技术相关文献来实现，也可通过案例分 析来实现。如表2所示，详细筛选应对照修复技术 筛选矩阵进行，然后根据判断值对各关键指标进行 量化计算。

根据含汞污染地块污染特征，利用项目总投资、 固定资产投资、运行成本、含汞污染物去除率、环 境风险、二次污染、修复时间、技术成熟度、技术 可获得性、可操作性、适用性和效果等指标，结合 技术筛选与评价指标的评分值与各指标的权重，对 技术综合评价按照以上各个层次比较的结果将权重 按大小进行排序，权重最大的即为最优方案，如表3 所示，通过打分的方式计算得到初步的权重分配表， 同时这些指标权重可根据技术的成熟进行优化和 更新。

根据技术评分值及部分定量数据，进行标准化 处理，加权求和，得出每个方案的分值。具体过程

确定含汞污染场地修复模式



否

是

数据是否足够

技术初步筛选

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 场地特性(水文地 质、规划) |  | 汞污染浓度范围］汞形态分布 |  | 技术应用情况 |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 确定潜在可行的修复技术 | |  |
|  |  |  |  |
|  | |  | |
|  | 修复技术详细筛选  i | | |
| **, 1 .** | | | |
| 修复技术自身特性**1 1**二次污染防治 | | | 工程操作实施 |
| **~i 1** | | | |

确定相对经济、适用、可行的无害化技术

修复技术可行性评估

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 实验室小试 |  | 现场中试 |  | 应用案例比较 |

技术综合评估  
确定含汞修复技术  
制定含汞污染场地修复技术方案

图 4 汞污染场地修复技术筛选路线

Fig.4 Evaluation routes of rehabilitation technology for mercury contaminated sites

表 2 汞污染修复技术筛选矩阵

Table 2 Rehabilitation technology screening matrix

技术指标

经济指标

环境指标

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 异位固化/稳定化 热脱附 | •  • | •  ◎ | •  • | •  • | ◎  ◎ | O  ◎ | O  O | O  • | ◎  O | ◎  O | ◎  O | ◎  ◎ | ◎  ◎ |
| 异位土壤淋洗 | • | ◎ | ◎ | • | • | • | • | • | O | O | O | ◎ | ◎ |
| 原位固化/稳定化 | ◎ | ◎ | • | • | ◎ | ◎ | O | O | ◎ | ◎ | • | ◎ | ◎ |
| 原位土壤淋洗 | ◎ | • | ◎ | • | • | ◎ | • | • | ◎ | • | ◎ | ◎ | ◎ |
| 植物修复 | ◊ | O | O | O | • | O | O | ◎ | • | • | • | • | • |
| 原位阻隔 | • | ◎ | ◎ | • | O | ◎ | O | ◊ | O | • | • | • | • |
| 抽出－处理 | • | • | • | ◎ | • | ◎ | • | ◎ | O | O | O | ◎ | ◎ |
| 原位稳定化 | • | O | • | • | O | ◎ | O | ◊ | O | • | • | • | • |

修复技术

Repair technology

成熟度可操作性 修复时间修复效果

无害化减量化综合利用 长期 直接基本间接基本运行维护 社会环境 二次污染 程度 程度 程度 稳定性 投资 投资 成本 影响 防治

注：符号定义：•-平均值以上◎-平均值。-平均值以下◊-根据技术本身特性决定

Technical index

Economic indicator

Environmental indicator

如下：

**3.2.1**评价方法经济指标为实际值，其他指标为 打分值；将每个指标实际值或打分值进行归一化处 理，得到［0，1］区间内的一个数；乘以各自的权重， 并加和，得到各个方案的总得分；根据每个方案总 得分，进行方案排序和优选。

**3.2.2**归一化方法 对于经济指标，值越小越优： 归一化值=各方案本指标的最小值/原值(*Bu* = *yImirJyH*) 式中，*Bi*表示本指标方案*i*归一化后的值，*ymi”*表示 本指标各个方案的最小值，*yn*表示本指标方案*i*的值;

对于其他指标，值越大越优：归一化值 = 原值/各方

| 表 3 汞污染修复技术评估指标权重分配  Table 3 Weight distribution of technical evaluation indicators | | |
| --- | --- | --- |
| 指标  Index | | 值  Value |
| 经济指标 | 总投资（直接基本投资） | y1 |
|  | 固定资产投资（间接基本投资） | y2 |
|  | 运行成本（维护成本） | y3 |
| 技术指标 | 修复时间（全过程时间） | y4 |
|  | 汞污染技术使用成熟度 | y5 |
|  | 技术可获得性、可操作性、可适用性 | y6 |
|  | 汞污染修复效果（小试、中试） | y7 |
| 环境指标 | 污染物去除率（工程实施阶段） | y8 |
|  | 环境风险 | y9 |
|  | 二次污染 | y10 |

案本指标的最大值*（B* = *yii* / *ymax）*。

**3.2.3**方案总排序对各个无害化技术评分指标的 标准化分值进行加权求和，公式如下：

*n*

*Ci = ^AixBi*

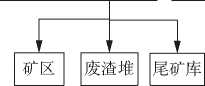
2 = 0

式中，*Ci*表示方案分数最终计算结果，如表示指标 *i*的权重，*Bi*表示方案指标*i*的归一化值。

**3.3** 修复技术综合评估

修复技术经过筛选后需要进行可行性评估，包 括实验室小试、现场中试和应用案例分析三种方式， 当技术详细筛选数据充足时，可跳过可行性评估进 入定量评估阶段；根据污染特征，结合修复模式和 修复技术矩阵筛选分数结果综合决策，采用多种修 复技术进行优化组合集成修复技术路线；如[图5所](#bookmark13) 示，以原生汞生产污染场地与涉及聚氯乙烯行业的 再生汞污染、汞化合物生产使用场地的区别为例， 按照筛选路线后综合打分决策结果，矿区采用固化/ 稳定化和封闭阻隔的组合技术、废渣堆采用固化/稳 定化技术、尾矿库采用封闭阻隔技术；筛选再生汞

典型含汞污染场地修复技术筛选综合评估思路

图 5 含汞污染场地修复技术筛选综合评估思路

原生汞生产污染场地再生汞生产污染场地

重污染土壤

| 固化/稳定化 | 固化/稳 | 封闭 |
| --- | --- | --- |
| 封闭阻隔 | 定化 | 阻隔 |

热脱附

汞化合物生产和  
使用污染场地

中轻污染土壤

固化/稳定化

Fig.5 Screening and evaluation of rehabilitation technology for mercury contaminated sites 污染地块的重污染土壤采用热脱附技术、中轻污染 土壤采用固化/稳定化技术等。

1. 总结与展望

聚氯乙烯行业场地污染将是我国防治汞污染、 履行相关国际公约的最重要领域，这是由于这一产 业的生产、升级、腾退转型都有可能导致的场地汞 污染，即这一领域场地潜在污染数量多、风险大， 为此需要提前开展相关研究，积极做好该行业汞污 染地块的识别、调查、风险管控工作，对于每一修 复环节都要有技术储备、主要技术还要经过实践检 验。当然，通过技术改造和生产管理提高在产企业 排放“三废”的汞回收利用率，减少直接污染风险是 最为重要的。

在土壤汞污染修复技术中固化、稳定化技术是 最常见、应用最广泛的，然而修复后土壤中汞的长 期稳定性问题尚待深入研究；由于汞具有的高挥发 性，致使场地土壤汞污染修复以热脱附技术效果较 好，但这一技术的缺点是能源投入量大，为此提高 能源利用效率、多种污染物联合修复以及增加修复 的针对性则是优化本技术的关键；土壤淋洗是另外 一类已在异位处理汞污染土壤和沉积物实际工程中 应用的技术，该技术的优点是可减少二次处理的土 壤量，从而降低修复费用，但一般修复处理土壤量 较小、经济性较差，且多限于在污染场地原位淋洗， 以免污染土壤外运造成新的污染风险。

行业场地汞土壤污染修复技术要根据修复场地 的实际情况、不同修复技术的特点加以选用；具体 操作方法是先建立相关技术筛选矩阵，再调查、识 别汞污染地块污染特征和污染程度等相关信息，确 定场地地块污染风险等级，最后筛选出应使用的修 复技术及其参数。在实际工作中，只有技术筛选与

地块污染风险评估紧密结合，才能科学有效地提出

修复方案与管理建议。

参考文献：

[1 ] 侯 淼,刘 然,王龙浩,等.冶炼过程中汞的研究展望J].[工业](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-425X.2018.08.027) [安全与环保](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-425X.2018.08.027), 2018, 44(8): 95 - 98.

[2 ] 《关于汞的水俣公约》[EB/OL].[2017-08-15].[http://www.mee.](http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201708/t20170816_419736.htm)

[gov.cn/gkml/hbb/bgg/201708/t20170816\_419736.htm](http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201708/t20170816_419736.htm).

[3 ] 周军,张新力•我国电石法聚氯乙烯发展的挑战和趋势[J]•[聚](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-7937.2012.07.001)

[氯乙烯](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-7937.2012.07.001), 2012, 40(7): 1 - 4.

[4 ] 王玉晶，臧文超，赵 静，等•我国电石法生产聚氯乙烯行业汞

排放清单[J].[化工环保](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1878.2016.05.019),2016, 36(5): 572 - 576.

[5 ] 曾华星，胡奔流,张银玲•我国含汞废物的再生利用J].[有色冶](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-4345.2012.03.013)

[金设计与研究](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-4345.2012.03.013), 2012, 33(3): 36 - 38.

[ 6 ] 于建国. 乙炔法聚氯乙烯生产减少汞排放的“最佳环境实 践” [J].[化学工业](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-9647.2011.07.011),2011, 29(7): 44 — 48.

[7 ] 韩钦生，孙 芳.乙炔法PVC与乙烯法PVC对比[J].[聚氯乙烯](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-7937.2009.09.002),

2009, 37(9): 5 - 7+12.

[8 ] 张 晶,段明哲,张志刚,等.氯乙烯生产技术[J].化工进展,

1. 33(12): 3164 - 3169.

[ 9 ] 薛祖源. 电石法/乙烯法生产聚氯乙烯技术经济分析、建议和展

望 J].[现代化工](https://doi.org/10.3321/j.issn:0253-4320.2009.12.003)，2009, 29(12): 12 - 19.

[10 ]权开玉.聚氯乙烯行业的生产现状及发展趋势J]•橡塑技术与 装备(塑料), 2018, 44(24): 32 - 36.

[11 ]蔡 杰.我国氯碱行业结构调整方向机会分析[J].[化学工业](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-9647.2016.06.002), 2016, 34(6): 10 - 14.

[12 ] 2019年中国氯碱工业行业调查报告[R].中国氯碱工业协会,

2019.

[ 13 ] 蒋松华, 海热提, 姜 华, 等. 我国聚氯乙烯行业的低汞化进展 探研[J].环境科学与技术,2011, 34(S2): 430 - 433+437.

[14 ]郑结斌.中国氯资源分布现状及主要氯产品发展趋势[J].[中国](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-1785.2019.09.001) [氯碱](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-1785.2019.09.001), 2019, (9): 1 - 4.

[15 ]田 祎，邢 奕,刘景洋，等•氯化汞触媒的汞挥发速率[J]•北京 科技大学学报, 2012, 34(8): 939 - 942.

[ 16 ] 李 强, 戴世金, 郑怡琳, 等. 工业废盐中有机物脱除和资源化 技术进展J]•环境工程,2019, 37(12): 200 - 206.

[17 ]朱 俊•聚氯乙烯合成树脂技术经济和环保分析[J]•[化学工业](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-9647.2015.06.002),

1. 33(6): 8 - 11.

[ 18 ] 焦庆庆, 王利国, 苟华超. 聚氯乙烯行业盐酸深度解吸技术的应 用[J].[聚氯乙烯](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-7937.2018.07.011),2018, 46(7): 38 - 40+44.

[ 19 ] 韩 超. 含汞固体废物硫代硫酸盐浸出与回收技术基础研 究[D].沈阳：东北大学,2017.

[20 ]李名新.PVC生产过程中低汞触媒及载体性能研究[D].贵阳:贵 州大学, 2016.

[ 21 ] 刘仕业, 岳昌盛, 彭 犇, 等. 铬污染毒性土壤清洁修复研究进 展与综合评价J]•工程科学学报,2018, 40(11): 1275 - 1287.

[ 22 ] 张新艳, 王起超. 含汞有害固体废弃物的固化/稳定化技术研究 进展[J].[环境科学与技术](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-6504.2009.09.025),2009, 32(9): 110 - 115.

[ 23 ] 李玉锋, 赵甲亭, 李云云, 等. 同步辐射技术研究汞的环境健康 效应与生态毒理[J].中国科学:化学,2015, 45(6): 597 - 613.

[24 ]宋 迪，陶 红,毛凌晨，等•水泥、沸石和TMT固化污染底泥 的实验研究J].[水资源与水工程学报](https://doi.org/10.11705/j.issn.1672-643X.2015.03.013),2015, 26(3): 60 - 64+71.

[ 25 ] Piao H, Bishop P L. Stabilization of mercury-containing wastes using sulfide[J]. Environmental Pollution, 2005, 139(3): 498 - 506.

[26 ]廖自基•微量元素的环境化学及生物效应[M].北京：中国环境 科学出版社, 1992.

[ 27 ] 方凤满, 王起超, 郝庆菊. 大气汞的来源、形态及环境过程研究 现状[J].环境导报,2001, (2): 18 - 21.

[ 28 ] Chang T C, Yen J H. On-site mercury-contaminated soils remediation by using thermal desorption technology[J]. [Journal of](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.07.053) [Hazardous Materials](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.07.053), 2006, 128(2-3): 208 - 217.

[ 29 ] Kucharski R, Zielonka U, Sas-nowosielska A, et al. A method of mercury removal from topsoil using low-thermal application[J]. [Environmental Monitoring and Assessment](https://doi.org/10.1007/s10661-005-1620-x), 2005, 104(1-3): 341 - 351.

[ 30 ] 蒋 村, 孟宪荣, 施维林, 等. 氯苯污染土壤低温原位热脱附修 复[J].[环境工程学报](https://doi.org/10.12030/j.cjee.201810082),2019, 13(7): 1720 - 1726.

[31 ]李亚琴，魏 镇,王会昌，等•氯乙烯生产中脱水方法的探讨J]. [中国氯碱](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-1785.2017.04.006), 2017, (4): 15 - 19.

[ 32 ] 鲁洪娟, 倪吾钟, 叶正钱, 等. 土壤中汞的存在形态及过量汞对 生物的不良影响[J]. 土壤通报,200, 7(3): 597 - 600.

[ 33 ] Massacci P, Piga L, Ferrini M. Applications of physical and thermal treatment for the removal of mercury from contaminated materials[J]. Minerals Engineering, 2000, 13(8): 963 - 967.

[ 34 ] Taube F, Pommer L, Larsson T, et al. Soil Remediation-Mercury Speciation in Soil and Vapor Phase During Thermal Treatment[J]. [Water, Air, and Soil Pollution](https://doi.org/10.1007/s11270-008-9679-y), 2008, 193(1-4): 155 - 163.

[35 ]冯新斌，仇广乐,付学吾，等.环境汞污染[J].化学进展，2009, 21(Z1): 436 - 457.

[ 36 ] 张 文, 徐 峰, 杨 勇, 等. 重金属污染土壤异位淋洗技术工 艺分析及设计建议J].环境工程,2016, 34(12): 177 - 182+187.

[ 37 ] 黄宝荣, 刘云国, 张慧[智, 等. 化](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-8942.2003.04.016)学萃取技术在重金属污染土壤 修复中应用的研究J]•[环境工程](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-8942.2003.04.016),2003, (4): 48 - 50+4.

[ 38 ] 万 梅, 刘 锐, 汤灵容, 等. 工业区域土壤和地下水中挥发性 氯代烃的污染现状与防治法规[J].环境工程,2011, 29(S1): 397 - 401+411.

[ 39 ] Bentley M, Fan M, [Dutcher B, et al. Catalytic re](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.09.021)generation of mercury sorbents[J]. [Journal of Hazardous Material](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.09.021)s, 2013, 262: 642 - 648.

[ 40 ] Sasmaz E, Kirchofer A, Jew [A D,](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.04.036) et al. Mercury chemistry on brominated activated carbon[J]. [Fuel](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.04.036), 2012, 99: 188 - 196.

[41 ]李 军•植物挥发性有机化合物研究方法进展J]•生态环境学 报, 2016, 25(6): 1076 - 1081.

[ 42 ] 王建旭, 张军方, 冯新斌, 等. 硫代硫酸铵添加对黄平大黄油菜 富集土壤汞的影响-田间试验[J].生态毒理学报,2014, 9(5): 992 - 997.

[ 43 ] Mccarthy D, Edwards G C, Gustin M S, et al. An innovative approach to bioremediation of [mercury conta](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.051)minated soils from industrial mining operations[J]. [Chemosphere](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.051), 2017, 184: 694 -

699.

[ 44 ] Barnett M O, Harris L A, Turner R R, et al. Stevenson Characterization of mercury species in contaminated floodplain soils[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 1995, 80(1-4): 1105 - 1108.

[45 ]朱 钢•结合老工业区的污染治理浅议棕地的风险工程控制措 施[J].环境工程,2016, 34(S1): 1034 - 1038.

[ 46 ] 陈文浩, 任宇鹏, 张严严, 许国辉, 许兴北. 污染场地围封阻隔技 术研究J]•环境科学与技术,2019, 42(S2): 114 - 124.

[47 ]郇 环，王金生•水力截获技术研究进展[J].[环境污染与防治](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-3865.2011.03.018), 2011, 33(3): 83 - 87.

[48 ]蒲 敏•污染场地地下水抽出处理技术研究[J].环境工程,2017,

35(4): 6 - 10.

[49 ]李博文.胶体Mg(OH)2在含水层中的迁移及其原位稳定化重金 属性能研究[D].长春:吉林大学,2018.

[50 ]蒋小红，喻文熙,江家华，等•污染土壤的物理/化学修复[J].[环境](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-3865.2006.03.015) [污染与防治](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-3865.2006.03.015), 2006, (3): 210 - 214.

[ 51 ] 刁春鹏. 焦化废水处理过程苯系物、苯胺类、重金属污染物的 存在及去除特性分析[D].广州:华南理工大学,2012.

[ 52 ] 张 艳, 邓扬悟, 罗仙平, 等. 土壤重金属污染以及微生物修复 技术探讨[J].有色金属科学与工程,2012, 3(1): 63 - 66.

[ 53 ] 左剑恶, 肖晶华, 陈莉莉. 氯代有机污染物在厌氧条件下还原脱

氯的研究进展J].环境污染治理技术与设备,2003, (6): 43 - 48.

Research Progress on Remediation Technology of Mercury  
Contaminated [Soil](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-3865.2006.03.015) in the PVC Industry

YAN Wen-bo1, 2, ZHANG Xue-feng1, 2, XIONG Jie3, HAN Chun-mei3, WANG Jun1, 2

(1. *BCEG Environmental Consulting Co., Ltd, Beijing* 100015, *China;* 2. *BCEG Environmental Remediation Co., Ltd,  
Beijing* 100015, *China;* 3. *Technical Centre for Soil, Agriculture and Rural Ecology and Environment,  
Ministry of Ecology and Environment, Beijing* 10001, *China)*

**Abstract:** The PVC industry is the most important field for the implementation of the mercury (Hg) convention in China. The potential number and risk of Hg contaminated plots caused by the transformation of production, upgrading and withdrawal of related industries is huge. So it is necessary to carry out the relevant remediation technology re­serve and engineering application practice in advance. Based on the investigation for the characteristics of PVC in­dustry in China, the ways and risk characteristics of Hg pollution caused by production process were summarized. The remediation technologies of Hg contaminated land at home and abroad were summarized. The common remediation technologies of Hg contaminated soil included solidification stabilization, thermal desorption and soil leaching. The Hg contaminated groundwater technologies included extraction treatment, *in-situ* stabilization and PRB. From the as­pects of pollution source control, pollution diffusion barrier, contaminated soil and groundwater remediation and so on, the remediation technology screening index was selected, and the multi-level standard of remediation technology screening was constructed, in order to provide a technical reference for environmental assessment, remediation and prevention of Hg contaminated plots in PVC industry.

**Key words:** PVC; Mercury pollution; Contaminated site; Soil remediation technology

[ 责任编辑：张玉玲]