北方园艺

Northern Horticulture

2019(20)：67-172

doi：10. 11937/bfyy. 20190249

土壤修复过程中地下水渗滤风险研究进展

胡 德 玉，王 光 辉 ，范 文 哲 ，罗 秋 艳

（东华理工大学 水资源与环境工程学院，江西 南昌 330013）

摘要**：**土壤修复是通过物理、化学或生物等方法固定、转移、吸收、降解或转化土壤中 的污染物，使其含量降低到可接受的水平，或将有毒有害的物质转换为无害物质的过程。但 是“修复”不当将成为一场转嫁行为，对地下水造成渗滤风险。该研究阐述了土壤修复技术 中的物理修复、化学修复以及生物修复等过程中可能会对地下水造成的渗滤风险和风险评 估方法，并就缓释螯合剂在土壤修复过程中对重金属释放的调控作用，降低对地下水渗滤风 险进行了介绍，最后总结出土壤修复的未来发展方向。

关键词**：**土壤修复；地下水渗滤风险；风险评估；缓释螯合剂

中图分类号:X 53 文献标识码：A文章编号：1001 —0009（2019）20 —0167 —06

20 世纪30 年代以来，随着工农业的迅速发 展，矿山大肆开采，农药化肥过量施用，汽车尾气 排放及工业废气干湿沉降等人类活动使得土壤污 染形势日益严峻［1］。据农业部调查数 据显示： 目 前我国污水灌区面积约140万hm2,其中遭受重 金属污染的土地面积占总面积的64 8%，其中轻 度污染占467％，中度污染占97％，严重污染占 84%。每年因土壤受重金属污染导致粮食至少 减产1 000万t,经济损失高达200亿元⑵。“民 以食为天，食以土为本”土壤的环境质量直接关 系到粮食安全问题，进而影响动物和人类的健康， 同时，十三届全国人大常委会第五次会议也通过 了“土壤防治法”于2019 年1 月1 日施行。 因此， 污染土壤修复不仅成为当前国内外的热门研究问 题，还上升到了国家政策层面。 近年来，土壤修复 技术如雨后春笋 般争 相 推 出，技术多种多样各有

第一作者简介：胡德玉（1994—），男，硕士研究生，研究方向

为土壤重金属污染修复。E-mail：2062312828@qq. com.

责任作者：王光辉（1968—），男，博士，教授，现主要从事土 壤重金属污染修复及水污染控制等研究工作。 E—mail： wgh68611@163. com.

基金项目：国家自然科学基金资助项目（41761069）；江西

省自然科学基金资助项目（20181ACB20004）。

收稿日期：2019—03—12

优缺点，典型的有物理修复、化学修复和生物修 复［3—4］等。 但是“修复”不当将成为另一场污染的 再生产，该研究就土壤物理、化学及生物修复过程 存在的渗滤风险、评估方法以及调控措施进行了 系统的介绍。

1. 土壤物理修复过程中的地下水渗滤 风险

土壤的物理修复是利用污染物与环境之间各 种物理特性的差异，将土壤中的污染物移除或者 转化为无害形态［5］。 根据处理工艺的不同分为： 基本物理分离修复、固定/稳定化修复［6］、电动力 学修复［7］和玻璃化修复［8］等。 但有研究表明，在 采用上述修复技术修复土壤过程中也可能存在一 些问题，会对地下水造成渗滤风险。

例如，经固定/稳定化修复的污染土壤，在酸 雨等极端环境下，固化后重金属有溶解或浸出的 风险⑷。XUE等〔10的研究发现，固定/稳定化后的 铅在2 年内的动态浸出累积分数高达4864%。 王 洪才［11］通过探究水泥对重金属污染土壤固化/稳 定化修复效果，发现在泥土比为4 ： 6、3 ： 7时的 固化体镍的浸出液浓度均超过了《地下水环境质 量标准XGB/T 14848—1993）中的皿类标准值 0. 05 mg • L—1,其中水泥添加比例为3 : 7时，镍

的浸出浓度最大，为0. 089 3 mg • LT ；在电动力 学修复过程中也 存在 相 应 的风 险**，**单 一 的 外加 电 源不能满足电动力学修复土壤**，** 需要外加一些化 学试剂**,**如Lasagna法口〕、酸碱中和法、表面活性 剂法［13］等都需要加外加剂**，**过量容易造成渗滤风 险和二次污染**；**玻璃化修复也会对地下水造成渗 滤风险，NAVARRO等发现在高温下对金属 尾矿玻璃化修复时，会增加锌(Zn**)**、镍**(Ni)**、锰 **(Mn)**和铜**(Cu)**的移动性，存在下渗到地下水的 风险。

1. 土壤化学修复过程中的地下水渗滤 风险

化学修复技术是指通过向土壤中添加稳定化 剂来使污染物产生一系列的吸附、沉淀、络合、氧 化还原等反应，从而降低其生物有效性， 减少对动 植物的毒害「诃。根据处理技术的不同可分为：化 学钝化修复「16〕、化学淋洗修复、化学氧化还原 修复和溶剂浸提修复等。 然而有众多报道认为其 中的化学钝化修复和化学淋洗技术在修复土壤过 程中将对地下水产生极大的渗滤风险。

**2 1**化学钝化修复对地下水的渗滤风险

与土壤物理修复中的固定化修复类似，在化 学钝化修复过程中，土壤中的污染物总量并未减 少，而且其修复效果的持久性和钝化剂用量等问 题使得该技术存在渗滤的环境风险［18\例如LI 等［19］发现经过红泥钝化后的砷，在碱性条件下会 被再次浸出来，浸出性可达12. 7%，迁移态的砷 又可能会随大气降水渗滤到地下水中，对地下水 造成二次污染。 再者某些钝化剂本身就具有一定 的环境风险，如磷酸盐类钝化剂极易造成水体富 营养化，其在施用量较低时，磷的淋失量不到加入 量的1%，但随着施用量的增加，磷的淋失量可高 达10%以上［20］，存在较高的渗滤风险。

**22** 化学淋洗修复对地下水的渗滤风险

化学淋洗修复中的淋出液中含有大量重金属 及其与淋洗剂的络合物，如果没有被及时妥善处 理，将会有地下水渗滤的风险并污染地下水［21］。 目前被广泛使用的淋洗剂有水、无机酸、有机酸、 人工合成螯合剂和表面活性剂等［22］，其中使用较 多的是强酸类物质和螯合剂。例如ZHU等匚23通 过硝酸、盐酸等强酸来淋洗钢铁冶炼厂重金属 污染土壤*，*以及MOUTSATSOU等™ 使用 6 mol **•** L-1 硝酸、6 mol **•** L-1 硫酸和 1 mol **•** L-1 盐酸淋洗矿区污染土壤**，**在使用酸类物质淋洗土 壤时会将土壤中的其它有益金属元素一并洗出**，** 同时造成土壤酸化**，**且强酸淋洗剂在使用后的回 收与利用艰难**，**它们的残留将会渗滤到地下水中 并造成二次污染［25］ **O**

因此，强酸类物质逐渐被螯合剂所取代，但是 伴随着螯合剂使用的生态环境风险也随之而来， 虽然螯合剂可以通过与土壤溶液中的重金属离子 结合，使重金属离子从不溶态转化为可溶态，以此 大大活化土壤中的重金属［26 ，为修复创造有利条 件，但在降水或灌溉条件下使用螯合剂淋洗污染 土壤时，会使得被活化的重金属有向下迁移或随 水流失的风险［27 。 而且螯合剂的残留也会对环 境造成危害，其中人工合成的多羧基氨基酸类螯 合剂(APCAs)，二乙基三乙酸(NTA)现己被认定 为□级致癌物「8,二乙三胺五三乙酸(DTPA)也 被Sigma公司证实为潜在的致癌物质。由此可 见，被活化的重金属和残留的螯合剂不仅有向地 下水渗滤的风险，还对人体健康产生风险。 以常 用的螯合剂乙二胺四乙酸(EDTA)为例，金依婷 等报道了在土壤中添加EDTA 48 h后，土壤 中水溶态的重金属Cu、Zn、Pb、Cd的含量分别增 加了 102、496、114、5倍，这极易引发地下水渗滤 风险。GRCMAN等［30］在盆栽中施加螯合剂ED- TA 后进行土壤淋洗试验，发现土壤中有379% 的Pb和56. 3%的Cd被冲洗出土柱。吴龙华 等［31］ 通 过 在 重 金 属 污 染 土 壤 中 施 加 12 mol • kg" EDTA对土壤进行淋洗，研究表 明，未加石英砂对照土壤中Cu、Zn、Pb、Cd的淋 失率分别 为 35%、794%、709% 和 86 5%。 KOS等通过开展盆栽-淋滤试验，发现添加 EDTA后有36. 2% Pb被淋出土柱。还有研究发 现，EDTA在增强植物修复时，植物对重金属的 吸收速率远低于螯合剂的活化速率，新形成的金 属螯合剂复合物不能被植物完全捕获和提取，这 也会增加重金属向地下水的渗滤风险［33］。

同时，由于EDTA具有难生物降解性、可溶 性以及生物毒害性［34］，因此，其在土壤中的残留 也具有向地下水渗滤的风险，并且还会造成生态 风险。己有大量研究表明EDTA难生物降解以 及会渗漏到地下水中，例如*,*ANDREW-HONG 等［35］的研究发现， 在最适宜的水培条件下， EDTA 在 10 d之内的降解率仅为3%〜50%。 WEN等〔36〕通过比较鼠李糖脂、柠檬酸和EDTA 在土壤中的降解速率，发现在20 d之后EDTA 也只有14%被降解。因此，过量的EDTA会随降 雨渗滤到地下水及周边地表水中。 有报道称，在 欧洲EDTA在河流中含量为10〜100 Mg • L-1, 湖泊中的含量为1〜10 gg • L-1,而且EDTA分 子中的氮元素较高，会在水体中和磷酸根竞争铁 离子，使得磷元素从底泥中释放出来，最终造成水 体富营养化［37］。 不只是 EDTA 会造成地下水渗 滤风险，其它螯合剂也具有同样的风险，如乙二胺 二琥珀酸(EDDS)等跑。

1. 土壤的生物修复过程中的地下水渗滤 风险

生物修复被公认为恢复和重建健康土壤环境 的最环保方法之一，它是利用微生物／植物来解毒 或去除污染土壤中的重金属，具有经济效益高、非 入侵性等特点［39—40］。 生物修复技术主要包括植 物技术和微生物技术，土壤的生物修复过程中产 生地下水渗滤的风险较低。

但风险依然存在，例如，植物稳定化技术是将 重金属固定在植物根部，使其不会向地上组织转 移，重金属仍然停留在土壤中［41］，随着植物的枯 萎凋零，土壤中重金属就有了向地下水渗滤的风 险。 再者，对提取重金属后的植物后处理也是一 个难题，目前国内外主要通过集中填埋、焚烧和堆 肥等方式处理收割的植物，但会因渗流及其它因 素的影响，致使收集到的重金属渗滤到地下水中 造成二次污染［42］。 微生物修复技术同样也存在 一定的渗滤风险，例如利用微生物强化土壤修复 时(如添加生物螯合剂等)，会因为污染物溶解度 增大等原因下渗污染地下水［43］。 生物修复技术 所使用的纳米级的生物炭颗粒，也可能会携带污 染物沿着土壤剖面迁移渗滤到地下水中，对地下 水构成潜在渗滤风险［44］。

1. 土壤修复过程中的渗滤风险评估方法

目前，我国对于土壤修复过程中的渗滤风险 评估方法研究相对较少， 主要有试验法和模型法 2 种 。

试验法主要通过评价土壤修复效果来评价渗 滤风险，包括毒性特性浸出试验(TCLP)和模拟 酸雨淋溶试验(SPLP)45。TCLP是美国国家环 境保护局指定的污染物释放效应评价方法，可以 用来检测土壤修复后土壤中污染物的迁移性和溶 出性；SPLP是模拟修复后的土壤在酸雨条件土 壤中污染物的迁移特征［46］。 例如，陈祖奇等［47］ 通过穿透渗漏试验来评估修复后的重金属废物对 地下水的渗滤风险，发现各种重金属的渗滤量分 别为 Zn 38%、Ca 37%、Cu 28%、Ni 21. 8%、Pb 21. 5%、Cr 64%和Ca 59% ；有时还可以采用逐一 对比和统计分析的方法来评估渗滤风险［48］。

而模型法主要是通过构建模型来预测渗滤风 险是否存在，目前常用预测渗滤风险的模型有三 相平衡耦合地下水稀释模型、SESOIL耦合地下 水稀释模型、AT123D模型和基于对流一弥散方 程(CDE)原理建立的数学模型等。其中当己知污 染物总量时，可采用三相平衡耦合地下水稀释模 型来预测土壤修复过程中产生的淋溶液中污染物 的浓度，该模型如公式(1)所示「切;而SESOIL耦 合地下水稀释模型则主要依据伊格尔森理论，通 过计算非饱和土壤水分转移和转化来掌握土壤修 复产生的污染对地下水的影响状况［50］ ；AT123D 模型可用来模拟土壤修复过程中产生的污染物在 饱和含水层的浓度变化情况［51］；陆雅茵［52］通过 CDE原理建立EDTA-重金属螯合物在下包气带 迁移转化的数学模型，预测螯合诱导植物修复土 壤过程中渗滤液的重金属向下包气带的迁移距 离，并以此来预测土壤修复产生的渗滤风险。

*3* = *° Xdw + HXda+PXK0CX foc* ⑴。

式中：♦为淋溶液中污染物质量浓度， mg • L-1 ； *°*为土壤中污染物质量分数， mg • kg-1 ；为污染土壤密度,kg • L-1 ；*%*为污 染土壤含水孔隙度，无量纲；*0*”为污染土壤含气 孔隙度，无量纲;*H*为污染物亨利常数，无量纲； *Koc*为污染物有机碳分配系数，无量纲*;foc*为土 壤有机碳含量，%。

5调控措施

近年来，针对上述土壤修复技术会存在地下 水渗滤风险的问题，已经引起环境修复方面的研 究人员重视并采取了一系列风险调控措施。例 如，BEIYUAN等「33〕通过食物垃圾堆肥对金属螯 合剂复合物的强吸附作用来减少EDTA增强植 物修复过程中 Cu／Pb－EDTA 复合物的意外浸出。 还有研究表明，可以通过在土壤底部添加一层活 性反应层来调控土壤修复过程中浸出的污染物向 地下渗滤风险［53］。

在众多风险调控措施中，其中通过具有缓释 功能的螯合剂增强植物修复污染土壤的联合技术 渐渐受到大众欢迎，使用缓释螯合剂可以调控土 壤中重金属释放速率，使得与植物提取重金属的 速率平衡，从而大大降低因植物吸收速率慢而造 成的渗滤风险，可以有效的缓解土壤修复过程中 对地下水的影响。缓释材料具有延长反应物释放 期，反应物峰值释放率低等特点，因此可以用它们 来修复环境中较为顽固的污染物［54］。例如 KA－ MBHU等「55〕使用以石蜡为缓释载体的缓释过硫 酸钠和缓释零价铁实现了 对水体中二恶烷的 100%去除。同时，还有用以烯烃聚合物和硅胶作 为缓释载体的缓释 EDTA 来修复重金属污染土 壤的［56－57］。当联合植物提取修复时，缓释螯合剂 将发挥更大功效，LI等［58］通过采用被硅酸盐包 裹缓释EDTA强化玉米修复Pb-Zn复合污染的 土壤，这种技术能最大程度的清除土壤中的重金 属 ， 而且还能降低修复过程中给地下水带来的渗 滤风险。如今缓释螯合剂已经发展到了一定的程 度 ， 下一步的方向正在向寻找可生物降解的缓释 材料进行。

6结语与展望

近年来，随着科学技术的飞速发展，土壤修复 技术也日益更新，但在修复的同时也要注意其带 来的环境风险，“修复”不当将成为另一场污染的 再生产。因此对未来的土壤修复研究提出以下几 点建议。

1） 土壤与地下水联系紧密，在进行土壤修复 时必须考虑到土壤-地下水的一体化，不能只关注 表层土壤的修复而忽视其修复过程中的地下水渗 滤风险。

2） 尽快制定和完善污染场地修复环境风险评 价系统及相应的控制措施，为日后土壤修复的环 境风险评估提供理论基础。

1. 缓释螯合剂增强植物修复重金属污染土壤 技术具有巨大潜力，采用可生物降解缓释螯合剂 将取得更佳效果，应该在此方面进行深入研究。
2. 选用土壤修复材料时尽可能选择经济合理 并可生物降解的材料，避免其渗滤到地下水造成 二次污染。

参考文献

1. HUANG S S, LIAO Q L, HUA M, et al. Survey o! heavy metal pollution and assessment o! agricultural soil in Yangzhong district,iangsu Province, China[J]. Chemosphere, 2007,67(11)： 2148-2155．
2. SUN Y, ZHOU Q, XU Y,et al. Phytoremediation for co- contaminatedsoilso!benzo[a.pyrene (B[a.P) andheavy metals using ornamental plant ***Tagebes paLula*** Journal o! Hazardous Materials,2011,186(2-3)：2075-2082．

SAN N K, CELEBIOGLU A, SARIOGLU O F, et al. En­capsulation o! living bacteria in electrospun cyclodextrin ultrathin !ibers!orbioremediationo!heavy metalsandreactivedye!rom wastewater「J]. Colloids Sur! B Biointerlaces,2018,161:169-176.

1. DIXITR,MALAVIYA D,PANDIYAN K,etal.Bioremedi- ation o! heavy metals !rom soil and aquatic environment： An over­view o! principles and crteria o! fundamental processes [J]. Sus- tainability,2015,7(2) 2189-2212.
2. 李佳 , 曹兴涛 , 隋红 , 等 . 石油污染土壤修复技术研究现状与 展望[]•石油学报(石油加工)，2017,33():811-833.
3. ZHAIX,LIZ, HUANG B,etal．Remediationo! multiple heavy metal-contaminated soilthrough the combination o!soil washing and ***in siiu*** immobilization]〕]. Science o! the Total Envi- ronment,2018,635：92-99．
4. HEJ,HEC,CHEN X,etal Comparativestudyo!remedia- tiono!Cr(VI)-contaminatedsoilusingelectrokineticscombined withbioremediation[J] EnvironmentalScience ＆ Po**l**ution Re- search,2018,25(18) 1-8．
5. 蒋小红, 喻文熙,江家华,等．污染土壤的物理／化学修复 [J] 环境污染与防治,2006,28(3) 210-214．
6. DU YJ,JIANG NJ,SHENSL,etal Experimentalinvesti- gationo!in!luenceo!acidrainonleachingandhydrauliccharac- teristics o!cement-based solidi!ied／stabilizedlead contaminated clay [J] Journalo!Hazardous Materials,2012(10) 195-201．
7. XUE Q,WANG P,LI J S,et al. Investigation o! the leaching behavioro!leadin stabilized／solidi!ied waste using atwo-year semi-dynamicleachingtest[J] Chemosphere,2017,166：1-7．
8. 王洪才．重金属污染土壤淋洗修复技术和固化／稳定化修复 技术研究「D].杭州：浙江大学,014.
9. DROZDJ M．Improved method!orinsitusoilremediation： Themodi!ied “LasagnaTM”process[P] EnvironmentalProtec- tion Agency，68098119 ，2017．
10. MAO X,JIANG R,XIAO W,et al. Use o! surfactants lor the remediation o! contaminated soils: A review]〕]. Journal o! Hazardous Materials,015,285 ：419-435.
11. NAVARRO A,CARDELLACH E,CANADAS I,t al. So- larthermalvitri!icationo!miningcontaminatedsoils]J] Interna— tionalJournalo!MineralProcessing,2013,119(9)65-74
12. 邵云,郝真真,王文斐,等 土壤重金属污染现状及修复技术 研究进展「J].北方园艺,016(17) 193-196.
13. BOLAN N,KUNHIKRISHNAN A,THANGARAJAN R, etal Remediation o!heavy metal(loid)scontaminatedsoils-to mobilizeortoimmobilize？[J] Journalo! Hazardous Materials, 2014,266(4)141-166
14. SUNJ,LIX,AIX,etal E**!**icientremovalo!cadmium!rom soil-washing ellluents by garlic peel biosorbent[J]. Environmental Science ＆Po**l**ution Research International,2018(4)1-11
15. 崔俊义,马友华,王陈丝丝,等 农田土壤镉污染原位钝化修

复技术的研究进展「]•中国农学通报,017,3(30):79-83.

「19] LI Y,WANG J,SU Y,et al. Evaluation o! chemical immobr lizationtreatments!orreducingarsenictransportinred mud[J] EnvironmentalEarthSciences,2013,70(4) 1775-1782

1. BASTA N T,MCGOWENSL Evaluationo!chemicalim- mobilizationtreatments!orreducing heavy metaltransportina smelter-contaminatedsoil[J] EnvironmentalPo**l**ution,2004,127

(1) 73-82

1. 孙涛, 陆扣萍, 王 海 龙 不同淋洗剂和淋洗条件下重金属污

染土壤淋洗修复研究进展「]•浙江农林大学学报,015,2(1)： 140-149

「22] GONG Y,ZHAO D,WANG Q,et al. An overview o! !ield- scalestudiesonremediationo!soilcontaminatedwithheavymet- alsand meta**l**oids： Technicalprogressoverthelastdecade「J] WaterResearch,2018,147：440-460

「23] ZHU G,GUO Q,YANGJ,etal Washingoutheavy metals !romcontaminatedsoils!romanironandsteelsmeltingsite「J] Frontiers o! Environmental Science & Engineering ,2015,9(4)： 634-641

「24] MOUTSATSOU A, GREGOU M, MATSAS D, et al Washingasaremediationtechnologyapplicableinsoilsheavily po**l**uted by mining-meta**l**urgical activities「J] Chemosphere, 2006,63(10)：1632-1640

「25]陈果.重金属污染土壤化学修复剂的研究进展「].应用化 工,2017,46(9)：1810-1813

「26] KAMBHAMPATI M, VU V. EDTA enhanced phytoremed­iation o! copper contaminated soils using chickpea (***Cicer aeribi- num*** L. ))J]. Bulletin o! Environmental Contamination & Toxi- cology,2013,91(3)：310-313

「27] 丁竹红,胡忻,尹大强 螯合剂在重金属污染土壤修复中应 用研究进展「]•生态环境学报,009,8(2):777-782.

「28] PETERS R W Chelantextraction o!heavy metals!rom contaminatedsoils「J] Journalo! Hazardous Materials,1999,66 (1-2)：151-210

「29]金依婷，王艳，李轲轲，等.络合剂淋洗Cu污染粉土的土柱 试验研究「J].水文地质工程地质,018,5(2):165-170.

「30] GRCMAN H,VODNIK D,VELIKONJA-BOLTA S,etal Ethylenediaminedissuccinateasanewchelate!orenvironmenta**l**y sa!eenhancedleadphytoextraction「J] Journalo!Environmental Quality,2003,32(32)：500-506

「31] 吴龙华,骆永明,章海波,等 有机络合强化植物修复的环境 风险研究**U**.不同质地对EDTA淋溶土壤中重金属的动态作用 「J] 土壤,2001,33(4)：193-196

「32] KOSB,LESTAN D In!luenceo!abiodegradable (「S,S]- EDDS)andnondegradable (EDTA)chelateandhydrogelmodi- !iedsoilwatersorptioncapacityonPbphytoextractionandleac- hing「J] Plant ＆ Soil,2003,253(2)：403-411

「33] BEIYUANJ, WUJ,TSANG D Interactionso!Food Waste Compostwith Metalsand Metal-ChelantComplexesduring Soil Remediation「J] Journalo!CleanerProduction,2018,12(4)：225- 230

「34]白薇扬，高焕方，李纲.NTA与EDTA联合施用对茼蒿富集 土壤重金属的影响「J].地球与环境,018,6(2):156-163.

「35] ANDREW-HONG P K,LI C,BANERJI S K,et al Extrac- tion,recovery,andbiostabilityo!EDTA!orremediationo!heavy metal-contaminatedsoil「J] Journalo!SoilContamination,1999,8 (1):81-103

「36] WEN J ,STACEY S P, MCLAUGHLIN MJ,et al Biodeg- radationo!rhamnolipid,EDTA and citric acid in cadmium and zinccontaminatedsoils「J] SoilBiology ＆ Biochemistry,2009,41 (10):2214-2221

「37] SCHMIDT C K,BRAUCH H J Impacto!aminopolycar- boxylatesonaquaticorganismsandeutrophication:Overviewo!a- vailabledata「J] Environmental Toxicology,2010,19(6):620- 637

「38] WANG A,LUO C, YANG R,etal Metalleachingalong soil pro!iles a!ter the EDDS application: A !ield study「J] Envi- ronmentalPo**l**ution,2012,164(1):204-210

「39] YES,ZENGG,WU H,etalBiologicaltechnologies!orthe remediationo!co-contaminatedsoil「J] CriticalReviewsin Bio­technology ,2017 ,37 (8 ):1-15

「40] KHALIDS,SHAHID M,NIAZIN K,etal A comparison o!technologies!orremediationo!heavy metalcontaminatedsoils 「J] Journalo!GeochemicalExploration,2016,182(2017):247- 268

「41] LIU L,LI W,SONG W,etal Remediationtechniques!or heavy metal-contaminatedsoils:Principlesandapplicability「J] Scienceo!theTotalEnvironment,2018,633:206-219

「42] 李玉宝,夏锦梦,论东东 土壤重金属污染的4 种植物修复 技术「]•科技导报,017,5(11):47-51.

「43] BEIYUANJ,TSANG D,VALIX M,etal Combinedappli- cationo!EDDSand EDTA !or removal o! potentia**l** y toxic ele­ments under multiple soil washing schemes「J] Chemosphere,

2018，205：178-187．

1. 刘笑生，陆海鹰，崔红标，等．秸秆生物炭还田应用及环境风 险综述「〕]•江苏农业科学,018,6(4):28-3.
2. FOLI G,GAWU S K Y. Using an integrated method !or the determination o!environmental TCLP arsenic!orsulphide-rich mine tailing remediation in Ghana, West AIrica[J]. Environmental EarthSciences,2018,77(8):309．
3. 谷庆宝,马福俊,张倩,等．污染场地 固 化／稳定化修复的评 价方法与标准「J].环境科学研究,017,0(5):755-764.

「47]陈祖奇，安丽.稳定化/固化废物中重金属的渗漏行为「J]. 环境污染与防治,2000,22(2):5-8．

「48] 国家环境保护局科技标准司．污染地块风险管控与土壤修 复效果评估技术导则(试行)：IJ 25. 5—2018,S]北京：中国标 准出版社,2018．

「49] 李婷婷,钟茂生,姜林,等．土壤污染对地下水影响的2 种 评 估方法的应用与比较「J].环境科学研究,013,6():793-799.

「50] 李婷婷 基于保护地下水的土壤筛选值推导方法应用研究 「D] 北京:首都师范大学,2013

「51] BURNELL D K,COOPER J,XU J,etal Graphical User Inter!ace!or AT123D-AT Solute Transport Model「J] Ground Water,2016,54(3):313-314

「52] 陆雅茵 螯合诱导植物提取修复的重金属渗漏及地下水环 境影响「D].广州:广州大学,017.

「53] KOS B,LESTAN D Soilwashingo!Pb,Znand Cdusing biodegradablechelatorandpermeablebarriersandinducedphyto- extraction by ***Cannabis saliva*** [J]. Plant and Soil, 2004,263 (1)： 43-51

[54] O’CONNOR D, HOU D, OK Y S, et al. Sustainable in situ remediationo!recalcitrantorganicpo**l**utantsingroundwaterwith contro**l**edrelease materials: Areview「J] Journalo! Contro**l**ed ReleaseO**!**icialJournalo!theContro**l**ed ReleaseSociety，2018， 283:200．

「55] KAMBHU A，GREN M，TANG W， et al Remediating 1， 4- dioxane-contaminated water withslow-releasepersul!ateandze- rovalentiron「J] Chemosphere2017，175:170-177．

「56] SHIBATA M，KONNO T，AKAIKE R，et al Phytoremedi- ationo! Pb contaminated soil with polymer-coated EDTA「J]． Plant＆Soil2007，290(1/2):201-208．

「57]谢志宜，陈能场.缓释微胶囊EDTA强化玉米提取土壤中铅 铜的效应研究「J].生态环境学报，2012,21():1125-1130.

「58] LIH,WANG Q,CUIY,etalSlowreleasechelateenhance- ment o! lead phytoextraction by corn ***(.Zea mays*** L. ) !rom con- taminatedsoil:Apreliminarystudy「J] Scienceo!theTotalEnvi- ronment,2005,339(1):179-187

Research Progress of Groundwater Leachate Risk During Soil Remediation

HU Deyu,WANG Guanghui,FAN Wengzhe,LUO Qiuyan

(Co**l**egeo! WaterResourcesandEnvironmentalEngineering,EastChina Universityo!Technology,Nanchang,Jiangxi 330013)

**Abstract:**Soil remediation is the process of {ixing, transferring, absorbing, degrading or transforming contaminantinthesoilbyphysical**,**chemicalorbiologicalmeans**,**which wi**l**reducethecontenttoan acceptablelevelorconverttoxicandharm!ulsubstancesintoharmlesssubstances．However**,**improper **‘**repair＇wi**l**becomeapass-through behaviorandcausetherisk o!leachateo!groundwater Inthis review**,**theleachateriskandtheriskassessmentmethods!orgroundwaterduringphysicalrestoration**,** chemical remediation**,**and bioremediation process in soil remediation techniques werereviewed．The regulationo!thereleaseo!heavymetals!romtheslowreleasechelatingagentduringsoilremediation andthereductiono!therisko!groundwaterleachatewereintroduced．Fina**l**y**,**the!uturedevelopment directiono!soilremediationwassummarized．

**Keywords：** soil remediation； groundwater leachate risk； risk assessment； sustained release chelating agent