**doi：0. 3969/j. issn. 1007**-**7545. 2021. 0& 004**

铀矿区放射性污染土壤修复技术研究进展

高柏1**，**2，高杨2，蒋文波2，张海阳2，史天成2，刘圣锋2，方正2，丁燕2

(1.东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室，南昌330013；  
2.东华理工大学水资源与环境工程学院，南昌330013)

摘要：放射性核素导致的土壤污染受到人们的日益关注，铀矿山生产引起的矿区生态环境污染治理与修 复已成为环保行业研究热点。铀矿区核素污染土壤修复技术包括物理修复技术、化学修复技术和生物 修复等。土壤挖掘、覆盖和清洗是应对突发事件的首选方法，可发挥拓展污染场地的实际利用功能。对 复杂的污染场地应当根据实际情况，发挥多学科交叉的作用，制定具有成本效益和环境友好的不同的修 复技术方案，成为铀矿区放射性污染土壤修复技术的主流选择。系统总结了物理修复技术、化学修复技 术和生物修复技术的基础理论、作用机制和发展现状，探讨对不同场地修复需求制定特定的修复方案路 径，展望铀矿区核素污染土壤修复标准制定方向，为铀矿区放射性核素铀污染土壤修复提供理论支撑和 指导依据。

关键词：铀矿区；放射性核素；物理技术；化学技术；生物技术

中图分类号：X52 文献标志码:A 文章编号：1007-7545(2021)08-0028-09

Research Progress on Remediation Technology of  
Radioactive Contaminated Soil in Uranium Mining Area

GAO Bai**1，**, GAO Yang**2**, JIANG Wen**-**bo**2**, ZHANG Haryang**2**,  
SHI Tian-cheng**2** , LIU Sheng-feng**2** , FANG Zheng**2** , DING Yan**2**(1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment , East China University of Technology , Nanchang 330013 , China；  
2. School of Water Resources and Environmental Engineering , East China University of Technology , Nanchang 330013 , China)

**Abstract**: Soil pollution caused by radionuclides has been increasingly concerned by government and public Treatmentandremediation of ecologicalenvironmentalpo**l**ution in mining areascausedbyuranium mineproduction has become a research hotspotin environmental protection industry Remediation of radionuclidecontaminatedsoilinuraniumoreareaincludesphysicalremediation，chemicalremediationand bioremediation Soil excavation, mulching and cleaning are the first choice to deal with emergencies,

which can play a role in expanding practical use of contaminated sites For complex contaminated site, it is necessarytodevelopdi**f**erentremediationtechnologyschemeswithcostbenefitandenvironmentfriendly according to actual situation，which wi**l** become mainstream choice of remediation technology of radioactivecontaminatedsoilinuranium miningarea.Basictheory，function mechanism and development current situation of physical repair technology，chemical remediation and bioremediation technology are systemly summarized. Study according to different field repair needs to formulate specific fix path is

收稿日期：2021-05-31

基金项目：国家自然科学基金资助项目(41162007,41362011) 作者简介：高柏(1964-),男，江西九江人，教授 discussed. District standards development direction of uranium ore is prospected. Direction of setting standards for remediation of radionuclide contaminated soil in uranium mining area is prospected It can provide theoretical support and guiding basis for bioremediation of uranium ore district radioactive nuclide uraniumcontaminatedsoil．

**Key words**/ uranium mining area； radionuclides； physical technology； chemical technology； biotechnology

环境 中的放射性核素是 指火山 活动、侵蚀、风化 等自然过程产生的放射性物质，主要包括铀（U）、钍 （Th）、镭（Ra）、氡（Rn）、铅（Pb）和钋（Po）等同位素。 人为活动导致自然产生的放射性物质泄漏到环境 中，包括核武器试验、矿山采选冶、核电站运营、核废 料处置、核事故、磷肥生产、化石燃料燃烧以及医用 或研究用放射性同位素的生产和应用[**1**]。 未受人类 活动影响的地区， 铀的流入主要与其溶解或胶体物 种有关， 矿山附近， 其运输以铀矿物颗粒的形式发 生[**2**]。 铀矿尤其是低品位铀 矿的开发利用， 必然会 产生大量废石和铀 尾矿， 如我国铀矿床以中低品位 为主，品位为0. 1 %〜0. 3 %，占总储量的60 %。由 于铀具有放射性和 化学毒性， 大量且连续的生产势 必会导致环境污染， 并对人类造成严重和长期的威 胁[**3**]。 铀矿山受到放射性核素土壤污染的 场地， 经 过长时间的自然淋滤、人工搬运等自然和人为因素 作用下， 可能进一步形成地下水的污染源， 对铀矿区 的居民造成潜在的危害。 土壤重金属及放射性核素 污染是公认的难去除的 污染物， 但科学工作者持续 关注并积极寻求突 破 土 壤 修 复 技 术， 根 据 污 染土 壤 实际情况，探索不同技术实践应用的适宜性， 为铀矿 区放射性污染土壤修复发展提供理论和技术依据。

1. 铀矿区土壤中核素来源及形态特征

**1.1**铀矿区土壤铀污染

地壳中铀的平均浓度估计为2. 7 mg/kg⑷，部 分国家土壤中铀的背景值超过2. 7 mg/kg,其中中 国土壤中铀的背景值为3 13 mg/kg，铀矿开采是矿 山土壤中铀污染的主要来源。 世界铀矿生产主要来 自于14个国家，全球的铀产量为54 752 t,其中哈 萨克斯坦的铀产量最高，占据41. 66%，其次为加拿 大（1267%） 和 澳大利亚 （1208%）。 然 而， 我 国 2019 年 的 铀 产 量 占 全 球 总 产 量 的 344%， 共 计 1885t， 排名第八位，2025 年国内需求预计可达到

1. 85万t,到2030年将达到2. 01万t〜2. 40万t， 国内铀资源需求将持续增加。

铀矿的开采会给土壤环境带来一定污染问题， 国外关于铀矿区及其周边的污染调查有不同程度的 研究。GONGALSKY等旧研究表明，铀矿区周边 草原土壤铀的富集率高达600倍；FERNANDO 等[**6**]发现， 西班牙西部土壤部分采样点铀的浓度远 远高于平均水平， 通过计算污染因子和地质累积指 数，表明了大多数样品的土壤受到了铀的中度污染； 姚高杨等[**7**]对我国南方某铀尾矿区周边农田土壤中 放射性核素污染进行了调查研究， 运用内梅罗综合 污染指数得出研究区 土壤中 ， 放射性核素污染指数 远超出了重度污染的临界值； 刘平辉等[**8**]分析评价 了华东某轴矿区的水稻土中铀污染情况， 得出研究 区水稻土中铀的平均含量是全国土壤铀背景值的 882 倍。 因此， 铀矿山开采后带来土壤环境中 铀 污 染的环境污染问题不可忽视。 不同国家土壤中铀的 背景值见表1。

表**1** 不同国家（地区）土壤中铀的背景值

**Table 1 Background values of uranium in  
soiSs of different countries**

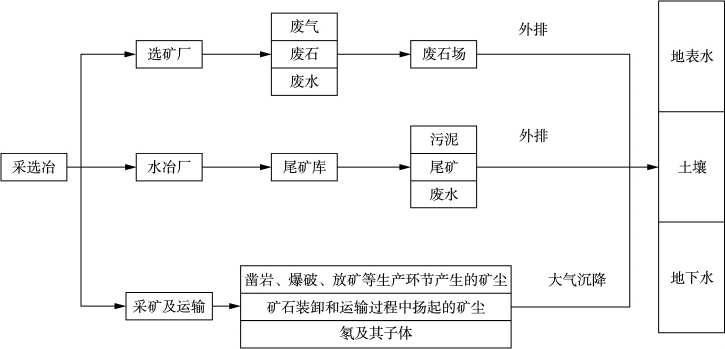
|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 国家（地区） | 铀含量/（mg • kg"1） | 参考文献 |
| 智利 | 079 | [9] |
| 德国 | 19 | [10] |
| 瑞士 | 225（耕地土壤）/193（草地） | [11] |
| 英国 | 26 | [12] |
| 西班牙 | 135 | [6] |
| 日本 | 174 | [13] |
| 美国 | 35 | [14] |
| 葡萄牙 | 251 | [15] |
| 印度 | 11 | [12] |
| 波兰 | 079 | [12] |
| 欧洲 | 246（底土）/237（表土） | [16] |
| 加拿大 | 12 | [12] |
| 中国 | 313 | [17] |

**1.2**铀矿区土壤铀的来源分析

我国核工业有60 多年的发展历史， 由于铀矿开 采的历史和技术等原因， 铀矿区放射性污染较为普 遍，局部较为 严重[**18**]。 在生产铀 的 任何一个环节， 包括铀矿山投入开采、含铀矿石运输、矿石或废渣堆 积、近地冶炼、资源枯竭退役等， 都会对铀矿区产生 污染[19－20]。

铀矿区的污染来源有多种（见图1）。 含铀的放 射性废水未经处理或处理不彻底排放到地面或者直

接打入地下，造成铀矿区周围水体污染。矿物开采 时，钻孔、爆破产生的粉尘颗粒难以控制，随空气流 通落在铀矿区周 围，污染环境的 同 时还易被人体吸 入。在矿物的运输和装卸车的过程中，会产生扬尘与 矿物遗落，使铀矿区周围道路附近铀含量升高。铀矿 石水冶、堆浸过程中产生的酸性排水，会使矿区周围 水体、土壤pH降低，铀含量增高，在氧的参与下核素 氧化并与其他金属发生反应，迁移性变高［**21**］。冶炼 加入适当的试剂， 如防垢剂、 助渗剂等［**22**］， 使得矿物 废渣含铀量较小，但数量巨大。如果含铀尾矿废渣长 期露天堆放，经过风化、雨水与地表径流冲刷与浸泡 等，矿物废渣中 的放射性元素会被淋出［**23**］。铀 在堆 积底部的土壤中的含量与分布状态会出现改变， 并被 植物吸收造成污染。某些铀废矿在遗弃时并没有进 行治理或者彻底治理，仍存在废弃矿石乱堆乱弃等现 象，使得矿区铀污染范围与浓度进一步扩大。



图**1** 铀矿区土壤放射性核素来源

**Fig 1 Sources of soil radionuclides in uranium mining areas**

**1.3**铀矿区土壤中铀的形态特征

土壤中 铀 的 形态主 要为 ＋4 价和 ＋6 价， 其中 u**4**+毒性较高，对人体健康危害较大**［24**］,故分析土 壤中铀的化学形态变化十分必要。铀是一种相对活 泼的放射性核素， 其形态变化易受外部因素影响。 氧化还原条件对铀在土壤环境中的形态变化发挥重 要作用**［25**"**26**］。氧化条件下，铀酰（UO2**2+ ）**形成高流 动性的化合物，而U**4+**还原条件下被氧化成稳定的 氧化铀酰（UO2）。同时土壤环境中，铀形态的变化 与土壤中有机质有一定关系，在存在有机化合物的电 子供体下，铀（巾）很容易还原为铀**（N**）**12**〕。因此，氧 化还原条件对土壤中铀的形态变化有影响作用。

土壤酸碱度对铀 形态也存在影响， 酸碱度控制 土壤中溶解度、 吸附和 解吸之间的 平衡［**27**］ ， 表明 土 壤酸碱度是控制土壤中铀形态变化的因素之一。 铀 在碱性土壤中的迁移率高于在酸性土壤中 ， 随着酸 碱度的增加， 铀被迁移并释放到土壤溶液中［**28**］。 碱 性环境下，促进含铀矿物溶解，U（N）向U5）的氧 化增强。 微生物主要通过其产生的还原酶、 蛋白质 以及发生 电子 传递条 件， 进而 使土 壤 中 铀 的 形 态 UCW）还原为U（N）**2**吨。微生物还有可能通过磷 酸化酶过程与磷酸盐等无机配体络合沉淀铀（巾），并 形成不溶于水的铀的磷酸沉淀物， 铀发生沉淀作用 也可能与微生物细胞壁的面积及组成有关［**31**］。 土 壤中有机质可吸附大量的铀离子， 其表面各种官能 团决定了有 机质与 铀 离子的 结合能力［**32**］。 土壤中 有机质的含量还会影响土壤中的*E*/i,有机质含量的 增加可以改变土壤*Eh*以促进U（巾）的减少。

氧化还原条件、酸碱度、微生物和有机质的变化 与铀离子的相互作用， 如/还原、吸附和沉淀， 从而导 致了铀形态的变化［**33**］。

1. 铀矿区放射性污染土壤修复技术
2. 物理修复技术

物理修复方法主要以改变土壤物理性质来对铀 污染土壤进行修复。 常用的方法主要为客土法、 热 处理法、电动修复法和稳定固化法等。

211 工程修复技术

工程修复技术又分为客土法和换土法，主要是 通过对放射性核素污染的搬运、覆盖填埋等手段， 隔 绝其接触地下 水 和 植物， 阻滞其 进 入生 态 圈的 速 率［**34**］。 客土法具有修复周 期短， 性能强等优点。 但 客土法工程量较大，投资高，仅限于污染浓度低、污染 范围较小的场地，并不能阻止污染物侵染地下水［**35**］。

2 12 电动修复

电动修复技术指是通过将电极插入土壤中，利 用土壤中的电解质溶液形成电流，从而达到去除重 金属及放射性核素污染的目的。电极必须是惰性材 料且廉价，石墨、不锈钢、钛或导电塑料是合适的材 料，从而有效去除土壤中重金属及放射性核素污染 物〔旳。电动修复技术适用于小范围黏质污染土壤 的修复，具有不扰动土层、简易方便和环保可再生等 优势，主要影响因素为土壤中的导电介质、电荷数 量、粒径、酸碱性、含水量及地下水位等［**37**］。 2 13 热处理法

热处理法是指利用 外界辅助方式加热土壤，导 致土壤颗粒表面放射性污染物以晶体的形态进入土 壤内部结构中，从而降低放射性物质的迁移性能和 生物有效性。 但热处理法在处理过程当中改变土壤 理化性质，主要适用于土壤中含挥发性的污染物等， 而重金属和放射性核素等效果不明显，且处理成本 较高。

2 14 固化稳化法

固化稳化法通常分为固化和稳化，主要通过改 变废物的物理和化学性质来减少其溶解度或化学反 应性，通过将金属转化为不溶的沉淀，或通过金属离 子与水泥水化产物（如钙矾石和硅酸钙）之间的相互 作用（如吸附和离子替代）来实现的，以实现低危害 化和低风险［**38**］。 但固化稳化法的主要缺陷表现 为 土壤结构发生改变，导致土壤肥力下降，且难以将放 射性核素完全稳定，固定化的产物也无法应用于其 他工业生产，修复成本较高。 同时修复后产物中的 放射性物质含量并未降低，修复效果持久性有待 考究［39］。

2 15 隔离修复法

土壤隔离指利用防渗材料将放射性污染土壤区 域进行分割、隔离的一种物理方法，仅仅局限于暂时 性的危害隔离和防治污染环境。 如李鹏峰等［**40**］运 用熟石灰 、坡缕石、细沙等按比例混合配置隔离层对 某矿区重金属污染土壤进行隔离修复研究，研究表 明，隔离层可有效降低其上植土层中种植作物内的 汞、铅和镉等含量，且适当提高熟石灰含量可有效阻 止污染因子向上迁移。

1. 1. 6玻璃化修复

原位玻璃化修复技术是将石墨电极插入放射性 土壤当中，将受污染的土壤加热至熔融后，再断开电 极电流使土壤缓慢冷却，使放射性物质固定在玻璃 体中，最终形成玻璃态物质。 曹骐等［**41**］针对放射性 岩棉进行玻璃固化参数优化，发现优化后配方工艺 制备的玻璃体均匀性好，玻璃化程度高，表明放射性 岩棉的玻璃固化工程应用的可实用性。 但玻璃化技 术其成本高、土壤不能重复利用，仅适用于小面积污 染土壤 ，且在实际应用中导电材料难以使土壤均匀 熔融。

1. 化学修复技术
2. 化学清洗技术

土壤 放射性核素 污 染 程度较高时，特别是多 重 重金属污染时，会导致土壤质量的不可控变化，为此 必须将受污染的土壤排除在农业用途限制之外，以 免造成地下水污染的危险，其中较为适宜的修复技 术为化学清洗修复技术。 土壤化学清洗修复技术是 一个物理或化学过程，旨在有效地去除高含量的多 种重金属和放射性核素污染污染物土壤。 土壤清洗 通常以物理分离、化学清洗、物理分离后化学清洗的 方式进行［42］。

国际上该技术目前研究较为成熟，但国内针对 性的研究和实际生产相对不足。 1994年，美国北卡 罗来纳州海军陆战队勒琼营进行了土壤含水层修复 示范项目，主要采用表面活性剂加强的原位土壤淋 洗系统，土壤淋洗系统包括3 个注射井、6 个提取井 和2 个液压控制井。 韩国研发的土壤清洗—电动去 污设备是一种用于短时间内从大量土壤中去除铀且 去除效率高的设备，由土壤清洗设备、电动分离设备 和去除铀的废液处理设备组成。 另 外，废 液 处理 设 备由沉淀设备、浓缩设备和压滤机组成。

1. 磁清洗技术

磁清洗技术是利用磁性纳米颗粒作为吸附剂材 料去除放射性核素污染土壤中的铀、钍、镭等污染元 素的处理方 法。 FAN 等［**43**］研 究 表 明，利 用 磁 性 螯 合基功能材料对土壤中重金属有较好的去除效果； 翁仁贵等［**44**］研究了球形磁性活性炭处理土壤含水 率、磁性活性炭投加量和停留时间对土壤铅去除效 率的影响，结果表明，磁性活性炭对模拟土壤中的铅 吸附能力可达3. 5 mg/g左右；BOENTE等〔**45**〕研究 结果表明，纳米零价铁结合高梯度磁分离能够将砷、 铜、汞、铅、锑等重金属高效富集在有磁部分进而与 土壤分离 。 上述研 究工 作 表 明 ，利用微纳米磁性功 能材料可清洗土壤 中 重金 属 ，对比化学清洗技术具 有一定的优势，主要体现在（整体技术层面）/易于实 现与土壤分离，大幅减少铁、钙等元素流失，同时提 高放射性核素的去除率，可反复使用，且容易再生， 进而降低成本，有利于实现铀的资源化利用，避免二 次污染；但也有局限性（选用材料层面）/土壤中伴生 金属的相互作用 机 制 不 明 确，选 择 性、稳 定 性、粒 径 分布范围等均可能存在特殊要求，土壤固液体系相 比复杂于水环境，铀酰离子的竞争吸附性能影响清 洗效率。

1. 超声／微波加热法

超声／微波加热法是指利用超声波对污染物进 行辅助处理，在这个过程中也会产生热能、物理机械 能，这样会对污染物进行物理解析、沉淀以及化学氧 化的作用，可以将污染物转化成小分子的化合物以 方便去除。与传统化学淋洗技术相比，超声强化辅 助可产生巨大空化、机械震荡及热效应，具有良好的 改进性能，与传统淋洗相比具有较好的经济效益且 省时高效［**46**］。超声波能够通过积极地搅动溶液来 破坏粒子，通过对液体或泥浆施加高强度和高频的 声波，可以实现亲密的混合和强大的物理和化学反 应，颗粒破坏暴露了新鲜的表面，从而使清洗剂能够 穿透颗粒。

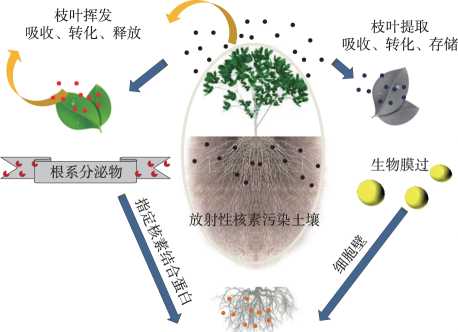
综上所述，国内外在超声波辅助淋洗方面进行 大量研究，但大多应用于化工厂及水体领域，对象多 为重金属和有机物，关于铀尾矿库周边放射性核素 污染土壤超声强化淋洗的研究相对较少，该类技术 相比其他手段，工艺更为简单成熟，对于实现产业转 化而言，操作性和实用性更强。

1. 生物修复技术
2. 植物修复技术

植物修复法是指运用植物降解、提取或遏制土 壤或水中的外源性物质［**47**］。目前许多植物可用来 修复放射性核素污染土壤，印度芥菜、向日葵、贝母、 亚麻、蕨类等，其主要修复过程见图2。植物修复技 术的优点在于其处理成本低、修复更便捷、能最大限 度地降低污染物浓度、能够改善生态环境、美化环 境；但也存在修复周期长、修复效果单一、深层土壤 修复能力差等缺点。为此，许多学者在超富集植物 筛选和植物提取强化等方面进行了大量研究，优化 和完善植物修复技术。

1. 微生物修复技术

土壤 微生物指土 壤 中 形体微小、结构简单的 生 物，主要包括细菌、真菌、藻类等，是土壤生命活体的 主要组成部分［**48-49**］。微生物修复技术利用土壤中 的某些微生物与放射性重金属通过络合、螯合、氧化 还原等化学反应，使放射性核素被氧化、还原、沉淀、 价态转换等，从而降低土壤中重金属的毒性和生物 有效性。有研究表明，细菌表面含有的硫酸盐、氨基 和羧基等官能团通过吸附作用，可去除放射性核素， 真菌能够通过细胞内隔离和细胞外隔离作用，从环 境中去除放射性核素，藻类可以有效地去除受污染 水域中的放射性核素，失活藻细胞比活性藻细胞积 聚更多的放射性核素。



根系聚集 吸收、转化、存储

图 **2** 植物修复过程

**Fig 2 Phytoremediation process**

2 33 动物修复技术

动 物 修复 主要是 指 动 物 在污 染 水 体、土 壤 中 生 长活动时。对环境中污染物质进行富集从而起到修 复土壤作用。目前针对放射性土壤动物修复技术 中，研究最多的就是蚯蚓，蚯蚓可以通过摄食放射性 土壤等方式［**50**］，对放射性核素进行累积，也可以和 土壤中的重金属进 行 络合 反 应 ，改变重金属的存在 形态，同时也可以促进植物修复过程中对重金属的 吸收［**51**］。但目前动物修复技术相对植物修复和微 生物修复技术来说应用得比较少，主要原因在于动 物修复技术虽然具备成本低、富集量高等特点，但在 实际应用中生物体的控制相对比较复杂，对生长环 境的要求也比较多，生物体内作用机制尚未明确，难 以得到广泛应用 。

1. 问题与探讨

**31** 放射性污染土壤修复技术适宜性

对比国内外污染土壤修复技术的基本理论、研 究方向和技术方法，目前针对铀矿区放射性污染土 壤修复技术较常规重金属污染土壤修复技术相对落 后，相关基础研究和应用基础研究主要借鉴重金属 的处理方法，尤其放射性污染土壤的危害本就不同 于重金属污染土壤，需要引起更多的关注。现行的

铀矿区放射性污染土壤修复技术分为物理修复技 术、化学修复技术和生物修复技术三大类型，三种方 法各有优缺点，针对的场地实际需求选择相应的修 复手段，进而制定唯一的修复方案视为合理科学的 前提条件。需要进一步了解更多的组合方式，来更 好地了解联合修复技术的作用 机制和途径，应当作 为发展铀矿区放射性污染土壤修复技术的热门。

邹兆庄等［**52**］通过建立矩阵进行计算，经层次分 析可以看出采用化学方法对铀矿山污染场地进行修 复要明显优于使用 物理方法，适用于铀矿山污染场 地的修复技术依次为/土壤清洗、堆浸去污、高 梯度 分离、原位玻璃固化；谢广智等［**53**］制作了现有放射 性污染土壤修复方法的 综合评价矩阵，以期为 相关 工作的推进提供参考。通过场地污染程度、污染面 积进而筛选较为合适的修复技术分类如表2 所示。

表**2**放射性污染土壤修复技术适宜性

**Table 2 Suitability of remediation technology**

**for radioactive contaminated soil**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 场地污染程度 | 污染面积 | 适宜修复技术 |
| 较重 | 较小 | 异位土壤淋洗法或工程法 |
| 较轻 | 较大 | 原位土壤淋洗、工程法和植物修复相结合 |
| 极轻 | 巨大 | 植物修复为主 ，工程法配合 |

综合所述，尽管目前尚未出现一种最优方法对 放射性污染土壤进行修复，单一技术修复放射性土 壤效果不十分理想，联合修复技术应用是必然选择。 研究尺度逐步由实验室—中 试—地块尺度—矿山， 这种模式将是铀矿山放射性污染土壤发展的主要路 线和途径，完善整体试验的作用机制和工艺包技术。 地质学、生态学、农学、林学、环境科学、材料科学、公 共卫生等多学科交叉研究是未来发展趋势。主要的 治理模式应采取末端治理—清洁生 产—绿色矿 山 为 宜 。

**32** 修复规范和修复效果评价标准 修复依据的判定和评价技术的导则作为科研工 作者主要参考和衡量的 标准，对制定修复方案计划 和开展科研问题探讨起到至关重要的作用 。目前我 国已颁布多项国家土壤环境保护标准、有关核与辐射 安全监督与执法的管理要求、铀矿冶环境辐射防护标 准、核设施安全审评和行政审批流程等标准规范，但 其中均不包含铀矿山放射性核素污染土壤的修复标 准，故可见相关标准规范制定的问题亟待解决。

4结语

尽管目前尚未出现一种最优方法对放射性污染 土 壤进行修复 ，单一技术修复放射性土壤效果不十 分理想，联合修复技术应用是必然选择，主要治理模 式应采取末端治理—清洁生产—绿色矿山为宜。地 质学、生态学、农学、林学、环境科学、材料科学、公共 卫生等多学科交叉研究是未来发展趋势。同时，国 家应抓紧铀矿山放射性核素污染土壤的修复规范和 修复效果评价标准的制定与应用。

参考文献

1. YAN LJ, LE QUYET V, SONNE C, et al.

Phytoremediation of radionuclides in soil, sediments and water [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 407/24771. DOI： 10. 1016/j. jhazmat. 2020. 124771.

1. MARTIN A, HASSAN-LONI Y, FICHTNER A, etal Anintegrated approach combining soil profile， recordsandtreeringanalysistoidentifytheoriginof environmental contamination in a former uranium mine

( Rophin，France ) [J ]．Science of the Total Environment, 2020, 747： 141295. DOI： 10. 1016/j. scitotenv. 2020. 141295.

1. YIN M L,ZHOU Y T,TSANG DC W,et al. Emergent thallium exposure from uranium mill tailings [J]. Journal ofHazardous Materials，2020，407(1)：124402．DOI： 10．1016/jjhazmat2020124402．
2. TAYLORSR．Trace element abundances and the chondriticearth model[J] Pergamon，1964，28 (12)． h**t**ps：//doiorg/10．1016/0016-7037(64)9014．
3. GONGALSKY K B. Impact of pollution caused by uraniumproductiononsoilmacrofauna[J] Environmental Monitoring andAssessment 2003，89(2)：197-219．
4. FERNANDO S，ELENA G P，ANTONIO M，etal． Concentrationofuranium inthesoilsofthe westof Spain[J] Environmental Po**l**ution 2018 236：1-11．
5. 姚高扬，华恩祥 ，高 柏，等 ．南方某铀尾矿区周边农田土 壤中放射性核素的分布特征生态与农村环境学 报，2015，31(6)：963-966．

YAO G Y, HUA E X, GAO B, et al. Distribution characteristicsofradionuclidesinfarmlandsoilaround a uranium tailings mine in southern China[J] Journal of Ecology and Rural Environment，2015，31 (6 )： 963-966．

1. 刘平辉，魏长帅，张淑梅，等．华东某铀矿区水稻土放射

性核素铀污染评价[J]. 土壤通报，2014 , 45 ( 6 )： 1517-1521．

LIU P H,WEI C S, ZHANG S M,et al. Evaluation of radionuclide uranium po**l**ution in paddy soil of a uranium mine area in East China [J ] Soil Bu**l**etin，

2014,45(6):1517-1521.

1. PINTO M C, FERREIRA D, SILVA M, et al. Estimated background values maps of uranium in Santiago Island topsoil and stream sediments [J]. ProcediaEarthandPlanetaryScience,2014,8:23-27．
2. SUN Y, WU B, AMELUNG W, et al. Non-critical uranium accumulation in soils of German and Danish long-term fertilizer experiments [J]. Geoderma, 2020, 370 ： 114336. DOI：10. 1016/j. geoderma. 2020. 114336.
3. BIGALKE M, ULRICH A, REHMUS A, et al. Accumulationofcadmium anduraniuminarablesoils in Switzerland[J]. Environmental Pollution, 2017,221: 85-93
4. VODYANITSK**I**Y N Chemicalaspects of uranium behaviorinsoils：Areview[J] Eurasian SoilScience， 201144(8)：862-873
5. SAHOO S K，HOSODA M，KAMAGATA S，etal Thorium， uranium and rare earth elements concentrationin weatheredJapanesesoilsamples[J] NuclearScienceandTechnology2011：416-419
6. BERN C R, WALTON-DAY K, NAFTZ D L. Improved enrichment factor calculations through principalcomponentanalysis：Examplesfromsoilsnear breccia pipe uranium mines，Arizona，USA [J ] Environmental Po**l** ution 2019 248：90-100
7. NEIVA A，CARVALHO P，ANTUNES I，etal Contaminated water stream sedimentsandsoilsclose to the abandoned Pinhal do Souto uranium mine， central Portugal [J ] Journal of Geochemical Exploration 2014 136(1)：102-117
8. SALMINEN PR The distribution of uranium over Europe：geologicalandenvironmentalsignificance[J] AppliedEarthScience2003，112：3
9. XU N, WEI F S, TEN E J, et al. Evaluation of indigenousconcentrationsofuranium andthoriumin soilsofChina[J] CommunicationsinSoilScienceand PlantAnalysis 1993 24：15-16
10. 敏玉.世界铀矿开采现状及发展前景[J]国土资源情 报，2009(5)：27-31

MIN Y Presentsituationanddevelopmentprospectof uranium mininginthe world[J] Landand Resources Information 2009(5)：27-31

1. FOULKES M，MILLWARD G，HENDERSON S， etalBioaccessibilityof U，Thand Pbinsolid wastes andsoilsfromanabandoneduranium mine[J] Journal ofenvironmentalradioactivity2017，173：85-96
2. HARIBALA，HU BT，WANG C G，etal Assessment ofradioactivematerialsandheavymetalsinthesurface soilarounduranium miningareaofTongliao，China[J] Ecotoxicology and Environmental Safety， 2016， 130 ： 185-192
3. JORGE H P，CARLOS E E，AMAURI A M，etalIn situspeciationofuraniumintreatedacidminedrainage using the diffusion gradients in thin films technique (DGT)[J] Chemosphere2017，169(1)：249-256
4. 吴沅陶，孟晋，陈梅安，等 铀矿堆浸工艺中助渗剂应用 的研究[J]铀矿冶，2007,26(2)72-78.

WU Y T，MENG J，CHEN M A，etal Study on permeation-promoter application in heap leaching process of uranium ores [J ] Uranium Mining and Meta**l**urgy200726(2)：72-78

1. 刘娟，李红春，王津，等 华南某铀矿开采利用对地表水 环境质量的影响[J]环境化学，2012,31(7)981-989. LIUJ，LI H C，WANGJ etalInfluenceofuranium miningandutilizationonsurface waterenvironmental qualityin South China[J] Journalof Environmental Chemistry 2012 31(7)：981-989
2. GAO N，HUANG Z，LIU H，etal Advances on the toxicity of uranium to di**f**erent organisms [J ] Chemosphere, 2019 , 237: 12454& DOI： 10. 1016/j. chemosphere2019 124548
3. RINKLEBEJ，SHAHEEN S M，EL-NAGGAR A，

etal Redox-induced mobilization of Ag，Sb，Sn andTl inthedissolvedco**l**oidalandsolidphaseofabiochar- treated and un-treated mining soil [J] Environment International，2020，140: 105754 DOI: 10 1016/j envint 2020 105754 DOI: 10 1016/j envint

2020 105754

1. RINKLEBEJ，SHAHEEN S M Redox chemistry of nickel in soils and sediments: A review [J ] Chemosphere2017，179:265-278
2. SHAHEENS M，ALESSI D S，TACK F M G，etal Redoxchemistryofvanadiuminsoilsandsediments: Interactions with co**l**oidal materials，mobilization， speciation，andrelevantenvironmentalimplications: A review[J] Advancesin Co**l**oidandInterfaceScience， 2019265:1-13
3. SELVAKUMAR R，RAMADOSS G，MENON M P， etal Cha**l**enges and complexitiesin remediation of uranium contaminated soils: A review [J ] Journalof EnvironmentalRadioactivity 2018，192:592-603
4. 鲁霞.环境微生物与铀和汞的相互作用和机理[D]兰 州: 兰州大学，2016

LU X Interaction and mechanism of environmental microbes with uranium and mercury [D] Lanzhou: Lanzhou University2016

1. 刘小红.异化铁还原对Shewanella oneidensis MR-1降 解磺胺类抗生素和还原Cr(M)的影响[D]合肥：安徽 农业大学，2018．

LIU X H．E**f**ect of dissimilated iron reduction on degradation of sulfonamides and reduction of Cr(W)by Shewane**l**a oneidensis MR-1 [ D ]．Hefei： Anhui AgriculturalUniversity，2018．

1. BANALA U K，INDRADYUMNA D N P，TOLETIS R. Uranium sequestration abilities of Bacillus bacterium isolated from an alkaline mining region[J]. Journal of Hazardous Materials，2021，411：125053.DOI：10. 1016／j.jhazmat.2021.125053.
2. CUMBERLAND S A，DOUGLAS G，GRICE K，etal. Uranium mobilityinorganic ma**t**er-richsediments：A review of geologicaland geochemical processes [J]. Earth-ScienceReviews，2016，159：160-185.
3. CHEN L，LIU J R，ZHANG W X，etal.Uranium(U) source，speciation，uptake，toxicity and bioremediation strategiesinsoil-plantsystem：Areview[J].Journalof Hazardous Materials，2021，413.DOI：10.1016／j. jhazmat.2021.125319.
4. 串丽敏，赵同科，郑怀国，等. 土壤重金属污染修复技术 研究进展[J]环境科学与技术，2014,37 (增刊2)： 213-222．

CHUAN L M， ZHAO T K， ZHENG H G， etal． Researchprogressonremediationtechnologyofheavy metalpo**l**utioninsoil[J] EnvironmentalScienceand Technology，2014，37(S2)：213-222．

1. 张淑娟.镉铅污染钙质土化学淋洗修复研究[D].长 沙：中 南大学，2013．

ZHANGSJStudyonchemicalleachingremediationof calcareoussoil po**l**uted by cadmium and lead [D]． Changsha：CentralSouth University，2013．

1. 储陆平，周书葵，荣丽杉，等．电动修复重金属污染土壤 的研究进展[J]应用化工，2020,49(11):2853-2858.

CHU L P，ZHOU S K， RONG L S，etal．Research progress of electro-remediation of heavy metal contaminatedsoil[J] Applied ChemicalEngineering, 2020,49 11)：2853-2858

1. 李智东 nZVI／nHAP 复合材料固定铀尾矿库区土壤 中铀(W)的机理研究[D]湖南衡阳：南华大学,019. LI Z D. Study on the mechanism of fixing uranium(W) insoilofuraniumtailingspondareawithnZVI／nHAP compositematerial[D] Hengyang：NanhuaUniversity, 2019
2. 王锋,张顺力,王宏杰,等 河道污染底泥重金属稳定化 药剂研究进展[J]净水技术，2020,39(7):92-100.

WANGF,ZHANG S L, WANG H J,etal Research progressofstabilizingagentsforheavy metalsinriver po**l**utedsediment[J] WaterPurification Technology, 2020,39(7):92-100

1. 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

LIUSY，YUECS，PENG B，etal Researchprogress onremediationtechnologiesofchromium-contaminated soil： A review [J ] Chinese Journal of Engineering， 2018，40(11)：1275-1287

1. 李鹏锋，王曙光 矿区重金属复合污染土壤隔离修复实 验研究[J]西部大开发(土地开发工程研究)，2019, 4(8)：29-35

LIP F， WANG S G Experimentalstudyonisolation andremediationofsoilcontaminatedbyheavy metals in mining area [J ] Western Development (Land Development Engineering Research)， 2019， 4 (8 )： 29-35

1. 曹骐，陈云明，张劲松，等 放射性岩棉玻璃固化过程中 的关键工艺参数[J]核化学与放射化学，2017,39(6)： 437-441

CAO Q, CHEN Y M, ZHANG J S, et al. Key technological parameters in the curing process of radioactiverock woolglass[J] NuclearChemistryand Radiochemistry,2017,39(6)：437-441

1. 沈威,高柏,章艳红,等 化学淋洗法对铀污染土壤的修 复效果研 究 [J] 有 色 金 属 (冶 炼 部 分),2019 (11)： 81-86

SHEN W, GAO B, ZHANG Y H, etal Study on remediation e**f**ect of uranium contaminated soil by chemicalelution [J] Nonferrous Metals (Extractive Meta**l**urgy),2019(11)：81-86

1. FAN L R, SONG J Q, BAI W B, etal Chelating captureand magneticremovalofnon-magnetic heavy metalsubstances from soil [J ] Scientific Reports, 2016,6 DOI：10 1038／srep21027
2. 翁仁贵,刘惠萍 球形磁性活性炭制备及对土壤重金属

Pb 的吸附研究 [J] 安全与环境学报,2016,16(5)： 285-289

WENG R G, LIU H P Preparation of spherical magneticactivatedcarbonanditsadsorptionofPbin soil[J] Chinese Journal of Safety and Environment, 2016,16(5)：285-289

1. BOENTE C, SIERRA C, MARTINEZ-BLANCO D, etal Nanoscalezero-valentiron-assistedsoil washing forthe removal of potentia**l**y toxic elements [J ] JournalofHazardous Materials,2018,350：55-65
2. LIAO T Q,FENG T Y,LIJ,etal Pilot-scaleremoval of uranium from uranium plant wastewater using industrialironpowderintheultrasonicfield[J]Annals ofNuclearEnergy，2021，150：107876 DOI：10 1016／j anucene2020 107876
3. SHARMA P，PANDEY A K，UDAYAN A，etalRole ofmicrobialcommunityand metal-binding proteins in phytoremediation of heavy metals from industrial wastewater[J] Bioresource Technology，2021 (7)： 124750 DOI：10 1016／j biortech 2021 124750
4. 张紫彦，葛高飞 土壤微生物响应和修复铅污染研究进

展[C]//中国环境科学学会.2020中国环境科学学会 科学技术年会论文集(第三卷)，南京，2020

ZHANGZY，GEGF Researchprogressofsoilmicrobial responseandremediationofleadpo**l**ution[C]//Chinese

Society of EnvironmentalSciences 2020 Science and Technology Annual Meeting of Chinese Society of EnvironmentalSciences：Volume3，Nanjing，2020

1. 张仕奇，杨洪英，佟琳琳，等 硫化矿细菌浸出机理及协

同作用研究现状[J1有色金属(冶炼部分)，2021(4)：

1-10

ZHANG S Q, YANG H Y,TONG L L,t al. Research statusofbacterialleaching mechanismandsynergyof sulfideore[J]Nonfe**r**ous Metals(Extractive Meta**l**urgy), 2021(4)：1-10

1. 史岩,斯琴图雅,赵弘韬 蚯蚓在放射性土壤修复中的 应用研究进展[J!辐射研究与辐射工艺学报，2020, 38(4)：17-26

SHIY,SIQIN T Y,ZHAO H T Researchprogressof application of earthworms in radioactive soil remediation[J! Journal of Radiation Research and RadiationTechnology,2020,38(4)：17-26

1. 黎昀昀.土壤微生物对镉的吸附特性研究[D!北京: 中国矿业大学,2019

LI Y Y Study on the adsorption characteristics of cadmium by soil microorganisms[D] Beijing：China University of Mining and Technology,2019

1. 邹兆庄.铀矿山放射性污染场地修复技术方法研究[D]. 北京：核工业北京地质研究院,2015

ZOU Z Z Study on remediation technology of radioactivecontaminatedsitesinuranium mines [D] Beijing： Beijing Institute of Geology, Nuclear Industry,2015

1. 谢广智,骆枫,林力,等 放射性污染土壤修复方法概述 及评价[J!四川环境，2018,37(1):164-168

XIE G Z, LUO F, LIN L, etal Overview and evaluation of remediation methods for radioactive contaminated soil [J ] Sichuan Environment， 2018， 37(1):164-168