矿产综合利用

*Multipurpose Utilization of Mineral Resources*

ISSN 1000-6532,CN 51-1251/TD

矿产综合利用》网络首发论文

重金属污染土壤修复遥感监测研究进展 宋文，成少平，迟晓杰，艾艳君，谷海红 2020-01-10 2020-06-22 宋文，成少平，迟晓杰，艾艳君，谷海红．重金属污染土壤修复遥感监测研 究进展．矿产综合利用**.**

题目：

作者： 收稿日期： 网络首发日期： 引用格式：

<https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1251.TD.20200622.1025.070.html>



Gna啊新洌

VCx [www.cnki.net](http://www.cnki.net)

**网络首发**：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶 段。录用定稿指内容己经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期 刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出 版年、卷、期、页码均己确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出 版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编 辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、 出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。 为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认**：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国 学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷 出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出 版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首 发论文视为正式出版。

网络首发时间：2020-06-22 13:23:37

网络首发地址：<https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1251.TD.20200622.1025.070.html>

重金属污染土壤修复遥感监测研究进展  
宋文1,4，成少平1，迟晓杰1，艾艳君1，谷海红1,2,3（1.华北理工大学矿业工程学院，唐山 063210；2.河北省矿业工程开发与安全技术重点实验室，唐  
山 063210 ；3. 河北省矿区生态修复产业技术研究院，唐山 063210 ；4. 中国科学院地理科学与资源研  
究所 陆地表层格局与模拟重点实验室，北京 100101）

**摘 要：**本文归纳了遥感技术在重金属污染土壤监测中的应用研究现状，分析了适合遥感监测的土壤 重金属污染修复技术，并论述了结合修复技术对土壤重金属污染修复效果进行监测的研究，进而提出了当 前土壤重金属污染修复遥感监测研究的不足与解决方法，最后展望了遥感技术在土壤重金属污染修复方面 的应用前景。分析表明：土壤中重金属含量反演研究集中在可见光-红外遥感与微波监测，其中可见光-红外 遥感反演已较为成熟，微波监测的研究有待加强，两者结合反演的研究还处于起步阶段；在土壤重金属污 染修复方法方面，生物修复及其联合修复（生物间联合修复）的过程适合遥感监测；在遥感监测土壤修复 效果的过程中，对植物性状的监测多于动物、微生物监测研究；同时，对于修复效果基本体现在土壤与植 物表现出的特性。目前，土壤重金属污染修复遥感监测研究涉及多源数据的使用以及多学科交叉研究，且 平台较为单一，致使整体研究还处于相对松散的状态。未来，解决遥感技术在土壤修复中的应用不足问题， 依赖于精度不断提高的遥感数据、土壤修复体系完善等方面的进步。

**关键字：**重金属污染土壤；生物修复技术；多源遥感监测

中图分类号：TD 989 T79 文献标志码：A

土壤污染不仅会导致植物的生长条件恶化，还会对周边的生态环境造成严重的破坏［1,2］，其中重 金属的污染尤为值得关注。重金属在土壤中难以降解，会转移到生物体内使高分子物质失活，造成人 体中毒等［3］，其治理难度不亚于治理大气与水中的污染［4］。土壤重金属污染具有隐蔽性、潜伏性、积 累性和长期性的特点。如何有效地修复和监测土壤中重金属的含量，成为亟待解决的社会问题。传统 的化学分析监测虽然可以有效地检测土壤复垦过程中的重金属含量，但耗资较大，实施复杂，甚至可 能会造成二次污染［5］。当前，国内外遥感技术的迅速发展，为土壤中重金属含量的无污染动态监测提 供了一条新的思路。

遥感技术是一门综合性、非接触观测地物特征的技术，具有大面积同步观测、获取信息速度快、 周期短等特点［6］。随着遥感技术的不断发展，从多光谱到高光谱、光学遥感到雷达遥感的不断完善， 能够全面、宏观、快速、连续和客观地反映矿区及周边环境［7］，尤其是对土壤的污染与修复情况能够 更加高效地监测。特别是随着遥感影像的空间分辨率、光谱分辨率、时间分辨率以及辐射分辨率的大 幅度提高，为遥感技术在土壤重金属污染修复监测中的应用提供了有力的数据支撑，提高了土壤重金 属污染修复的监测效率。

早期利用遥感技术监测土壤，主要监测土壤潜力与土壤性质［8,9］。例如，STONER［10］等根据土壤 光谱反射率变化，研究土壤性质与土壤类别，并且根据遗传曲线对性状进行描述。近年来，随着遥感

收稿日期： 2020-01-10,，改回日期 2020-02-27

资助项目：河北省自然科学基金项目（E2015209300）；河北省高等学校青年拔尖人才计划项目（BJ2014029）；河北省 引进留学人员资助项目（编号：CL201633）；唐山市科技研发计划重点项目（19150247E）；唐山市科技创新团队培养 计划项目（ 19130206C）

作者简介：宋文（1995-），男，硕士研究生，主要从事矿区生态恢复与重建方面的研究。

通讯作者：谷海红（1982-）,女，副教授，主要从事矿区生态修复、资源环境遥感方面的研究。Email： [haihonggu1982@hotmail.com](mailto:haihonggu1982@hotmail.com) 技术在土壤领域的广泛应用，对于监测修复土壤重金属污染的研究也逐渐增加。国外发达国家或地区 的学者已采用遥感技术对土壤重金属的修复过程进行监测，如利用高光谱遥感对 1999 年与 2000 年的 西班牙 Aznalcollar 矿区土壤中重金属含量进行监测，并进行了对比分析［11］；美国学者 Ebbs 等人［12］ 在筛选超积累植物时，利用遥感技术对植物中重金属含量进行监测，从而进一步推测出土壤中的重金 属含量；通过高光谱和数字高程模型的使用，并结合地表径流数据，美国地质调查局的研究人员对 18 个矿山的重金属含量分布进行了预测［13］。

本世纪初，由于中国遥感卫星的发展依然落后于发达国家，中国的土壤污染监测研究在研究初期 多采用欧美的光谱数据［14-16］。但是，由于遥感数据的时空间分辨率较低，并且来源受到限制，影响了 监测效果。近年来，中国学者［17-21］陆续开始使用遥感数据对土壤中的金属矿物及其它污染物进行预测。 例如，通过探讨可见光与红外波谱技术测定重金属含量的机理与方法，用高光谱数据制作土壤污染分 布图［22］。此后，随着中国国产遥感卫星的发展与遥感数据使用的普及，有关利用遥感技术进行土壤污 染监测的研究和报道与日俱增。

总体上，目前已经有一些通过遥感监测对土壤中重金属含量进行预测的研究。但是，这些研究在 修复过程方面系统性梳理的工作仍然较少，不利于遥感监测土壤重金属修复过程研究的归纳和总结。 本文在综合分析大量文献的基础上，重点总结通过遥感手段监测土壤重金属修复的过程，结合现有土 壤重金属污染修复的手段，通过多光谱、高光谱、微波等一系列遥感手段，论述当前遥感技术在监测 土壤重金属修复效果方面的理论研究与应用现状，探讨当前遥感监测修复土壤重金属污染研究中存在 的不足，展望其未来，希望能为以后的相关研究提供参考。

1. 土壤中重金属含量的遥感反演

目前，国内外常用遥感技术对土壤重金属含量的监测分为两种［14-16,23,24］：一是利用航空遥感、航 天遥感、无人机等平台连续获取地表土壤重金属含量信息，进一步实现对土壤重金属污染修复的监测； 二是利用光谱测定仪通过对土壤表层的植物生长情况、植物体内各元素变化、土壤表层的微生物群落 结构等反演，通过其它依附土壤上生长、生存的生物特征间接来判别土壤重金属含量。

* 1. 重金属含量的直接反演

遥感技术直接监测土壤中的重金属目前主要分为可见光-近红外遥感监测和微波遥感监测［22,25］。 可见光-红外遥感监测土壤中的重金属是通过光谱仪得到土壤的光谱反射率变化。基于可见光与红外 范围的连续光谱，结合实验室对土壤中重金属含量的实测数据，从而建立土壤重金属含量反演的模型 ［26］；微波遥感监测土壤中的重金属是根据其被测的电磁辐射和散射特性，从而判断重金属含量［27］。

在可见光-红外遥感监测方面，主要利用遥感数据的单一或多重波段（或变形）与土壤中重金属 含量进行相关性拟合［25］。例如，Wang等［23］在实验室中利用这一方式对焦家式金矿区土壤中Cr的含 量进行反演。此外，许多学者［22,26,28,29］将反演的模型应用到大面积中、高分辨率的遥感影像上，进一 步得出研究区内所研究重金属的分布等专题图。如，通过对 Sentinel-2 光谱数据与原始反射率预测模 型的研究，丁海宁等［30］对黄土高原上的土壤样品在实验室内进行 Fe 含量测定，从而绘制了榆林市东 部区域土壤 Fe 含量分布图；方媛［31］将土壤数据的训练样本结合 Landsat-8 数据，得出古蔺测区 Cu、 As、Hg 三种土壤重金属元素的预测图。

相比较可见光-红外遥感监测土壤中重金属含量而言，微波遥感监测重金属的研究较少。高菁等［27］ 通过高频物探设备及地质雷达测定土壤的介电特性，得出了土壤剖面重金属垂直分布规律与水分含量 及其分布，表明介电常数对表层土壤中Cd、Pb金属含量变化最为敏感。虽然微波监测土壤中重金属 含量的研究较少，但是目前利用微波对进行重金属处理的研究已有很多［32-34］。

可见光-红外遥感与微波遥感监测土壤中重金属含量的研究已有一定的进展，两种遥感数据的原 理不同，或许能够进行优势互补，使重金属含量反演更加准确。

* 1. 重金属含量的间接推断

土壤中理化性质、植物及微生物等方面的定量反演能从侧面推断重金属的含量，不仅能够与直接 反演的结果互相验证，还能弥补直接反演带来的不足。

土壤的理化性质（如有机质、机械组成、养分含量、pH、导电性等）影响着土壤的光谱反射特征， 是土壤遥感的理论基础，也是定量土壤遥感的重要组成部分［35］。许多学者［36-38］研究发现土壤中重金属 含量与土壤理化性质之间有着复杂的关系，Cu、Zn、Ni、Cd、As等元素与土壤有机质含量、土壤粘 粒含量呈显著的线性关系，此外还与pH、阳离子交换量有极显著的线性相关性。在长期受到重金属 污染的喀斯特粮食种植区，研究人员发现土壤中的Cr、Ni、Cu和Pb的光谱响应与粘土矿物和有机质 相关带密切相关［39］，以此为依据准确预测了污染区的 Cr 和 Cu 的含量，为粮食污染区治理提供了数 据支撑。Durodoluwa等［40］发现排土场土壤的重金属含量对土壤pH、质地有着严重的影响。这些研究 通过遥感反演土壤的理化性质，证明了间接推断土壤中重金属含量的可行性。

土壤中的重金属通过植物根系的转移进入植物中，包括茎、叶等各个组织部分，会影响植物的生 长。通过光谱测定植物各种光谱指数，如归一化植被指数（NDVI）、比值植被指数（RVI）与差植被 指数（DVI）、改进红边参数、三角形植被指数等，建立多植物指数的植物生物量估算模型，以其为 参考，进一步判断土壤中各种物质含量是当前研究的主要方向［41-45］。杨灵玉等［46］运用植物光谱反射率 波段与植物指数分别同土壤中重金属含量建立植物光谱反射率模型和综合植物指数模型，两者结果对 比表明，通过对植物的监测可以间接预测土壤中的重金属含量。

土壤中微生物及其群落结构的遥感监测研究由于监测对象的体积微小且物种较多，因此研究主要 集中在高光谱的监测［47,48］。监测土壤微生物群落结构的完善与否可以衡量土壤的生态状况，反映出重 金属的浓度［47,49］。由于微生物体积小，即使是微生物群落也难以进行精确的遥感测定［50］，导致目前对 于土壤微生物的遥感监测还很少。

1. 遥感监测重金属污染土壤修复

土壤受重金属污染的来源多样，同时重金属的种类也不尽相同［51］。相应的，不同重金属造成的污 染，其适合的修复手段也各不一样［14,15］，因此并不是所有修复土壤的过程都适合以遥感技术进行监测。 因此，了解各种修复土壤重金属的手段对遥感监测土壤重金属修复的过程是极为必要的。

2.1 重金属污染土壤修复方法

土壤修复是指利用物理、化学和生物的方法转移、吸收、降解和转化土壤中的污染物，使其浓度 降低或将有毒有害的污染物转化为无害的物质的处理过程［16］。从根本上来说，土壤重金属修复技术的 原理是通过固化迁移或者活化降低重金属浓度。

目前，国内外常用的针对土壤重金属修复的技术有物理修复、化学修复、生物修复以及联合修复 ［14-16］，各种手段优劣各异（表 1），在大规模的土地复垦中以生物修复与联合修复为主。物理修复分 为客土法、热解析与电动修复，其成本普遍较高，但是见效快，无污染［52-54］。例如， HODSON 等［53］ 在实验室内利用物理修复中的热解析法，快速修复了土壤中的 Pb、Zn 与 P 污染。重金属污染土壤的 化学修复主要分为化学固定与浸出，这些方法具有较好的效果，但需要注意二次污染的发生。安茂国 等［55］利用化学还原与固化稳定结合的方法，使土壤中 Cr 污染的修复率达到 90%以上，且修复后的土 地可被用于建设用地。生物修复与联合修复都是当前修复土壤重金属污染的主要手段［56-58］。这两种修 复手段周期较长，需要根据不同的机理制定具体的物质，但修复效果较好。在针对 Mn、Zn、Cd、Pb、 Cu、Cr、Co、Ni等不同的重金属污染时，需要选取不同的超积累植物进行修复［59］： Cd污染选取龙葵 进行修复［60,61］、 Pb 污染选取紫花苜蓿进行修复［62,63］、 Zn 污染选取天蓝遏蓝菜进行修复［64,65］，东南景 天、印度芥菜能同时针对土壤中的 Cd、 Pb、 Zn 进行吸收［66-68］等；丛枝菌根等微生物能与不同植物联 合能对修复不同重金属污染的土壤起到促进作用［69］；与动物的结合能够提高土壤活力，对修复效果起 到促进作用［70］。例如，使用丛枝菌根真菌接种黑麦草［71,72］，经过 60 余天的培育后，发现黑麦草对受 污染土壤中的 Cr 和 Ur 的吸收能力大幅度提高；在联合修复过程中，蚯蚓等土壤动物的引入对植物与 微生物的起到了“催化剂”的作用，并能够进一步缩短修复时间［73］。

**表 1 重金属污染土壤修复方式对比**

Tab.1 Comparison of the Technologies of Heavy Metal Contaminated Soil Remediation

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 修复方式 | 修复手段 | 优点*、/* | 缺点 |
|  |  |  | 工程量大，成本高，适用面 |
|  | 客土法［52］ | 见效快、稳定、无污染 | 积小 |
| 物理修复 | 热解析［53］ | 工艺简单，可重复使用 | 成本高，时间长 |
|  |  | 低渗透性土壤效果显著，无有害物 | 设备复杂，成本高，应用范 |
|  | 电动修复［54］ | 质，修复时间短 | 围小 |
|  |  |  | 污染物不能根除，后续监测 |
|  | 化学固定［16］ | 成本低，效果好，操作简单 | 周期长 |
| 化学修复 | 化学浸出［74］ | 对污染严重的土壤修复效果好 | 要求土壤高渗透性，易二次 |
|  |  |  | 污染 |
|  | 动物修复［70,73］ | 提高土壤的通气性、松紧度和肥力 | 不能直接降解，污染扩散 |
|  |  | 成本低，操作简单，自养生物，无 | 周期长，效率低，缺高效的 |
|  | 植物修复［2,59］ |  |  |
| 生物修复 |  | 需外界供能，固土、美化环境 | 植物品种 |
|  |  | 周期短，成本低，具备改善土壤环 | 需外界提供能量，易受自然 |
|  | 微生物修复［75］ | 境降解有机污染物的能力 | 环境因素的影响 |
|  | 植物-微生物联合修 |  |  |
| 联合修复 | 复［76 ］为例 | 活化或钝化重金属，增强植物特性 | 作用机制差异大 |

现有的重金属污染土壤修复方法中，物理方法见效快，几乎能在修复完成后反映出效果。化学方

法需要添加一定量的化学物质，这给原本就复杂的土壤系统增添了变数。因此，采用物理方法与化学 方法修复土壤重金属污染的过程并不适合遥感监测。而生物修复与植物-微生物联合修复过程较为缓 慢，且对周围的生态系统有潜移默化的作用。相比较而言，后两者在重金属污染土壤修复的过程中， 更适合利用遥感技术进行监测。

1. 重金属污染土壤修复效果监测

遥感监测重金属污染土壤修复效果是重金属含量反演与土壤修复的结合，大多数研究主要是监测 生物修复与联合修复的效果［44,77,78］。用遥感技术监测植物修复、动物修复、微生物修复及它们之间的 联合修复的研究已有一定的进展，这其中又集中在植物修复与植物-微生物联合修复方面［76,79］。

重金属污染的土壤区域植物的生长过程与正常土壤中有很大的区别，这也使得在使用植物修复土 壤重金属污染时，植物光谱与纹理的变化情况成为监测修复效果的一种指示性手段。在土耳其库塔哈 西伊托姆褐煤企业的实例研究［77］，利用多时相Landsat TM数据集，通过对研究区1987-2006年简单 比值（SR）指数、简化简单比值（RSR）指数、归一化植被指数（NDVI）和缨帽变换（亮度和绿色 度）等光谱指标的连续变化进行分析，绘制并评价了植物的生长情况，表明植物生长情况逐渐向好， 为遥感监测植物修复重金属污染土壤提供了较为典型的案例。同时，使雷达获取采矿迹地植物的叶面 积指数、间隙率和郁闭度3种植物参数，结合数据表达出的纹理特征与数字高程模型（DEM）结合探 讨植物的恢复状况，也是应用遥感技术对土壤重金属污染修复效果的监测［44］。

土壤中的动物能有效改善土壤结构、增强肥力，这对重金属污染的土壤能起到良好的修复效果 ［70,80］。由于土壤动物体型较小，且常处于土壤内部或被植物遮盖，因此需要在高分辨率影像上才能观 测其行为痕迹并推断其空间密度［81,82］。研究显示［83］，遥感影像上能够有效识别动物的生长习性。

与植物、动物修复不同，微生物修复土壤重金属污染过程中，其自身或群落结构并不能被当前的 遥感技术直接监测［84］。一般情况下，应用遥感技术监测微生物修复效果需要对整体的环境进行评估， 从而侧面推断修复过程中的情况。

此外，植被修复通常也与微生物进行联合修复。国外研究人员采用遥感监测与地面结合的方式， 对采用植物-微生物联合方法修复土壤的采矿迹地进行监测，其包含土壤理化性质、土壤和空气温度、 相对湿度、孢子浓度、地上和地下细菌和真菌种类等多种指标，这些均能通过遥感数据进行综合反映 ［78］；国内学者［79］利用地基高光谱监测植物接菌后植物叶绿素、“三边”等参数变化，丰富了植物-微生 物联合修复矿区土壤重金属污染的理论与方法。

遥感监测植物、动物、微生物间联合修复的研究已有一定的进展［14-16,78］。在修复方法涉及植物时， 都会研究遥感数据中植物的性状反应。同时，土壤中元素含量与植物、动物、微生物相互联系紧密［85］。 因此，在采用生物修复和联合修复方法对土壤进行修复时，遥感数据多数表现为总体的修复状况。

1. 存在问题与解决途径

对比其他领域，遥感监测土壤重金属污染修复是一个相对较新的领域，同时也是一个从宏观到微 观涵盖内容广泛的领域。虽然一些机构与学者做出了一些成功的案例，但绝大多数都是验证性或者实 验性质的研究，距离大规模应用以及形成产业化还有不小的差距，依旧有许多问题与挑战。

3.1 监测设备与平台

目前，在土壤重金属修复过程中已经可以使用多种设备及平台来监测修复效果［15,86-88］，其中包括

了 MODIS系列卫星、Landsat系列卫星、World View系列卫星、Hyperion卫星、Sentinel卫星及手持 地物光谱成像仪（ASD、PSR、ATH等）等。但大多数的监测研究平台㈤89-92嘟以高光谱平台为主导， 尤其是手持地物光谱成像仪的使用频率极高。这使得遥感监测土壤重金属修复的研究在高光谱方向能 够有较为集中成果，大面积监测研究及多平台一体化监测研究有待进一步深化。

随着国产高分系列卫星及国内商业卫星的成熟与应用，不断扩充土壤重金属污染修复监测的平台。 同时，卫星数据的免费获取和应用更能推动遥感监测土壤重金属修复的区域化与体系化监测研究。

1. 数据质量与融合

随着遥感应用的不断发展，高光谱技术也不断地普及与成熟，大多数的土壤重金属污染修复监测 研究集中于此，而微波遥感因其数据处理复杂以及来源较少，研究也相对不足。但不可否认的是，微 波遥感的应用确实弥补了光学遥感的不足［93,94］。同时，现阶段是多源数据的结合监测，包含实地或实 验室检测与多遥感平台的监测。在多源数据（遥感数据与非遥感数据）综合应用的前提下，各种数据 的类型、格式等复杂多样，且优势互补，数据同化就显得异常重要。为更加全面地监测土壤重金属污 染状况与修复情况，将多源、多种、多属性数据转换成统一的时空数据与物理数据的表达的需求也在 逐渐增加。

目前，随着国内外遥感技术的发展，尤其是高光谱甚至是超光谱应用研究的进步［95］，能有效促进 土壤中成分的遥感识别，更能推动遥感监测重金属污染土壤修复的不断发展。

**3.3 多学科交叉研究**

土壤重金属定量遥感的研究缺乏系统性和普适性，分散各领域的研究者们联系松散，很难形成系 统性的成果［96］。同时，重金属污染土壤修复的遥感监测研究涉及到一个复杂的、交汇的知识体系［89］。 在遥感监测过程中，遥感器涉及光学、物理学、测量学、计算机等多种先进技术；在土壤修复过程中 又要兼顾化学、生态学、植物学等多种学科。

同时，重金属污染土壤的修复研究应该从源头的损毁、修复的过程以及修复后期管理三方面进行 研究，并随着时空的变化也要进一步调整［97］。这些需要有效的协调各学科领域的知识与成果，整合出 各学科中高质量的二级文献，便于相关领域学者对于知识的快速获取［98］。

1. 结论与展望

通过对土壤重金属污染修复遥感监测相关进展的梳理，本文从土壤中重金属含量反演、土壤修复 效果遥感监测、存在问题与解决方法三方面综述了当前土壤重金属污染修复遥感监测的现状。土壤中 重金属含量反演分为直接反演与间接推断，两者的结合能够综合判断土壤污染状况及对周边的生态环 境的影响。在现有的土壤重金属污染修复方法中，生物修复与联合修复的过程是遥感监测研究的主要 方向。在遥感监测土壤重金属修复过程中，主要依靠植物的生理状况与综合的生态环境变化显示修复 效果。土壤重金属污染修复过程中的监测平台较为单一，多平台一体化监测研究有待进一步深化。遥 感监测土壤重金属污染修复研究的相关进展中，表现出了监测数据的多样化与多源化。同时，由于各 个交叉学科联系不足，导致整体性的理论与方法没有一个系统性的框架。总体来说，土壤重金属污染 修复遥感监测研究有了一定的进展，但缺少相对完备的体系结构。

随着遥感技术中高光谱、微波甚至是超光谱技术的研究进步，再建立相对完备的修复过程的监测 理论体系，遥感监测重金属污染土壤修复的研究及应用也会有很大的提升。同时，伴随着从手持到卫 星等一体化监测平台的健全，空天地人一体化监测平台的建立，也会促进监测从宏观到微观的贯通性。 参考文献(References)

1. Acosta J A, Faz A, Martinez-Martinez S, et al. Multivariate statistical and GIS-based approach to evaluate heavy metals behavior in mine sites for future reclamation[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2011, 109(1):8-17.
2. Chaney R L, Malik M, Li Y M, et al. Phytoremediation of soil metals[J]. Current Opinion in Biotechnology, 1997, 8(3):279-284.
3. Bhuiyan M a H, Parvez L, Islam M A, et al. Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 173(1):384-392.
4. Guan X, Sun L N. Current Situation and the Harm of Soil Heavy Metal Pollution and Food Safety[J]. Applied Mechanics &

Materials, 2014, 675-677:612-614.

1. Zhang W, Liu X, Cheng H, et al. Heavy metal pollution in sediments of a typical mariculture zone in South China[J].

Marine Pollution Bulletin, 2012, 64(4):712-720.

1. Li Y, Zhao H L, Fan J H. Application of Remote Sensing Technology in Mine Environment Monitoring[J]. MATEC Web of

Conferences, 2015, 22:04008.

1. 罗格，卫征.航天遥感与中国空间信息产业发展[J]•航天返回与遥感,2018, 39(04):10-17.
2. Ben-Dor E, Banin A. Near-Infrared Analysis as a Rapid Method to Simultaneously Evaluate Several Soil Properties[J]. Soil Science Society of America Journal, 1995, 59:364-372.
3. Sommer S, Hill J, Megier J. The potential of remote sensing for monitoring rural land use changes and their effects on soil conditions[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1998, 67(2):197-209.
4. Stoner E R, Baumgardner M F. Characteristic Variations in Reflectance of Surface Soils1[J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45:1161-1165.
5. Kemper T, Sommer S. Mapping and monitoring of residual heavy metal contamination and acidification risk after the Aznalcollar mining accident (Andalusia, Spain) using field and airborne hyperspectral data[C]. Proceedings, 3rd EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy EARSeL Secretariat, Paris, 2003:333-343.
6. Ebbs S D, Lasat M M, Brady D J, et al. Phytoextraction of Cadmium and Zinc from a Contaminated Soil[J]. Journal of Environmental Quality, 1997, 26(5):1424-1430.
7. Mars J C, Crowley J K. Mapping mine wastes and analyzing areas affected by selenium-rich water runoff in southeast Idaho using AVIRIS imagery and digital elevation data[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(3):422-436.
8. 王夷萍，郑慧敏，孙华.土壤重金属污染农艺修复及其高光谱遥感监测研究评述[J].农业环境与发展,2007, 24(3):68-72.
9. 沈文娟，蒋超群，侍昊，等.土壤重金属污染遥感监测研究进展[J].遥感信息,2014, 29(6):112-117+124.
10. Yao Z, Li J, Xie H, et al. Review on Remediation Technologies of Soil Contaminated by Heavy Metals[J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 16(4):722-729.
11. 王瑗，盛连喜，李科，等.石油污染土壤的近红外波段偏振光特性测量[J].科学通报,2008, 53(23):2956-2961.
12. 王晓华，邓喀中，杨化超.土壤重金属污染信息提取遥感模型的建立一以水口山矿区铅锌污染为例[J].测绘通 报, 2013, (3):29-31.
13. 宋婷婷，付秀丽，陈玉，等.云南个旧矿区土壤锌污染遥感反演研究[J].遥感技术与应用,2018, 33(1):88-95.
14. 商梦石，贾瑞强，张海林.图像处理技术在矿石粒度检测中的应用[J].矿产综合利用,2016, (6):13-16.
15. 潘淑春，王雪莲，陈梅，等全谱直读等离子体发射光谱法测定土壤中有效磷[J].矿产综合利用,2015,⑶:59-61.
16. Shi T, Chen Y, Liu Y, et al. Visible and near-infrared reflectance spectroscopy—An alternative for monitoring soil contamination by heavy metals[J]. Journal of hazardous materials, 2014, 265:166-176.
17. Wang F, Wang J N, Cao W T, et al. Concentration Estimation of Heavy Metal Cr in Soilsfrom Jiaojia-Type Gold Mining Areas Using Reflectance Spectroscopy[J]. Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi/Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(5):1649-1655.
18. 涂宇龙，邹滨，姜晓璐，等矿区土壤Cu含量高光谱反演建模[J].光谱学与光谱分析,2018, 38(2):575-581.
19. 解宪丽，孙波，郝红涛.土壤可见光-近红外反射光谱与重金属含量之间的相关性[J]. 土壤学报,2007, 44(6):982-993.
20. Gray C W, Mclaren R G, Roberts A H C. Atmospheric accessions of heavy metals to some New Zealand pastoral soils[J]. Science of The Total Environment, 2003, 305(1):105-115.
21. 高菁，赵贵章，李志萍，等土壤重金属污染垂直分布特征及介电特性分析[J].工程勘察,201 & 46(4):68-74.
22. Clevers J G P W, Kooistra L, Salas E a L. Study of heavy metal contamination in river floodplains using the red-edge position in spectroscopic data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(19):3883-3895.
23. Viscarra Rossel R A, Behrens T, Ben-Dor E, et al. A global spectral library to characterize the world's soil[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 155:198-230.
24. 丁海宁，陈玉，陈芸芝.黄土高原土壤铁元素含量遥感反演方法[J].遥感技术与应用,2019, 34(2):275-283.
25. 方媛.多时相Landsat-8影像反演土壤重金属含量的经验模型选择与特征提取[D].中国地质大学(北京),2018.
26. 乔欢欢，李健.土壤中重金属监测前处理方法[J].农业灾害研究,2015, 5(7):53-55.
27. 梅元妹.土壤中重金属监测前处理方法研究[J].环境与发展,2018, 30(3):175-176.
28. 刘淑君，刘卫，吴丽琨，等微波消解——ICP-AES测定钻基高温合金中的稀土成分[J].矿产综合利用,2013, (5):47-49+59.
29. Chabrillat S, Ben-Dor E, Rossel R a V, et al. Quantitative Soil Spectroscopy[J]. Applied & Environmental Soil Science, 2013, 2013.
30. Chakraborty S, Weindorf D C, Deb S, et al. Rapid assessment of regional soil arsenic pollution risk via diffuse reflectance spectroscopy[J]. Geoderma, 2017, 289:72-81.
31. Sun W C, Zhang X. Estimating soil zinc concentrations using reflectance spectroscopy[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2017, 58:126-133.
32. 柴世伟，温琰茂，张云霓，等.广州郊区农业土壤重金属含量与土壤性质的关系[J].生态与农村环境学报,2004, 20(2):55-58.
33. Lu Q, Wang S, Bai X, et al. Rapid inversion of heavy metal concentration in karst grain producing areas based on hyperspectral bands associated with soil components[J]. Microchemical Journal, 2019, 148:404-411.
34. Durodoluwa Joseph O. Changes in soil properties and plant uptake of heavy metals on selected municipal solid waste dump sites in Ile-Ife, Nigeria[J]. African Journal of Environmental Science & Technology, 2008, (5).
35. 迟晓杰，谷海红，李富平，等.重金属污染土壤植物修复效果评价方法一高光谱遥感[J].金属矿山,2019, (1):16-23.
36. 张静静，周卫红，邹萌萌，等.高光谱遥感监测大面积土壤重金属污染的研究现状、原理及展望[J].江苏农业科学, 2018, 46(12):9-13.
37. 贾学勤，冯美臣，杨武德，等.基于多植被指数组合的冬小麦地上干生物量高光谱估测[J].生态学杂志,2018, 37(2):424-429.
38. 田佳榕，代婷婷，徐雁南，等.基于地基激光雷达的采矿废弃地生态修复的植被参数提取[J].生态与农村环境学报, 2018, 34(8):686-691.
39. 李新，刘强，柳钦火，等.黑河综合遥感联合试验研究进展:水文与生态参量遥感反演与估算[J].遥感技术与应用， 2012, 27(5):650-662.
40. 杨灵玉，高小红，张威，等.基于Hyperion影像植被光谱的土壤重金属含量空间分布反演一以青海省玉树县为 例 [J].应用生态学报,2016, 27(6):1775-1784.
41. 陈书琳，毕银丽.遥感技术在微生物复垦中的应用研究[J].国土资源遥感,2014, 26(3):16-23.
42. 卫亚星，王莉雯.湿地土壤硝化微生物群落的高光谱研究[J].光谱学与光谱分析,2016, 36(10):3254-3260.
43. 毛骁，孙保平，张建锋，等微生物菌肥对干旱矿区土壤的改良效果[J].水土保持学报,2019, 33(2):201-206.
44. Silva f S, Santos E D C D, Menezes C R D, et al. Bioremediation of a polyaromatic hydrocarbon contaminated soil by native soil microbiota and bioaugmentation with isolated microbial consortia[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(20):4669-4675.
45. Yang Q, Li Z, Lu X, et al. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment[J]. Science of The Total Environment, 2018, 642:690-700.
46. 陈怀满，郑春荣，周东美，等.德兴铜矿尾矿库植被重建后的土壤肥力状况和重金属污染初探[J]. 土壤学报,2005, 42(1):29-36.
47. Hodson M E, Cotterhowells J D. Bonemeal additions as a remediation treatment for metal contaminated soil[J]. Environmental Science & Technology, 2000, 34(16):3501-3507.
48. Cox C D, Shoesmith M A, Ghosh M M. Electrokinetic Remediation of Mercury-Contaminated Soils Using Iodine/Iodide Lixiviant[J]. Environmental Science & Technology, 1996, 30(6):1933-1938.
49. 安茂国，赵庆令，谭现锋，等.化学还原-稳定化联合修复铬污染场地土壤的效果研究[J].岩矿测试,2019, 38(2):204-211.
50. Mahar A, Wang P, Ali A, et al. Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: A review[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, 126:111-121.
51. 赵庆龄，路文如.土壤重金属污染研究回顾与展望——基于web of science数据库的文献计量分析[J].环境科学与 技术, 2010, 33(6):105-111.
52. Gallego J L R, Loredo J, Llamas J F, et al. Bioremediation of diesel-contaminated soils: Evaluation of potential in situ techniques by study of bacterial degradation[J]. Biodegradation, 2001, 12(5):325-335.
53. 石润，吴晓芙，李芸，等.应用于重金属污染土壤植物修复中的植物种类[J].中南林业科技大学学报,2015, 35(4):139-146.
54. 黎诗宏，梁斌，李忠惠.螯合剂对龙葵修复成都平原Cd污染土壤的影响[J].农业环境科学学报,2016, 35(10):1917-1922.
55. 魏树和，周启星，王新，等一种新发现的镉超积累植物龙葵(Solanum nigrum L)[J].科学通报,2004,
56. :2568-2573.
57. 景俏丽.紫花苜蓿对土壤Cd、Pb重金属污染的修复研究[D].长安大学,2019.
58. 杨玉荣.丛枝菌根真菌(AMF)提高植物修复土壤重金属Pb污染的作用机制[D].西北农林科技大学,2015.
59. Su D, Jiang R, Li H. The Potential of Oilseed Rape and Thlaspi caerulescens for Phytoremediation of Cadmium-Contaminated Soil [M]. Twenty Years of Research and Development on Soil Pollution and Remediation in China. Springer. 2018: 349-363.
60. 韩璐，魏嵬，官子楸，等Zn/Cd超富集植物天蓝遏蓝菜(Thlaspi caerulescens)中 TcCaM2基因的克隆及在酵母中的 重金属耐受性分析[J].中国科学院研究生院学报,2007, (4):465-472.
61. Chen S, Zhang M, Feng Y, et al. Nicotianamine Synthase Gene 1 from the hyperaccumulator Sedum alfredii Hance is associated with Cd/Zn tolerance and accumulation in plants[J]. Plant and Soil, 2019, 443(1-2).
62. Yang W, Wang S, Ni W, et al. Enhanced Cd-Zn-Pb-contaminated soil phytoextraction by Sedum alfredii and the rhizosphere bacterial community structure and function by applying organic amendments[J]. Plant and Soil, 2019, 444(1-2).
63. 赵庆龄，路文如.中美土壤重金属污染超富集植物文献计量分析——以印度芥菜为例[J].中国农学通报,2011, 27(4):370-375.
64. 王英丽，林庆祺，李宇，等.丛枝菌根真菌在土壤重金属污染植物修复中的作用及机理研究进展[J].应用生态学报, 2013, 24(7):2081-2088.
65. 刘军，刘春生，纪洋，等土壤动物修复技术作用的机理及展望[J].山东农业大学学报(自然科学版),2009, 40(2):313-316.
66. Shi-Qi Z, Yi-Jin L, Yu Z, 等. Repair capacity of perennial ryegrass (Lolium perenne L.) based on arbuscular mycorrhizal fungi on the in uranium contaminated soil[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 330:032034.
67. 田野，张会慧，孟祥英，等镉(Cd)污染土壤接种丛枝菌根真菌(Glomus mosseae)对黑麦草生长和光合的影响[J]. 草地学报, 2013, 21(1):135-141.
68. 唐浩，朱江，黄沈发，等.蚯蚓在土壤重金属污染及其修复中的应用研究进展[J]. 土壤,2013, 45(1):17-25.
69. Dermont G, Bergeron M, Mercier G, et al. Soil washing for metal removal: a review of physical/chemical technologies and field applications[J]. Journal of hazardous materials, 2008, 152(1):1-31.
70. 滕应，骆永明，李振高.污染土壤的微生物修复原理与技术进展[J]. 土壤,2007,⑷:3-8.
71. Gutierrez-Gines M J, Hernandez A J, Perez-Leblic M I, et al. Phytoremediation of soils co-contaminated by organic compounds and heavy metals: Bioassays with Lupinus luteus L. and associated endophytic bacteria[J]. Journal of Environmental Management, 2014, 143:197-207.
72. Erener A. Remote sensing of vegetation health for reclaimed areas of Seyitomer open cast coal mine[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 86(1):20-26.
73. Pant P, Pant P. Ecological Restoration Techniques for Management of Degraded, Mined-Out Areas and the Role Played by Rhizospheric Microbial Communities [M]//Singh R, Kumar S. Green Technologies and Environmental Sustainability. Cham; Springer International Publishing. 2017: 437-453.
74. 陈书琳，毕银丽，齐礼帅，等.接种菌根大豆叶绿素含量差异的光谱特征分析[J].中国矿业大学学报,2015, 44(1):170-175.
75. 田伟莉，柳丹，吴家森，等.动植物联合修复技术在重金属复合污染土壤修复中的应用[J].水土保持学报,2013, 27(5):188-192.
76. Muller J, Brandl R. Assessing biodiversity by remote sensing in mountainous terrain: the potential of LiDAR to predict forest beetle assemblages[J]. Journal of Applied Ecology, 2009, 46(4):897-905.
77. St-Louis V, Pidgeon A M, Clayton M K, et al. Satellite image texture and a vegetation index predict avian biodiversity in the Chihuahuan Desert of New Mexico[J]. Ecography, 2009, 32(3):468-480.
78. Vihervaara P, Auvinen A-P, Mononen L, et al. How Essential Biodiversity Variables and remote sensing can help national biodiversity monitoring[J]. Global Ecology and Conservation, 2017, 10:43-59.
79. Larsen P E, Scott N, Post A F, et al. Satellite remote sensing data can be used to model marine microbial metabolite turnover[J]. Isme Journal, 2015, 9(1):166-179.
80. Frouz J, Prach K, Pizl V, et al. Interactions between soil development, vegetation and soil fauna during spontaneous succession in post mining sites[J]. European Journal of Soil Biology, 2008, 44(1):109-121.
81. 陈剑南.基于WorldView-3数据的土壤Cu含量反演研究[D].中国地质大学(北京),2019.
82. 王恒，张强，戴慧敏，等.基于Sentinel-2A 的耕地质量综合评价[J].北京测绘,2019, 33(10):1176-1181.
83. Guan Q, Zhao R, Wang F, et al. Prediction of heavy metals in soils of an arid area based on multi-spectral data[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 243:137-143.
84. Wang F H, Gao J, Zha Y. Hyperspectral sensing of heavy metals in soil and vegetation: Feasibility and challenges[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2018, 136:73-84.
85. Tan K, Wang H, Chen L, et al. Estimation of the spatial distribution of heavy metal in agricultural soils using airborne hyperspectral imaging and random forest[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 382:120987.
86. Zhang S, Shen Q, Nie C, et al. Hyperspectral inversion of heavy metal content in reclaimed soil from a mining wasteland based on different spectral transformation and modeling methods[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2019, 211:393-400.
87. Gholizadeh A, Kopackova V Detecting vegetation stress as a soil contamination proxy: a review of optical proximal and remote sensing techniques[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2019, 16(5):2511-2524.
88. Ming L, Xiangnan L, Meiling L, et al. Root mass ratio: Index derived by assimilation of synthetic aperture radar and the improved World Food Study model for heavy metal stress monitoring in rice[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2016, 10(2):026038.
89. 韩玲，张延成.光学与微波数据协同反演植被覆盖区土壤水分[J].水资源与水工程学报,2018, 29(4):230-235.
90. 李盛阳，刘志文，刘康，等航天高光谱遥感应用研究进展(特邀)[J].红外与激光工程,2019, 48(3):9-23.
91. 李小文，王祎婷.定量遥感尺度效应刍议[J].地理学报,2013, 68(9):1163-1169.
92. Blum W E H. Soil Protection Concept of The Council of Europe and Integrated Soil Research[C]. Integrated Soil and

Sediment Research: A Basis for Proper Protection, 1993:37-47.

[98] Nemoianu, Virgil. A Theory of the Secondary: literature, progress and reaction[J]. Poetics Today, 1989, 11(3):715.

**Research Progress on Remediation of Heavy Metal  
Contaminated Soil Monitored by Remote Sensing**SONG Wen1, 4, CHENG Shaoping1, CHI Xiaojie1, AI Yanjun1, GU Haihong1, 2, 3(1. College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210,  
China; 2. Hebei Key Laboratory of Mining Development and Security Technology, Tangshan 063210, China;

3. Hebei Research Institute of Ecological Restoration Technology for Mining Industry, Tangshan 063210,  
China; 4. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and  
Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract ：**The research progress of remote sensing technology in monitoring of heavy metal contaminated soil is summarized, and the appropriate technologies of heavy metal contaminated soil remediation monitored by remote sensing have been analyzed. The study of monitoring the effect of soil heavy metal pollution remediation combined with the repair technology has been discussed at the same time, followed by the proposition of the deficiencies and solutions to the current remote sensing based on monitoring of heavy metal contaminated soil remediation. Finally, the application prospects of remote sensing technology in soil heavy metal pollution remediation have been forecasted. Research showed that the research on inversion of heavy metal content in soil focuses on visible-infrared remote sensing and microwave monitoring. The inversion of visible-infrared remote sensing is relatively mature, and the microwave monitoring needs to be strengthened. It is in its infancy that both of them is combined. In terms of heavy metal contaminated soil remediation methods, the process of bioremediation and its joint remediation (Combined Bioremediation) is suitable for monitoring. In the process of monitoring the effect of soil remediation by remote sensing, the research on plants is more than that on animals and microbes. Meanwhile, the characteristics of the restoration effect are basically reflected by soil and plants. At present, the research on monitoring of heavy metal contaminated soil remediation involves the use of multi-source data and multi-disciplinary cross-research, and the platform is relatively single. So the overall research is still relatively loose. In the future, solving the problem of insufficient application of remote sensing technology in soil remediation will depend on the advances in remote sensing data with increasing accuracy and the improvement of soil remediation systems.

**Keywords：**Heavy metal contaminated soil；bioremediation technologies；monitoring by multi-source remote sensing