

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.03.002

典型金属矿区污染土壤生态修复研究与实践进展

周连碧,王琼,杨越晴

(矿冶科技集团有限公司,北京 100160)

摘要:为助推我国金属矿区污染土壤生态修复研究与治理,促进植物筛选、配置技术在矿区生态构建中的应用,对国内外金属矿区污染土壤生态修复历史发展与现状进行总结、比较,指出我国矿区污染土壤生态修复所面临的问题,简要概述矿区污染土壤的物理、化学、生物改良方法与过程,重点阐述金属矿区污染土壤生态修复研究与实践中植物选择的原则、植物的种类以及配置原则,并对矿区生态修复研究与应用的发展提出展望。

关键词:土壤;重金属污染;生态修复

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2021)03-0010-09

Progress in Research and Practice of Ecological Restoration of Contaminated Soil in Typical Metal Mining Areas

ZHOU Lian-bi, WANG Qiong, YANG Yue-qing

(BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China)

Abstract: In order to promote research and treatment of ecological restoration of contaminated soil in China's metal mining areas and promote application of plant screening and configuration technology in ecological construction of mining areas, historical development and current status of ecological restoration of contaminated soil in metal mining areas at home and abroad were summarized and compared. Pollution in China's mining areas and problems faced by soil ecological restoration were pointed out. Physical, chemical, and biological improvement methods and processes of contaminated soil in mining areas were briefly outlined. Principles of plant selection, plant species and configuration principles in research and practice of ecological restoration of contaminated soil in metal mining areas were emphasized in detail. Development of ecological restoration research and application in mining areas were prospected.

Key words: soil; heavy metal pollution; ecological restoration

据《2018 中国环境统计年鉴》,我国居民点及独立工矿用地面积约 32.13 万 km²,截至 2017 年,矿业开采累计占用损坏土地 2 607 489 hm²,而当年废弃地恢复面积仅 75 778 hm²;据《2017 中国国土资源统计年鉴》,我国共有大中小型矿山和矿产企业 77 558 家(非油气),仅 2016 年就审批建设工矿仓储

用地 77 495.04 hm²,相关生产经营活动产生大量矿山废弃地,矿区周边土壤污染严重。截至 2014 年,我国已完成 81 万 hm²修复工作,虽较前一时期有所提高,但治理比例仍远低于发达国家^[1]。调研表明,我国有色金属矿区周边土壤 Cd、As、Pb 等污染较为严重。数据显示,2018 年全国新增矿山恢复治理面积

收稿日期:2021-01-04

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC1805005)

作者简介:周连碧(1961-),男,北京人,博士,正高级工程师

约 6.52 万 hm^2 , 新增损毁土地约 4.80 万 hm^2 , 净增矿山恢复治理面积仅约 1.72 万 hm^2 。新增恢复治理面积中, 在建和生产矿山恢复治理面积约 3.22 万 hm^2 , 占 49.4%, 废弃矿山治理面积约 3.30 万 hm^2 , 占 50.6%^[2]。

1 国内外金属矿区污染土壤生态修复历史与现状

1.1 国外金属矿区污染土壤生态修复

国外矿山的生态修复工作起步较早, 大约在 19 世纪末兴起, 到 20 世纪中期发展较为成熟, 并在法制、管理和研发等方面获得了较大突破。

美国是最早开始矿区生态修复的国家之一。矿区环境治理工作, 以法律颁布前、颁布后为界限划分, 法律颁布前统筹规划, 法律颁布后“谁破坏、谁治理”, 要求环境修复至原始地形地貌。1977 年《露天采矿管理与修复(复垦)法》进一步推进了矿区土壤生态修复工作^[3]。例如, 美国犹他州米德维尔矿污染区域约 2.8 km^2 , 对场地中污染区土壤进行挖掘移除, 并在地表回填 60 cm 厚的清洁土壤进行植被恢复; 美国 IKMHSS 矿尾矿废弃地酸性较强, 重金属 Pb、Zn 及类金属 As 严重超标, Juliana Gil-Loaiza 等在强酸性场地建立一套植被系统。通过添加堆肥, 并混种高羊茅(*Festuca arundinace*)、紫杉(*Taxus cuspidata*)、水牛草(*Cenchrus ciliaris*)等种子, 41 个月后, 植被盖度由于 21% 上升到 61%, 接近未开采地区的植被盖度^[4]。

德国矿山环境治理特别是土壤修复工作实行较早, 1950 年颁布了第一部土地复垦法规, 对土地复垦的程序、内容、操作步骤都做出详尽的规定。德国的矿区土地复垦目标有别于美国, 更侧重于景观生态的重建。德国在矿区污染土壤生态修复过程中以科学技术为先导, 致力于技术研发、设备应用和人才培养^[5], 经过长期努力, 复垦工作取得了很大成绩, 无论是城市还是乡村矿区, 表现出非常高的环境质量。

澳大利亚是矿业大国, 是矿区环境治理、生态修复效果最典型、最成功的国家之一。澳大利亚矿区土壤修复多数是政府出资, 各部门配合执行。复垦抵押金(保证金)制度是有效保障污染管控的基础^[6], 在土地复垦与生态修复技术方面, 以综合模式为主, 以大环境为对象, 调动各学科与专业, 从整体性出发, 达到自然、和谐的矿区土壤生态修复^[7-8]。

法国的特点是工业发达、人口密集。在矿区污

染土壤治理工作中, 侧重于农用、林用的保持与恢复, 常用的方法有覆土、移植草本植物, 经一段时间恢复后达到农用地标准, 形成农田或景区^[9]。

英国立法明确、执法严格, 土壤污染生态修复工作的执行力较强。矿区边开采边复垦, 保证土壤污染治理与生态构建工作的进度, 恢复后的土地主要作为农用地、林业或风景区, 侧重整体效果的提升。

日本成立了新能源产业技术综合开发机构(The New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO)^[10], 专门处理矿区废弃地生态恢复问题, 对矿山废弃地的生态恢复进行统一规划。

1.2 国内金属矿区污染土壤生态修复

在我国, 矿区污染土壤生态修复起始于 20 世纪 50 年代, 起初仅限于部分矿山的自发行为, 到 20 世纪 60 年代, 我国开始了矿山复垦实践, 大多是在废石场或闭库的尾矿库进行简单的平整和覆土绿化, 由于矿山废弃地受其生境恶劣、基质有毒、缺乏土壤等因素限制, 其复垦率还停留在较低水平; 60~70 年代处于自发探索阶段, 主要研究土地退化和土壤退化问题; 随着技术和思维认识的进步, 80 年代我国矿区污染土壤生态修复工作步入正轨, 更加具备组织性、有序性、主动性。1986 年国家颁布《中华人民共和国土地管理法》, 随后颁布《土地复垦规定》和《中华人民共和国环境保护法》, 为该项工作提供了法制支持。为规范土地复垦活动, 加强土地复垦管理, 提高土地利用的社会效益、经济效益和生态效益, 国务院于 2011 年发布并实施了《土地复垦条例》。2016 年, 国务院公布的《土壤污染防治行动计划》, 强调重点监管有色金属矿采选等行业及严防矿产资源开发污染土壤, 为打好大气、水、土壤污染防治三大战役提供有力武器^[11]。2019 年自然资源部出台了《关于建立激励机制加快推进矿山生态修复的意见(征求意见稿)》, 明确提出: 鼓励矿山土地综合修复利用、实行差异化土地供应、盘活生产建设矿山存量建设用地、推动矿山修复土地指标交易、合理利用废弃矿山土石料措施, 将进一步推动矿山生态修复工程产业化发展。

在修复成果方面, 从 2000 年起, 我国先后投资 24 亿元, 历时 6 年, 共计完成 797 个矿区生态修复项目, 到 2014 年, 我国累计投资相关项目 901 亿。到 2016 年, 我国矿区污染土壤生态修复工作取得显著成果, 相关修复技术研发取得诸多突破, 累计研

发、示范、应用、推广了 200 余项生态修复技术,修复矿区污染土地近百万公顷^[12],其中,无土复垦技术、固化稳定化等技术的研发应用,有效提高了矿区生态修复效果,降低了工程成本,为金属矿山污染土壤的修复治理提供了基础保障^[13-14]。例如,1998 年起,中国铝业股份有限公司贵州分公司开展了为期 7 年的大规模矿区生态修复工作,累计种植近 6 万株植物,矿区整体生态恢复治理率将近 80%;同样,孝义铝矿、平果铝业公司采用了剥采—排土—生态修复有机结合的工艺方法,先后对 18 万 m² 的污染破坏区域进行生态恢复,复垦率 74%;铜陵有色集团公司五公里尾矿库,在“兼绿地与建筑用地为一体复垦模式”的目标导向下,对 13 万 hm² 场地进行无土生态修复治理,取得较好修复效果。截至 2018 年,我国累计治理矿山 7 298 个,主要集中在内蒙古、山西、陕西、安徽、山东、新疆、河北、河南等地。2001~2019 年,累计恢复治理面积约 100.46 万 hm²。然而,我国矿产资源丰富,采矿历史悠久,矿区土壤污染与生态破坏问题严重,矿山污染土壤修复率仍处于较低水平,矿区土地复垦率 25% 左右,发达国家已经达到 50%~70% 的平均修复率,矿山污染土壤修复工作任务重道远。

1.3 金属矿区污染土壤生态修复面临的主要问题

据《2018 中国环境统计年鉴》,我国居民点及独立工矿用地面积约 32.13 万 km²,2015 年工业固体废弃物产生量约 331 055 万 t,其中金属矿山固体废弃物排放占用大量土地面积,形成金属矿废弃地;截止 2017 年,矿业开采累计占用损坏土地 2 607 489 hm²,而当年废弃地恢复面积仅 75 778 hm²。数据显示,我国未修复矿区污染土壤面积巨大,且污染区域分布广泛、类型各不相同、治理难度较大,早期开矿未注意“边开采、边修复”的重要性,导致历史遗留问题严重,生态恢复任务十分艰巨。我国金属矿区污染土壤生态修复面临的主要问题有:1)权责不清、生态恢复业主不明;2)缺乏良好的商业模式;3)理念、技术方面的问题;4)政策规范与环保意识问题等。

2 矿区污染土壤改良技术

2.1 物理改良

1) 表土保护利用技术

表土保护(Top soil preservation)是针对露天采场、堆浸场、排土场、尾矿库等建设场地的表土,通过采取表土剥离、运输、存放和利用,实现有效保持表层土壤养分和原位土壤再利用。一般情况,采矿

前先将表土移除(约 0~30 cm 或 30~60 cm),堆存起来,采矿结束后回填,再结合本地特点,播种植物进行生态恢复,保证植物能够得到与周边生境相差不多的生长环境,包括水分、养分、微生物群落等^[15]。研究发现,当回填表土厚度保持在 10 cm 时,生态恢复后植被盖度大约 50%;当回填 30 cm 表土时,植物盖度可达 70%^[16]。REDENTE 等^[17]研究发现,回填应用中,15 cm 回填厚度经济、效果较佳。但回填表土也存在较大的局限性,主要因为涉及表土的采集、存放、二次倒运等大量工程,一些矿山企业甚至花费巨资进行异地熟土覆盖^[18-19]。因此,回填表土的改良方法只能在条件允许的矿区适用,在土源短缺的矿区,应该选择其他行之有效的改良措施。

2) 客土覆盖

当矿区原污染场地缺少可储备的土壤时,可采用异地取土的方式,选取理化性质较优的土壤运送至修复区,同时也可添加氮、磷、钾、有机质、微生物等,为种子萌发、生态恢复提供良好的土壤条件。客土修复,应尽量利用周边距离较近的土壤,或其他项目剥离的土壤,以降低修复成本、减少对其他土层的破坏^[20-21]。客土法和表土回填法一样,因工程涉及的诸多问题,存在很多的局限性,关键在于寻找适用的土源和确定覆盖的厚度和方式。

3) 添加有机物改良土壤

肥料含有大量植物生长发育必须的营养元素,也可改良污染土壤的理化性质,故向矿区污染土壤中投加有机肥可起到双重的修复作用。有机肥来源广泛,粪便、污泥、堆肥等均可作为有机肥料。有机肥料离子交换能力较强,是理想的改良吸附剂,添加到土壤中后,可增强土壤的缓冲能力、改善土壤结构、降低土壤盐分。对于重金属污染土壤,有机肥料可在一定程度上吸附、络合重金属离子,使重金属离子转变成稳定的形态,降低重金属毒性和环境风险。

2.2 化学改良

化学改良方法是比较常见的方法,可分为通过添加化学肥料来提高土壤肥力、添加某种化学物质来抑制另外一种物质的吸收、添加化学物质调节土壤 pH 等。

1) 添加营养物质提高土壤肥力技术

N、P 和 K 都是植物所必需的大量元素,N、P 和 K 的缺失往往是矿山污染土壤植物生长的限制因素。大部分矿区污染土壤均存在结构不佳、养分贫

瘠、污染情况复杂等问题,添加 N、P 和 K 等营养物质可改善土壤成分,促进植物生长。有研究显示,添加一定比例的木屑可促进灌木、非禾本植物成活,添加磷肥可促进氮肥的利用率,促进豆科植物生长^[22]。

2) 施加含 Ca^{2+} 的化合物

研究表明, Ca^{2+} 可与土壤中的某些离子产生拮抗作用,降低土壤中部分重金属离子的毒性,进而降低植物对重金属离子的吸收,促进植物生长。据文献报道^[23],石灰石能够在提高土壤 pH 的同时降低植物吸收重金属 Zn 的总量,使农作物产量提高,亦可用作尾矿库复垦改良基质,能够有效提高尾矿 pH 并降低电导率,阻隔、防止下层尾矿酸化,促进生态恢复; CaCO_3 能有效促进土壤中可交换态重金属 Pb、Cd、Zn 向较稳定形态转化^[20]; $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 可将土壤中的钠离子置换为钙离子,改善土壤基质、提高土壤水的渗透能力,缓解土壤盐碱化程度^[24]。

3) 添加其他重金属钝化材料

近些年,固化/稳定化技术备受关注,由于土壤中重金属的提取工艺成本高,且对土壤理化性质有较大影响,固化/稳定化处理成为污染土壤污染风险管控的另一个优选方案,同时也可利用固化/稳定化技术辅助污染土壤的生态修复。运用天然或改性的环境功能材料,低成本、高效率地使土壤中重金属从活跃态转变成稳定态,改善土壤微生物功能,降低重金属可迁移性和生物毒性,具有很大的研究和应用价值^[25-28]。

2.3 生物改良

1) 动物改良

土壤中的小动物,例如蚯蚓,其正常生活(挖洞、爬行、排粪)就能起到改良土壤结构、增加土壤肥力、促进土壤养分循环、增加土壤中微生物数量的作用^[29-30],进而增强土壤通透性,加速土壤熟化进程,提高土壤肥力^[31-32]。

2) 植物改良

(1) 重金属超富集植物

重金属污染土壤的植物修复近年来受到人们的广泛关注^[33]。植物改良是指用植物来清除、转化、稳定重金属,从而降低土壤重金属的残留水平、逐步改善土壤养分状况并同时恢复土壤原有地貌,促进局部气候改善,微环境得以优化的方法^[33],主要包括植物提取、植物挥发、植物过滤、植物钝化等。目前,已经发现几百种植物能超量富集重金属^[34]。蜈蚣草 [*Eremochloa ciliaris* (L.) Merr.] 和节节草

(*Equisetum ramosissimum* Desf.) 对 As、Cu 有很强的富集作用,适合应用于铜矿区重金属污染土壤^[36]。

(2) 固氮植物

已知固氮量大、固氮能力强、抗逆能力强的生物固氮体系之一是根瘤菌-豆科植物共生体系。从铅锌矿区会自然生长的一些豆科植物根部提取根瘤菌,经过菌株筛选、驯化,可将高性能接种于豆科植物,进而针对矿区污染土壤开展植物-微生物联合修复^[21,29,37-40]。

3) 微生物改良

利用微生物的生命代谢活动降解、转化土壤中的污染物质,达到改良土壤、降低土壤毒性的目的。大量研究和实践表明,微生物改良适合应用于土壤中重金属无害化、植物生长促生、土壤结构改良等,具有巨大的应用潜力。因此,该项技术的研发、推广和应用越来越受重视。有报道显示,铁氧化菌可以有效降低 Fe 污染土壤的风险性,且操作成本低廉^[41];从 Hg 污染河泥中筛选、驯化出来的抗汞微生物,具备把甲基汞还原成元素 Hg 的能力,可以利用这种微生物降低污染土壤中 Hg 的毒性;VA 菌根真菌可促进植物对营养元素的吸收,辅助矿区污染场地生态修复^[42]。

物理、化学方法都是常见方法,成效快,但不可忽视的是对环境扰动大,容易造成二次污染,造成污染物迁移或者是转变成其他有毒有害物质。辛海成等^[43]从物理化学生物等方面综述了不同技术的优缺点,阐述了物理化学修复技术容易造成二次污染,难以大面积推广。黄益宗等^[44]总结了物理化学修复方法和生物修复方法的缺点和优点,提出生物方法绿色环保,还可以提高土壤有机质含量和肥力。所以生物方法有很大的优势,尤其是植物修复,它是一种绿色无污染修复技术,不破坏土壤生态环境,是一种有效和廉价处理某些有害废物的方法。

3 金属矿区土壤生态修复植被的选择与配置

3.1 植物选择的原则

植被恢复一直以“人工辅助自然”、“物种搭配多样”、“乔-灌-草分期布置”、“移植辅助喷播”等为指导思想,遵循“因地制宜、具体设计”、“先锋为首、稳定为主”、“可实现自然演替”、“可实现土壤改良”、“合理利用、有机搭配”、“耐性优先”等原则,在总结与发展的过程中,逐步取得一系列理想的成果,不仅

可以满足短期的生态恢复要求,还可实现长期的自然演替与自然景观恢复。

3.2 适生植物的筛选

3.2.1 草本植物

草本植物早期生长快,盖度大、密度大、易于存活、迅速覆盖地面,对于金属矿区污染土壤生态修复来说,草本植物是初期修复的最佳选择,可以有效防止土壤流失与侵蚀,有利于稳定土层的形成。但草本植物具有根系单一等缺点,单纯使用草本植物,不利于植被群落稳定性形成与维持,易导致自然灾害发生,也容易使恢复的生态系统崩溃。

通过大量研究与实践,适用于金属矿区污染土壤生态防护工程使用的草本植物主要有:田菁[*Sesbania cannabina* (Retz.) Poir.],五节芒[*Miscanthus floridulus* (Labill.) Warb. ex K. Schum. & Lauterb.],弯叶画眉草[*Eragrostis curvula* (Schrader.) Nees],狗牙根[*Cynodon dactylon* (L.) Pers.],紫花苜蓿[*Medicago sativa* L.],高羊茅[*Festuca elata* Keng ex E. Alexeev],百喜草[*Paspalum notatum* Flugge],商陆[*Phytolacca acinosa* Roxb.],野古草[*Arundinella anomala* Steud.],狼尾草[*Pennisetum alopecuroides* (L.) Spreng.],大吴风草[*Farfugium japonicum* (L.f.) Kitam.],野菊花[*Dendranthema indicum*],金鸡菊[*Coreopsis drummondii*],波斯菊[*Cosmos bipinnatus* Cav.],芒萁[*Dicranopteris dichotoma* (Thunb.) Berhn.],香根草[*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash],虎尾草[*Chloris virgata* Sw.],无芒雀麦[*Bromus inermis* Leyss.],碱茅[*Puccinellia distans* (L.) Parl.],山野豌豆[*Vicia amoena* Fisch. ex DC.],绣球小冠花[*Securigera varia* (L.) Lassenn.],结缕草[*Zoysia japonica* Steud.],诸葛菜[*Orychophragmus violaceus* (L.) O. E. Schulz],马蔺花[*Iris lactea* Pall. var. *chinensis* (Flsch.) Koidz.],冰草[*Agropyron cristatum* (L.) Gaertner],斜茎黄耆[*Astragalus adsurgens* Pall.],黑麦草[*Lolium perenne* L.],苇状羊茅[*Festuca arundinacea* Schreb.],白花草木犀[*Melilotus albus* Medic. ex Desr.],披碱草[*Elymus dahuricus* Turcz.]等。

3.2.2 灌木植物

灌木植物在生态修复中的研究与应用,多数来源于日本专家学者的研究。灌木植物根系强壮发达、适于坡面土壤生态修复、韧性强,同时具有易于管理维护、不易滑落、生态系统稳定性强等优点,可

以明显改善小气候,缓和阳光辐射。

但单一的灌木群落也易产生表土侵蚀,对初期的水土保持不利。因此,在边坡防护过程中,应灌木和草本植物相互搭配,可起到快速持久的护坡效果,有利于生态系统的正向演替。适用于金属矿区污染土壤生态防护工程使用的灌木植物主要有:海滨木槿[*Hibiscus hamabo* Sieb. et Zucc.],马棘[*Indigofera pseudotinctoria* Matsum.],荆条[*Vitex negundo* L. var. *heterophylla* (Franch.) Rehder],胡枝子[*Lespedeza bicolor* Turcz.],小叶女贞[*Ligustrum quihoui* Carr.],紫穗槐[*Amorpha fruticosa* L.],决明[*Cassia tora* L.],野山楂[*Crataegus cuneatae*],海桐[*Pittosporum tobira* (Thunb.) Ait.],冻绿[*Rhamnus utilis*],多花木兰[*Magnolia multiflora* M. C. Wang et C. L. Min],算盘子[*Glochidion puberum* (L.) Hutch.],野蔷薇(*Rosa multiflora* Thunb.),杭子梢[*Campylotropis macrocarpa* (Bunge) Rehd.],云实[*Caesalpinia decapetala* (Roth) Alston],小槐花[*Desmodium caudatum* (Thunb.) DC.],夹竹桃(*Nerium indicum* Mill.),野迎春(*Jasminum mesnyi* Hance),锦鸡儿[*Caragana sinica* (Buc'hoz) Rehder],柠条(*Caragana Korshinskii* Kom.),叉子圆柏[*Sabina vulgaris* Antoine],绣线菊[*Spiraea salicifolia* Linn],黄刺玫[*Rosa xanthina* Lindl.],胡颓子(*Elaeagnus pungens* Thunb.),丁香(*Syringa oblata* Lindl.),连翘[*Forsythia suspense* (Thunb.) Vahl],黄栌(*Cotinus coggyria* Scop. var. *cinerea* Engl.),蒙古莢(*Caryopteris mongholica* Bunge),枸杞(*Lycium chinense* Mill.),酸枣[*Ziziphus jujuba* Mill. var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H. F. Chow],怪柳(*Tamarix chinensis* Lour.),杞柳(*Salix integra* Thunb.),杜鹃(*Rhododendron simsii* Planch.),四季桂(*Osmanthus fragrans* var. *semperflorens*),细枝岩黄芩(*Hedysarum scoparium*),沙冬青[*Ammopiptanthus mongolicus* (Kom.) S. H. Cheng],沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.),沙柳(*Salix cheilophila*),黄柳(*Salix gordejvii* Y. L. Chang & Skvortsov),白刺(*Nitraria tangutorum* Bobrov)等。

3.2.3 乔木植物

在金属矿区污染土壤生态修复尤其是边坡修复中,往往需要乔木、灌木、草本植物相结合的形式形成稳定的群落结构,以快速、稳定达到修复目标,且

使修复具有长效性、科学性。研究表明,适宜于金属矿区土壤生态恢复使用的乔木植物有:臭椿 [*Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle]、樟树 [*Cinnamomum camphora* (L.) J. Presl]、构树 [*Broussonetia papyrifera* (Linn.) L' Hér. ex Vent.]、野桐 [*Mallotus japonicus* (Thunb.) Muell. Arg. var. *floccosus*]、刺槐 (*Robinia pseudoacacia* Linn.)、乌桕 [*Sapium sebiferum* (L.) Roxb.]、盐肤木 [*Rhus chinensis* Mill.]、大叶女贞 [*Ligustrum compactum* (Wall. ex G. Don) Hook. f. & Thomson ex Decne.]、黄连木 [*Pistacia chinensis* Bunge]、木麻黄 [*Casuarina equisetifolia* L.]、舟山新木姜子 [*Neolitsea sericea* (Bl.) Koidz.]、榔榆 [*Ulmus parvifolia* Jacq.]、侧柏 [*Platycladus orientalis* (L.) Franco]、油松 [*Pinus tabulaeformis* Carr.]、栓皮栎 [*Quercus variabilis* Bl.]、辽东栎 [*Quercus wutaishanica* Mayr]、栎树 [*Koelreuteria paniculata* Laxm.]、榆树 [*Ulmus pumila* Linn.]、白蜡树 [*Fraxinus chinensis* Roxb.]、杜梨 [*Pyrus betulaefolia* Bunge]、山桃 [*Amygdalus davidiana* (Carrière) de Vos ex Henry]、山杏 [*Armeniaca sibirica* (L.) Lam.]、火炬树 [*Rhus typhina* Torner.]、银合欢 [*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit]等。

3.2.4 藤本植物

藤本植物多根系发达,生长速度快,可以满足陡坡或垂直绿化要求,生命力顽强,适合极端条件下的污染土壤生态修复,起到快速、稳定的生态修复效果。藤本植物具有极强的扩张性、抗逆性,同时可以有效保土、固坡,价格低廉,景观性强,适应性强。适用于金属矿区污染土壤生态修复的藤本植物主要有以下几种:五叶地锦 [*Parthenocissus quinquefolia* (L.) Planch]、葛藤 [*Pueraria lobata* (Willd.) Ohwi]、爬山虎 [*Parthenocissus tricuspidata*]、络石 [*Trachelospermum jasminoides* (Lindl.) Lem.]、常春油麻藤 [*Mucuna sempervirens* Hemsl.]、西番莲 [*Passiflora coerulea* L.]、忍冬 [*Lonicera Japonica* Thunb.]、凌霄 [*Campsis grandiflora* (Thunb.) Schum.]、常春藤 [*Hedera nepalensis* K. Koch Var. *Sinensis* (Tobler) Rehder]、木藤蓼 [*Fallopia aubertii* (L. Henry) Holub]、杠柳 [*Periploca sepium* Bunge]等。

3.3 植物配置原则

在金属矿区污染土壤生态修复中,植物配置方

式、种植密度、品种选择、搭配形式等均可以影响修复效果、成本。因此,矿区污染土壤生态修复要因地制宜、科学合理、经济有效、长效稳定。植物的配置应遵循以下原则:1)优化植物配置,遵从生态位原则;2)建立自然群落结构,保持物种多样性;3)外来植物与乡土树种相结合;4)合理搭配目标植物与先锋植物的比例。

4 展望

典型金属矿区污染土壤生态修复不是单一的污染修复问题,系统化的生态修复要考虑到污染特征、地域特性、修复效率、经济效益、长期效应等复杂的全过程环节,同时还要匹配社会发展与生态系统的相互联系与依赖。基于金属矿区污染土壤生态修复研究与实践现状,对金属矿区污染土壤生态修复的发展方向提出以下几点展望:

1)急需建立金属矿区污染土壤生态修复评估体系与标准

金属矿区污染条件复杂,且受区域地理位置影响,因此,各金属矿区面临的生态修复问题不同,生态修复技术往往具有针对性,需因地制宜,导致该领域评估手段与方法很难形成体系,缺乏具有全面覆盖性、系统化的金属矿区污染土壤生态修复的评估体系与标准。需要以在全国范围内的金属矿区生态环境现状调研、修复效果统计工作为基础,同时对生态修复技术发展现状、实践情况进行系统统计,进而建立金属矿区污染土壤生态修复评估体系与标准。

2)缺乏金属矿区污染土壤生态修复长效监管系统

人工修复与阻隔只是金属矿区污染土壤生态修复的开始,长效性的考察与监管更加重要。探索人工生态修复与自然生态演替的衔接演化关系是一项复杂的、漫长的工作,因此,建立一套金属矿区污染土壤生态修复长效监管系统尤为重要,目前,在这方面的研究尚未见报道。

3)金属矿区污染土壤生态修复的技术体系较薄弱

目前,对金属矿区污染土壤生态修复的研究较多,集中在土壤改良、植物修复、微生物修复等的研究,然而,对于金属矿区污染土壤生态修复的技术体系研究较薄弱。修复体系的研究与建立,需要大量的分项试验配合及大规模的示范验证,同时需要每一项工艺环节提供具体参数,因此,金属矿区污染土

壤生态修复体系的建立是一项繁琐的工作,也是一项具有技术发展标志性的工作,具有深刻的研究与现实意义。

参考文献

- [1] 谢计平. 矿山废弃地分析及生态环境修复技术研究进展[J]. 环境保护与循环经济, 2017(6): 43-47.
XIE J P. Analysis of mine abandoned land and research progress of ecological environment restoration technology[J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2017(6): 43-47.
- [2] 中华人民共和国自然资源部. 2019 中国矿产资源报告[R]. 北京:地质出版社, 2019.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. China Mineral Resources Report[R]. Beijing: Geological Publishing House, 2019.
- [3] SRIVASTAVA P K, VAISH A, DWIVEDI S, et al. Biological removal of arsenic pollution by soil fungi[J]. Science of the Total Environment, 2011, 409 (12): 2430-2442.
- [4] 范景彪,熊明瑜,钟均华. 酸性尾矿废弃地生态修复技术进展[J]. 现代矿业, 2019, 35(4): 216-219.
FAN J B, XIONG M Y, ZHONG J H. Advances in ecological restoration technology of acidic mine tailings[J]. Modern Mining, 2019, 35(4): 216-219.
- [5] 孙婧. 发达国家矿区土地复垦对我国的借鉴与启示[J]. 中国国土资源经济, 2014(7): 42-44.
SUN J. What we can learn from developed countries' land reclamation in mining areas as our inspiration and reference[J]. China's Land and Resources Economy, 2014(7): 42-44.
- [6] 曾小星,廖翔. 矿山土地复垦和生态重建工作探析[J]. 科技资讯, 2019, 17(28): 59-60.
ZENG X X, LIAO X. Exploration and analysis of mine land reclamation and ecological reconstruction [J]. Technology Information, 2019, 17(28): 59-60.
- [7] 王永生,黄洁,李虹. 澳大利亚矿山环境治理管理、规范与启示[J]. 中国国土资源经济, 2006(11): 36-37.
WANG Y S, HUANG J, LI H. Management, regulation and enlightenment of environmental governance in Australian mines[J]. China's Land and Resources Economy, 2006(11): 36-37.
- [8] 姜杉钰,余星涤. 澳大利亚自然保护地矿业管理经验与启示[J]. 国土资源情报, 2019(1): 11-17.
JIANG S Y, YU X D. The enlightenment from experience on mining management in Australian natural protected area[J]. Land and Resources Information, 2019(1): 11-17.
- [9] 袁斯文. 铅锌矿废弃地生态修复工程设计及效果研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2015.
YUAN S W. Study on design and effect of ecological rehabilitation project of lead-zinc mine abandoned land[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2015.
- [10] 郑娟. 矿区废弃地生态恢复研究进展[J]. 水土保持应用技术, 2019(6): 53-55.
ZHENG J. Research progress of ecological restoration of abandoned land in mining area[J]. Water and Soil Conservation Application Technology, 2019(6): 53-55.
- [11] 陈伟,宁平,黎慧娟,等. 矿山废弃地生态环境恢复治理进展[J]. 环境工程技术学报, 2017, 7(1): 78-87.
CHEN W, NING P, LI H J, et al. Progress in restoration and management of ecological environment in abandoned mines [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2017, 7(1): 78-87.
- [12] 杨华明,李建文. 冶金矿山生态修复技术的进展[J]. 鞍钢技术, 2017(6): 4-10.
YANG H M, LI J W. Development of ecological restoration technology in metallurgical mines [J]. Angang Technology, 2017(6): 4-10.
- [13] 曾宪坤,熊挺宇. 生态重建技术在城门山铜矿的应用[J]. 有色冶金设计与研究, 2018, 39(5): 8-11.
ZENG X K, XIONG T Y. Application of ecological reconstruction technology in Chengmenshan copper mine[J]. Non-ferrous Metallurgy Design and Research, 2018, 39(5): 8-11.
- [14] 束文圣,叶志鸿,张志权,等. 华南铅锌尾矿生态恢复的理论与实践[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 1629-1639.
SHU W S, YE Z H, ZHANG Z Q, et al. Theory and practice of ecological restoration of lead-zinc tailings in South China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23 (8): 1629-1639.
- [15] 莫爱,周耀治,杨建军. 矿山废弃地土壤基质改良研究的现状、问题及对策[J]. 地球环境学报, 2014(4): 292-300.
MO A, ZHOU Y Z, YANG J J. Existing situation, problems and countermeasures on amelioration of soil matrix in mining wasteland [J]. Journal of Earth Environment, 2014(4): 292-300.
- [16] HOLMES P M, RICHARDSON D M. Protocols for restoration based on recruitment dynamics, community structure and ecosystem function: Perspectives from South African fynbos[J]. Restoration Ecology, 1999, 7(3): 215-230.
- [17] REDENTE E F, MCLENDON T, AGNEW W. Influence of topsoil depth on plant community dynamics of

- a seeded site in northwest Colorado [J]. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1997, 11(2): 139-149.
- [18] 彭建, 蒋一军, 吴健生, 等. 我国矿山开采的生态环境效应及土地复垦典型技术[J]. *地理科学进展*, 2005(2): 38-48.
- PENG J, JIANG Y J, WU J S, et al. Ecological environmental effects of mining in my country and typical land reclamation techniques [J]. *Geographical Science Progress*, 2005(2): 38-48.
- [19] 张鸿龄, 孙丽娜, 孙铁珩, 等. 矿山废弃地生态修复过程中基质改良与植被重建研究进展[J]. *生态学杂志*, 2012(2): 222-229.
- ZHANG H L, SUN L N, SUN T H, et al. Research progress on substrate improvement and vegetation reconstruction in the process of ecological restoration of mine wasteland [J]. *Journal of Ecology*, 2012(2): 222-229.
- [20] 王志宏, 李爱国. 矿山废弃地生态恢复基质改良研究[J]. *中国矿业*, 2005, 14(3): 24-25.
- WANG Z H, LI A G. Amelioration of soil media during ecological restoration in the mining wasteland [J]. *China Mining Magazine*, 2005, 14(3): 24-25.
- [21] 李若愚, 侯明明, 卿华, 等. 矿山废弃地生态恢复研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2007(1): 55-59.
- LI R Y, HONG M M, QING H, et al. Research progress on ecological restoration of mine abandoned land [J]. *Mineral Protection and Utilization*, 2007(1): 55-59.
- [22] 黄凯, 张学洪, 张杏锋. 改良剂对铅锌尾矿砂重金属形态的影响[J]. *湖北农业科学*, 2014(21): 80-84.
- HUANG K, ZHANG X H, ZHANG X F. Influence of modifiers on the form of heavy metals in lead-zinc tailings [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2014(21): 80-84.
- [23] DAVIS J G, WEEKS G, PARKER M B. Use of deep till age and liming to reduce zinc toxicity in peanuts grown on fluedust contaminated land [J]. *Soil Technology*, 1995, 8(2): 85-95.
- [24] 胡宏伟, 姜必亮, 蓝崇钰. 广东乐昌铅锌尾矿废弃地酸化控制研究[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 1999, 38(3): 68.
- HU H W, JIANG B L, LAN C Y. Study on acidification control of Lechang lead-zinc tailings wasteland in Guangdong [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 1999, 38(3): 68.
- [25] 娄燕宏, 诸葛玉平, 顾继光, 等. 粘土矿物修复土壤重金属污染的研究进展[J]. *山东农业科学*, 2008(2): 68-72.
- LOU Y H, ZHUGE Y P, GU J G, et al. Research progress of clay minerals in remediation of soil heavy metal pollution [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2008(2): 68-72.
- [26] 徐超, 陈炳睿, 吕高明, 等. 硅酸盐和磷酸盐矿物对土壤重金属化学固定的研究进展[J]. *环境科学与管理*, 2012, 37(5): 164-168.
- XU C, CHEN B R, LV G M, et al. Research progress on the chemical fixation of soil heavy metals by silicate and phosphate minerals [J]. *Environmental Science and Management*, 2012, 37(5): 164-168.
- [27] 刘云, 董元华, 杭小帅, 等. 环境矿物材料在土壤环境修复中的应用研究进展[J]. *土壤学报*, 2011, 48(3): 629-638.
- LIU Y, DONG Y H, HANG X S, et al. Research progress on application of environmental mineral materials in soil environmental remediation [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(3): 629-638.
- [28] YI X U, LIANG X F, XU Y M, et al. Remediation of heavy metal-polluted agricultural soils using clay minerals: A review [J]. *Pedosphere*, 2017, 27(2): 193-204.
- [29] BOYER S, WRITTEN S D. The potential of earthworms to restore ecosystem services after opencast mining: A review [J]. *Basic & Applied Ecology*, 2010, 11(3): 196-203.
- [30] 张永志. 重金属污染对土壤动物群落结构的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- ZHANG Y Z. Influence of heavy metal pollution on soil animal community structure [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
- [31] 林淑芬, 李辉信, 胡锋. 蚓粪对黑麦草吸收污染土壤重金属铜的影响[J]. *土壤学报*, 2006, 43(6): 911-918.
- LIN S F, LI H X, HU F. Effect of vermicompost on ryegrass absorption of heavy metal copper in polluted soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(6): 911-918.
- [32] 王丹丹. 蚯蚓及蚓粪对植物修复 Cu、Zn 污染土壤的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2006.
- WANG D D. The effect of earthworm and vermicompost on phytoremediation of Cu and Zn contaminated soil [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006.
- [33] 胡鹏杰, 李柱, 吴龙华. 我国农田土壤重金属污染修复技术、问题及对策谏议[J]. *农业现代化研究*, 2018(4): 535-542.
- HU P J, LI Z, WU L H. Remediation technology, problems and countermeasures of heavy metal pollution in farmland soil in my country [J]. *Agricultural Modernization Research*, 2018(4): 535-542.

- [34] KHAN A G, KUEK C, CHAUDHRY T M, et al. Role of plants, mycorrhizae and phytochelators in heavy metal contaminated land remediation [J]. *Chemosphere*, 2000, 41(1/2): 197-207.
- [35] 高晓宁. 土壤重金属污染现状及修复技术研究进展[J]. *现代农业科技*, 2013(9): 229-231.
GAO X N. Current status of soil heavy metal pollution and research progress in remediation technology [J]. *Modern Agricultural Technology*, 2013(9): 229-231.
- [36] 李影, 王友保, 刘登义. 安徽铜陵狮子山铜尾矿场植被调查[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(11): 1981-1984.
LI Y, WANG Y B, LIU D Y. Vegetation investigation on Shizishan copper tailings field in Tongling, Anhui [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 1981-1984.
- [37] 王英辉, 陈学军. 金属矿山废弃地生态恢复技术[J]. *金属矿山*, 2007(6): 4-7.
WANG Y H, CHEN X J. Ecological restoration technology of abandoned metal mines [J]. *Metal Mine*, 2007(6): 4-7.
- [38] 赵默涵. 矿山废弃地土壤基质改良研究[J]. *中国农学通报*, 2008(12): 138-141.
ZHAO M H. Research on soil substrate improvement of mine wasteland [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008(12): 138-141.
- [39] 王红新, 郭绍义, 许信旺, 等. 接种丛枝菌根对复垦矿区玉米中重金属含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(4): 1333-1337.
WANG H X, GUO S Y, XU X W, et al. Effect of inoculation of *Arbuscular mycorrhiza* on heavy metal content in corn in reclaimed mining area [J]. *Journal of Agricultural Environmental Sciences*, 2007, 26(4): 1333-1337.
- [40] 杨晓艳, 姬长生, 王秀丽. 我国矿山废弃地的生态恢复与重建[J]. *矿业快报*, 2008(10): 22-24.
YANG X Y, JI C S, WANG X L. Ecological restoration and reconstruction of abandoned land in mines of China [J]. *Express Information of Mining Industry*, 2008(10): 22-24.
- [41] 孙翠玲, 顾万春, 郭玉文. 废弃矿区生态环境恢复林业复垦技术的研究[J]. *资源科学*, 1999(3): 70-73.
SUN C L, GU W C, GUO Y W. Research on forestry reclamation technology for ecological environment restoration in abandoned mining area [J]. *Resource Science*, 1999(3): 70-73.
- [42] 赵永红, 张涛, 成先雄. 矿山废弃地植物修复中微生物的协同作用[J]. *中国矿业*, 2008, 17(10): 46-48.
ZHAO Y H, ZHANG T, CHENG X X. Synergistic effect of microorganisms in phytoremediation of mine wasteland [J]. *China Mining Magazine*, 2008, 17(10): 46-48.
- [43] 辛海成, 赵运林, 许永立, 等. 重金属污染治理修复技术[J]. *现代农业科技*, 2013(10): 221.
XIN H C, ZHAO Y L, LIN Y L. Heavy metal pollution treatment and repair technology [J]. *Modern Agricultural Technology*, 2013(10): 221.
- [44] 黄益宗, 郝晓伟, 雷鸣, 等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 3(3): 409-417.
HUANG Y Z, HAO X W, LEI M, et al. Remediation technology and practice of heavy metal contaminated soil [J]. *Journal of Agricultural Environmental Sciences*, 2013, 3(3): 409-417.