

# 金属尾矿砂的改良和植被重建研究进展<sup>①</sup>

郝秀珍 周东美\*

(土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所) 南京 210008)

**摘要** 针对金属尾矿砂的理化性状以及所带来的环境影响进行了简要介绍和评述,着重从改良的角度论述了我国治理修复金属矿区尾矿砂的研究进展、存在的问题和将来的发展方向。

**关键词** 重金属;尾矿砂;改良

**中图分类号** S156.5

土壤重金属污染来源主要包括矿山开采与冶炼、污水灌溉、固体废弃物不当堆置以及大量农药与化肥的使用等<sup>[1]</sup>。其中,矿山开采与冶炼所带来的土壤重金属污染是相当严重的<sup>[2]</sup>。

人类的矿业活动已有几千年的历史,而我国目前 90% 以上的能源和 80% 左右的工业原料取自矿产开发,矿产品作为人类的主要原料之一,对国民经济的发展起着非常重要的作用。但是,采矿工业在向大自然挖掘矿产资源的同时,也不同程度的破坏了当地的土地资源<sup>[3-5]</sup>,使土地失去利用价值,特别是导致了土壤和植被的丧失,如露天开采会直接摧毁地表土层和植被,地下开采会导致地表塌陷等<sup>[6]</sup>。

金属矿山选矿厂排弃的尾矿是矿山主要固体废弃物之一,在我国南方地区表现得尤为突出。据 1998 年不完全统计,我国金属矿山存在地面的尾矿已达 40 多亿 t,并以每年约 200 万 t 的速度在增长<sup>[7]</sup>。其中每采出 1 t 矿石,就产生 0.92 t 尾矿。由于我国大多数矿藏的品位较低,多呈多组分共(伴)生,矿物嵌布粒度细,再加上一些选矿设备陈旧,自动化水平低,管理水平不高,导致选矿总回收率只有 30% 左右,同时矿产综合利用程度不足。目前,我国尾矿的综合利用率仅为 7% 左右,大量的尾矿只能长期堆放在尾矿坝围筑的尾矿库中,有些边远地区的乡镇矿山选矿厂甚至直接将尾矿排放到自然场地之中。

## 1 尾矿的危害性

我国多数老矿山生产建设时不重视环保要求,

环境欠账较多。改革开放以来,对迅猛发展的小型矿山疏于管理,加之小型矿山的开采方法和选矿工艺落后,大多无环境保护设施,加剧破坏了矿区的生态环境。由于矿山企业星罗棋布,分布广泛,造成的环境影响面大,已成为我国重要的污染源。

尾矿库坝体高度随着尾矿的大量排放而增加,从而不安全隐患增大,如安徽黄梅山铁矿尾矿库溃坝,冲毁村庄,造成人民生命财产的严重损失<sup>[8]</sup>。与此同时,有色金属工业产生的尾矿中含有的有毒物质还容易造成重大环境问题:颗粒细小的尾矿干固后极易扬尘,若遇到刮大风天气有可能引起尾矿沙尘暴,污染大气和环境;尾矿中的有害成分产生大量酸性水以及由此引起所含有的重金属元素发生化学迁移,从而导致地下水源和土壤的污染;因植被丧失引起的局部水土流失,造成严重的生境恶化,打破原有的生态平衡。目前,我国因尾矿造成的直接污染面积已达 10 万  $\text{hm}^2$ ,间接污染土地 100 余万  $\text{hm}^2$ <sup>[8]</sup>。所以,加强尾矿治理和生境恢复等具有非常重要的意义。

## 2 尾矿砂的性状

尾矿又称尾砂,它是矿石经粉碎,浮选中矿、精矿后余下的微粒状固体粉末。由于尾矿粒度小( $<37 \mu\text{m}$ )、重量轻、表面积大,堆放时易造成流动和塌漏,破坏植被;尾矿粉尘在风力推动下,四处飞扬,造成空气、土壤污染,土地退化、沙化、盐渍化,生态系统退化,生物多样性丧失,农作物减产,并威胁到人体健康<sup>[9]</sup>;大量松散的尾矿在季节性降雨作用下,容易造成土地滑坡和泥石流,对

<sup>①</sup>国家 863 项目(2001AA645010-2)和中国科学院知识创新项目(KZCX 2-401)资助。

\*通讯作者(dmzhou@issas.ac.cn)

附近的村镇、农田、水源等构成巨大威胁。

由于尾矿砂的结构特点,昼夜温差大,颗粒凝聚力弱,使得持水力特别差,湿时粘重板结,透气性不良,对作物生长极为不利<sup>[10]</sup>。质地疏松的尾矿砂极易发生风蚀水蚀现象,因此必须建造尾矿坝加以储存,而被填满的尾矿坝常常便成为寸草不生的废弃地。

尾矿根据选矿的工艺,分为高硫、中硫和低硫尾矿。含硫尾矿在氧气、水分的作用下,经细菌催化而发生酸化。随着时间的推移,高硫和中硫矿发生了不同程度的酸化,而低硫尾矿由于内部的碱性物质足以中和硫化物氧化所产生的酸,pH 始终保持在 8 左右<sup>[11, 12]</sup>。尾矿的酸化引起金属离子和养分元素的活化流失,使尾矿更加贫瘠。

早期的一些研究表明,尾矿废弃地具有极端恶劣的化学性质:过酸或过碱;重金属(如 Cu、Pb、Zn、Cd 等)含量高<sup>[13, 14]</sup>,是食物链中重金属的潜在来源;极端贫瘠,有机质、N、P、K 含量低,表现为营养不良或不平衡;盐分含量高;S 含量高<sup>[15-21]</sup>。

综上所述,矿砂不良的物理和化学性质对植物的生长不利,从而限制了尾矿砂上植被的恢复和重建。近年来,一些学者在矿山废弃地利用方面已经开展了一系列的研究和探讨,尤其是植被恢复技术方面<sup>[22-25]</sup>。除此之外,不同的矿砂有不同的限制植被重建的因素,即使同一个尾矿库,化学组成在横向和纵向上可能也有很大的不同,因此要想成功地恢复一个尾矿库的植被,正确地评价其理化的和生物的限制因素是非常必要的<sup>[26]</sup>。

### 3 重金属尾矿的治理与利用

目前对尾矿治理与利用的方法可概括为:①覆土造田。在土壤比较充足的地区可采用压 10~20 cm 土的方法而后进行种植,覆土造田,扩大耕地面积,这种方法适用于呈山谷形的尾矿库。多年来,这种方法已得到肯定。周连碧等<sup>[10]</sup>研究了黄土与尾矿砂混合覆盖,由于所用矿砂本身碱性,碳酸盐含量高,可以长久地保持 pH 值接近 8,从而大大减低了以 Cu 为主的重金属在土壤水相中的溶解度,使得尾矿库上种植的作物籽粒(高粱)中的重金属浓度远远低于尾砂中的浓度(200~500 mg/kg)。种子中的重金属浓度相当,达到了食品卫生标准。但也有因压的土层较薄,造成粉尘二次危害的。②利用有机废弃

物,对重金属尾矿粉尘采取可降解性固化、封闭,选择适当种子和基质使植物迅速发芽、成长以达到植被利用目的。这种治理尾矿的方法,通过几年的实践,摸索出一些经验,尤其是对可降解固化废料选择、基质、种子选择以及种子发芽时间等做了多项实验,有些已获成功。它克服了占用大量土层、受尾矿性状所限治理不便等弊端。同时在沙漠治理等方面也大有可为。③利用尾矿开发建筑材料。金属尾矿中某些硅砂、砂岩或脉石英可被利用。砖是最常见的建筑材料,用尾矿制砖也是很好的利用方法,掺加一定量的石灰制成砖坯,然后送入碳化室,通入 CO<sub>2</sub> 碳化成砖,不但增加砖的压强,减少取土毁地,而且经济效益也相当可观。尾矿还可以制造平板玻璃及各种保温、隔热、隔音材料。此外,从尾矿中提取有用金属技术也已被利用。

### 4 重金属尾矿改良

通过基质改良的方法可降低或消除一些尾矿砂理化方面的限制因子。基质改良的方法就是通过加入改良剂(有机质、石灰等),以改善尾矿砂不良的理化性状来满足植物生长所需要的适宜条件。土壤的理化性质,如有机质含量、矿物组成、pH 和 Eh 值,均可影响重金属的形态及各种形态之间的转化。通过施用改良剂来改变这些参数,从而可以调节重金属在土壤中的移动性。一旦污染土壤中的重金属被固定后,不仅能减少其向土壤深层和地下水迁移,而且可能重建植被<sup>[27, 28]</sup>。但同时由于其具有不同于一般意义上的土壤理化特点,其治理难度较大。在含有重金属污染的尾矿砂上选择使用改良剂,进行基质改良的目标主要集中在改善不良的物理结构、降低重金属生物有效性和增加养分上<sup>[9]</sup>。

#### 4.1 改良剂

目前国内外广泛采用的改良剂主要有:①沉淀剂:磷酸盐、石灰、硅酸钙炉渣、粉煤灰、磷灰石、生物固体、蘑菇渣、石灰硫磺合剂等;②吸附材料:有机物料、锰氧化物、含水铁氧化物、沸石、膨润土、甲壳质、蒙脱石等;③络合剂:EDTA、DTPA、HEDTA、有机质等。但是所加入的改良剂所起到的作用并不是单一的,如生物固体和有机质在某种程度上充当一种缓慢释放的营养源,同时可通过螯合有效态的有毒金属而降低其毒性<sup>[29]</sup>。

#### 4.2 改良机理

关于土壤重金属污染物防治途径研究,人们一

直强调土壤自身的净化能力。而加入各种改良剂就是增强这种自净能力。不同的改良物质有其独特的作用和机理。各种改良剂改良污染土壤的机理主要有：沉淀作用、吸附作用和颞颞作用<sup>[30]</sup>。

沉淀作用就是利用一些物质与重金属形成沉淀，来降低土壤溶液中重金属离子的溶解度，从而有效地降低重金属向植物体的迁移。吸附作用则是通过吸附剂来钝化土壤中的重金属，降低其生物活性，以减少植物的吸收。另外，Wilkins<sup>[31]</sup>在1957年发现，很多溶液中的重金属离子毒性由于 $\text{Ca}^{2+}$ 的存在而趋于缓和，这种作用称为离子颞颞。通过离子之间的颞颞来降低植物对污染物的吸收，在某些情况下也是经济有效的。

当然，作为一种具体的改良剂加入到土壤中后，所发生的作用以及所起到的效果并不是单一的，而可能是几种作用的综合表现<sup>[32]</sup>。研究表明，石灰一般作为酸性条件下土壤重金属污染的改良物质，它不仅可以增加土壤的pH值，而且还可以通过重金属自身的水解反应及其与 $\text{CaCO}_3$ 的共沉淀反应机制降低土壤中重金属的移动性<sup>[33]</sup>。在酸性土壤上施用石灰，利用 $\text{Ca}^{2+}$ 离子与 $\text{Pb}^{2+}$ 的颞颞作用，也可减少作物对Pb的吸收<sup>[34]</sup>。污水污泥、生活垃圾及动物粪便等也被广泛地应用于矿业废弃地重建植被时的基质改良。这是因为它们富含养分，且养分的释放缓慢，可供植物较持久地利用；含有大量的有机质，可以螯合部分重金属离子，缓解其毒性；可改善基质的物理结构，提高基质的持水保肥能力。这类物质本身便是一类固体废弃物，这种以废治废的做法具有很好的综合效益<sup>[35]</sup>。

#### 4.3 改良剂在金属尾矿上的应用

关于改良剂在重金属尾矿的改良修复应用方面，取得了一些进展，主要集中于Pb/Zn矿上，同时Cu矿尾矿砂的研究也陆续开展起来。在温室条件下于Pb/Zn矿上施用不同比例的污泥，种植豆科植物*Sesbania rostrata*和*S. cananbina*的试验结果表明，这两种植物能够在改良过的Pb/Zn矿上生长80天，并且以污泥施用比例为50%时效果最好。污泥的加入不但增加了C、N、P和K的总量，而且还减少了矿砂中Pb、Zn、Cd总量以及用DTPA提取的Pb和Cd含量。但是，试验中也发现了污泥的施用导致了矿砂以及植物中的Cu含量增加，这可能是因为污泥本身含有高浓度的Cu<sup>[36]</sup>。

利用双穗雀稗(*Paspalum distichum*)的重金属

耐性生态型，结合土壤、垃圾和石灰改良尾矿，束文圣等<sup>[37]</sup>在广东乐昌进行了为期1年的尾矿植被重建的野外试验。结果表明，双穗雀稗可以在乐昌Pb/Zn尾矿正常生长，而尾矿覆盖5cm的土壤或垃圾则可大幅度提高它的生物量。施用石灰不仅促进植物的生长，同时可抑制植物对重金属的吸收。除了TDL处理(尾矿+5cm垃圾+石灰)，第二次收割结果双穗雀稗的生物量较第一次收割有着极显著的提高，但各处理组植物体内的重金属含量普遍有所降低。试验证明利用耐性植物可在经轻度改良的尾矿上成功定居。

Ye等<sup>[14, 22]</sup>利用石灰和猪粪改良酸性Pb/Zn矿取得了很好的效果，不仅提高了尾矿砂的pH值，还减少了其电导(EC)和DTPA提取态的Pb和Zn含量。另外，他们<sup>[29]</sup>还用猪粪、蘑菇渣、煤渣、粉尘以及未受污染的表层土壤作为Pb/Zn矿的改良材料，其中以煤渣加表土以及粉尘加30cm表土的效果比较好。

我们实验室在这方面也进行了大批次的盆栽试验，将蒙脱石、沸石、泥炭以及鸡粪等应用于Cu矿砂，种植黑麦草，获得了非常好的结果，综合比较而言，以添加5%施用量的泥炭效果更经济有效<sup>[38-40]</sup>。

#### 4.4 改良方法的评价

改良措施不需要将污染土壤移去，可就地治理，治理效果及费用适中，对于中度污染区，不失为适宜的方法，如果与农业措施及生物措施配合使用，效果会更好。利用改良方法可明显改善尾矿不良的理化性状，并且可根据当地的条件就近取材，选用价廉易得的材料。

任何一种治理方法都有其局限性，需根据土壤污染的特点和土壤的性质，选择一种或几种联合起来达到一个较理想的效果。在尾矿改良过程中，如果处理不当，将会造成二次污染。如颞颞法虽可使某种离子毒害减轻，但同时也会使土壤中另外一些离子浓度升高，造成另一种元素的污染及复合污染等<sup>[41]</sup>。沉淀作用虽然可以降低土壤溶液中金属离子的溶解度，同时也会使土壤和植物某些必需的营养元素发生沉淀，易导致微量元素的缺乏。因此改良剂施用后要加强管理，以免被吸附或固定的污染物再度活化<sup>[30, 42]</sup>。

改良措施只是一个将污染减少到一定限度的措施，仅改变了污染物在土壤中的存在状态，但仍持

留在土壤中<sup>[43]</sup>。对于尾矿废弃地来说,加入改良剂并不能达到根本治理目的,废弃地的修复还必须要植物的参与,使植物能够在废弃地环境中成功定居,因此需要选择耐旱、耐贫瘠以及耐重金属毒性的植物,同时也要加入一些植物生长所需要的养分等。

#### 4.5 肥料和耐性植物

施用污泥和有机物质可以提供营养物质和积极地改善矿砂的不良性状,然而仅仅靠这些物质是不能达到稳定、长期的复垦,必须综合考虑肥料和植物因子。

施肥是农业生产中必不可少的一项增产措施,即使在污染土壤上亦是如此。施肥可以通过以下几种途径而影响到植物对土壤中重金属的吸收:①促进植物生长;②带入重金属离子;③影响土壤 pH(少数情况下影响到土壤 Eh);④提供能沉淀、络合重金属的基团;⑤带入竞争离子;⑥影响到根系和地上部的生理代谢过程或重金属在植物体内的运转等而间接影响重金属元素的吸收<sup>[44]</sup>。

N、P、K 都是植物所必需的大量元素,而 N、P、K 的缺乏往往是矿业废弃地上植物生长的限制因子<sup>[45]</sup>,因而化学肥料使用后一般能取得迅速而显著的效果。鉴于废弃地的基质结构不良,速效的化学肥料极易被淋溶,这样就需要少量、多次施用速效化肥或选用一些分解缓慢的长效肥料。但是如果存在有毒因素,如极端的 pH 值、盐或重金属含量过高,那么对废弃地添加各种主要养分不能促进植物的生长。在这种情况下,缺乏主要养分不过是次要因素,只有那些有毒因素被排除后,植物生长才能获得明显的效果。

在矿业废弃地植被恢复中 N 素及 N 循环常常处于关键的地位<sup>[46]</sup>。因为 N 素的状况在很大程度上反映出系统中的养分状况。利用生物固氮,是化肥和有机肥的很好替代。重金属含量较低的废弃地,生物固氮显示出很大的潜力。豆科植物具有较强的耐干旱特性,同时根瘤菌又可以固定空气中的 N 源,当前许多国家非常重视对重金属耐性豆科植物的发现和选择以及利用豆科植物进行矿业废弃地修复的实践。在美国加洲北部的 Cu 矿废弃地上发现了生长良好的豆科百脉根属 (*L. purshianus*)、羽扇豆属 (*Lupinus bicolor*) 和车轴草属植物,这是一些相应 Cu 具耐性的生态型物种<sup>[47, 48]</sup>。张志权等<sup>[49]</sup>在 Pb/Zn 尾矿上引入土壤种子库的试验中也发现,木

本豆科植物银合欢可以在尾矿地上成功定居并开花结果。但是由于尾矿存在着极为恶劣的理化特性,包括板结,透气性不良,含有重金属毒性,过酸或过碱等,不利于固氮微生物的活动<sup>[50]</sup>,影响固氮效率。因此可以考虑在尾矿砂上添加改良剂,对不良的理化性状进行改善以后,逐渐使寄主植物、根瘤菌和它们的共生体系对含有重金属的矿区废弃地具有一定的耐受能力<sup>[51]</sup>,从而促进可持续生态系统形成。

在纯尾砂裸地阶段,生境十分恶劣,大多数草类也难以存活,所以在选择植物种类上应以适生为前提,优选那些耐干旱、耐瘠薄、生产力较高,对土壤改良功能较强、环境效益好的草本植物为先锋植物种类<sup>[52]</sup>。在植被复垦早期,先使得一些草类(如禾本科植物)生长,逐渐熟化矿砂,恢复肥力,然后可以适应大批其他植物的生存,进而形成较好的植被和良好的生态系统。

黑麦草通常是一种多年生的适应性强的草类,生长迅速,对重金属不太敏感<sup>[53]</sup>。从它的根和全苗对 Cu、Zn、Pb、Cd 和 Ni 的吸收方面来看,黑麦草属于高吸收的植物<sup>[54]</sup>。由于黑麦草的根系十分发达,根与土壤充分接触,根深的特点有利于克服废弃地上常常遇到的干旱胁迫。

香根草 (*V. zizanioides*) 具有很发达的细微根系,可以有效控制和防止土壤侵蚀和滑坡。这种植物对土壤盐度、酸性和重金属 (As、Cd、Cr、Ni、Pb、Zn、Hg、Se 和 Cu) 有很高的忍耐性,适于金属污染土壤的复垦和土地填埋区渗出液的处理<sup>[55]</sup>。

绿肥作物的优势在于生长迅速,也有较强的适应性。各种绿肥作物均含有较多的有机质以及多种大量和微量的营养元素,可为后茬的植物提供各种有效养分,改善土壤结构。因此,可以利用绿肥作物迅速改良废弃地。

## 5 结语

综上所述,采矿业在相当程度上污染了环境,并形成了大量的矿业废弃地,是一种严重而持久的污染源<sup>[56]</sup>。通过应用一些物理、化学的方法来减轻和控制 Cu 矿尾矿砂的水蚀和风蚀危害是可行的,但从长远的目标来看,必须通过植被覆盖从而最终达到恢复景观、控制污染的目的<sup>[26]</sup>。

采取基质改良措施,并种植耐性强的先锋草类,使裸地迅速被植物所覆盖,形成草丛群落,改善尾

矿生态环境。这样,不但尾矿污染问题得到控制,而且修复后的土地具有自我维持和发展能力,从而改善了局部的土壤条件和小气候,形成复杂的群落结构<sup>[52]</sup>,矿区的生境得到恢复。

目前,我国在金属尾矿改良方面的研究多侧重于酸性 Pb/Zn 矿的植被恢复<sup>[14, 19, 22, 26, 36, 37]</sup>,对于碱性 Cu 矿尾矿砂的改良研究也正在开展之中<sup>[38-40]</sup>,但是大多还处于理论研究和小范围示范阶段,离具体的大范围实际操作还有一段距离。根据尾矿砂具体特点,需要进一步筛选出适宜的、低成本、高效率和环境友好的改良剂;加强适应矿砂不良性状并且生长迅速有效的耐性植物的发掘研究工作;同时进行相应的水肥措施以及工程措施优化等。最后将比较成熟的结果应用于大范围内的区域,达到区域内的植被覆盖,对于经过改良修复的地区,要加强管理、监测工作,使得修复效果得以维持。

重金属污染的矿业废弃地复垦工作需要土壤学、植物学、肥料学以及其他一些学科的合作。随着人们环保意识的逐渐增强以及对矿业废弃地复垦的重视,我国矿业废弃地复垦以及管理工作将会出现一个新的局面,这将对我国生态平衡与环境保护起着非常积极的推动作用。

## 参考文献

- 1 陈怀满, 郑春荣, 周东美等. 土壤中化学物质的行为与环境质量. 北京: 科学出版社, 2002, 46, 116, 472 ~ 474, 492
- 2 黄铭洪, 骆永明. 矿区土地修复与生态恢复. 土壤学报, 2003, 40 (2): 161 ~ 169
- 3 McNeamy RL, Wheeler KR. Knight mine reclamation: A study of revegetation difficulties in a semiarid environment. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 1995, (9): 113 ~ 119
- 4 高林, 张文敏, 施文献等. 有色金属工业环境的整治及矿山土地复垦. 见: 王如松主编. 现代生态学的热点问题研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1996, 572 ~ 582
- 5 蒋高明. 矿山废弃地恢复生态学的理论与实践. 见: 陈灵芝, 陈伟烈主编. 中国退化生态系统研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1995, 234 ~ 246
- 6 杨修, 高林, 吴刚. 矿山废弃地复垦的理论与技术. 见: 《社会-经济-自然复合生态系统可持续发展研究论文集》. 北京: 中国环境科学出版社, 1999, 124 ~ 136
- 7 蔡嗣经, 杨鹏. 金属矿山尾矿问题及综合利用与治理. 中国工程科学, 2000, 2 (4): 89 ~ 92
- 8 鲍负, 常前发. 尾矿利用是实现矿业可持续发展的重要途径. 矿业快报, 2000, 337 (7): 3 ~ 5
- 9 束文圣, 张志权, 蓝崇钰. 中国矿业废弃地的复垦对策研究. 生态科学, 2000, 19 (2): 24 ~ 29
- 10 周连碧, 代宏文, 吴亚君, 高继宏, 宁永平, 王政一. 胡家峪铜矿尾矿库复垦农作物种植研究. 采矿技术, 2002, 2 (2): 54 ~ 56
- 11 胡宏伟, 束文圣, 蓝崇钰, 王伯荪. 乐昌铅锌尾矿的酸化及重金属溶出的淋溶实验研究. 环境科学与技术, 1999, 86(3): 1 ~ 3, 37
- 12 蓝崇钰, 束文圣, 张志权. 酸性淋溶对铅锌尾矿金属行为的影响及植物毒性. 中国环境科学, 1996, 16 (6): 461 ~ 465
- 13 Sidle RC, Chambers JC, Amacher MC. Fate of heavy metals in an abandoned lead-zinc tailings pond: II. Sediment. *Journal of Environmental Quality*, 1991, 20: 752 ~ 758
- 14 Ye ZH, Wong JWC, Wong MH, Lan CY, Baker AJM. Lime and pig manure as ameliorants for revegetating lead/zinc mine tailings: a greenhouse study. *Bioresource Technology*, 1999, 69: 35 ~ 43
- 15 陈昌笃主编. 持续发展与生态学. 北京: 中国科学出版社, 1993, 132 ~ 138
- 16 孙庆业, 刘付程. 铜陵铜尾矿理化性质的变化对植被重建的影响. 农村生态环境, 1998, 14 (1): 21 ~ 23, 60
- 17 孙庆业, 蓝崇钰, 杨林章. 铅锌尾矿废弃地的化学性质研究. 农村生态环境, 2000, 16(4): 36 ~ 39, 44
- 18 Vangronsveld J, Colpaert JV, Van Tichelen KK. Reclamation of a bare industrial area contaminated by non-ferrous metals: Physico-chemical and biological evaluation of the durability of soil treatment and revegetation. *Environmental Pollution*, 1996, 94: 131 ~ 140
- 19 Lan CY, Shu WS, Wong MH. Reclamation of Pb/Zn mine tailings at Shaoguan, Guangdong Province, PRC: the role of river sediment and domestic refuse. *Bioresource Technology*, 1998, 65: 117 ~ 124
- 20 Wong JWC, Ip CM, Wong MH. Acid-forming capacity of lead-zinc mine tailings and its implications for mine rehabilitation. *Environmental Geochemistry & Health*, 1998, 20: 149 ~ 155
- 21 Pichtel J, Salt CA. Vegetative growth and trace metal accumulation on metalliferous wastes. *Journal of*

- Environmental Quality, 1998, 27: 618 ~ 642
- 22 Ye ZH, Wong JWC, Wong MH. Vegetation response to lime and manure compost amendments on acid Lead/Zinc mine tailings: a greenhouse study. *Restoration Ecology*, 2000, 8 (3): 289 ~ 295
- 23 张志权, 束文圣, 廖文波, 蓝崇钰. 豆科植物与矿业废弃地植被恢复. *生态学杂志*, 2002, 21 (2): 47 ~ 52
- 24 张志权, 蓝崇钰. 铅锌矿尾矿场植被重建的生态学研究. I. 尾矿对种子萌发的影响. *应用生态学报*, 1994, 5 (1): 52 ~ 56
- 25 Wong MH. Ecological restoration of mine degraded soils with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere*, 2003, 50: 775 ~ 780
- 26 Ye ZH, Shu WS, Zhang ZQ, Lan CY, Wong MH. Evaluation of major constraints to revegetation of Lead/Zinc mine tailings using bioassay techniques. *Chemosphere*, 2002, 47: 1103 ~ 1111
- 27 Vangronsveld J, Assche V, Clijsters H. Reclamation of a bare industrial area contaminated by non-ferrous metals: In situ metal immobilization and revegetation. *Environmental Pollution*, 1995, 87: 51 ~ 59
- 28 Vangronsveld J, Colpaer JV, Tichelen KKV. Reclamation of a bare industrial area contaminated by non-ferrous metals: physiochemical and biological evaluation of the durability of soil treatment and revegetation. *Environmental Pollution*, 1996, 94: 131 ~ 140
- 29 Ye ZH, Wong JWC, Wong MH, Baker AJM, Shu WS, Lan CY. Revegetation of Pb/Zn mine tailings, Guangdong Province, China. *Restoration Ecology*, 2000, 8 (1): 87 ~ 92
- 30 郑喜坤, 鲁安怀, 高翔, 赵谨, 郑德圣. 土壤中重金属污染现状与防治方法. *土壤与环境*, 2002, 11 (11): 79 ~ 84
- 31 Wilkins DA. A technique for the measurement of lead tolerance in plants. *Nature*, 1957, 189: 37 ~ 38
- 32 郝秀珍, 周东美. 沸石在土壤改良中的应用研究进展. *土壤*, 2003, 35 (2): 103 ~ 106
- 33 Kabata-Pendias A, Pendias H. *Trace Metals in Soil and Plants*. Boca Raton: CRC Press, 1992, 365 ~ 370
- 34 符建荣. 土壤中铅的积累及污染的农业防治. *农业环境保护*, 1993, 12 (5): 223 ~ 226, 232
- 35 蓝崇钰, 束文圣. 矿业废弃地植被恢复中的基质改良. *生态学杂志*, 1996, 15 (2): 55 ~ 59
- 36 Ye ZH, Yang ZY, Chan GYS, Wong MH. Growth response of *Sesbania rostrata* and *S. cannabina* to sludge-amended lead/zinc mine tailings: A greenhouse study. *Environment International*, 2001, 26: 449 ~ 455
- 37 Shu WS, Zhang ZQ, Huang LN, Lan CY, Ye ZH. Use of tolerant population of *P. distichum* for revegetation of a Pb/Zn mine tailings at lechang: field experiment. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2000, 39 (4): 94 ~ 98
- 38 郝秀珍, 周东美, 钱海燕. 黑麦草在铜矿尾矿砂与菜园土复合土壤上的生长及其影响因素研究. *农村生态环境*, 2003, 19 (2): 38 ~ 42
- 39 郝秀珍, 周东美, 王玉军, 陈怀满. 不同改良剂对铜矿尾矿砂的改良效果研究. *农村生态环境*, 2002, 18 (1): 11 ~ 15
- 40 Hao XZ, Zhou DM, Wang YJ, Cang L, Chen HM. Effect of different amendments on ryegrass growth in copper mine tailings. *Pedosphere*, 2003, 13 (4): 299 ~ 308
- 41 秦淑琴. 治理土壤重金属污染的方法概述. *新疆环境保护*, 1998, 20 (1): 19 ~ 22
- 42 李永涛, 吴启堂. 土壤污染治理方法研究. *农业环境保护*, 1997, 16 (3): 118 ~ 122
- 43 龙新宪, 杨肖娥, 倪吾钟. 重金属污染土壤修复技术研究现状与展望. *应用生态学报*, 2002, 13 (6): 757 ~ 762
- 44 熊礼明. 施肥与植物的重金属吸收. *农业环境保护*, 1993, 12 (5): 217 ~ 222
- 45 涂从, 郑春荣, 陈怀满. 铜矿尾矿库土壤-植被体系的现状研究. *土壤学报*, 2000, 37 (2): 284 ~ 287
- 46 Sorensen DL, Fresquez PR. Nitrification potential in reclaimed coal mine spoils and soils in the semiarid Southwest (USA). *Journal of Environmental Quality*, 1991, 20 (1): 279 ~ 285
- 47 Kruckeberg AL, Wu L. Copper tolerance and copper accumulation of herbaceous plants colonizing inactive California copper mines. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1992, 23 (3): 307 ~ 319
- 48 Lin SL, Wu L. Effects of copper concentration on mineral nutrient uptake and copper accumulation in protein of copper-tolerant and nontolerant *Lotus purshianus* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1994, 29 (2): 214 ~ 228
- 49 张志权, 束文圣, 蓝崇钰, 黄铭洪. 引入土壤种子库对铅锌尾矿废弃地植被恢复的作用. *植物生态学报*, 2000, 24 (5): 601 ~ 607
- 50 滕应, 黄昌勇, 骆永明, 龙健, 姚槐应. 铅锌尾矿区土

- 壤微生物活性及其群落功能多样性研究. 土壤学报, 2004, 41 (1): 113 ~ 119
- 51 廖继佩, 林先贵, 曹志洪. 内外生菌根真菌对重金属的耐受性及机理. 土壤, 2003, 35 (5): 370 ~ 377
- 52 杨修, 高林. 德兴铜矿矿山废弃地植被恢复与重建研究. 生态学报, 2001, 21 (11): 1932 ~ 1940
- 53 Dijkshoorn W, van Broekhoven LW, Lampe JEM. Phytotoxicity of zinc, nickel, cadmium, lead, copper and chromium in three pasture plant species supplied with graduated amounts from the soil. Neth. J.Agric. Sci., 1979, 27: 241 ~ 253
- 54 孟昭福, 张增强, 薛澄泽, 唐新保. 替代黑麦幼苗测定土壤中重金属生物有效性的研究. 农业环境保护, 2001, 20 (5): 337 ~ 340
- 55 Yang B, Shu WS, Ye ZH, Lan CY, Wong MH. Growth and metal accumulation in vetiver and two *Sesbania* species on lead/zinc mine tailings. Chemosphere, 2003, 52 (9): 1593 ~ 1600
- 56 席嘉宾, 徐昊娟, 杨中艺. 矿业废弃地复垦的现状与治理对策. 草原与草坪, 2001, (2): 11 ~ 14

## A REVIEW: REMEDIATION AND REVEGETATION OF METAL MINE TAILINGS DUMPING SITES

HAO Xiu-zhen ZHOU Dong-mei

(State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008)

**Abstract** Basic physical and chemical properties of metal mine tailings and their effects on environment of the mining areas are introduced and reviewed with emphasis on progresses, problems and future development in remedying and revegetating used metal mine tailings dumping sites. It is expected that the work will enrich the theory for remediation of land damaged by metal mine tailings.

**Key words** Heavy metals, Mine tailings, Amendment, Revegetation