

### 试论矿山生态修复的地质成土

胡振琪 张子璇 孙煌

#### 引用本文:

胡振琪, 张子璇, 孙煌. 试论矿山生态修复的地质成土[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(12): 21–29.

HU Zhenqi, ZHANG Zixuan, SUN Huang. Geological soil formation for ecological restoration of mining areas and its case study[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(12): 21–29.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.06.0463>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 冻融循环作用对露天矿排土场土料水土特征的影响

Influence of the freezing–thawing cycles on soil–water characteristics of soil in open–pit mine dumping sites

煤田地质与勘探. 2019, 47(5): 138–143 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.05.019>

##### 丛枝菌根真菌与沙棘对露天矿排土场的联合改良效应

Effect of arbuscular mycorrhizal fungi and *Hippophae rhamnoides* on the improvement of the dump of open–pit coal mine in the eastern grassland

煤田地质与勘探. 2021, 49(2): 202–206 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.02.025>

##### 我国矿区棕地综合治理及再利用

Sustainable management and reuse of brownfield in China's mining areas

煤田地质与勘探. 2017, 45(5): 127–134 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2017.05.022>

##### 河道疏浚底泥堆土镉污染修复技术分析

Remediation techniques for cadmium–contaminated dredged river sediments after land disposal

煤田地质与勘探. 2021, 49(5): 200–208 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.05.022>

##### 露天煤矿冻结岩土边坡介质特征与稳定性分析

Medium characteristics and stability of frozen rock (soil) slope in open–pit coal mine

煤田地质与勘探. 2018, 46(3): 104–112 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2018.03.018>

##### 无人机在矿区表土特征及地质灾害监测中的应用

Application of unmanned aerial vehicle in surface soil characterization and geological disaster monitoring in mining areas

煤田地质与勘探. 2021, 49(6): 200–211 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.06.024>



移动阅读

胡振琪, 张子璇, 孙煌. 试论矿山生态修复的地质成土[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(12): 21–29. doi: 10.12363/issn.1001-1986.22.06.0463

HU Zhenqi, ZHANG Zixuan, SUN Huang. Geological soil formation for ecological restoration of mining areas and its case study[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(12): 21–29. doi: 10.12363/issn.1001-1986.22.06.0463

## 试论矿山生态修复的地质成土

胡振琪<sup>1,2</sup>, 张子璇<sup>2</sup>, 孙 煌<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 土壤是植物生长的重要基质, 是矿山生态修复成败的关键。针对大多数矿山生态修复所面临缺少土壤的现状和土壤漫长的地质成土过程的现实, 试图在阐述自然地质成土原理的基础上, 探讨矿山生态修复中的地质成土(简称矿山地质成土)的概念与方法。自然地质成土是地质大循环和生物小循环历经漫长时期将“岩石”变成“土壤”的过程, 其中风化、黏化、有机质积聚以及元素的交换和迁移是重要的自然地质成土过程。矿山地质成土是指仿自然地质成土过程, 通过筛选矿区可利用的成土母质或土壤材料, 采用物理、化学和生物措施促进土壤快速发育和熟化并在短期内形成期望土壤功能、达到自我可持续发育状态的过程, 其实质为人工造土。方法包含矿山地质成土的需求分析、成土材料的筛选、土壤材料的组配和生物熟化 4 步骤, 还阐述了矿山地质成土与矿山复垦土壤重构的关系。以内蒙古某露天煤矿生态修复为例, 详细讨论基于原始地层材料的露天矿表土的矿山地质成土过程, 筛选出原始第 3 层土壤作为新表土的最优土壤材料组配与生物熟化方法; 以矿山固体废弃物为土壤材料, 介绍利用自然地质成土原理所构造的煤基生物土的方法; 同时对黄河泥沙基矿山地质成土在西部矿区生态修复中的应用给予了展望。

**关键词:** 地质成土; 生态修复; 黄河泥沙; 露天矿; 煤基生物

**中图分类号:** TD88 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2022)12-0021-09

### Geological soil formation for ecological restoration of mining areas and its case study

HU Zhenqi<sup>1,2</sup>, ZHANG Zixuan<sup>2</sup>, SUN Huang<sup>2</sup>

(1. School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Institute of Land Reclamation and Ecological Restoration, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** Soil is an important substrate of plant growth, as well as the key for successful ecological restoration of mine. In view of the status of insufficient soil for most of ecological restoration of mine and the reality of a very long process of geological soil formation, the concept and method of geological soil formation for ecological restoration of mine (Mine-GSF for short) were discussed on the basis of description on the principle of natural geological soil formation. Natural geologic soil formation is the process of turning “rock” into “soil” through a long period of macro-geological cycle and biological cycle, including the important links of weathering, claying, accumulation of organic matter, and the exchange and migration of elements. Mine-GSF is the process of simulating the natural geological soil formation by promoting the rapid development and maturation of soil with the physical, chemical and biological measures through screening the available soil-forming parent materials or soil materials at the mine site, and thus forming the desired soil functions in a short period of time to achieve a self-sustainable development state. It is exactly a process of artificial soil formation. Specifically, the method consists of four steps: demand analysis of Mine-GSF, screening of parent material for soil formation, composition of soil materials and its biological maturation. In addition, the relationship between Mine-GSF and soil reconstruction for mine reclamation was described. Moreover, the geological soil formation process for the

收稿日期: 2022-06-08; 修回日期: 2022-09-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1806505); 国家自然科学基金项目(41771542); 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2003AA322040)

第一作者: 胡振琪, 1963 年生, 男, 安徽五河人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为矿山土地复垦与生态修复. E-mail: huzq1963@163.com

topsoil of open pit mine based on the original soil material of geological stratum is discussed in detail, and the optimal soil material composition and biological maturation method with the third layer of original soil as topsoil was determined based on the ecological restoration of an open pit coal mine in Inner Mongolia. The method of coal-based biological soil constructed on the principle of geological soil formation is introduced using the solid waste of mine as the soil material. Meanwhile, prospect is made for the application of geologic soil formation with the Yellow River sediment as soil material in the ecological restoration of western mining areas.

**Keywords:** geological soil formation; ecological restoration; Yellow River sediment; open pit mine; coal-based biological soil

矿产资源的开采不可避免造成土地的挖损、塌陷和压占,使耕地损失和生态环境恶化。随着国家绿色发展战略的实施,矿山生态修复已经成为绿色矿山发展的重要技术途径,已经成为研究热点。

我国从 20 世纪 80 年代开始重视矿区生态修复,迄今已经实施了大量的土地复垦与生态修复工程,取得了一定成绩,但也有很多失败或效果欠佳的案例,甚至发生“一年绿、二年黄、三年死光光”的现象<sup>[1]</sup>,究其原因主要是缺少土壤或所用土壤质量差。有关研究表明:现代土地复垦与生态修复技术研究的重点应是土壤因素的重构,而不仅仅是植被的建立,为使土地复垦与生态修复土壤达到最优的生产力,构造一个最优的、合理的、稳定的土壤物理、化学和生物条件是进行土地复垦和生态修复最基本的工作<sup>[2]</sup>。因此,土壤是生命之基,是矿山生态修复成败的关键。

土壤是地球陆地表面经过漫长的地质成土过程形成的能够生长绿色植物的疏松层,其形成受到多种因素的影响并通过多种地质和地球化学作用来实现<sup>[3-5]</sup>,如 1 cm 厚的熟土往往要经历数百年甚至成千上万年的时间形成。因此,快速成土就成为矿山生态修复中的重要任务。由于土壤形成是地质作用的成土过程,因此,从地质视角不妨称之为地质成土。地表土壤是地层中富含生物、支撑生命的生态关键层(也可称之为地质生态关键层),所以,地质科技工作者将利用地质学理论应用于矿山生态修复成土过程的研究,加速成土并促进矿山生态修复土壤重构的成功。

许多矿山特别是露天开采矿山(例如青海木里矿区),没有很好地剥离和储存土壤,或是开采前土壤资源不足,导致排土场和采场修复时缺乏土壤,只能在岩石和土壤的混合基质或者直接在各种岩层的剥离物上种植植被,植被成活和生长困难。因此,对于普遍存在的缺少植物生长土壤的矿区,为了修复生态环境,人工地质成土则成为十分紧迫的任务。

笔者目的是基于国内外的矿山生态修复实践,以矿山生态修复中的成土为研究对象,试图借鉴自然地质成土原理,阐明成土的艰巨性、复杂性和长期性,将地质学与土壤学相结合,提出矿山生态修复中(人工)

地质成土的概念与内涵,探讨其快速成土方法并给出实际案例,以期为矿山生态修复奠定基础。

## 1 自然地质成土

### 1.1 概念

土壤是具有固液气三相结构的一种复杂的生物地球化学物质,是一个动态生态系统,为植物生长提供了机械支撑、水分、养分和空气条件<sup>[3-5]</sup>。土壤形成与发育可以从物理、化学或生物学观点研究,也可以从土壤化学、地质学和地球化学观点去研究。

从地质学的视角来看,自然地质成土首先就是地球表面或近地球表面的岩石在大气圈各种营力作用下发生物理、化学、生物风化作用形成岩石碎屑与可溶性物质,即成土母质。然后,成土母质在地质运移和沉积以及一定水热、生物条件作用下,经过一系列地质作用而发育形成土壤。在这个过程中,母质与成土环境(如气候、地形、生物、时间)之间发生了一系列的物质、能量交换和转化,形成了具有肥力、剖面层次分明的土壤<sup>[6]</sup>。所以,自然地质成土是地质大循环和生物小循环历经漫长时期将“岩石”变成“土壤”的过程(图 1)。在成土过程中,人类活动不断利用和改造土壤,也是成土的重要因素,因此,土壤是自然因素与人为因素共同作用的结果。本文的重点是在研究自然成土因素的基础上,通过人为因素加速成土。

### 1.2 原理

成土过程也叫土壤形成过程,是指在各种成土因素的综合作用下,土壤发生发育的过程。它是土壤中各种物理、化学和生物作用的总和,包括岩石的崩解风化,迁移与沉积,矿物质和有机质的分解、合成,以及物质的淋失、淀积、迁移和生物循环等(图 1)。

自然地质成土是一个漫长的地质过程,由于各个历史时期的地质作用和各种外部环境的影响,最终形成的土壤也因岩石特性、气候、地理地形等条件不同而有好有坏,甚至还存在土壤形成过程中的障碍因子。由这一特点可知,应该重视已经熟化成土的各种土壤。

从“岩石”到“土壤”的首要标志是颗粒组成的变化,由密实的岩石变成岩石碎屑状土壤母质,然后再从

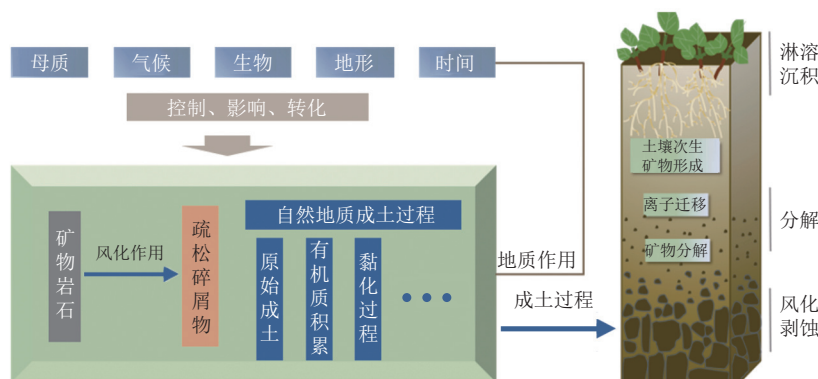


图 1 自然地质成土过程及其产物

Fig.1 Process of natural geological soil formation and its products

土壤母质演变为颗粒较细的土壤。“土壤”颗粒由大变小的同时,还伴随矿物成分和化学成分的变化。不同颗粒组成结构的土壤就构成了不同质地和不同理化生物性质的土壤。

重要的自然地质成土过程是:

#### 1) 风化、迁移、沉积等地质作用

土壤的营养成分是土壤优劣的重要指标,它主要由成土母质中的矿物含量所决定,也受地质搬运迁移和沉积等因素的影响。成土母质来自于岩石的风化,风化的母质材料可能会有部分地质迁移,也会有其他母质迁移沉积到本地的成土母质中,这些地质作用决定了土壤营养条件的好坏。同时,岩石或成土母质附着的微生物和低等植物将加速风化及后期的土壤的原始成土过程。这一成土过程说明应该重视成土材料的来源和风化作用。

#### 2) 黏化过程

成土过程包含着土体内矿物的形成和破坏(如黏化过程、富铁铝过程、灰化过程、漂洗过程和潜育过程)<sup>[3-4]</sup>,其中黏化过程是土壤剖面中黏粒形成和积累的过程,对土壤物理特性的优劣发挥重要作用。土壤黏粒、粉粒和砂粒含量的不同,导致其土壤质地不同,对土壤含水量、持水性和保肥能力等土壤物理特性都有很大影响。黏粒比表面积大,具有很好的吸附水分和营养的能力。自然地质成土的黏化过程可分为残积黏化和淀积黏化。前者是土内风化作用形成的黏粒产物,由于缺乏土内稳定的向下水分运移,黏粒难以向深土层移动而就地积累,形成一个明显黏化或铁质化的土层;后者是风化和成土作用形成的黏粒,由上部土层在具备充足水分条件下淀积而成。

#### 3) 元素的交换和迁移过程

成土过程中的淋溶、钙化、盐化、碱化过程等促进了土壤元素交换和迁移<sup>[4]</sup>,使不同元素在土壤中的分布不同,产生有利或不利的土壤条件。营养元素的增加有利于土壤肥力的提高,而有害元素往往会导致

土壤污染,影响土地健康。

#### 4) 有机质的积聚过程

有机质是土壤肥力的重要指标。有机质积聚过程是在植物作用下有机质在土体上部积累的过程,这一过程在各种土壤中都存在。由于成土条件的差异,有机质及其分解与积累也可有较大的差异,据此可将有机质积聚过程进一步划分为腐殖化、粗腐殖化及泥炭化 3 种。地表植被及其根系的生理活动,能促进原生矿物风化和有机质的积聚,还有助于水稳定性团聚体的形成,改善土壤物理结构,提高土壤的生态功能。

## 2 矿山生态修复的地质成土

自然地质成土中的土壤均自然形成,且难以改变,只能通过人工方式进行表层土壤改良;而大范围、高强度的矿山开采造成煤层上覆地层,特别是土壤层的破坏,为土壤层(地层)重构创造条件和机会,但许多矿山生态修复实践中不合理的矿山土壤重构导致土层混乱、表层土壤缺失或不足、重构失败的结果,对矿山生态修复中的土壤重构提出新挑战,因此,应对科学的人工地质成土引起高度重视。

### 2.1 概念与内涵

矿山生态修复的地质成土(简称矿山地质成土)是指仿自然地质成土过程,通过矿区可利用的成土母质或土壤材料,采用物理、化学和生物措施促进土壤快速发育和熟化并在短期内形成期望土壤功能、达到自我可持续发育状态的过程(图 2)。显然,“矿山地质成土”就是“矿山人工成土”或“人工造土”或“造土”。

矿产资源的开采破坏了原有的土层、地层,同时



图 2 矿山地质成土过程

Fig.2 The process of geological soil formation



也提供了大量可作为土壤的原始材料,为重新构造土壤提供很好的契机。可以利用自然地质成土的原理,在短时间内人工快速成土和熟化、重新构造出适宜的土壤,为矿山生态修复奠定基础。

从地质学视角,自然地质成土的内涵就是构造土壤。土壤的漫长地质成土过程是在各种地质作用和地球化学与生物作用下,不仅形成了熟化的土壤,也形成丰富多彩的、不同类型的土壤剖面结构<sup>[4,6-7]</sup>。从矿山地质成土的视角,其核心是将不同备选土壤材料,经过物理化学和生物措施,在短时期形成期望的土壤,这也可称之为“造土”。

从矿山土地复垦与生态修复视角,自然地质成土与土壤重构二者目的和内涵是一致的,都是重构土壤。土壤重构不仅需要各种不同功能、不同生态空间位的土壤,还需要科学合理的土壤剖面构型<sup>[8]</sup>。因此,土壤重构的实质首先就是土壤材料的筛选与重构(或称“造土”,即矿山地质成土),然后再将土壤材料进行垂向的土壤剖面的重构,即“造土”加“土壤剖面重构”。也可根据土壤剖面重构分析中的土层生态位宽度不足的土壤层进行“造土”以弥补<sup>[8]</sup>,因此,矿山地质成土是矿山生态修复土壤重构的一部分,是其基础和首要任务。

## 2.2 方法和步骤

按照仿自然地质成土的理念,矿山生态修复地质成土方法主要包括 4 个步骤。

### 2.2.1 需求分析

不同的采矿活动以及非采矿活动的矿山建设损毁对矿山土壤的破坏情况千差万别,采后土地利用方式(包括植被恢复方案)对土壤的需求也不尽相同。露天采矿形成巨大的矿坑和堆积成山的排土场、矸石山等人工地貌,其生态修复时原表土均不足以满足矿坑、排土场、矸石山治理的植被恢复需求,需要大量的表土替代材料。地下开采导致大量土地沉陷,为恢复更多的耕地,沉陷区需要大量充填材料,即充填复垦土壤。因此,不同矿山对地质成土的要求存在差异。

矿山地质成土前,需要充分调查了解矿山土壤损毁现状和采矿前原始土壤状况,分析矿山土壤损毁特征并评价其损毁程度,基于客观条件和区域发展需求,找出矿山土壤存在的问题和差距,提出矿山生态修复对土壤的要求,并确定矿山地质成土的目标。一般情况下,表层种植土是矿山生态修复最需要的成土土壤,同时也是理化生物特性要求最高的土壤。矿山地质成土的需求量应结合矿区实际治理的面积和厚度确定。

### 2.2.2 材料筛选

基于自然地质成土母质的重要性和土壤发育的长期性,需要充分利用矿山已经拥有的熟化土壤和各种

可能的成土材料(也可称之为备选土壤材料)。备选土壤材料既包括原始土壤、损毁土壤,也包括矿山的固废如风化煤、煤矸石、粉煤灰等以及河湖淤泥、城市垃圾等。对露天矿而言,由于上覆岩土层在开采时已被剥离,因此,均可作为备选材料。对部分采煤塌陷区而言,需要筛选一些外源充填材料。不同土壤材料与土壤通气性、保肥保水性、土壤结构、紧实度、黏结性、离子交换和营养物质密切相关<sup>[9-11]</sup>。因此,备选土壤材料筛选应遵循以下原则:

(1) 需求原则。依据矿山地质成土对土壤的要求和成土目标进行选择。

(2) 成土材料质量原则。地质成土过程中成土材料的重要筛选标准之一就是土源的质量,主要包括成土材料的物理、化学和生物特性。如黄河中下游采煤塌陷区的充填复垦中选取黄河泥沙作为成土构造的成土材料,其原因是黄河泥沙来源于土壤侵蚀,含有一定量的黏粒、粉粒,具备易成土的基本条件<sup>[12]</sup>。

(3) 绿色生态原则。应关注成土材料的环境性,应尽可能使用不含污染元素的成土材料和天然材料,使成土及其过程绿色生态。

(4) 成本效应原则。不同的备选土壤材料所需要的处理工艺和投入的时间不同,如对粒度较大的备选材料,搬运、粉碎、搅拌等往往是必不可少的。备选材料越接近成土目标,地质成土的成本就越低;备选材料距离复垦修复场地越近,运输成本就越低。因此,在遵循成土材料质量和绿色生态原则的基础上,应更多关注地质成土材料的成本问题,如煤基生物土中的煤矸石和黄河泥沙作为废弃物和沉积物进行地质成土,可大大缩减矿山生态修复地质成土的成本。

对所有备选土壤材料要进行物理、化学、生物特性的分析,并与期望成土目标对比进行成土材料筛选。有条件的情况下,还可以结合盆栽试验进行筛选。

### 2.2.3 材料组配

矿山地质成土材料往往不是优质的土壤,单一备选土壤材料往往满足不了成土目标的要求,这就需要将多种成土材料有机组合,形成接近成土要求的土壤材料组配,实现与期望土壤相近的理化特性。因此,需要根据修复方向的不同,仿照自然的土壤类型选用合理材料进行试验确定组配关系。如黏粒含量高的土壤材料需要添加砂质材料;有机质含量低的可以添加秸秆等生物质;砂性土壤材料需要添加黏性或植物胶材料。如我国生态脆弱的露天矿,表土土壤砂粒含量多的特性决定了其矿山地质成土的主要需求是黏粒含量较丰富的土壤源材料<sup>[13]</sup>;采矿活动所产生的煤矸石、粉煤灰及风化煤等煤基废弃物,因其经历风化作用后

所具备特定的基本物理性质<sup>[14-17]</sup>, 可将其按照不同的比例加以混合形成适宜实际矿山生态修复的土壤。

矿山地质成土的材料组配过程主要是仿自然地质作用, 进行成土土壤材料的多源组合。将占比大且起骨架作用的材料称之为基质材料, 将各种调节质地、营养等改良材料称之为辅助材料, 因此, 地质成土材料的组配就是基质材料加辅助材料。材料组配过程往往需要对材料进行搬运、粉碎、混合、搅拌、发酵等措施, 材料组配的最佳比例需要通过物理化学分析以及盆栽试验加以研究确认。例如各种备选土壤材料如煤矸石、风化煤、黄土等相当于一般成土过程中的土壤母质材料, 通过搬运、粉碎、混合、搅拌、堆积、压实等仿自然地质成土过程成土, 经过短时间内的淋溶、黏粒迁移、矿化、熟化发育成具备植物生长介质能力的“土壤”, 往往再通过多种组配的柱状试验和盆栽试验进行优化和筛选。

#### 2.2.4 生物熟化

矿山地质成土的成土材料组配, 在短时间内为新构土壤今后的发育构造了良好的固液气三相结构, 为土壤的发育熟化奠定了基础。自然地质成土的生物小循环对土壤发育熟化发挥重要作用。为了短期内熟化土壤, 需要人工接种各种生物, 如接种微生物、蚯蚓和种植植物等措施, 促进成土过程中水、肥、气、热诸因素不断协调, 从而利于促进土壤黏化过程和有机质聚集过程的进行, 形成较好的土壤团聚体的同时提高土壤有机质含量。生物熟化过程中应更多关注成土基质团聚体和有机质等养分、土壤水分入渗、酸碱缓冲性、土壤微生物、土壤结皮等多种指标的变化及其对不同成土材料组配的影响。

不同的成土材料, 需要接种不同的菌类、种植不同的植物等, 应具体问题具体分析。如接种真菌、根瘤菌促进土壤团聚体的增加和植物生长, 接种蚯蚓改善土壤结构和生物特性等。任何生物熟化材料的筛选都需要通过室内室外实验来确定最优的种群和适宜的密度。通过 2~3 年的生物熟化, 矿山地质成土基本达到矿区周边土壤条件, 并达到自我可持续发育状态。

### 3 矿山生态修复中的地质成土案例

尽管本文凝练提出自然地质成土和矿山地质成土的名称, 但自然地质成土是实际客观存在的, 矿山地质成土的实践也有许多, 本文从 3 个方面的案例验证笔者的观点和方法。

#### 3.1 基于原始地层材料的露天矿新表土的矿山地质成土

基于矿山地质成土方法, 以内蒙古呼伦贝尔市西

北部某大型露天矿为例, 完成原始地层材料筛选和改良, 进行地质成土试验研究<sup>[18-21]</sup>。

##### 1) 需求分析

根据采矿损毁土地的特征分析以及当地实际情况调查, 该矿表层种植土(简称表土)约 0.5 m, 含砂量多, 沙化现象严重, 表土非常缺乏。因此, 研究区的矿山地质成土的要求和成土目标是构造大量且适宜的新表土(也称表土替代材料)。

##### 2) 材料筛选

根据矿山地质成土材料筛选原则进行材料的筛选。研究区地质柱状如图 3 所示, 已知原始地层中 IV 层及以下的基质为硬度较大的砂砾岩石层, 与土壤差别太大, 不具备表土替代材料的适宜性, 但 II 层(黄土层)和 III 层(亚黏土层)黏粒含量较高、质地较好(图 3)。因此, 首选 II 层和 III 层为表土替代材料的原始地层来源。选择 I 层为对照层(CK), II 层黄土的风化及原状基质表示为 II1、II2, III 层亚黏土的风化及原状基质表示为 III1、III2, 对其理化性质、营养成分和重金属含量进行分析<sup>[20-21]</sup>, 其质地结果见表 1<sup>[20]</sup>。此外还进行了盆栽试验, 结合出苗率和土壤结皮情况等生物量结果进一步筛选基质材料<sup>[20-21]</sup>。结果表明, III 层基质在酸性、养分含量、环境风险及出苗率等方面均接近当地表土(CK 层), 其风化后的土壤特性更优。因此, 该研究区矿山地质成土的最佳地质成土材料为 III 层原状或其风化土。

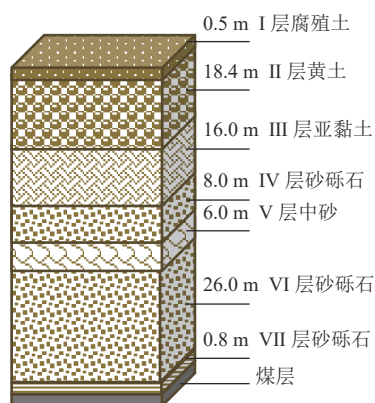


图 3 研究区地质柱状图

Fig.3 Geological bar chart of the study area

##### 3) 土壤材料组配分析

由于筛选的基质材料黏粒含量过高、有机质缺乏, 选用蛭石、秸秆和硝基腐殖酸作为 3 种辅助材料进行地质成土土壤材料的组配, 选用紫花苜蓿作为盆栽宿主植物, 利用正交盆栽实验, 筛选出最佳的成土材料有机组合, 形成接近成土要求的组配土壤材料。采用三因素三水平正交试验, 具体试验设计见表 2<sup>[19,21]</sup>。

通过以上 9 个处理 3 次重复的盆栽试验研究, 其

表 1 露天矿各层不同基质粒度组成含量  
Table 1 Particle size distribution of different soil materials in open-pit mine layers

样品组	不同粒径范围的质量分数/%						质地
	细黏粒	粗黏粒	细粉粒	中粉粒	粗粉粒	细砂粒	
	<0.001 mm	0.001~0.002 mm	0.002~0.005 mm	0.005~0.010 mm	0.010~0.05 mm	0.05~0.25 mm	
CK	2.20	9.17	13.77	12.02	58.23	4.61	粉砂土
II 1	24.03	38.29	22.66	7.28	7.74	0	粉黏土
II 2	59.14	35.61	3.84	1.12	0.29	0	黏土
III1	95.35	4.63	0.02	0	0	0	重黏土
III2	99.85	0.15	0	0	0	0	重黏土

表 2 试验设计  
Table 2 Experimental design (g·kg<sup>-1</sup>)

处理组	蛭石	玉米秸秆	硝基腐殖酸
T1	10	10	0.5
T2	10	30	1.0
T3	10	50	1.5
T4	30	10	1.5
T5	30	30	0.5
T6	30	50	1.0
T7	50	10	1.0
T8	50	30	1.5
T9	50	50	0.5

生物量如图 4 所示。结果表明, T9 处理地上部生物量最大。因此, 最优组配为 III 层亚黏土施加 3 种辅助材料, 且蛭石、秸秆和硝基腐殖酸三者的质量比为 50 : 50 : 0.5(T9)。笔者团队还对地质成土材料的植物和土壤理化生物特性的响应及作用机理进行了探讨<sup>[19,21]</sup>, 3 种改良剂中对成土材料养分含量、水分特征有明显改善。成土材料在未经改良之前微生物主要由细菌组成, 经改良后成土材料中细菌、放线菌、真菌的数量均有显著提高。

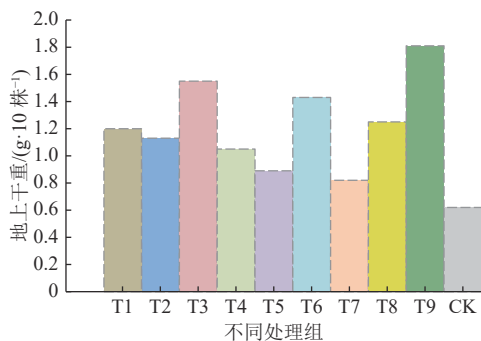


图 4 紫花苜蓿生物量(地上部干重)  
Fig.4 Biomass of Medicago sativa (aerial dry weight)

#### 4) 生物熟化分析

生物熟化是提高矿山地质成土的生物特性、使其具有可持续自我修复能力的过程。生物熟化需要人工

接种各种生物辅助材料如微生物、动物等以实现并促进仿自然的生物小循环。本案例以加入蚯蚓作为生物熟化材料为例, 探讨生物熟化方法。以当地的表土作为对照组表示为 CK, 改良处理中添加质量为 0.2 g 左右的蚯蚓 10 条, 表示为 QY, 未添加蚯蚓的处理为空白表示为 DZ, 每个处理 3 次重复, 选用紫花苜蓿作为盆栽宿主植物。最终生物量如图 5 所示, 表明不同处理间地上部分的鲜重具有显著性差异( $P<0.05$ ), 其中 QY 处理的地上部分的鲜重明显高于其他处理, 分别是 CK 处理的 1.34 倍, DZ 处理的 2.37 倍。3 组处理地下部分鲜重间存在显著性差异( $P<0.05$ ), 其中以 CK 处理地下部分鲜重最大, QY 处理与 DZ 处理相比地下部分鲜重显著增加, 是其质量的 2.54 倍。在露天新表土野外试验基地, 当年种植植物生物量达到正常对照土地的生产力水平, 持续耕种 3 年无显著变化, 实践证明露天新表土能达到较好的效果。

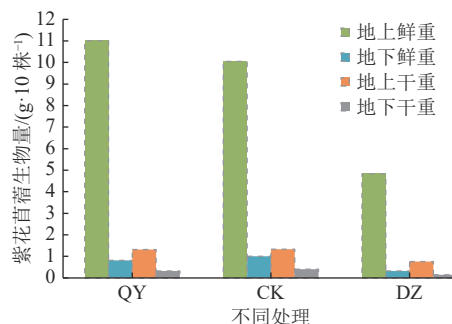


图 5 不同处理紫花苜蓿生物量  
Fig.5 Biomass of Medicago sativa in different treatments

### 3.2 基于煤基材料的矿山地质成土

煤炭开采和利用中不可避免产生大量固体废弃物, 如煤矸石、粉煤灰、风化煤等, 这些固废的处置与利用已经成为研究热点。同时, 矿山生态修复缺乏土壤, 这些固废显然都可以作为矿山地质成土的成土材料。长期以来, 由于煤矸石、粉煤灰中含有一些矿物质和微量元素, 已经被用于制作成土壤改良剂、微肥等<sup>[14-16]</sup>。风化煤, 俗称“露头煤”, 是煤炭经过长期风化形成的,



含有较高的有机质<sup>[17]</sup>,是成土的理想源材料。因此,在矿山生态修复缺少土壤的情况下,利用煤矸石、粉煤灰、风化煤等煤基固废材料进行矿山地质成土,就能变废为宝,解决矿区缺土的难题,具有巨大应用前景。

笔者团队利用煤基固废进行的“煤基生态环境修复剂”的研究与开发及其应用”(863 计划项目),就是矿山地质成土的研究与实践。选择内蒙古 3 个采煤矿区分别以 3 种固废(煤矸石、粉煤灰、风化煤)为基质材料,膨润土、保水剂和稳定剂为辅助材料。设计不同比例材料的盆栽试验进行矿山地质成土的基质材料组配筛选,风化煤按照质量分数 40%~60% 添加,煤矸石和粉煤灰按照质量分数 10%~40% 添加,构成了 10 种组配方案,3 个矿区的材料构成了 30 个材料组配。同时按照组配基质材料+辅助材料的方法,分别进行了 4 种处理: A 处理为基质材料+1% 保水剂; B 处理为基质材料+1% 稳定剂; C 处理为基质材料+0.5% 保水剂+0.5% 稳定剂; D 处理为基质材料+3% 膨润土,分别进行了正常供水(75%)、轻度胁迫供水(55%) 和重度胁迫供水(25%) 共 3 种田间持水量条件下的盆栽辅助材料组配试验。

基质材料组配试验表明,煤矸石、粉煤灰和风化煤的比例为 1 : 2 : 2 时,该基质组配材料可以保证其上生长植物的生物量可以好于或接近于对照组水平。最优配比基质材料生长植物的茎叶生物量可对照组高 20%,根系生物量可对照组高 50%。因此,可以将这种基质组配材料作为一种煤基生物土,促进煤矿生态修复。辅助材料组配试验结果表明,在正常供水 75% 情况下,4 种添加剂辅助材料添加后的处理对提高生长植物的生物量的作用并不明显;而在干旱胁迫情况下,4 种辅助材料添加处理均能不同程度地提高生长植物的生物量,其中 0.5% 稳定剂+0.5% 保水剂、1% 稳定剂效果最好,生长植物的生物量提高 38%~59%。因此,4 种辅助材料添加处理对保证植株供水,促进植株生长具有重要的意义,该配方对西部干旱缺水情况下的矿山生态修复中的植被恢复非常有利。

矿山地质成土需要生物熟化过程,因此,该研究采用添加菌根(摩西球囊菌 *Glomus.mosseae*) 的方式加速土壤发育和熟化。试验表明,基质组配材料按 1 : 2 : 2 配比后,在低磷情况下接种菌根处理植株的生物量都优于未接种的处理,植株生物量增加 40%~300%,且进行基质组配后的各个处理接种菌根后植株生物量接近或优于对照组土壤接种菌根的植株生物量(图 6),促进了土壤生物条件的改善。在野外煤基生物土实地(图 7),当年植物种植生物量达到正常对照土地,持续耕种 3 年无显著变化,显然煤基生物土加菌根将是

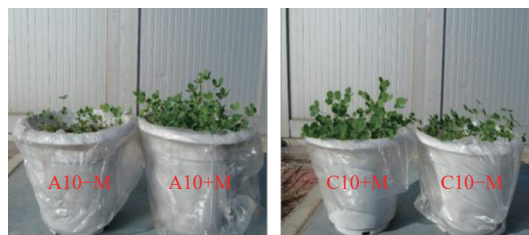


图 6 不同处理接种菌根后的植株生物量  
Fig.6 Plant biomass after mycorrhizal inoculation in different treatments



图 7 煤基生物土野外场地植物长势  
Fig.7 Plant growth in the field of coal-based biological soil

最佳的矿山地质成土土壤。

### 3.3 黄河泥沙基矿山地质成土进展与展望

黄河泥沙主要是由水土流失造成,由于雨水、河水的冲刷,黄河泥沙与原始自然的土壤有很大的差异,但仍然是最接近土壤的成土基质。因此,在滨黄河的矿区,利用黄河泥沙作为基质材料进行地质成土具有很大的应用前景。笔者团队已经在黄河流域下游的山东省实现了利用黄河泥沙充填复垦采煤塌陷区的应用案例<sup>[22]</sup>,同时,提出了利用黄河泥沙与山东当地表土、心土进行组配作为黄河泥沙充填复垦塌陷区覆盖土壤的研究<sup>[23]</sup>。研究表明,黄河泥沙与表土和心土的 2 : 1 : 1 组配是优选的复配土壤。

黄河流域生态保护与高质量发展已成为国家战略,而黄河中上游大量矿山的生态修复缺少土壤,因此,将黄河泥沙作为重要成土基质利于矿山生态修复中的土壤重构,能够进一步促进黄河流域的矿区生态修复。此外,在黄河上游、中游矿区生态修复中,表层种植土的需求量大,开发黄河泥沙基的复垦土壤具有很大市场需求。黄河中上游矿区生态脆弱、风蚀严重,黄河泥沙基质成土的难点则是土壤的团聚和抗风蚀以及有机质和营养成分的增加与保持。为此,针对滨黄河不同矿区生态修复需求,将黄河泥沙与矿区的风化煤、煤矸石、粉煤灰等矿山固废有机组配,利用自然地质成土的原理,快速发育熟化黄河泥沙基复垦土壤就成为未来研究的方向,具有广泛的应用前景。

## 4 结论

a. 土壤是地球陆地表面能够生长绿色植物的疏松层,是经过漫长的地质成土过程形成的,矿山生态修复



工程失败的原因主要是缺少土壤或缺乏科学的重构土壤方法。

**b.** 提出了矿山生态修复中的地质成土的概念和内涵,其实质为仿自然地质成土过程,使矿山备选土壤材料快速发育和熟化并在短期内形成期望土壤功能、达到自我可持续发育状态的过程,亦即“造土”。自然地质成土与广义的土壤重构内涵是一致的,因此矿山复垦土壤重构实际上就是“矿山地质成土”加“土壤剖面重构”。

**c.** 矿山地质成土方法包含需求分析、材料筛选、材料组配和生物熟化 4 步骤。通过基于原始地层材料的露天矿新表、基于固废的煤基生物土和黄河泥沙基的矿山地质成土 3 个案例,验证了本文提出的矿山地质成土方法的应用效果。

**致谢:** 论文撰写过程中赵艳玲教授、位蓓蕾博士等给予了许多意见和建议,在此表示衷心感谢。

## 参考文献(References)

- [1] 胡振琪,赵艳玲. 矿山生态修复面临的主要问题及解决策略[J]. *中国煤炭*, 2021, 47(9): 2-7.  
HU Zhenqi, ZHAO Yanling. Main problems in ecological restoration of mines and their solutions[J]. *China Coal*, 2021, 47(9): 2-7.
- [2] National Research Council. Surface mining: Soil, coal, and society[M]. Washington D. C.: National Academy Press, 1981.
- [3] 黄昌勇,徐建明. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [4] 陈余道,蒋亚萍. 环境地质学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
- [5] 方谦,洪汉烈,赵璐璐,等. 风化成土过程中自生矿物的气候指示意义[J]. *地球科学*, 2018, 43(3): 753-769.  
FANG Qian, HONG Hanlie, ZHAO Lulu, et al. Climatic implication of authigenic minerals formed during pedogenic weathering processes[J]. *Earth Science*, 2018, 43(3): 753-769.
- [6] 崔晓阳. 土壤资源学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2007.
- [7] 陈孝杨,张凌霄,陈敏,等. 煤矸石组分与表土质地对充填重构土壤导气率的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 91-97.  
CHEN Xiaoyang, ZHANG Lingxiao, CHEN Min, et al. The effects of coal gangue composition and surface soil texture on the air permeability in reconstruction soil filled with coal gangue[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(5): 91-97.
- [8] 胡振琪. 矿山复垦土壤重构的理论与方法[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(7): 2499-2515.  
HU Zhenqi. Theory and method of soil reconstruction of reclaimed mined land[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(7): 2499-2515.
- [9] 李新举,胡振琪,李晶,等. 采煤塌陷地复垦土壤质量研究进展[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(6): 276-280.  
LI Xinju, HU Zhenqi, LI Jing, et al. Research progress of reclaimed soil quality in mining subsidence area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(6): 276-280.
- [10] 刘益良,苏幼坡,殷尧,等. 膨润土改性胶凝材料的研究进展[J]. *材料导报*, 2021, 35(5): 5040-5052.  
LIU Yiliang, SU Youpo, YIN Yao, et al. Research progress of bentonite modified cementitious materials[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(5): 5040-5052.
- [11] 王培俊,胡振琪,邵芳,等. 黄河泥沙作为采煤沉陷地充填复垦材料的可行性分析[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(6): 1133-1139.  
WANG Peijun, HU Zhenqi, SHAO Fang, et al. Feasibility analysis of Yellow River sediment used as the filling reclamation material of mining subsidence land[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(6): 1133-1139.
- [12] 毕银丽,彭苏萍,杜善周. 西部干旱半干旱露天煤矿生态重构技术难点及发展方向[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(5): 1355-1364.  
BI Yinli, PENG Suping, DU Shanzhou. Technological difficulties and future directions of ecological reconstruction in open pit coal mine of the arid and semi-arid areas of western China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(5): 1355-1364.
- [13] 马力,罗强,武璟,等. 露天矿外排土场粒径及土层厚度对表土渗透规律影响[J]. *太原理工大学学报*, 2021, 52(6): 953-959.  
MA Li, LUO Qiang, WU Jing, et al. Influence law of particle size and soil thickness on the permeability of topsoil of open-pit dump[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2021, 52(6): 953-959.
- [14] 程蓉,廖祥文,舒荣波,等. 利用硅酸盐细菌制备煤矸石矿物肥料[J]. *矿产综合利用*, 2017(6): 115-118.  
CHENG Rong, LIAO Xiangwen, SHU Rongbo, et al. Study on the preparation of gangue mineral fertilizers by silicate-dissolving bacterial strains[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2017(6): 115-118.
- [15] 王顺,陈敏,陈孝杨,等. 煤矸石充填重构土壤水分再分布与剖面气热变化试验研究[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(4): 93-98.  
WANG Shun, CHEN Min, CHEN Xiaoyang, et al. Water redistribution and gas-heat diffusion of reconstruction soil filled with gangue[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(4): 93-98.
- [16] KOTELNIKOVA A D, ROGOVA O B, KARPUKHINA E A, et al. Assessment of the structure, composition, and agrochemical properties of fly ash and ash-and-slug waste from coal-fired power plants for their possible use as soil ameliorants[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 333: 130088.
- [17] 武瑞平,李华,曹鹏. 风化煤施用对复垦土壤理化性质酶活性及植被恢复的影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(9): 1855-1861.  
WU Ruiping, LI Hua, CAO Peng. Amelioration of weathered coal on soil physical, chemical properties and enzyme activities with vegetation restoration[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(9): 1855-1861.
- [18] 林杉,位蓓蕾,胡振琪,等. 紫花苜蓿苗期对腐殖酸改良露天矿表土替代材料的响应[J]. *河南农业科学*, 2013, 42(8): 48-52.  
LIN Shan, WEI Beilei, HU Zhenqi, et al. Response of seedling stage Alfalfa (*Medicago sativa* L.) to topsoil substituted material improved by humic acid in open pit mine area[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2013, 42(8): 48-52.
- [19] 位蓓蕾,陈玉玖,胡振琪,等. 紫花苜蓿对蛭石改良某煤矿表土

- 替代材料的响应[J]. *金属矿山*, 2013(5): 131–134.
- WEI Beilei, CHEN Yujiu, HU Zhenqi, et al. Response of purple Alfalfa for Vermiculite as material substitute modifying the surface soil of an open-pit mine[J]. *Metal Mine*, 2013(5): 131–134.
- [20] 胡振琪, 位蓓蕾, 林衫, 等. 露天矿上覆岩土层中表土替代材料的筛选[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(19): 209–214.
- HU Zhenqi, WEI Beilei, LIN Shan, et al. Selection of topsoil alternatives from overburden of surface coal mines[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(19): 209–214.
- [21] 位蓓蕾. 露天矿表土替代材料的筛选与改良研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2014.
- WEI Beilei. Study on screening and improvement of surface soil substitute materials in open-pit mine[D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing), 2014.
- [22] 胡振琪, 赵艳玲. 黄河流域矿区生态环境与黄河泥沙协同治理原理与技术方法[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 438–448.
- HU Zhenqi, ZHAO Yanling. Principle and technology of coordinated control of eco-environment of mining areas and river sediments in Yellow River watershed[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 438–448.
- [23] 邵芳, 胡振琪, 王培俊, 等. 基于黄河泥沙充填复垦采煤沉陷地覆土材料的优选[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(增刊2): 352–358.
- SHAO Fang, HU Zhenqi, WANG Peijun, et al. Selection of alternative soil for filling reclamation with Yellow River sediment in coal-mining subsidence areas[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(Sup.2): 352–358.
- (责任编辑 周建军)