

# 贺兰山保护区采煤迹地生态修复技术与模式研究

刘秉儒<sup>1,2\*</sup>, 张成梁<sup>3</sup>, 史常青<sup>4</sup>, 周光华<sup>5</sup>, 赵廷宁<sup>4</sup>, 李国旗<sup>2</sup>

<sup>1</sup>北方民族大学生物科学与工程学院, 宁夏 银川

<sup>2</sup>宁夏大学西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 宁夏 银川

<sup>3</sup>北京市科学技术研究院城市生态环境研究中心, 轻工业环境保护研究所, 北京

<sup>4</sup>北京林业大学水土保持学院, 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京

<sup>5</sup>国家能源集团宁夏煤业集团有限责任公司, 宁夏 银川

Email: [bingru.liu@163.com](mailto:bingru.liu@163.com)

收稿日期: 2021年2月23日; 录用日期: 2021年3月24日; 发布日期: 2021年3月31日

## 摘要

贺兰山是我国西部重要的天然生态屏障, 由于历史原因, 宁夏贺兰山国家级自然保护区内煤矿开采等人类活动频繁, 重大环境生态破坏问题极为突出。开展贺兰山露天开采采煤迹地生态修复技术研究, 加快恢复贺兰山生态安全屏障功能, 对维护宁夏乃至我国北方地区生态安全, 早日实现“青山绿水就是金山银山”, 落实宁夏“生态立区”战略, 有着十分重要的意义。宁夏重点研发计划重大项目“贺兰山保护区采煤迹地生态修复技术与模式研究”, 采用东西部合作、产学研紧密结合的方式, 组成具有遥感、生态修复、植物生态等学科背景的专家队伍, 以近自然地形重塑技术和研发乡土物种植被恢复技术为核心, 在贺兰山生态保护区汝箕沟露天采区研发采煤迹地地形重塑与土体重构技术、采煤迹地土壤改良与边坡安全防护技术、适生乡土灌草选育及植被抗旱建植保育技术, 确立科学合理的采煤迹地生态修复技术模式并进行综合示范, 为贺兰山生态治理区生态修复工程与生态保护提供科技支撑, 为西北地区同类地区的采煤迹地生态修复提供技术支持。

## 关键词

贺兰山, 采煤迹地, 生态修复, 乡土物种, 技术与模式

# Ecological Restoration Technology and Model of Coal Mining Site in Helan Mountains Reserve

Bingru Liu<sup>1,2\*</sup>, Chengliang Zhang<sup>3</sup>, Changqing Shi<sup>4</sup>, Guanghua Zhou<sup>5</sup>, Tingning Zhao<sup>4</sup>, Guoqi Li<sup>2</sup>

\*第一作者。

文章引用: 刘秉儒, 张成梁, 史常青, 周光华, 赵廷宁, 李国旗. 贺兰山保护区采煤迹地生态修复技术与模式研究[J]. 世界生态学, 2021, 10(2): 145-152. DOI: [10.12677/ije.2021.102016](https://doi.org/10.12677/ije.2021.102016)

<sup>1</sup>College of Biological Science and Engineering, North Minzu University, Yinchuan Ningxia

<sup>2</sup>Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan Ningxia

<sup>3</sup>Environmental Protection Research Institute Center for Remediation, Research Center for Urban Environment, Beijing Academy of Science and Technology, Beijing

<sup>4</sup>College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating, Ministry of Education, Beijing

<sup>5</sup>National Energy Group Ningxia Coal Industry Group Co., Ltd., Yinchuan Ningxia  
Email: bingru.liu@163.com

Received: Feb. 23<sup>rd</sup>, 2021; accepted: Mar. 24<sup>th</sup>, 2021; published: Mar. 31<sup>st</sup>, 2021

## Abstract

Helan Mountains is an important natural ecological barrier in Western China. Due to historical reasons, coal mining and other human activities are frequent in Helan Mountains National Nature Reserve of Ningxia, and serious environmental and ecological damage is extremely prominent. It is of great significance on Ecological Restoration Technology of open-pit mining sites in Helan Mountains and to speed up the restoration of ecological security barrier function in Helan Mountains for maintaining ecological security in Ningxia and even in northern China, realizing as soon as possible that green mountains and green waters are Jinshan and Yinshan and implementing the strategy of ecological standing area in Ningxia. The key R&D project of Ningxia is "Ecological Restoration Technologies and Models of Coal Mining Sites in Helan Mountains Reserve". The team of experts with the backgrounds of remote sensing, ecological restoration, plant ecology and other disciplines is formed by models of cooperation between the East and the West and close integration of production, education and research, so as to remodel technology of near-natural terrain and develop native land. With the technology of species vegetation restoration as the core, the technology of topographic remodeling and soil body remodeling, soil improvement and slope safety protection, selection of suitable native shrubs and grass, and vegetation drought-resistant construction and conservation were developed in Rujigou, Helan Mountains Ecological Reserve, and a scientific and rational technological model of ecological restoration of coal mining sites was established. Comprehensive demonstration was conducted to provide scientific and technological support for ecological restoration project and ecological protection in Helan Mountains ecological control area, and to provide technical support for ecological restoration of mining sites in similar areas in Northwest China.

## Keywords

Helan Mountains, Coal Mining Site, Ecological Restoration, Native Species, Technology and Model

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

贺兰山是我国西部重要的自然地理分界线和重要的水源涵养林区，是宁夏北部的天然生态屏障，其生态环境直接影响到黄河、银川平原、河套平原，并波及西北、华北及其他地区。宁夏贺兰山国家级自然保护区自然环境复杂多样，生物多样性比较丰富，植被垂直分布明显，是我国中温带半干旱、干旱地区山地生态系统的典型代表[1][2]。由于历史原因，宁夏贺兰山国家级自然保护区内人类活动频繁，重大

环境生态破坏问题突出。在贺兰山保护区因露天开采，破坏地表植被，而且造成水土流失，又诱发山体滑坡等地质灾害，切断了生态保护区生物廊道，对开采区景观、水环境、生物多样性等均产生巨大影响。因此，为了加快恢复贺兰山生态安全屏障功能，尽快开展贺兰山露天开采采煤迹地生态修复技术研究，具有强烈的迫切性。加强贺兰山生态保护，维护和提升贺兰山生态系统功能，对维护宁夏乃至我国北方地区生态安全，促进宁夏生态文明建设，实现宁夏“生态立区”战略，有着十分重要的意义。

贺兰山保护区生态修复与治理成为宁夏生态环保领域的“一号工程”。目前各企业采矿场地关闭后采取了一些植被恢复措施，但是保护区露天煤矿采煤迹地生态修复是一项十分艰巨的工程，技术力量不足，而且缺乏科学性，现有措施强化了人工痕迹，地形地貌和植被未充分考虑生态系统功能和生态系统的可持续性。因此，系统引进先进的采煤迹地生态修复技术，研发适合贺兰山高海拔露天煤矿采煤迹地生态修复技术和模式并进行示范，显得极为迫切。

宁夏重点研发计划重大项目“贺兰山保护区采煤迹地生态修复技术与模式研究”(2018BFG02002)，瞄准该领域技术短板，组成具有遥感、矿区复垦、生态修复、植物生态等学科背景的专家队伍，以近自然地形重塑技术和研发乡土物种植被恢复技术为核心，综合应用地貌、土壤、水文、风沙动力学、生物、恢复生态等学科相关理论，在贺兰山生态保护区汝箕沟研发采煤迹地地形重塑与土体重构技术、采煤迹地土壤改良与边坡防护技术、适生乡土灌草选育及植被抗旱建植保育技术，确立科学合理的采煤迹地生态修复技术模式并进行综合示范，为贺兰山生态治理区生态修复工程与生态保护提供科技支撑。并将贺兰山保护区采煤迹地生态治理区打造成我国干旱区矿山生态修复技术模式的示范样板区，为西北地区同类地区的采煤迹地生态修复提供技术支持。

## 2. 项目研究内容、研究思路与技术路线

### 2.1. 项目研究内容

#### 2.1.1. 贺兰山保护区露天采煤迹地地形重塑与土体重构技术研究

依据贺兰山治理区域不同阶段的地形地貌资料，结合原始地形地貌、气象、水文、地质等资料，研究近自然地形重塑的方法和技术[3][4]；研发、集成新土体构建集智能化施工与构建技术。

#### 2.1.2. 采煤迹地土壤改良与边坡安全防护技术研究

分别针对已经重塑或新构建的地形地貌的不同坡面和坡位，开展矿区土地整理后立地类型划分，划分的方法、指标体系等研究。以腐殖酸、菌肥或秸秆碎屑和保水剂等材料，研发采煤迹地土壤改良技术[5][6][7][8]。分别针对已经重塑或新构建的地形地貌的不同坡面和坡位，采用适宜的、经济的生态材料，研发设计防治边坡不稳、阻风蚀、降蒸发的生态防护技术[9]-[14]，实现边坡稳定安全，土壤保水保墒的生态效果。

#### 2.1.3. 贺兰山保护区采煤迹地适生灌草选育及植被抗旱建植保育技术研究

根据植被地带性原理和乡土物种优先的原则，针对不同生境，选育适应的草本和灌木物种；调查乡土物种的种子最佳成熟期，研发蒙古扁桃、沙冬青等乡土灌木快速打破休眠技术以及快繁育苗技术，并制定相应的技术标准，为推动乡土物种种苗工程产业化提供技术保障。针对干旱、缺水问题，研发贺兰山矿区灌草结合的植被抗旱建植保育技术。综合不同生境生态修复的植物选配技术、植被抗旱建植及管理技术，进行技术集成研究[15][16][17][18]，形成一系列植被恢复技术模式。

#### 2.1.4. 贺兰山保护区采煤迹地生态修复技术模式示范

综合不同生境生态修复的植物选配技术、植被抗旱建植及管理技术[19][20][21]，集成2~3套旱区生态保护区矿区废弃地植被恢复技术，形成可供示范推广的生态修复技术模式。

## 2.2. 项目研究思路

贺兰山保护区采煤迹地生态修复技术与模式研究技术路线图如下图 1 所示:

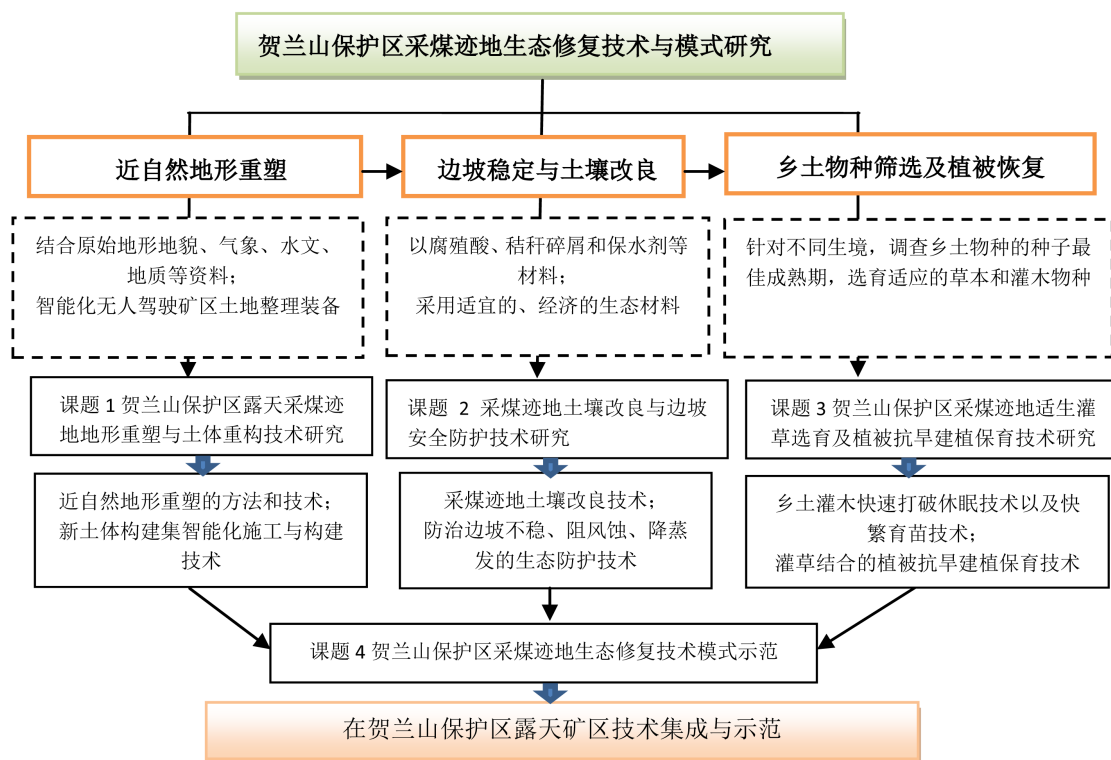


Figure 1. Project technical ideas and methods  
图 1. 项目技术思路和方法

## 2.3. 项目野外实施区域

贺兰山汝箕沟矿区大峰矿位于贺兰山腹地，地势高峻，沟谷发育，海拔在+1830 m~+2254 m 之间，是典型的高山地形，煤层露头随地形起伏出露于地表。受沟谷切割矿田自然形成中槽、大峰、羊齿、红梁四个采区，是我国稀缺和优质煤种——太西无烟煤的重要产区。大峰露天煤矿东、西两侧境界毗邻贺兰山保护区实验区和缓冲区。大峰东外排土场作为项目试验基地，红梁西翼渣台作为项目示范区。

项目区的气象水文、土地类型及植被概况如下：

### 2.3.1. 气象

项目区属高山大陆性气候，空气稀薄，含氧量少，经地面空气测定按体积计，含氧量仅为 18.9%。风向多西北风，风速较大，最大风力达十级。终年干旱，雨量稀少，变幅大，汝箕沟治理区降水季节多集中于 6~9 月间，平均降水量 200~250 mm，年最大 378.2 mm，最小 64.2 mm，年平均蒸发量为 2455.3 mm，年平均蒸发量远大于降水量。历年平均气温为-0.7℃至 1.3℃。每年九月下旬至翌年四月为霜冻期，最大冻土厚度为 1.04 m (数据来源：石嘴山市气象局，国家能源集团宁夏煤业集团有限责任公司汝箕沟无烟煤分公司，下同)。

### 2.3.2. 水文

矿区地处贺兰山腹地，地势陡峭，气候干旱少雨，蒸发量大于降水量，且大气降水均形成地表径流

顺自然沟谷流出区外。本区无井、泉、地表水系存在。矿田唯一地表径流为大峰沟洪水流，雨季山洪暴发时，沙沟有水流，平时干涸无水，历年最大洪水流量为 3.1 万 m<sup>3</sup>/h。

### 2.3.3. 土地类型

井田内山体基岩裸露，土壤类型主要是淡灰钙土和粗骨土，灰钙土是在干旱气候和荒漠草原植被下形成的地带性土壤，腐殖质积累很低，有机质含量仅为 0.5%~0.8%，土壤中碳酸钙以灰白色石灰斑块状沉积形钙积层；粗骨土是由于山丘地区地形起伏，地面坡度大，切割深，上体浅薄，加之风蚀、水蚀大多较重，细粒物质易被淋失，土体中残留粗骨碎屑物增多，因而具显著的粗骨性特征。

### 2.3.4. 植被

矿区内山体基岩裸露，植被稀少，局部可见少量稀疏草本植被生长，主要为耐寒、耐旱的草本植物，但由于区内矿山开采活动频繁，已对该区域的植被系统造成大面积的破坏，植被覆盖率小于 10%，植被覆盖率小，生态条件脆弱。

根据项目区的自然条件和地形地貌，试验区空间布局为：雨养恢复试验区、种质资源圃、乡土物种扩繁试验区、地形重塑试验区、边坡治理试验示范区。示范区空间布局为：边坡治理示范区、植被恢复示范区。

## 2.4. 项目技术路线

分别针对已经重塑与新构建的地形地貌的不同坡面和坡位，采用砾石覆盖、秸秆覆盖、仿生设计等材料与技术，研发设计防治边坡不稳、阻风蚀、降蒸发的生态防护技术[4]。根据植被地带性原理和乡土物种优先的原则，针对阴坡、阳坡、平地等不同生境，选育适应的草本和灌木物种。综合不同生境生态修复的植物选配技术、植被抗旱建植及管理等技术(图 1)。研发蒙古扁桃、沙冬青、四合木等乡土灌木的快繁育苗技术；研发微生物生态肥料，提高移栽苗木成活率，贺兰山矿区灌草结合的植被抗旱建植保育技术。

## 3. 项目总体目标、考核指标及预期成果

### 3.1. 项目总体目标

针对贺兰山保护区露天采煤迹地生态治理技术现状与存在的技术问题，研发采煤迹地地形重塑与土体重构技术、采煤迹地土壤改良与微生境安全防护技术、适生灌草植物选育及植被抗旱建植保育技术，确立科学合理的贺兰山保护区采煤迹地生态修复技术模式，为贺兰山生态保护提供科技支撑，为宁夏生态文明和生态立区战略提供智力支持。

### 3.2. 考核指标

#### 3.2.1. 基础研究层面

采煤迹地乡土物种及土壤种子库；贺兰山不同生境采煤迹地生态恢复区植物-土壤-微生物特征研究；边坡不同修复措施的生态水文效应；坡面不同恢复阶段植被对土壤水分和养分的影响；不同施肥措施对蒙古沙冬青光合作用和根系生物量的影响。

#### 3.2.2. 技术成果方面

研发产出露天采煤迹地近自然土体构建技术、贺兰山矿区适生植物快繁与抗旱建植技术、旱区矿山土壤快速培肥技术 2~3 项；采煤迹地生态修复技术模式 2~3 套；制定旱区矿山采煤迹地生态修复技术规程 2~3 项；申报相关技术专利 2~3 项；



### 3.2.3. 技术示范方面

建立试验研究综合示范基地 1~2 处，示范区面积 700 ha。

### 3.2.4. 人才培养方面

培养技术骨干 5~6 人；发表学术论文 3~5 篇；面向社会技术培训 2~3 次，承办学术会议 1~2 次。

## 3.3. 预期成果

给政府部门提交决策咨询报告 1 份《贺兰山保护区露天开采矿区生态治理技术模式及建议》。利用 GeoflurvTM 设计地形重构，开发智能地形重塑智能化系统 1 套；筛选出 2~3 种耐旱、抗寒的保护区本土草本植物，优选出 2~3 种乡土灌木，并建立种苗快繁基地 1~2 处；培养企业生态修复技术骨干 2~3 人；集成 2~3 套旱区生态保护矿区废弃地植被恢复技术并示范，示范面积 700 ha，培养技术骨干 2~3 人。

## 4. 技术关键、难点与创新点

### 4.1. 技术关键

露天采煤迹地地形重塑与新土体近自然构建技术，以及抗旱植物建植与保育技术是贺兰山矿区生态修复技术的关键，也是当前最需要的技术。

### 4.2. 技术难点

技术难点是“师法自然”在贺兰山保护区的实施方法和途径，以及乡土物种抗旱建植技术的研发。

### 4.3. 创新点

本项目综合应用地貌、土壤、水文、风沙动力、生物、恢复生态等学科的相关理论开展生态修复技术研究，创新点如下：

#### 4.3.1. 理论创新

提出以地形重塑和土体重构为主要内容的露天矿区土地恢复理论。

#### 4.3.2. 技术创新

近自然土体构建技术；贺兰山矿区适生植物快繁与抗旱建植技术。

#### 4.3.3. 材料与装备

开发近自然地形重塑装备智能化系统；贺兰山矿区植被快速恢复所需的适生植物物种苗木；研发旱区矿山土壤快速培肥技术所需的材料、肥料。

## 5. 展望

废弃矿山生态恢复是一项综合的、跨学科的技术，集成了生态、材料、植物、土壤、工程等方面技术为一体的生态恢复技术体系；生态修复的时间应为 5~10 a，避免“人一走，草(树)就死”的人工暂时维系的生态修复工程，应当师法自然进行生态修复[3]。宁夏科技研发重大专项，采用科学的、先进的生态修复理念和技术，以近自然地形重塑和乡土物种植被恢复为核心，研发符合当地条件的生态恢复技术和措施，这对我国保护区矿区生态修复理念的影响将是深远的。

本项目开发的近自然地形重塑装备智能化系统，可为贺兰山保护区采煤迹地低成本生态修复提供技术保障，降低工程成本 10%以上；贺兰山采煤迹地植被快速恢复所需的乡土物种苗木繁育，以及土壤快速培肥技术所需的原料，可带动、引领特色乡土种苗产业的发展，为当地实现脱贫致富找到新途径；生

态修复项目的资金投入, 以及今后的技术示范推广, 能创造更多就业岗位, 生态修复样板工程带动的生态旅游将带来可观的经济效益; 采煤迹地生态系统稳定性和可持续性得到显著增强, 因此, 项目具有良好的社会效益、经济效益和生态效益。

自然资源部对该项目的实施高度重视, 宁夏自然资源厅同步跟踪项目实施过程, 宁夏回族自治区科学技术协会委托项目面向全国举办“科技助推贺兰山生态修复高层论坛”, 分别针对: 1) 干旱区矿山生态修复新材料新技术; 2) 西部生态屏障综合管理问题与对策; 3) 贺兰山地区煤矿企业生态转型发展, 凝聚全国科学家的智慧思想, 集成干旱区矿山生态修复的技术方法, 维护和提升贺兰山生态系统功能, 保障宁夏平原乃至我国西北地区生态安全及经济社会可持续发展, 早日实现“青山绿水就是金山银山”。同时通过项目执行和论坛举办, 将成立政、产、学、研、用紧密结合的“北方旱区矿山生态修复技术创新中心”, 使其成为北方干旱风沙区、陕甘宁蒙能源金三角和西北其他干旱区各类矿山生态修复提供技术研发平台和技术推广的培训中心。

矿区属半干旱、高寒、高风蚀、高水蚀的生态脆弱区, 应科学管理。项目今后需要进一步对人工生态系统演替规律、监测-评价-管护、植被与功能关系等问题进行研究, 具体内容有: 1) 生态修复项目区土壤种子库研究[22] [23]; 2) 水、土、气、生等要素变化的长期定位监测, 尤其是植被演替过程与生物多样性监测等[24] [25]; 3) 坡面不同恢复阶段植被对土壤水分和养分的影响[26] [27]; 4) 植被-土壤互作效应[28] [29]; 5) 生态恢复效果及成本评价。

## 基金项目

宁夏重点研发计划重大项目(2018BFG02002); 国家重点研发计划项目(2017YFC0504400); 北方民族大学高层次人才启动项目(11159181)。

## 参考文献

- [1] 刘秉儒, 璩向宁, 李志刚, 等. 贺兰山森林生态系统长期定位研究的重大意义与研究内容[J]. 宁夏农林科技, 2010(1): 53-54.
- [2] 刘秉儒, 张秀珍, 胡天华, 等. 贺兰山不同海拔典型植被带土壤微生物多样性[J]. 生态学报, 2013, 33(22): 7211-7220.
- [3] 张成梁, Li, B.L. 美国煤矿废弃地的生态修复[J]. 生态学报, 2011, 31(1): 276-285.
- [4] 赵廷宁, 张玉秀, 曹兵, 等. 西北干旱荒漠区煤炭基地生态安全保障技术[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 1-5.
- [5] 王金满, 白中科, 周伟, 等. 一种黄土区大型露天煤矿排土场微地形改造方法[P]. 2015, ZL 201210400983.9.
- [6] 张成梁, 张洪江, 刘士余. 采煤对山西省的环境影响及其生态修复策略[C]//第二届全国农业环境科学学术研讨会论文集. 昆明: 中国农业生态环境保护协会、农业部环境保护科研监测所, 2007: 786-790.
- [7] 谢云, 钊逢光. 一年生先锋植物在边坡喷播绿化中的应用试验[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(3): 384-388.
- [8] 戴钦. 煤炭矿区生态恢复与对策研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [9] 丁志平. 矿区地质环境的破坏与恢复: 以乌海地区为例[J]. 国土资源, 2002(12): 32-33.
- [10] 彭苏萍, 赵建庆. 中国西部煤矿区生态环境控制及改善研究[C]//西部大开发, 科教先行与可持续发展——中国科协 2000 年学术年会文集. 北京: 中国科学技术出版社, 2000: 48.
- [11] 张亦扬, 强于鲜, 李萌津, 等. 榆神府矿区采煤塌陷地植被群落恢复演替特征[J]. 绿色科技, 2019(6): 65-66+71.
- [12] 张瑞琦, 王进鑫, 王秀青, 等. 4 种草本植物浸提液对长柄扁桃种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(5): 94-99.
- [13] 吴祥云, 李宏昌, 瞿春艳, 等. 露天矿排土场不同恢复措施土壤种子库生态特征[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2009, 28(5): 820-822.
- [14] 朱成剑. 采矿废弃地生态恢复的主要措施和技术[J]. 江西建材, 2015(21): 226-226.
- [15] 王洁, 周跃. 矿区废弃地的恢复生态学研究[J]. 安全与环境工程, 2005, 12(1): 5-8.

- 
- [16] 冯国宝. 煤矿废弃地的治理与生态恢复[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009.
- [17] 韩永清. 煤矿废弃地生态恢复治理研究[J]. 山西农经, 2015(10): 55.
- [18] 王雷, 宋效刚, 徐燕英, 等. 煤矿废弃地生态修复研究[J]. 安徽农学通报, 2012, 18(5): 110-112.
- [19] 曹翠玲, 于学胜, 耿兵, 等. 露天煤矿废弃地复垦技术及案例研究[J]. 西安科技大学学报, 2013, 33(1): 51-55.
- [20] 孙泰森, 白中科. 大型露天煤矿废弃地生态重建的理论与方法[J]. 水土保持学报, 2001(5): 56-59.
- [21] 王宾, 申广荣, 白中科. 煤矿废弃地生态重建智能决策支持系统的分析设计[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 1999(1): 52-54.
- [22] 王改玲, 白中科, 郝明德. 平朔安太堡露天矿排土场土壤种子库研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(6): 178-180.
- [23] 韩丽君, 白中科, 李晋川, 等. 安太堡露天煤矿排土场土壤种子库[J]. 生态学杂志, 2007(6): 25-28.
- [24] 郝蓉, 白中科, 赵景逵, 等. 黄土区大型露天煤矿废弃地植被恢复过程中的植被动态[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 1470-1476.
- [25] 樊金拴. 中国北方煤矸石堆积地生态环境特征与植被建设研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2006.
- [26] 李晋川, 王翔, 岳建英, 等. 安太堡露天矿植被恢复过程中土壤生态肥力评价[J]. 水土保持研究, 2015(1): 66-71.
- [27] 王翔. 安太堡露天矿复垦地植被恢复对土壤酶活性和微生物区系影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 山西大学, 2012.
- [28] 王翔, 李晋川, 岳建英, 等. 安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较[J]. 环境科学, 2013, 34(9): 3601-3606.
- [29] 唐骏. 黄土区露天煤矿排土场植被恢复的土壤环境效应[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2015.