

黄土区

露天煤矿重构土壤 特性定量表征理论与方法

王金满 白中科 杨睿璇 秦倩 等著



科学出版社

黄土区露天煤矿重构土壤 特性定量表征理论与方法

王金满 白中科 杨睿璇 秦 倩 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书探讨了黄土区露天煤矿重构土壤特性定量表征理论与方法。全书分为12章,总结了国内外露天煤矿土壤重构研究现状,分析了黄土区露天煤矿土地损毁类型及其对土壤质量的影响,运用地统计学方法研究了黄土区露天煤矿损毁土地土壤特性空间变异,探讨了受损土地土壤重构过程与方法,运用构建模型的方法分析了复垦土壤质量演替规律及复垦土壤质量与植被交互影响。此外,对复垦土壤粒径分布、复垦土壤孔隙分布进行了多重分形表征,对复垦土壤特性进行了联合多重分形表征,并对重构土壤孔隙进行了三维重建及定量表征,实现了重构土壤粒径分布和土壤孔隙分布的定量化研究。

本书可作为土地资源、生态学、农业资源与环境专业研究生和高年级本科生的参考教材,也可供相关专业的科研、教学等人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

黄土区露天煤矿重构土壤特性定量表征理论与方法 / 王金满等著.
—北京:科学出版社,2016.5

ISBN 978-7-03-048284-6

I. ①黄… II. ①王… III. ①黄土区-露天矿-煤矿-复土造田-研究
IV. ①TD88

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 103599 号

责任编辑:周 杰 / 责任校对:张凤琴

责任印制:张 倩 / 封面设计:铭轩堂

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年5月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016年5月第一次印刷 印张:15 1/4

字数:274 000

定价:108.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《黄土区露天煤矿重构土壤特性定量表征理论与方法》

编委会名单

按姓氏汉语拼音排序：

白中科	曹银贵	曹振环	谷 裕	郭凌俐
贺振伟	胡斯佳	贾 玮	焦泽珍	李 博
李新风	刘慧娟	刘 鹏	刘 涛	刘伟红
秦 倩	王洪丹	王金满	王 平	王 宇
吴克宁	杨睿璇	叶驰驱	尹建平	张 萌
张耿杰	赵华甫	赵中秋	周 伟	

前 言

中国是全世界最大的煤炭生产国和消费国，而煤炭开采在促进经济发展的同时也带来了一系列的生态环境问题。黄土区露天煤矿的开采是一种高速度、大规模改变生态环境的生产活动，它破坏了地形地貌，改变了原有的水循环过程，加剧了土壤流失和退化，降低了当地的生物多样性，使黄土区本就恶劣的生态环境雪上加霜。因此，做好黄土区的土地复垦工作意义重大。

土壤重构是矿区土地复垦的基础阶段，也是复垦的重点与核心。复垦中应采取适当的工程措施及物理、化学、生物、生态措施，重新构造一个适宜的土壤剖面与土壤肥力条件，以及稳定的地貌景观，在较短的时间内恢复和提高重构土壤的生产力，改善重构土壤的环境质量。虽然自 20 世纪 80 年代初期中国就开展矿区土地复垦工作，也取得一些成果，但目前土地复垦工作明显落后于欧美发达国家，复垦率比较低，同时缺乏对复垦质量的要求和控制，特别是对土壤重构不够重视，导致一些土地复垦工程效益低下，甚至失败。此外，露天煤矿排土场受大型机械施工碾压，导致土壤板结严重，物理结构不良，土壤培肥改良周期长。为此，作者在国家自然科学基金“基于多重分形理论的黄土区大型露天煤矿排土场土壤重构机理与调控模式”（项目编号：41271528）、北京高校“青年英才计划”“黄土区大型露天煤矿排土场复垦土壤特性空间变异研究”（项目编号：YETP0638）、中央高校基本科研业务费专项资金项目“黄土区排土场重构土壤结构的定量表征方法”（项目编号：2652012072）、“黄土高原生态脆弱矿区排土场土壤-植被动态交互影响与模拟”（项目编号：2652010027）等项目的资助下，开展了黄土区露天煤矿损毁土地土壤特性空间变异、复垦土壤质量演替规律、复垦土壤质量与植被交互影响、复垦土壤粒径与土壤孔隙分布的多重分形表征，以及重构土壤孔隙三维重建及定量表征等方面的研究，旨在为黄土区露天煤矿的复垦与土壤重构工作提供依据与指导。

全书共 12 章，在总结国内外露天煤矿土壤重构研究现状、分析黄土区露天煤矿土地损毁类型及其对土壤质量的影响的基础上，研究了黄土区露天煤矿损毁土地土壤特性空间变异，探讨了受损土地土壤重构过程与方法，运用构建模型的方法分析了复垦土壤质量演替规律及复垦土壤质量与植被交互影响。此外，还运用

多重分形理论对复垦土壤粒径分布、复垦土壤孔隙分布进行了多重分形表征,对复垦土壤特性进行了联合多重分形表征,并对重构土壤孔隙进行了三维重建及定量表征。

先后参加有关项目研究的有中国地质大学(北京)土地科学技术学院的王金满、白中科、杨睿璇、秦倩、周伟、曹银贵、张萌、郭凌俐、王宇、王洪丹、曹振环、谷裕等。本书是对上述项目组成人员研究成果的高度总结。另外,本书还参考了其他单位和个人的研究成果,均已标注在参考文献中,在此一并表示感谢!全书由王金满、秦倩、谷裕、曹振环统稿,由王金满最后审定。

在本书成稿之际,向所有为本书出版提供支持和帮助的同仁表示衷心感谢。由于时间及经费的限制,所取得的成果仅仅限于黄土区露天煤矿土壤定量表征理论与方法的某几个方面,可能对有些问题的认识还不够深入。同时,由于作者水平有限,书中难免存在疏漏之处,还恳请广大读者提供宝贵意见,也恳请同行专家批评指正。

作 者

2015年6月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 黄土区露天煤矿复垦土壤特性定量表征的研究内容	16
1.4 黄土区露天煤矿复垦土壤特征定量表征的研究思路和技术方案	19
第2章 研究区概况	21
2.1 自然资源概况	21
2.2 社会经济概况	24
2.3 矿区复垦概况	24
第3章 黄土区露天煤矿土地损毁类型及其对土壤质量的影响	26
3.1 土地损毁类型	26
3.2 土壤重构限制因素	28
3.3 黄土区露天煤矿土地损毁对土壤质量的影响	32
3.4 小结	35
第4章 黄土区露天煤矿损毁土地土壤特性空间变异	37
4.1 土壤特性空间变异的研究理论与方法	37
4.2 土壤物理特性空间变异	43
4.3 土壤化学特性空间变异	54
4.4 土壤肥力特性空间变异	57
4.5 合理采样数目及监测点的确定	64
4.6 小结	74
第5章 黄土区露天煤矿受损土地土壤重构过程与方法	76
5.1 土壤重构原理	76
5.2 土壤重构过程	78
5.3 小结	81
第6章 黄土区露天煤矿复垦土壤质量演替规律	82
6.1 样品采集与模型构建	82

6.2	土壤物理特性演替规律	86
6.3	土壤化学特性演替规律	87
6.4	土壤肥力特性演替规律	87
6.5	土壤综合质量演替规律	89
6.6	小结	89
第7章	黄土区露天煤矿复垦土壤质量与植被交互影响	91
7.1	土壤与植被样品采集与参数测定	91
7.2	土壤演替规律与模型	93
7.3	植被演替规律与模型	95
7.4	土壤与植被的交互影响模型	97
7.5	植被恢复对立地环境因子的响应	99
7.6	小结	109
第8章	黄土区露天煤矿复垦土壤粒径分布的多重分形特征及其空间变异	111
8.1	土壤粒径分布的多重分形方法	111
8.2	复垦土壤粒径分布的多重分形特征	114
8.3	多重分形参数与土壤理化性质之间的关系	120
8.4	多重分形参数空间变异特征	132
8.5	小结	145
第9章	黄土区露天煤矿复垦土壤孔隙分布的多重分形表征	147
9.1	土壤孔隙分布的多重分形方法	147
9.2	复垦土壤孔隙分布特征	156
9.3	复垦土壤孔隙分布的多重分形特征	173
9.4	小结	182
第10章	黄土区露天煤矿复垦土壤特性的联合多重分形表征	184
10.1	土壤特性联合多重分形方法	184
10.2	复垦土壤物理特性的联合多重分形特征	188
10.3	复垦土壤化学特性的联合多重分形特征	194
10.4	复垦土壤肥力特性的联合多重分形特征	197
10.5	小结	200
第11章	黄土区露天煤矿重构土壤孔隙三维重建及定量表征	202
11.1	土壤孔隙三维重建及定量表征的研究方法	202
11.2	重构土壤孔隙的三维分布	204
11.3	孔隙团搜索结果	207

11.4 影响土壤孔隙状况的讨论	210
11.5 小结	211
第 12 章 总结与探讨	213
12.1 总结	213
12.2 探讨	213
参考文献	216

第1章 绪 论

1.1 研究背景

中国是全世界最大的煤炭生产国和消费国,2013年,我国露天煤矿煤炭产量已经从4%提升到了12%。露天煤矿大多分布在黄土高原等生态脆弱区,该地区自然条件严酷,土壤贫瘠,植被稀疏,水资源极度匮乏,生态环境极为脆弱,是典型的干旱、半干旱地区。而露天煤炭的开采直接剥离表土和煤层的上覆岩层,使煤层暴露后开采。露天开采是一种高速度、大规模改变生态环境的生产活动,破坏了地形地貌,改变了原有的水循环过程,破坏了地表径流下渗过程,加剧了土壤流失和退化,同时破坏了动物栖息地,使物种多样性降低,给矿区生态系统带来了很大威胁,严重制约着矿区社会经济的发展。据有关部门预测,到2020年,中国露天开采煤炭损毁土地 $0.22\text{ hm}^2/\text{万 t}$,随着露天煤矿的建设和发展,其对矿区土地资源和生态环境的破坏日趋严重。因此,做好黄土高原矿区的复垦工作意义重大。露天煤矿导致的废弃地多为排土场,因而必须做好该地区露天煤矿排土场土地的复垦与生态恢复工作,恢复矿区的生态景观,减缓土壤流失和退化,促进矿区社会经济的可持续发展。

露天煤矿土地复垦包括地貌重塑、土壤重构和植被重建。其中,土壤重构是矿区土地复垦的基础阶段,也是复垦的重点与核心。土壤重构(soil reconstruction, soil restoration),即重构土壤,是以工矿区破坏土地的土壤恢复或重建为目的,采取适当的采矿和重构技术工艺,应用工程措施及物理、化学、生物、生态措施,重新构造一个适宜的土壤剖面与土壤肥力条件,以及稳定的地貌景观,在较短的时间内恢复和提高重构土壤的生产力,并改善重构土壤的环境质量。如果没有良好的土壤母质条件,植被和作物就没有很好的生存基础,将很难达到良好的复垦效果。复垦后的土壤条件直接关系到复垦的成败和效益的高低,因此重构一个较高生产力的土壤是土地复垦技术革新的动力和方向。现代矿区土地复垦技术研究的重点之一就是土壤因素的重构,为了使复垦土壤达到最优生产力,最基本的是要构造一个最优的土壤物理、化学和生物条件。

在露天矿区复垦的过程中,由于受开采成本及开采技术的限制,露天煤矿各

层岩土层的剥采与堆倒会无次序混排,形成“矿山土”,改变了原有土壤的层次结构,容易造成土壤侵蚀及水土流失,不利于植被重建工程的开展。此外,露天煤矿排土场受大型机械施工碾压,导致土壤板结严重,物理结构不良,持水保温能力差,氮、磷、钾和有机质等含量只有原表土层的 20% ~ 30%,不利于复垦植物的生长。另外,上覆岩层或煤矸石中可能含有重金属元素,会造成土壤污染,这些有毒元素若随径流扩散,会造成更大范围的土壤污染。

要重构一个适宜植被生长的土壤条件,科学地推进黄土露天矿区土地复垦工作,需要一套完整且切实可行的理论作为依据,尤其在重构土壤特性层量表征方面,其对黄土区露天煤矿土壤重构理论与方法的研究与探讨具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

本节将从矿山土地复垦土壤重构研究进展、露天煤矿重构土壤质量研究、露天煤矿植被及生态恢复研究,以及露天煤矿土壤重构研究中新方法的使用等几个方面来综述国内外的研究现状。总体来说,目前关于露天煤矿重构土壤质量、植被恢复的研究较多,但是对土壤质量-植被-环境因子之间响应关系机理的揭示不够深入,同时在露天煤矿重构研究中很少应用地统计学、多重分形、三维重建等新方法。

1.2.1 矿山土地复垦土壤重构研究进展

1. 矿山土壤重构发展历程

发达国家从 19 世纪末开始对矿区废弃地进行治理,20 世纪 20 年代开始对矿区土地复垦和生态恢复的研究。70 年代的研究主要针对矿山废弃地恢复、防止生态系统退化。20 世纪末期的研究主要针对沉陷区环境影响植被恢复、废弃地复垦技术、固废综合利用和土壤重金属去除等方面。21 世纪的研究则针对矿山废弃地物种多样性、土壤重金属的植物富集、矿山开采对环境的影响机理、3S 技术在土地复垦监测和评价中的应用、矿区水体修复等方面。美国复垦法律健全,技术先进,实行边开采边复垦,复垦率高达 85%。德国实施复合型土地复垦,休闲用地、物种保护用地、景观用地都有,机构健全,执法严格,资金渠道稳定。澳大利亚的特色土地复垦模式以高科技主导、多专业联合、综合性治理开发为主。英国将损毁土地复垦为农林用地,矿区土壤改良处于世界领先地位(卞正富,2000)。

我国现代意义的土地复垦开始于 20 世纪 50 年代,当时主要针对土地退化和

土壤退化问题将废弃地进行农业复垦。1988 年开始强调生态恢复学理论在基质改良方面的应用。1999 年开始注重生态系统健康和环境安全的生态恢复。矿山废弃地土壤重构主要包括物理改良、化学改良和生物恢复等技术。其中,物理改良包括排土、换土、去表土、客土、深耕翻土;化学改良包括用酸碱盐改善土壤酸碱化;生物恢复包括施用有机肥料、木屑、绿色垃圾、粪肥、有机污泥,推广重金属超富集植物以富集重金属,补充树皮以提高土壤有机碳含量等(魏远等, 2012)。

2. 土壤剖面重构方法研究

露天煤矿区土壤重构的主要内容是排土场重构,而排土场重构的核心问题主要是排土场合理的开采工艺与复垦技术相结合的土壤剖面重构。土壤剖面重构是土壤重构的关键,也是最为基础的一步。土壤剖面(soil profile)在土壤学中是指一个具体的土壤纵剖面,一个完整的土壤剖面包括土壤形成过程中所产生的发生学层次及母质层次。土壤剖面重构(soil profile reconstruction),概括地说就是土壤物理介质及其剖面层次的重新构造,是指采用合理的采矿工艺和剥离、堆垫、贮存、回填等重构工艺,构造一个适宜土壤剖面发育和植被生长的土壤剖面层次、土壤介质和土壤物理环境。

美国《露天采矿管理与土地复垦法》规定和推荐采用一体化的采矿与复垦工艺,即根据不同的地区和地形条件,分别采用平地开采法、等高开采法、山顶开采法等一系列采矿与复垦一体化模式。国外应用比较广泛的是横跨采场倒推的铲斗轮开采系统,这是一种同时使用剥离铲和斗轮挖掘机进行剥离的无运输倒推工艺,适用于倾角小于 10° 的水平或近水平煤层,是比较典型的露天煤矿土地复垦技术。这种方法没有运输环节,与其他工艺相比,具有投资省、成本低、功效高等一系列优点,能够形成边采煤边复垦的良性循环。

国内对露天煤矿土壤剖面重构技术的研究较少。20 世纪 80 年代初,我国复垦采煤沉陷地主要采用泥浆泵挖深垫浅的方法,但此方法不适宜恢复为耕地的复垦。运用拖式铲运机挖深垫浅的工艺可解决这一难题,而后“条带复垦表土外移剥离法”、“梯田模式表土剥离法”等生态复垦表土剥离工艺,以及生态预复垦的表土剥离工艺被广泛应用,进一步优化了土壤重构技术(付梅臣和陈秋计, 2004)。露天煤矿排土场是由原来的剥离土体和上覆土壤经过剧烈的扰动,以松散堆积状态堆置形成的人工巨型地貌景观,因此存在严重的水土流失、表层土壤压实,以及排土场本身的稳定等问题。排土场平台“堆状地面”的土壤重构方法有效地避免了表层土壤压实,并起到了增加水分入渗和分散地表径流的作用(魏忠义等, 2001)。基于土壤学理论和国外露天矿复垦的实践经验,胡

振琪等(2005)提出的“分层剥离、交错回填”的土壤剖面重构技术广泛应用于露天煤矿复垦,这种方法使得损毁土地的土层顺序在复垦后能保持基本不变,从而更适宜于植物的生长。通过对内蒙古胜利东二号露天矿排土场平台及边坡的研究,刘春雷(2011)将开采时的表土剥离、表土存放,以及复垦过程中的剖面重构、复垦后的土壤改良、植被的筛选与配置、水土保持工程措施、人工管护作为整体,系统地提出了草原露天煤矿区土壤重构技术,以及矿区复垦中需要注意的问题,进一步完善了矿区土壤重构技术理论,为排土场后期及相同区域土地复垦提供了一定的参考。

1.2.2 露天煤矿重构土壤质量研究

重构土壤是矿山植被重建的基础,重构土壤质量的高低是土地复垦效果的主要评价标准,也是复垦成败的关键。国内外关于重构土壤质量的研究较多,但多集中在土壤理化性质、土壤微生物及土壤污染方面,而目前对于复垦土壤质量空间变异性研究、重构土壤特性定量化研究及土壤质量演替规律模型研究较少。

在复垦土壤质量评价中,胡振琪(1996)运用模糊集理论开发了一个定量评价土壤生产力模糊数学模型,对复垦土壤耕作效果进行了评价,采用土壤生产力指数的修正模型和复垦土地生产力的耕作效果指数评价了复垦土壤耕作效果。此外,陈龙乾等(1999)、卢铁光等(2003)、王志宏等(2006)、马建军等(2007)分别用土壤质量评价指数法、单因子评价和模糊数学综合评价、灰色关联分析法评价了复垦土壤的质量。这些土壤质量评价方法为复垦土壤质量的研究奠定了基础。

下面将从重构土壤理化性质与养分、重构土壤微生物活性及重构土壤重金属污染3个方面叙述国内外关于露天矿重构土壤质量的研究进展。

1. 重构土壤理化性质与养分研究

在重构土壤质量的研究中,往往以有机质、全氮、有效磷、速效钾、pH、电导率、容重等作为评价指标来反映复垦土壤的理化性质及养分状况。Potter等(1988)、Akala和Lal(2001)、于君宝等(2001, 2002)、Shukla等(2004)、李戎凤等(2007)、丁青坡等(2007)对复垦土壤养分状况进行了分析。Daniel等(2002)对露天开采后复垦20年的土壤与未受损土壤进行了对比研究,发现复垦土壤有机质的含量仅为未受损土壤的36%。李华等(2008)以风化煤为修复介质研究了复垦土壤理化性质的变化,结果发现0~20 cm土层土壤有机质、腐殖质含量显著提高,pH有所降低,但效果不显著,并指出风化煤施加量为27 000 kg/hm²时改良效果最佳。张乃明等(2003)、孙海运等(2008)选择土壤有机质、全

氮、有效磷、速效钾、pH、电导率、容重等指标对复垦土壤质量进行了综合评价,指出随着复垦年限的增加,土壤质量不断提高,复垦后种植不同植被土壤质量差异较大,种植牧草、杨树较好,用作耕地和种植针叶树较差,施用有机肥和化肥可以加速土壤的熟化,土壤理化性质逐年改善。樊文华等(2010)以复垦13年的平朔安太堡露天矿区南排土场1420平台正常复垦土壤与自燃退化土壤为研究对象,研究了煤矸石自燃对复垦土壤质量的影响,发现自燃后土壤体积质量、田间持水率与正常平台和原地貌土壤相比显著偏小,总孔隙度比正常平台和原地貌土壤的要大,煤矸石自燃可以降低复垦土壤的有机质、速效磷质量分数及pH,提高复垦土壤表层速效钾的质量分数。郭凌俐等(2014)分析了内蒙古大唐胜利东二号露天矿不同表土堆存方式下土壤质量的变化,研究结果表明散状表土场除土壤pH和堆状表土场基本一致外,土壤有机质养分参数(有机质、全氮、速效钾、速效磷)和电导率都高于堆状表土场。

此外,也有少数学者对露天煤矿复垦土壤有机碳进行了研究,刘伟红等(2014)研究了平朔露天煤矿排土场不同复垦阶段的耕地、林地、草地土壤有机碳的动态变化,结果表明土壤有机碳随着土层深度的增加而逐渐递减,与未复垦土壤相比,复垦土壤有机碳含量增加,且有机碳含量呈现林地大于耕地、耕地大于草地的趋势,同时发现林地和草地土壤有机碳含量与全氮之间有极显著的正相关关系,耕地和林地土壤有机碳含量与pH具有明显的负相关性。李俊超等(2014)研究了植被重建模式过程中碳储量的变化,结果显示在不同植被重建模式中表层土有机碳含量从高到低依次为草地、灌木、乔木、乔灌混交林、自然恢复地,在不同的植被配置类型中苜蓿地0~10 cm土壤中有机碳含量最高,达到5.71 g/kg,比自然恢复地高166.7%,与未进行植被恢复的排土场相比,植被重建后的草地、灌木、乔木地有机碳含量均增加,表现出了巨大的固碳能力。Bartuska和Frouz(2015)运用年代序列的方法,研究了索科洛夫附近露天煤矿复垦土壤的碳积累,发现随着复垦年限的增加,碳积累量也增加,但增加的速度变得缓慢。

2. 重构土壤微生物活性研究

土壤微生物是维持土壤生物活性的重要组分,其对土壤中各化学元素的循环和矿物质的分解有着重要作用,在土壤发育、肥力改善以及植被生长等方面起着重要作用。在露天煤矿的开采中,原有的地形地貌和土层结构都遭到损坏,微生物种群也受到很大影响,从而影响到营养元素的循环及土壤的肥力,因此恢复地下土壤微生物生态群落是复垦中的一项重要工作。重构土壤微生物及其活性的研究对复垦土壤质量的提高具有重要意义。

矿区重金属污染能使土壤微生物总数下降,土壤酶活性减弱,土壤生化作用强度降低(龙健等,2003; Ciarkowska et al., 2014)。Daniel 等(2002)的研究结果表明,露天煤矿开采后复垦20年的土壤中,总微生物量、细菌、真菌量分别仅为未受损土壤的20%、16%及28%。可见,经过露天煤矿的开采,土壤中微生物受到很大影响,土壤活性也会下降。但Frouz 等(2001)、樊文华等(2011a)、Dangi 等(2012)发现,随着复垦年限的增加,土壤中微生物的数量种类也逐渐恢复,且土壤微生物群落恢复最重要的阶段在复垦后的5~14年。Wanner 和Dunger (2001)对德国东部露天煤矿已复垦46年的林地土壤微生物活性进行了研究,发现复垦地微生物丰富度及生物量与未扰动林地相差不大,但在复垦土壤中却很少见到大型有壳变形虫。

不同的复垦模式及植被配置方式对微生物恢复的效果不同。Sourkova 等(2005)对矿区砂土和黏土两种复垦土壤中的微生物碳、磷及微生物活性进行了长期研究,结果表明,砂土中微生物活性要高于黏土,底层黏土全磷浓度高不代表微生物的磷含量高。樊文华等(2011a)研究了安太堡露天煤矿不同复垦植被模式对土壤微生物的影响,发现云杉、油松、落叶松配置方式对微生物恢复的生态效益较好,在任何一种复垦模式或复垦年限的0~20 cm土层中,细菌的数量占95%以上,放线菌的数量居中,真菌的数量最少。Li 等(2013, 2015)探究了黄土高原露天煤矿不同复垦模式和不同施肥处理对土壤微生物的影响,发现真菌、细菌和古生菌都在施肥后增加,但复垦时植被组成比施肥对微生物群落有更大的影响, Li 随后又研究了复垦方案对土壤酶活性和微生物群落的影响,发现混交林复垦方式下土壤养分、土壤酶活性及微生物的丰富度均高于裸地和园地。因此,在土地复垦中选择合适的复垦模式及植被配置方式,有利于土壤中微生物的恢复。

为了加速土壤质量的提高,可以人工培育菌种,将其投入到矿区的土地复垦当中。韩桂云等(2003)以霍林河露天煤矿排土场的绿色泥岩为研究对象,接种外生菌根真菌菌剂,分别进行了施肥、不施肥、泥岩氨化3组对比试验,结果显示不施肥的感染率和成活率均高出施肥的1.21~2.78倍和1.0~2.7倍,供试的部分菌根菌剂对贫瘠质量差的土壤条件表现出了较强的适应能力。张淑彬等(2009)研究发现,分离自江西和新疆的两个丛枝菌根真菌菌种对内蒙古露天煤矿回填土壤有很好的适应能力,能够显著提高沙打旺的生物量,并且能改善植株的氮、磷营养。类似这种耐受性菌剂应用到矿区生态修复中,可加速植被恢复及提高土壤质量。

3. 重构土壤重金属污染研究

露天煤矿开采中产生大量的煤矸石,煤矸石中的重金属元素经过风化、自燃、

淋溶等过程迁移到土壤中,导致重金属污染,土壤功能受损,影响复垦区植被的恢复,并且重金属向农作物转移还会威胁到粮食安全。因此,对复垦土壤重金属的研究及修复是土地复垦中一项重要的工作。

目前,关于露天煤矿重构土壤重金属的研究大多集中在重金属含量及生态危险评价方面。Popovic 等 (2001)、Hinojosa 等 (2004)、秦俊梅等 (2006) 采用单项和综合污染指数对复垦土壤的环境质量进行了研究,结果表明,复垦土壤虽然有一定的污染性,但土壤环境质量可以达到环境质量标准,不会影响植物生长。魏忠义等 (2008)、魏忠义和王秋兵 (2009) 对抚顺西露天矿区煤矸石山表层土壤重金属污染进行了分析,结果显示 Cd、Cr、Ni、Cu 等元素含量随着与煤矸石山距离的增大而减小,且重金属元素具有一定的纵向迁移性,表现为 0~20 cm 土层 Cd、Cr、Ni 元素含量大于 20~40 cm 土层,但在煤矸石山植被重建土壤限制性因子的研究中发现,重金属元素的影响排在末位。

虽然大部分研究表明露天矿区重金属的污染程度处于安全范围内,不会影响植被的恢复,但是部分重金属元素污染还是要引起我们的重视。马从安等 (2007)、葛元英等 (2008)、樊文华等 (2011b)、Wang 等 (2013a)、李春等 (2014) 在对露天矿区重金属污染的评价中发现, Cd、Cr、Hg、Pb 等元素污染最为严重,是主要的潜在污染因子。马建军等 (2012) 以黑岱沟露天煤矿为研究对象,研究发现 Cu、Pb、Zn、Cd、Ni 及 As 的累积量随着复垦时间的增加而减小,而 Hg、Cr 的累积量却随着复垦时间的增加而增加,成为复垦地农用的限制性因素。秦俊梅等 (2006) 对安太堡露天煤矿不同复垦土壤、基质及植物中重金属进行了研究,研究发现煤矸石是重金属主要的污染来源,植物中重金属 Cd、Pb、Cu 和 As 含量均未超出正常植物的含量标准,但所有植物中 Cr 含量均超出正常植物的含量标准。Martinez 等 (2013) 研究了越南东部距离露天矿 2 km 的水稻田植物,结果表明,水稻植株内 Cd、Cu、Pb 含量超过了正常食物含量标准,水稻根部 Cd 和 Pb 的含量最高,达到了 (0.84 ± 0.02) mg/kg 和 (7.7 ± 0.3) mg/kg,重金属通过食物累积到人体器官,可能会导致严重的疾病。

综上所述,露天煤矿开采带来的土壤重金属污染对矿区的植被、农作物及人体健康造成一定的威胁,因此在矿区复垦时要结合物理化学修复、植被修复、生物修复等技术减轻重金属污染。Habakuchi (2015) 的发明专利指出,通过烘烤发泡剂和锌、铜、锰、铬等金属氧化物混合物得到的发泡烧结材料对土壤中的重金属或有毒物质具有洗脱和抑制作用,可以用于矿区的土地复垦,减少重金属等的污染。在矿区土地复垦过程中,人为构建地形异质性可以明显加速生态演替和促进植物群落多样性,而将矿业碎片与污泥混合用于采石场等矿区的复垦中,不仅不会污染土壤及地下水,还会为土壤生物的栖息提供合适的场所,从而加快植被

重建 (Gilland and Mccarthy, 2014; Domene, 2010)。

1.2.3 露天煤矿植被及生态恢复研究

植被是陆地生态系统的重要组成部分,是生态系统中物质组成和能量流动的中枢(杨勤学等,2015)。植被不仅能够改善重构土壤的质量和结构,还能减少水土流失与侵蚀,矿区植被恢复是复垦的主要环节之一,是矿区生态系统恢复的基础与保障(Parrota,1992)。植被恢复是指运用生态学原理,保护现有植被,修复或重建已毁坏或破坏的森林和其他自然生态系统,恢复其生物多样性及其生态系统功能(李其远,1998)。目前,国内关于露天煤矿植被及生态恢复的研究较多,多分布在植被恢复模式选取、植被恢复的影响因素、植被恢复对土壤质量的影响,以及露天矿区生态系统评价等方面,但目前关于植被与土壤质量交互影响规律的揭示不够深入,对限制植被恢复的立地环境因子考虑单一。

1. 植被恢复模式选取

根据矿区的情况,因地制宜地选取合适的植被配置模式是至关重要的,合适的植被配置能促进矿区生态系统更加快速恢复。在选择植被时,应考虑当地的气候、水热条件及矿区恢复的目标,挑选耐受性好、土壤培肥能力强、生长快速的先锋物种。

豆科植物被认为是在贫瘠、缺水矿区环境中最为有用的物种,一方面豆科植物的枯枝落叶能为复垦土壤提供大量的有机物质,提高土壤中的氮素含量;另一方面豆科植物可以起到保护其他植物的作用,如为栎属(*Quercus*)、山毛榉属(*Fagus*)等林窗入侵种的生长提供了有利条件(张志权等,2002; Harris et al., 1996; Herrera et al., 1993)。李晋川等(1999)的研究指出,豆科牧草适合作为安太堡煤矿的复垦先锋植物,复垦植被可选择沙棘、柠条等灌木,刺槐和新疆杨等树种。陈洪祥等(2007)的研究表明,豆科灌丛植物对土壤容重的改良效果最好,且油松+柳+沙棘或锦鸡儿,以及杨树+沙棘等类型的乔、灌混合林土壤有机质含量较高。赵洋等(2015)也指出,豆科植物可明显改善土壤质量,促进矿区排土场物种多样性的恢复。台培东等(2002)及陈来红和马万里(2011)都认为,沙棘可以作为草原露天煤矿植被恢复的先锋物种,其土壤培肥和水土保持效果明显。郝蓉等(2003)指出,在安太堡露天煤矿复垦中较好的人工植被模式为刺槐+油松+柠条、刺槐+油松、刺槐+沙棘和刺槐纯林。赵广东等(2005)的研究结果表明,在矸石山废弃地中,白榆和沙打旺的成活率分别为81%、85%,小叶杨、刺槐、栎树的成活率均在70%以上,这些物种均适合矸石山废弃地的复垦。郭祥云和李道亮(2009)应用除趋势典范对应分析(DCCA)排序法分析了阜新