

YONG GUTI FEIQIWU
GOUZAO TUDI FUKEN JIZHI
DE LILUN YU SHIJIAN

用固体废弃物构造土地 复垦基质的理论与实践

资 源 环 境 与 发 展 研 究 丛 书

郑九华 冯永军 于开芹 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

用固体废弃物构造土地 复垦基质的理论与实践

郑九华 冯永军 于开芹 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书为资源环境与发展研究丛书之一,全书共分10章,前3章分别介绍了沉陷废弃地的土地复垦研究、固体废弃物的理化性质及在土地复垦中的应用和重金属污染土壤的植物修复研究进展。第4~8章介绍了试验材料、设计与方法,复垦基质合理配比与盐分和重金属淋洗试验分析,不同基质在植物种植条件下的理化性质变化,复垦基质对植物生长的影响与植物适宜性评价和重金属元素的植物修复研究等内容。最后两章分析了固体废弃物用于沉陷地复垦思想的形成与发展以及重金属元素的植物修复实践技术研究。

本书可供环境工程、农业科学、生物技术等专业的师生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

用固体废弃物构造土地复垦基质的理论与实践 / 郑九华, 冯永军, 于开芹著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2010. 10

(资源环境与发展研究丛书)

ISBN 978-7-5084-7930-9

I. ①用… II. ①郑… ②冯… ③于… III. ①固体废弃物利用—复土造田—研究 IV. ①X705②TD88

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第184567号

书 名	资源环境与发展研究丛书
作 者	用固体废弃物构造土地复垦基质的理论与实践
出版发行	郑九华 冯永军 于开芹 著 中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
经 售	
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市天竺颖华印刷厂
规 格	140mm×203mm 32开本 6.25印张 168千字
版 次	2010年10月第1版 2010年10月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	20.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

序

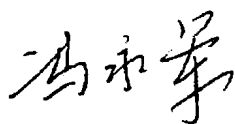
在人类社会进入 21 世纪的今天，随着全球经济的快速发展和人口数量的持续增长，资源、环境与发展的矛盾日益突出，资源瓶颈和环境容量的制约愈发严重，循环经济和可持续发展呼声日高，因此资源、环境与发展的研究逐渐成为关系到社会进步的重要课题。

我国物质资料消耗的增长高于国民经济的增长，淡水资源匮乏、水污染状况恶化、土地退化、水土流失加剧、矿产资源储采比下降和利用率低下等问题已经严重影响到人民生活水平的提高，影响到社会经济的可持续发展。进入 21 世纪以来，我国工业化和城市化进程加快对资源环境的压力进一步加大，以石油进口为核心的能源安全问题突出地摆到了我们的面前，环境污染由城市向农村转移，由东部向西部转移，环境质量“局部改善、整体下降”的趋势在近期内还难以得到根本性的转变。

基于我国的资源家底和环境容量，我们不能走高能耗、高污染的老路，只能建立资源节约型、质量效益型的国民经济体系，只能建立节约型的社会。2005 年，我国政府提出了“建设环境友好型社会”的构想，“建设生态文明，基本形成节约能源资源和保护生态环境的产业结构、增长方式、消费模式”作为我国全面建设小康社会的基本要求。

多年来，我们以资源环境与发展为中心，就水资源的开发利用和保护、土地退化与治理、固体废弃物的综合利用、重金属污染的植物修复、城市化和旅游经济开发对生态环境的影响

和土地管理与保护等多个专题问题进行了深入的研究和探讨，取得了一定的成果。为了能对我国的国民经济发展和社会进步略尽绵薄之力，也阶段性地总结前期的研究成果，特编写了这套“资源环境与发展研究丛书”。

A handwritten signature in black ink, reading '冯永军' (Feng Yongjun). The characters are written in a cursive, flowing style.

2010年5月

前言

沉陷废弃地是我国量大面广的被破坏土地，因其沉陷深、面积大，在全世界较为典型。目前我国广泛采用的复垦方式是充填后覆土，虽然取得了一定效益，但是土地沉陷范围一般较大，而且大多数沉陷地周围无多余的土壤可挖，远途客土费用昂贵，表层覆土的缺乏成为制约当前土地复垦工作的主要问题。在人口、资源、环境矛盾日益激化的情况下，寻求覆土来源，扩大耕地面积，促进沉陷区土地可持续利用，维护矿区生态平衡，是客观现实提出的严峻课题。

另外，随着工农业生产的发展，在对自然资源的利用过程中，产生了大量的固体废弃物，如粉煤灰、酒糟、糠醛渣、污泥等。这些固体废弃物的种类繁多，成分各异，生产过程也多种多样，尽管近年来对这些固体废弃物的处理做了许多工作，但仍有相当一部分被丢弃、堆积或排放到周围环境中，不仅污染土壤、污染水体、污染大气，而且还占用了大量的土地，制约了工农业的快速发展，严重威胁着人体的健康。因此应当寻求新的措施和途径来处置固体废弃物，以消除或减轻它们对环境的不利影响。

如果能够利用一种或多种固体废弃物构造土地复垦基质，用于沉陷废弃地的土地复垦，不仅能节土造田，增加耕地面积，改善沉陷地周边环境，而且还能变废为宝，实现固体废弃物的资源化利用，对促进资源、环境与社会经济的协调发展，具有积极的现实意义。

基于这种现状，山东农业大学提出了利用固体废弃物构造

土地复垦基质的思想，并且把粉煤灰分别按一定比例与酒糟、糠醛渣、污泥等混合成复垦基质进行了试验研究，取得了较为理想的结果。本书在讨论了目前相关研究的基础上，系统地介绍了用固体废弃物构造土地复垦基质的理论与实践过程，包括复垦基质合理配比与盐分和重金属淋洗、不同基质在植物种植条件下的理化性质变化、复垦基质对植物生长的影响与植物适宜性评价和重金属元素的植物修复研究，并对固体废弃物用于沉陷地复垦思想的形成与发展以及重金属元素的植物修复实践技术研究进行了分析和展望。

本书在编写过程中，得到了山东农业大学资源与环境学院和水利土木工程学院的领导、老师的支持和帮助。感谢史衍玺教授、赵庚星教授、张志国教授、聂俊华教授、陈宝成老师、宋付朋老师、孔凡美老师在学术上的指导，感谢张蕾娜、王兆锋、康惊涛、袁秀杰、魏敏、李芬、王晓玲、刘西敏、郝桂喜、李政等研究生和郭丽丽、田帅、田慧、杨元青、蔺中、张鹏、李冉等同学所做的大量工作！本书参考了国内外的一些著作、论文和大量的网络资料，在此谨向他们致以衷心的感谢！同时还要感谢中国水利水电出版社的编辑的大力支持和关心！

由于编者工作经验、学术水平和能力所限，书中的不足之处，敬请同行专家及读者批评指正。

编者

2010年3月

目 录

序

前言

1 沉陷废弃地的土地复垦研究	1
1.1 沉陷废弃地的形成、现状与危害	1
1.2 沉陷废弃地复垦研究的历史和现状	5
1.3 沉陷地复垦模式	11
1.4 沉陷废弃地土壤性质、植被恢复和基质改良	13
2 固体废弃物的理化性质及在土地复垦中的应用	20
2.1 几种固体废弃物的主要理化性质	21
2.2 土地复垦中粉煤灰和污泥等对废弃地土壤性质 的影响	26
2.3 土地复垦中粉煤灰和污泥的应用需要注意的问题	28
3 重金属污染土壤的植物修复研究进展	31
3.1 土壤重金属污染的特点与危害	31
3.2 重金属污染土壤治理措施	33
3.3 重金属污染土壤的植物修复研究概况	36
3.4 超富集植物的定义与研究进展	38
3.5 植物对重金属污染的吸收能力评价指标研究	45
4 试验材料、设计与方法	49
4.1 试验背景与时间安排	49
4.2 试验材料	50
4.3 试验植物	51
4.4 试验设计与方法	52

4.5	测定项目与方法	58
5	复垦基质合理配比与盐分和重金属淋洗试验分析	60
5.1	复垦基质合理配比试验分析	60
5.2	基质盐分冲洗定额研究	66
5.3	基质重金属元素淋溶特性研究	69
6	不同基质在植物种植条件下的理化性质变化	71
6.1	不同基质物理性质的变化	71
6.2	不同基质化学性质的变化	72
6.3	复垦基质质量综合评价	80
7	复垦基质对植物生长的影响与植物适宜性评价	92
7.1	不同基质对植物出苗的影响	92
7.2	不同基质对植物生长状况的影响	99
7.3	不同基质对植物产量或生物量的影响	120
7.4	不同基质对植物叶绿素含量的影响	122
7.5	不同基质对植物重金属含量的影响	124
7.6	复垦基质先锋植物的适宜性评价	125
7.7	小结	131
8	重金属元素的植物修复研究	133
8.1	评价重金属元素的植物修复能力新指标的提出	133
8.2	重金属元素的植物修复能力综合评价指标的 概念与计算	134
8.3	重金属的植物修复评价指标体系的建立和评价 标准的制定	135
8.4	超富集植物和富集植物筛选量化指标的分析	136
8.5	“超富集植物”和“富集植物”的新理解及选择 标准的界定	140
8.6	植物对重金属镉(Cd)的吸收和富集能力的 评价研究	140
8.7	植物对其他重金属元素的吸收与富集	154

8.8 小结	158
9 固体废弃物用于沉陷地复垦思想的形成与发展	160
9.1 基质用于沉陷废弃地复垦从理论到实践应遵循的步骤	160
9.2 固体废弃物的种类选择及合理搭配	161
9.3 复垦基质的冲洗脱盐	161
9.4 工程处理措施	162
9.5 土地复垦中基质充填方式的选择	164
9.6 施用改良剂改善基质理化性质	164
9.7 复垦基质适种植物的选择	164
9.8 基质用于沉陷废弃地复垦须掌握的几个原则	165
10 重金属元素的植物修复实践技术研究	167
10.1 超富集植物的筛选和培育	168
10.2 增强基质内重金属元素活性, 提高溶液中有效态 重金属的浓度	173
10.3 小结	176
参考文献	178

沉陷废弃地的土地复垦研究

矿山生态系统是陆地生态系统的一个特殊且重要的子系统。我国 95% 以上的一次能源、80% 以上的工业原料、70% 以上的农业生产资料都来自矿产资源。我国矿石采掘量仅次于俄罗斯和美国，是世界第三大矿业国家。可是，矿产资源开采给人类提供财富的同时，也给矿区带来了一系列生态环境问题。更为严重的是，矿山开采将导致数倍于开采面积的区域地表形态发生根本变化，出现了大量沉陷废弃地。在我国人口、资源与环境的矛盾日益加剧的情况下，应大力开展土地复垦工作，将沉陷废弃地优先复垦为农业用地。本章将在分析国内外沉陷废弃地土地复垦的历史与发展的基础上，针对当前土地复垦的现状和存在问题，讨论相应的解决措施。

1.1 沉陷废弃地的形成、现状与危害

沉陷废弃地是指在工农业生产中由于开采沉陷、机械挖损、地表占压等原因形成的废弃地，广义上也包括由这些因素引起的失去经济利用价值的土地（李永庚等，2004），其中的主导因素是采矿业。按其形成原因主要可分为三种类型：一是开采坑废弃地，指随着矿物开采形成的大量的采空区域及塌陷区；二是占压废弃地，指剥离的表土、开采的废石及低品位矿石堆积而成的占压区，以及利用各种分选方法分选出精矿物后的剩余物排放形成的尾矿废弃地；三是其他废弃地，指由于采矿作业面、机械设备、矿山辅助建筑物和道路交通等先后占用的土地，还包括生产过程中由于重金属、 SO_2 等污染物的排放所导致的退化土地（吴

欢等, 2003; 束文圣等, 2000)。

从全球范围看, 自 1976~2000 年, 估计采矿活动累计占地面积达 370 万 km^2 , 相当于整个地球陆地面积的 0.2%, 而矿山的污染范围一般为其占地面积的 10 倍, 则矿山的环境污染面积占地球面积的 2% (Dudka et al., 1997)。目前, 我国共有大中型矿山 9000 多座, 小型矿山 26 万余个, 采矿侵占的土地面积已接近 4 万 km^2 , 由此而产生的废弃土地面积每年达 330 km^2 (章家恩等, 1999)。据统计, 矿业是除农业外扰动土地最多的行业。我国平均每年因矿业生产活动在陆地表面搬动运移的岩土量达 32.5 亿 t, 平均每人每年约扰动 2.5t 岩土见表 1-1。如用级别来定量表示各行各业对生态施加综合影响的强度, 则矿业对生态环境的影响居于首位, 见表 1-2。

表 1-1 中国不同行业每年扰动的土壤及岩石数量

行业	扰动量 (亿 t)	行业	扰动量 (亿 t)
农业	326.0	林业	2.1
矿业	32.5	城市建设	1.1
牧业	16.5	总量	381.8
基础设施	3.6		

表 1-2 中国不同行业对生态的影响强度

行 业	影响强度	行 业	影响强度
采矿业	2.4	建筑业	1.1
化学和石油加工业	1.8	纸浆造纸业	1.0
冶金	1.5	运输业	1.0
燃料能源	1.4		

沉陷废弃地是一种极端的生境, 理化性质极差, 它不仅严重影响植物的定居和植被的恢复, 而且还带来包括重金属和其他毒性物质对大气、水体、土壤和生物的污染, 同时也影响景观生态、加剧水土流失、诱发地质灾害等各种环境问题。

1.1.1 植被破坏，土地被破坏和侵占，水土流失、地质灾害威胁增大

沉陷废弃地森林植被的破坏主要是由于矿山工业广场的建设、矸石堆放、开山修路、地面沉陷与露天采矿剥离引起的。土壤作为供给植物生长发育所必需的水、肥、气、热的主要源泉，也是营养元素不断循环、不断更新的场所。沉陷废弃地的形成改变了土地养分的初始条件，从而使植被生长量下降。植物作为生态系统的生产者，它的破坏使得废弃地及其临近地区的生物生存条件破坏，生物量减少，生态系统结构受损、功能及稳定性下降，引起水土流失和沙漠化等问题。这些都影响了系统内部生物物种的数量和质量，造成野生物种如鸟类，栖息数量和种类的减少，生物多样性降低后，受损生态系统的恢复变得更为缓慢，自然恢复通常需要 50~100 年，特别是土壤的恢复，可能需要 100~1000 年（Dobson, 1997；Bradshaw, 1997）。因此，为了加速沉陷废弃地的生态恢复，开展人工修复，特别是根据废弃地的具体条件，利用一定的技术措施开展恢复工作是十分必要的。

露天采掘直接破坏大量土地，各类废石、废渣、尾矿的堆放也侵占大量土地。废弃地地表植被破坏后，受风力、水力的侵蚀加剧，大片土地出现沙化。采矿诱发多种地质灾害，造成人员伤亡以及巨大的经济损失。地面及边坡开挖影响山体、斜坡稳定，导致岩体或土体变形，诱发崩塌及滑坡等地质灾害。矿山排放的废石（渣）常堆积于山坡或沟谷，在暴雨诱发下极易发生泥石流。

1.1.2 废气、废水和废渣污染

造成废弃地环境质量下降的原因是多方面的，其中最重要的就是废气、废水、废渣的污染。在矿山范围内，从采掘生产地点、选矿厂、尾矿坝、排土场以及生活区等地点排出的废水，均造成矿山废水污染。由于矿山废水排放量大，持续性强，而且含

有大量的重金属离子、酸和碱、固体悬浮物、选矿药剂，所以矿山废水排放会严重污染矿山的生态环境，危害人体健康。其中煤矿、金属矿、非金属矿业的废水以酸性为主，并含有大量重金属及有毒有害元素；石油、石化业的废水中含挥发性酚、苯类，多环芳烃等物质。大多数废水未经达标处理就任意排放，甚至直接排入地表水体中，使土壤或地表水体受到污染。由于排出的废水会渗入地下，也会使地下水受到污染。矿山产生的废渣主要来自采矿、选矿生产过程中的废石、煤矸石和尾矿。随着采矿工业的发展，废石和尾矿的数量还会增加，这些固体废物的排放和堆积，不仅占用大量土地，还会造成环境污染，危害人体健康和矿山安全。尾矿另一个常见的污染是高度酸化，例如某铅、锌矿 S 含量高达 15.4%，酸化后能使基质的 pH 值降至 2.4 左右，渗出液的 pH 值甚至降至 2 左右，高含量的重金属与强的酸度通常是植物定居的最大限制因子（谢荣秀，2005；Evangelou，2001）。

1.1.3 重金属污染

金属矿山的井下废水、选矿废水、冶炼厂废水以及煤矿的洗煤废水等，含有较多重金属元素。沉陷废弃地，尤其是有色金属矿山废弃地一般都含有大量的重金属，其中又以尾矿和废弃的低品位矿石的重金属含量最高。这些重金属含量很高的废弃物露天堆放后，会迅速风化，并通过降雨、风扬等作用向周边地区扩散，从而导致了一系列的重金属污染问题。例如广东凡口铅、锌尾矿 1 号矿的铅、锌总量分别高达 34300mg/kg 和 36500mg/kg，有效态锌的含量亦高达 1963mg/kg，如此高的重金属含量对绝大多数植物的生长发育都产生严重抑制和毒害作用，而且重金属污染物在土壤中一般可迁移性差，不易随水淋滤，不能被微生物分解，所以常常在土壤中积累，危害土壤动物、微生物、土壤酶等（夏汉平，2002）。有的可以转化成毒性更强的化合物（如甲基化合物），有的通过气、水、土、植物、食物链等途径进入人体系统，进而影响人类的健康。

1.2 沉陷废弃地复垦研究的历史和现状

1.2.1 土地复垦的含义

依据 1998 年 11 月国务院颁布的中华人民共和国行业标准《土地复垦技术标准（试行）》，“土地破坏”是指由于人类的生产建设活动导致土地的挖损、塌陷、压占等，“土地复垦”则是指被破坏的土地，通过采取综合整治措施，使其恢复到可供利用状态的活动。美国的 Frank W Schaller 等在《被剧烈扰动土地的复垦》（Reclamation of Drastically Disturbed Lands）一书中指出：美国的土地复垦有三种不同程度的要求：“Restoration”、“Reclamation”和“Rehabilitation”。

“Restoration”是指完全恢复或复制出被扰动土地原存在状态，包括首先重新恢复原先的地形，然后在此基础上按原有的模式利用土地。然而，实践证明这种“Restoration”在许多方面是不科学的，因为在土地复垦过程中，某些土地的使用价值要或多或少地丧失或被更换，所以绝对地“复制”出开采以前的地形、地貌、植被、土壤等是不可能的，也是不必要的。

“Reclamation”是指尽可能按照采矿前土地的地形、生物群体的组成和密度进行恢复，同时包括可恢复与原生物群体相近的其他生物群体，但它们必须能共处同一生境。这一概念是大多数环境专家所支持的，实践证明也是可行的，欧美一些以林草植被恢复为主，最终利用方向为森林群落顶极演替的采矿大国在这方面已经有一些成功的范例，但是对于我们这样一个人口众多，粮食需求量仍然相当大的国家，这种向着森林群落顶极演替的复垦方式在相当长的时间内是不现实的。

“Rehabilitation”是指按照土地破坏的情况和事先的规划以及利用计划，逐渐恢复或建立一种持续稳定、并与周围环境和人为景观价值相协调的相对永久利用方式。这种利用方式可以与破坏以前相同，也可以在更高程度上进行利用方式的更换，如玉米

地可以改为小麦地，沉陷地可以复垦为人工湖或者水上娱乐用地，农业用地可以复垦为鱼塘、建筑用地等。基于目前我国的土地资源日渐减少，人地矛盾日益突出，沉陷废弃地生态环境日趋恶化的现实情况，我国的沉陷废弃地的土地复垦更宜采用这种土地复垦模式。对于不同的土地破坏形式，因地制宜，综合治理，宜农则农，宜林则林，宜牧则牧，宜渔则渔，条件允许的地方应优先复垦为农业用地。本文中所涉及的土地复垦即是指这种复垦方式。

沉陷废弃地的土地复垦具有生态效益、经济效益和社会效益，对社会发展和人类进步有着十分重大的意义。沉陷废弃地的土地复垦可以促进废弃地社会经济、生产和自然环境之间的协调发展，主要表现在景观改善、生物多样性增加、物候改变、水土保持作用增强和肥力提高等方面。土地复垦的实施可大大增加土壤的有机质和氮、磷、钾的含量，改善土壤结构，对土地生产力的提高起到促进作用；在废弃地及周边环境影响区建设了合适的“乔、灌、草”人工植被，控制了水土流失和土地沙化，对水土保持起到了很好的作用；废弃地生态恢复使可以明显改善矿区的生态环境和调节小气候，减少突然侵蚀和大气飘尘，减轻矿区风蚀与风沙危害，减轻滑坡、泥石流的危害，促进当地人民的身心健康，为废弃地从事生产、管理、生活人员提供一个良好的生态环境和舒适的生活空间。沉陷废弃地的土地复垦工程对矿区的经济也起到了带动的作用，形成了地区经济产业链，对后续产业也产生了深远影响。例如，种植牧草可以带动当地的畜牧业发展，牛、羊等的粪便又可以作为肥料，进一步提高了土壤的肥力，形成良性循环；林业的发展可以促进新兴木材加工业的发展等，为发展地方产业提供了可靠的资源保证。经过生态恢复后，原占用土地可转变为农田、草地、经济林地，土地利用等级及经济效益均较原来的土地大大提高了。另外，土地复垦后的土地还通过级差地租的形式体现出来很高的增值效益，即原来的土地等级低、质量差，经过生态恢复改良后土地的等级提高了。因此，沉陷废

弃地的土地复垦研究很有现实意义。

1.2.2 国外沉陷废弃地复垦的历史和现状

近半个世纪以来,世界发达国家对矿山废弃地治理非常重视,据统计全世界废弃矿山面积约 670 万 hm^2 ,其中露天采矿破坏和抛荒地约占 50%。根据美国矿务局调查,美国平均每年采矿占用土地 4500 hm^2 ,被占用土地已有 47%的矿山废弃地恢复了生态环境,1970 年以来生态恢复率为 70%左右(夏汉平等,2002)。英国政府对采矿造成的地表破坏十分重视。在 1970 年英国有矿山废弃土地 7.1 万 hm^2 ,其中每年煤矿露采占地 2100 hm^2 ,由于各级政府的重视,通过法律、经济等措施,生态恢复效果显著,1974~1982 年,因采矿废弃土地 19362 hm^2 ,生态恢复面积达 16952 hm^2 ,恢复率达 87.6%,到 1993 年露天采矿占地已恢复 5.4 万 hm^2 (钟爽,2004)。

德国是世界上重要的采煤国家,年产煤量达 2 亿 t,以露采为主。德国政府对沉陷废弃地的生态恢复、保持农林面积、恢复生态平衡也十分重视。莱茵地区露天开采时,将剥离的黏土单独存放作为覆盖表土,把沙、石和电厂的粉煤灰等废料直接回填到采煤坑,填至标高,上面覆盖表土 1m 厚。多施肥料,首先过渡性的种植苜蓿草,苜蓿根系发达且入土很深,可活化土层改良土壤,经过 2~3 年将苜蓿翻种后,土壤中留下了大量的腐殖质和氮素养分,再多施一些厩肥,然后再种植小麦、黑麦、甜菜。经过过渡性生态恢复后的各种作物均达到或超过当地原地的收获水平。由于机构健全、严格执法、资金渠道稳定,德国的生态恢复工作取得了很大成绩。到 1996 年,全国煤矿采矿破坏土地 15.34 万 hm^2 ,已经完成的生态恢复的面积有 8.23 万 hm^2 ,恢复率达 53.5%(彭少麟,1996)。

在澳大利亚,采矿业是该国的主导产业,矿山生态恢复已经取得长足进展和令人瞩目的成绩,被认为是世界上先进而且成功地处理扰动土地的国家。澳大利亚矿山生态恢复的显著特点就是