

*Application of Landfill Stabilized Waste in
Ecological Restoration*

存量垃圾土

生态修复应用研究

张成梁 冯晶晶 赵廷宁◎著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

存量垃圾土生态修复应用研究

张成梁 冯晶晶 赵廷宁 著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

图书在版编目(CIP)数据

存量垃圾土生态修复应用研究 / 张成梁, 冯晶晶, 赵廷宁著.

—北京: 知识产权出版社, 2017. 10

ISBN 978-7-5130-4893-4

I. ①存… II. ①张… ②冯… ③赵… III. ①垃圾处理

IV. ①X705

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 103796 号

内容提要

本书主要研究了存量垃圾土的特性, 包括物理、化学及微生物等方面的特性, 并进行了垃圾筛分土在矿山废弃地植被恢复中应用的适宜性评价, 在此基础上研究了通过人工配制、压实等手段, 构建基于师法自然生态修复理论的人工土体和植被恢复技术。本书可为环境保护、垃圾土应用、生态修复等领域的技术人员提供参考, 也可供政府相关部门决策参考, 还可供其他感兴趣的读者阅读。

责任编辑: 张雪梅

封面设计: 刘伟

责任校对: 王岩

责任出版: 刘译文

存量垃圾土生态修复应用研究

张成梁 冯晶晶 赵廷宁 著

出版发行: 知识产权出版社有限责任公司

社址: 北京市海淀区气象路50号院

责编电话: 010-82000860 转 8171

发行电话: 010-82000860 转 8101/8102

印刷: 北京科信印刷有限公司

开本: 720 mm × 1000 mm 1/16

版次: 2017年10月第1版

字数: 156千字

ISBN 978-7-5130-4893-4

网 址: <http://www.ipph.cn>

邮 编: 100081

责编邮箱: 410746564@qq.com

发行传真: 010-82000893/82005070/82000270

经 销: 各大网上书店、新华书店及相关专业书店

印 张: 12

印 次: 2017年10月第1次印刷

定 价: 65.00元

出版权专有 侵权必究

如有印装质量问题, 本社负责调换。

序

随着我国人口的不断增长，城市化进程的加快以及人民生活水平的不断提高，环境污染问题日渐突出，资源环境问题已成为制约我国经济社会可持续发展的重大问题。我国垃圾分类工作推进缓慢，垃圾处理水平低，全国垃圾堆存占地达到5亿平方米，“垃圾围城”的现象比比皆是。目前我国的垃圾处理方式主要有卫生填埋、焚烧处理和生化处理，其中填埋是最常用的垃圾处理手段。2015年，全国清运的生活垃圾无害化处理率为79%。

对此，党和政府高度重视，提出了建设生态文明、建设资源节约型与环境友好型社会等一系列新概念和新举措。国务院批转住房和城乡建设部等16部门《关于进一步加强城市生活垃圾处理工作意见的通知》，指出由于城镇化快速发展，城市生活垃圾激增，垃圾处理能力

相对不足，一些城市面临“垃圾围城”的困境，要求各省、自治区、直辖市人民政府，国务院各部委、各直属机构充分认识加强城市生活垃圾处理的重要性和紧迫性，进一步统一思想，提高认识，全面落实各项政策措施，推进城市生活垃圾处理工作，创造良好的人居环境，促进城市可持续发展。

在《“十二五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施规划建设规划》中，存量垃圾治理被首次写入建设任务，表明国家对存量垃圾整治工作的重视。“十二五”期间，全国预计将实施存量垃圾治理项目1882个，其中不达标生活垃圾处理设施改造项目503个，卫生填埋场封场项目802个，非正规生活垃圾堆放点治理项目577个。2012年，住房和城乡建设部、发展改革委、环境保护部联合发布了《关于开展存量生活垃圾治理工作的通知》，要求在全国范围内开展存量垃圾调查和治理工作，各地对存量垃圾治理工作制定计划。预计“十三五”期间国家将投入超过180亿元资金支持存量垃圾治理工作。

存量垃圾堆放点的治理是结合不同类型堆放场的规模、设施状况、场址地质构造、周边环境条件、修复后用途等特点选择治理技术方案。治理技术包括封场覆盖、输氧抽气、筛分减量处置等，处理过程中需做好填埋气、垃圾渗滤液等的控制，并通过采取鼓气通风、抽气、洒水等好氧填埋技术促进已填埋垃圾快速降解。在垃圾填埋量大、具有开发价值、土地资源紧缺或具有焚烧设施的地区，可对填埋场内的垃圾实施开挖利用，对其中的金属等可再生资源进行回收利用，富含养分的筛下物作绿化用土，高热值垃圾可进行焚烧处理，大粒径无机物垃圾进行回填。而开挖会产生大量的筛分腐殖土，目前由于存量垃圾治理工作在我国刚刚开始，对筛分出的存量垃圾土的利用途径和可行性尚在研究和确认中。

本书对存量垃圾土的理化和生物特性的分析表明，垃圾土是一种容重小、孔隙度大、渗透速率高、保水性强、抗剪强度低、富含有机

质和氮、磷、钾等营养元素的类土体，各项污染物指标低于《土壤环境质量标准》二级或三级标准和《展览会用地土壤环境质量评价标准（暂行）》（HJ/T 350—2007）的限值要求。在此基础上，深入开展了垃圾土资源化利用的可行性研究。在以存量垃圾-石砾人工土构建矿山废弃地人工土体的思路下，充分研究了人工土的物理特性、水分特征、植物生长特性及植被构建技术，并开展了系列试验，通过机械压实等手段，对石砾含量较高的人工土进行物理结构调节，增加土壤孔隙率，提高土壤毛管水含量，以改善植物生长环境，恢复近自然植被。研究表明，存量垃圾土可以作为土壤资源，替代传统绿化用土应用于矿山废弃地生态修复（植被恢复）。

本书具有较强的学术性和实用性，可以说是我国开展存量垃圾治理工作不可多得、也是最新的资料文献，为推进我国存量垃圾治理工作提供了新的思路和有力的科技支撑。



前 言

伴随着经济的高速发展，城镇化速度加快，城市规模日益扩展，人口快速增加。与此同时，城市每天产生的大量垃圾给市民日常生活和环境带来了日益严重的负担，影响着自然环境，也威胁着社会和谐。在京津冀地区，老旧垃圾填埋场随城市的扩张而日益中心化，垃圾场与社会、环境的矛盾越来越突出。为了延长填埋场的使用寿命，安全、经济地处理城市垃圾，可将非正规生活垃圾堆放点和不达标的生活垃圾处理设施中的存量垃圾原地筛分，将富含腐殖质的垃圾土作为植物生长基质应用于工矿废弃地生态修复。

本书对存量垃圾土的物理、化学、生物特性进行了分析研究，评价了垃圾土资源化利用的可行性：将垃圾土与粗颗粒采石废弃物按照不同比例混合，配制成存量垃圾-石砾人工土，构建矿山废弃地人工

土体；研究人工土的物理特性、水分特征、植物生长特性及植被构建技术；以师法自然理论为指导，针对粗粒土质地松散、漏水漏肥的特点，通过机械压实等手段，对石砾含量较高的人工土进行物理结构调节，增加土壤孔隙率，提高土壤毛管水含量，改善植物生长环境，恢复近自然植被。

研究表明：存量垃圾土可以作为土壤资源，替代传统绿化用土应用于矿山废弃地生态修复（植被恢复）。利用存量垃圾土配制矿山废弃地人工土，改良粗颗粒采石废弃物，构建矿区新土体，改善矿区迹地立地条件，促进植被恢复。在矿渣中添加存量垃圾土30%以上，矿山废弃地人工土的养分、水分、通气条件就可满足生态修复先锋植物的生长需要。当垃圾土体积含量低于该配比时，可通过机械压实措施，改善人工土的水分物理性质，提高植物生长适宜性。压实强度过大不利于植物生长，应依据人工土和植物特性决定压实强度，保持土壤适宜的土体密实度。

本书中开展的研究由国家重点研发计划课题“采煤迹地地形与新土体近自然构建技术研究”（编号2017YFC0504404）、林业公益性行业科研专项课题“建设工程损毁林地植被修复关键技术与示范”（编号200904030）资助。轻工业环境保护研究所荣立明在研究中给予了大力帮助，在基地实验中付出了辛勤的劳动，在此表示衷心的感谢。

由于作者学识水平所限，书中不足之处在所难免，恳请读者提出宝贵意见。

目 录

序

前 言

第一章 概述	1
第一节 存量垃圾土简述	5
第二节 人工土简述	11
第三节 采石场迹地简述	13
第四节 压实的影响简述	16
第五节 研究目的与意义	20

第二章 研究区域概况	23
第三章 存量垃圾土的基本性质	27
第一节 物理性质	28
第二节 化学性质	36
第三节 半挥发性有机污染物	44
第四节 大肠菌群	57
第五节 垃圾土松散堆积体水分及径流特性	58
第六节 垃圾土与植物	64
第四章 存量垃圾-石砾人工土体的配制及基本特征	69
第一节 水分物理常数	71
第二节 抗剪强度	73
第三节 人工土体坡面径流特征	75
第四节 人工土含水量及时空特征	79
第五节 人工土蒸散特性	86
第六节 人工土与植被	91
第五章 压实人工土的构建及特征	95
第一节 压实人工土水分特征	98
第二节 压实人工土体蒸散特性	108
第三节 压实区植物生长情况	113
第四节 压实区植物空间分布特征	119
第六章 存量垃圾土配制喷播基材	127
第一节 添加剂对垃圾土抗剪强度的影响	128

第二节 垃圾土配制喷播基材方案设计	131
第三节 喷播示范试验	136
第四节 垃圾土配制喷播基材效益评价	137
第七章 结论与展望	141
参考文献	145
附录 垃圾填埋场治理和修复案例	173

第一章 概述

随着经济发展，城市人口增加，人们生活水平不断提高，生活垃圾越来越多。2005年以来，我国已成为世界上城市垃圾产量最多的国家。截至2011年年底，我国城市人口每天人均产生生活垃圾1kg，大城市达1.2kg，全国每年产生垃圾总量达1.58亿吨，并以每年4%的速度增长（Dong et al., 2014）。2015年，我国生活垃圾清运量为1.91亿吨，其中北京市为790.3万吨。

填埋是最常用的垃圾处理手段。根据《中国统计年鉴2016》，2015年，全国建有卫生填埋场640座，无害化处理能力为34.4万吨/日，总处理量为1.15亿吨，占无害化处理总量的63.7%。北京市建有卫生填埋场14座，无害化处理能力为8621吨/日，总处理量为325.8万吨，占无害化处理总量的52.3%。

然而,垃圾填埋场占用了大量宝贵的土地资源。据了解,北京城市垃圾填埋的成本高达1530.7元/吨,其中21.4%为土地成本(宋国君等,2015)。此外,我国于1997年发布《生活垃圾填埋污染控制标准》(GB 16889-1997),在此之前,由于缺乏相关法规支撑和约束,许多老填埋场在选址、设计、管理方面存在缺陷。北京市现有垃圾积存量在200吨以上的非正规垃圾填埋场1011个,累计堆存量8000万吨,占地1333.34万 m^2 。由于缺少防渗措施和覆盖导气系统,非正规填埋场可能对大气、土壤、地下水造成严重污染(刘毅、李欣,2014;周晓萃等,2011)。

垃圾填埋场封场以后可以修复生态,作为市民的休闲娱乐场地(绿地)、野生动物的栖息地或作为农用地(Chen et al., 2016)。然而,对于非正规填埋场来说,垃圾渗沥液和甲烷等有毒气体的排放对土壤造成了污染,导致土壤的重金属含量和盐浓度增加;对于正规填埋场来说,防渗、压实和表土覆盖措施导致表层土壤紧实度增加、透气性和土壤含水量下降(Wong et al., 2016; Cassinari et al., 2015; Chen et al., 2016)。由此可见,无论非正规填埋场还是正规填埋场,其生态修复均需要特殊的技术手段。即使填埋场地经过修复后再利用,由于地价上涨,新建场地选址困难(Sonkamble et al., 2013),城市垃圾的处理问题仍然没有得到解决。由于实际的垃圾处理量远大于设计处理能力,设施超负荷率达44.6%,许多垃圾场超限堆放,全国城镇面临“垃圾围城”的问题。为了延长填埋场的使用寿命,安全、高效、经济地处理日益增长的城市垃圾,存量垃圾的资源化利用引起了人们的关注(Zhou et al., 2015)。

我国采石场主要分布在东部沿海经济发达地区,具有数量多、规模小、分布零散、布局不合理的特点(方华等,2006)。为了追求效益,缩小运输半径,采石场多选址于城市周边交通便利的地带,严重影响了市貌,对城市周边造成了一系列的环境问题(汤惠君、胡振

琪, 2004)。

北京市房山、门头沟、密云、延庆、怀柔等远郊区(县)矿产资源丰富,以煤矿、铁矿、石灰岩为主,为保护首都生态环境,北京市实施了政策性停产。截至2006年8月,北京市关停废弃矿山共1142处,面积总计 5973.3hm^2 ,其中采石场451处,面积总计 2846.7hm^2 (逯进生, 2008),分布在昌平、房山、丰台、海淀、怀柔、门头沟、密云、平谷、顺义、延庆10个区(县),其中房山区采石场面积最大,占北京市采石场总面积的62%(图1-1)。

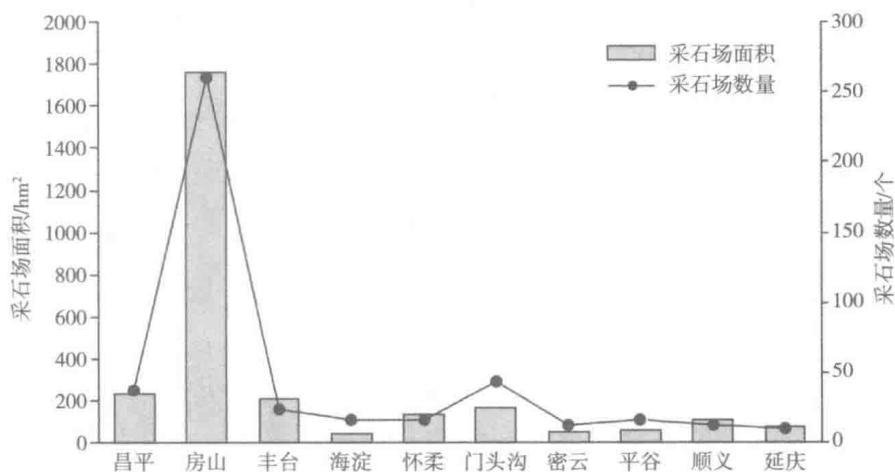


图1-1 北京地区关停采石场分布情况

采石作业对地表植被、土壤、母质层造成破坏,采石场迹地土壤贫瘠、土层薄、漏水漏肥,土壤种子库遭到破坏,植被的自然恢复非常缓慢,损毁土地的植被修复必须从土壤或母质层的修复和植物生境的构建着手。“十一五”期间,主要采取“客土法”修复地表基质,工程费用主要用于购买“种植土”,约占总工程投入量的50%。“客土”主要来自于附近的山地地表土和耕地土壤。许多矿山恢复工程虽然修复了矿山迹地,但是破坏了其他地方的地表土,甚至损毁了耕地,实际上造成了二次生态环境破坏。

人工土是人为配制的植物生长基质。尽管人工土的来源和形成过程与自然土壤截然不同,但通过人为调整配方,人工土能够获得与自然土壤类似的物理、化学和生物特性,完成特定的生态功能(Hafeez et al., 2012)。近年来,为了节约土地和土壤资源,不同类型的产业和生活废弃物被用来生产人工土。

存量垃圾主要为堆放于非正规生活垃圾堆放点和不达标的生活垃圾处理设施中的生活垃圾。存量垃圾土是通过筛分得到的、在微生物作用下稳定化的部分存量垃圾,其中富含有机质和植物生长所需的多种营养元素,能够支持植物生长,改良土壤理化性质。因此,可以利用存量垃圾土配制人工土,运用于采石场迹地等退化污染场地的生态修复,改善立地条件。通过垃圾土的资源化利用,降低植被修复成本,保护土地与植被资源,符合近年来我国大力倡导的循环经济理念。填埋场腾出库容后,将按照正规垃圾填埋场标准改造,不但能够填埋新垃圾,也能够大幅提高填埋场处理垃圾的效率,解决城市垃圾问题。

垃圾土的组成成分具有地域上的差异性,与城市发展水平有关。我国垃圾分类回收系统不完备,城市垃圾组成复杂,其中的重金属、有机污染物、病原菌等可能对地下水和土壤造成污染。在存量垃圾的开采、筛分和运输过程中,其结构必然遭到破坏。存量垃圾土的结构松散、压缩性高、结构不稳定,在使用过程中可能会造成水土流失或带来其他安全隐患。针对上述问题,笔者将测定垃圾土的化学成分、半挥发性有机污染物浓度、大肠菌群数量,测定垃圾土的机械组成、孔隙度、渗透性、持水性、抗剪强度等物理性质,研究垃圾土松散堆积体的水分动态特征、产流产沙特性,观测垃圾土浸提液处理下植物种子萌发及垃圾土种植幼苗生长状况。

采石场迹地遗留了大量的采石废弃物,这些松散堆积的弃渣石往往质地粗大、结构松散、漏水漏肥,直接种植植物难以成活。将垃圾

土运用于采石场迹地植被修复时,要同时解决废弃渣石的处理问题。将垃圾土与石砾相结合,配制成存量垃圾-石砾人工土,能够同时解决存量垃圾处理、采石场废弃物处理及采石场迹地植被修复三个环境问题。笔者将通过调节垃圾土与石砾配比及采用两种不同程度的机械压实方法,调节人工土的水分物理特性,对不同配比及不同压实度下人工土的水分时空分布特征、坡面径流特征、蒸散特性及植物生长适宜性作进一步研究。

第一节 存量垃圾土简述

1. 城市垃圾

存量垃圾主要来源于城市垃圾。城市垃圾是指工矿企业、商店和城市居民丢弃的工业废弃物、建筑废弃物和生活废弃物。工业废弃物来自工厂生产过程,包括金属、废木料、纸张、塑料等。建筑废弃物是指建设、施工单位新建、改建、扩建和拆除各类建筑物、构筑物、管网等以及居民装饰装修房屋过程中产生的弃土、弃料及其他废弃物,主要由砖块、混凝土块、碎瓷砖、碎玻璃、废木料、渣土等组成(杨德志、张雄,2006)。生活废弃物主要由厨余垃圾、纸张、塑料、金属等组成。日本将废弃物分为一般废弃物和产业废弃物,一般废弃物包括家庭生活垃圾、办公室及饮食店产生的垃圾,产业废弃物包括焚烧残渣、下水道淤泥、废油、废碱、塑料、纸屑、木料、纤维屑、动植物加工残渣、废橡胶、废金属、玻璃及陶瓷碎片、矿渣、瓦砾、动物粪尿、动物尸体、煤尘等(简文星,2002)。

资源化利用城市垃圾的理念可以追溯至1979年(Filip & Küster, 1979)。目前,城市垃圾被广泛运用于工矿企业污染场地修复和土壤基质改良。城市垃圾可以作为矿区塌陷区、采空区的填料(李雨芯、

邱媛媛, 2008), 作为表土替代物覆盖(束文圣、蓝崇钰, 1996)或配制成添加剂、土壤改良剂、有机复合肥。卞正富和张国良(1999)直接将煤矸石回填并种植紫穗槐和牧草, 有效提高了土壤速效氮、磷、钾和有机质含量, 使土壤适合耕作。研究表明, 粉煤灰、淤泥、污泥等城市垃圾能够提供植物生长所需的营养成分, 增加团聚体和腐殖酸的含量, 降低土壤容重, 增加土壤孔隙度, 提高土壤微生物的数量和酶活性, 改良土壤理化性质, 促进植物生长(汪彪, 2010; 黄岗等, 2008; 刘勃等, 2007; 周学武等, 2005; 申俊峰等, 2004; 张万钧等, 2002; Guerrero et al., 2001)。建筑垃圾如碎石块、渣土等虽然养分含量较低, 但按比例加入种植土后, 可以改善土壤的物理性质(李广清, 2010)。研究表明, 混合多种固体废弃物能够平衡其质地、酸碱度、化学成分、微生物活性等性质的不平衡(牛花朋等, 2006)。

另一方面, 城市垃圾可能含有过量的砷、镉、铬、汞、铅、铜、锌、镍等重金属(董刚等, 2011)。这些重金属可能滞留在土壤中, 被植物吸收, 进入食物链或随土壤水的运动进入地下水。

砷、镉、铬、汞、铅不是植物生长不可或缺的元素, 铜、锌、镍尽管是植物生长不可或缺的元素, 但过量积累会产生毒害作用。重金属的积累会影响植物体内光合过程中的电子传递和破坏叶绿体的完整性, 诱导脂质过氧化, 破坏细胞内自由基产生和清除之间的平衡, 导致大量的活性氧自由基产生, 引发膜中不饱和脂肪酸产生过氧化反应, 破坏膜结构和功能。重金属还可能引起植物可溶性碳水化合物、叶绿素含量、酶和蛋白质活性等发生改变, 影响植物细胞的生理过程。使用城市垃圾改良土壤, 可能使土壤重金属含量改变(闫治斌等, 2011; 黄岗等, 2008), 必须坚持定期监测。城市垃圾可以与生物量大、重金属吸收能力强的超量积累植物配套使用, 一些土壤添加剂能够进一步提高植物对重金属的吸收量(袁敏等, 2005)。城市垃