

附件 3

《污染土壤修复工程技术规范 生物堆
（征求意见稿）》

编制说明

《污染土壤修复工程技术规范 生物堆》编制组

二〇二二年一月

项目名称：污染土壤修复工程技术规范 生物堆

项目统一编号：2016-58

承担单位：北京市环境保护科学研究院

生态环境部固体废物与化学品管理技术中心

生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心

北京高能时代环境技术股份有限公司

北京建工环境修复有限责任公司

编制组主要成员：钟茂生、张文毓、姜林、韩丹、张丹、周友亚、马杰、郭观

林、邹惠、王玉、魏丽、杨乐魏

标准所技术管理负责人：姚芝茂

科技与财务司投资处项目管理人：张钦、吕奔

目 录

1. 任务来源.....	1
2. 标准制订的必要性分析.....	1
3. 工作过程.....	2
4. 国内外相关标准研究.....	2
5. 同类工程现状调研.....	3
5.1. 技术应用概述.....	3
5.2. 技术原理.....	3
5.3. 技术流程.....	4
5.4. 技术适用性.....	5
5.5. 技术应用现状.....	5
5.5.1. 应用进展.....	5
5.5.2. 工程案例.....	6
5.5.3. 工程中存在的主要问题.....	9
6. 主要技术内容及说明.....	10
6.1. 适用范围.....	10
6.2. 规范性引用文件.....	10
6.3. 术语和定义.....	10
6.4. 污染物与污染负荷.....	10
6.5. 总体要求.....	11
6.5.1. 一般规定.....	11
6.5.2. 工程构成.....	11
6.5.3. 场址选择与总图布置.....	11
6.6. 工艺设计.....	11
6.6.1. 一般规定.....	11
6.6.2. 工艺流程.....	12
6.6.3. 工艺设计要求.....	12
6.6.3.1. 预处理系统.....	12

6.6.3.2. 抽气系统.....	12
6.6.3.3. 防渗系统及渗滤液收集系统.....	12
6.6.3.4. 生物堆堆体.....	13
6.6.3.5. 土壤气监测系统.....	13
6.6.3.6. 进气系统.....	13
6.6.3.7. 营养水分调配系统.....	14
6.6.3.8. 覆盖系统.....	14
6.6.3.9. 二次污染控制措施.....	15
6.7. 主要工艺设备和材料.....	15
6.8. 检测与过程控制.....	15
6.8.1. 检测.....	15
6.8.2. 过程控制.....	15
6.9. 主要辅助工程.....	15
6.10. 劳动安全和职业卫生.....	15
6.11. 施工与调试.....	16
6.12. 运行与维护.....	16
7. 标准实施的环境效益与技术经济分析.....	17
7.1. 环境和社会效益.....	17
7.2. 技术经济分析.....	17
8. 本标准的实施建议.....	17

1. 任务来源

根据原环境保护部《关于开展2016年度国家环境保护标准项目实施工作的通知》（环办科技函〔2016〕633号）的要求，由北京市环境保护科学研究院作为项目承担单位，环境保护部固体废物与化学品管理技术中心、生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心、北京高能时代环境技术股份有限公司、北京建工环境修复有限责任公司作为项目协作单位，联合承担《污染土壤修复工程技术规范 生物堆》（原名称：《污染土壤异位通风与生物堆耦合修复技术规范》）（项目统一编号：2016-58）标准项目的编制工作。

2. 标准制订的必要性分析

近年来，城市建设开发市场急剧膨胀，城市土地资源日趋紧缺，大批重度污染型化工企业外迁后留下了大量污染地块，多年的生产活动对土壤及地下水造成不同程度的环境污染，对未来土地使用者存在健康风险。生态环境部要求企业关闭搬迁后、遗留地块开发建设前必须进行土壤修复，达到相应用地标准后方可开发利用，修复污染搬迁企业遗留的污染土壤已势在必行。

针对污染土壤的修复治理，原环境保护部对此极为重视，2004年发布了《关于切实做好企业搬迁过程中环境污染防治工作的通知》（环办〔2004〕47号）。通知规定“所有产生危险废物的工业企业、实验室和生产经营危险废物的单位，在结束原有生产经营活动、改变原土地使用性质时，必须经具有省级以上质量认证资格的环境监测部门对原址土地进行监测分析，报送省级以上环境保护部门审查，并依据监测评估报告确定土壤功能修复实施方案。当地政府环境保护部门负责土壤功能修复工作的监督管理。”

2008年发布的《关于加强土壤污染防治工作的意见》，明确将污染地块土壤环境保护监督管理列入了土壤污染防治的重点领域，并将开展污染土壤修复与综合治理试点示范作为强化土壤污染防治工作的重要措施。

2014年发布的《关于〈加强工业企业关停、搬迁及原址场地再开发利用过程中污染防治工作〉的通知》（环发〔2014〕66号）要求“场地治理修复从业单位必须按照相关环保标准规范开展调查、风险评估及治理修复工作。”

本标准的制定，符合新的环境标准体系要求，有利于真正规范和进一步推进我国场地修复技术工作，有利于突破污染土壤再利用发展的环境制约，有利于对污染土壤的有效治理和监督管理，可实现经济、社会和环境效益的“三同时”，同时保证了政府管理的规范化及科

学化。

3. 工作过程

(1) 项目组成立

2016年4月，项目立项，签订任务书。

(2) 开题报告与初稿

2016年5月~2017年7月，编制单位分别调研了美国、欧洲、加拿大、中国香港等地区的生物堆相关制度、技术进展及相关工程案例，结合编制单位前期在北京焦化厂建设的450 m³规模生物堆试点工程经验，完成《污染土壤异位通风与生物堆耦合修复技术规范》（草案）编制工作。

(3) 开题论证

2017年7月13日，项目召开并通过《污染土壤异位通风与生物堆耦合修复技术规范》（草案）开题论证会，会后就与会专家提出的问题和建议继续开展调研论证及文本修改，完成《污染土壤异位通风与生物堆耦合修复技术规范》（征求意见稿）编制工作。

(4) 征求意见稿起草

2020年1月9日，项目召开《污染土壤异位通风与生物堆耦合修复技术规范》（征求意见稿）专家咨询会，会后根据专家意见，将标准题目修改为《污染土壤修复工程技术规范 生物堆》并对文本进行了进一步修改，形成最新版本的《污染土壤修复工程技术规范 生物堆》（征求意见稿）。

4. 国内外相关标准研究

尽管生物堆技术已经被大量应用于有机污染土壤的修复工程，且已经形成较成熟的工艺系统，但目前该技术的专项技术规范文件并不多，主要为US EPA和美国海军工程服务中心（US NFESC）及美国巴特尔纪念研究所编制的相关文件，而国内对此技术编制的文件几乎没有。

(1)美国环保总署2004年编制的《地下储油罐污染场地的可行治理技术评价方法导则》，第四篇生物堆技术（EPA 510-B-16-005）（How To Evaluate Alternative Cleanup Technologies For Underground Storage Tank Sites）》。该导则主要介绍了生物堆处理技术的基本概念和优缺点、生物堆处理有效性的评估方法、生物堆系统的设计和施工方法以及生物堆运行和修复

过程中的实时监测方法，并制定了生物堆可行性筛选流程表。导则内容简洁明了介绍了开展生物堆处理技术的主要步骤和关键环节，具有较强的实用性和可操作性。

(2) 美国海军工程服务中心1996年编制的《生物堆修复技术设计和施工手册 (biopile design and construction manual)》及《生物堆修复技术操作和维护手册 (biopile operation and maintenance manual)》。该手册编制目的是为生物堆技术治理工程提供设计施工和运行维护参数。

(3) 美国巴特尔纪念研究所1998年编制的《用于烃类污染土壤治理的生物堆修复技术设计、操作及施工手册 (biopile design, operation, and maintenance handbook for treating hydrocarbon contaminated-soils)》。该手册介绍了合理选择、设计、构建、运行操作、运行维护和拆除生物堆系统的相关知识。同时增加了软件Biopile Cost Estimator (生物堆成本计算器)的介绍，可以轻松估算投资资本，运营成本和单位处理成本。该手册从生物堆技术基本概述开始，详细描述参数选择原则，监管问题，设计参数和施工程序，另外附录包括一些健康和安全的措施计划以及故障排除指南。

5. 同类工程现状调研

5.1. 技术应用概述

生物堆是一种可持续利用、绿色、可达到较低成本、且比较有效的污染土壤修复处理技术。其实施过程为将开挖出来的污染土壤加入微生物促进剂等添加剂，准备好具有良好防渗措施的场地,将混合后的土壤放置到有良好防渗措施的地面上，经过强化通风处理，土壤中的有机污染物被微生物降解为二氧化碳和水。主要针对石油产品中挥发性/半挥发性有机物 (VOCs/SVOCs)污染土壤，因其对挥发性/半挥发性有机物污染的土壤及地下水治理的有效性、经济性和环境友好性，在世界各地被广泛应用。

5.2. 技术原理

生物堆技术的工作原理包括：

通风:利用新鲜空气在抽气作用下不断从设置在通风堆体顶部的进气口进入堆内并与堆体内含有目标污染物的土壤气进行对流传质，之后被设置在堆体底部的抽气管网收集排出堆体。由于土壤气中挥发性污染物浓度的不断降低，吸附于土壤中的挥发性污染物将在浓度梯度的驱动下挥发进入土壤气，之后再被抽出土壤。当抽气设备连续运行时，吸附于土壤中的

污染物将不断从土壤颗粒中挥发至周围的土壤气中并被抽出堆体，最后达到去除绝大部分挥发性有机污染物的目的。

生物降解：当系统运行一定时间后，土壤中的目标污染物浓度将大大降低，土壤颗粒中污染物浓度与周围孔隙气体中对应污染物浓度差降低。同时由于土壤中有机的吸附，残留的目标污染物从土壤颗粒中的吸附位点解吸并扩散至周围土壤气中的速度大大降低，此时通过调整抽风系统的抽风量，系统进入好氧生物降解阶段（即生物堆降解阶段），该阶段主要是利用土壤中的土著微生物对污染物的降解功能，将可生物降解的目标污染物降解为水和二氧化碳，此阶段应及时补充营养/水分，便于微生物的降解。

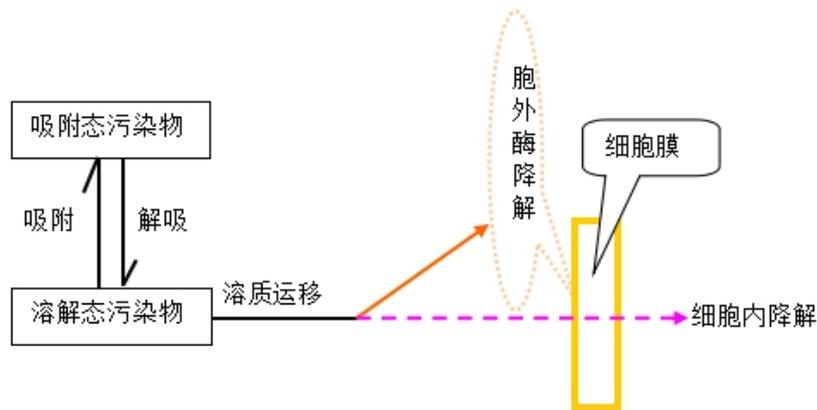


图 1 微生物降解目标污染物的原理

5.3. 技术流程

生物堆技术修复污染土壤的工艺流程包括对拟修复土壤进行破碎、筛分、调理等预处理后将其堆置成生物堆，通过抽气、调配水分及营养等以维持微生物生长所需环境，利用土壤中微生物对污染物进行降解。运行过程中，对产生的废水和废气进行收集处理后达标排放。

典型生物堆工程结构图及实际现场图如下：

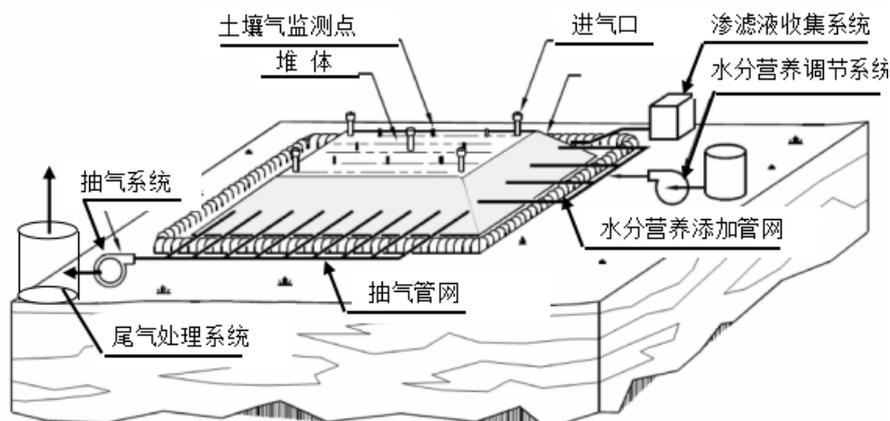


图 2 典型生物堆工程结构图



图 3 生物堆工程实际现场图

5.4. 技术适用性

生物堆技术主要适用于石油烃等可生物降解有机物污染土壤的修复，也有用于多环芳烃、氯代烃、苯系物、有机胺类等化合物的工程实例，但需经小试或中试确认污染土壤能够满足修复要求。

5.5. 技术应用现状

5.5.1. 应用进展

生物堆修复技术在国外如美国、加拿大、澳大利亚、比利时、英国、法国及中国香港均有广泛应用，主要应用于多环芳烃类（PAHs）、石油烃类（TPH）、氯代溶剂类及有机胺类有机污染场地土壤修复，且均取得了较好的修复效果，修复成本低廉。污染物去除效果普遍可达到75%~95%左右，处理周期3个月~2年不等，处理成本约35美元~80美元/吨。

表 1 生物堆技术在国外的一部分应用

序号	场地名称	目标污染物	规模
1	加拿大魁北克水利局 PAHs 污染场地修复	多环芳烃	9000 t
2	南澳大利亚某燃料油污染场地	石油烃	2000 m ³
3	北青衣土壤净化工程	石油烃	65000 m ³
4	竹篙湾财利船厂土壤修复	石油烃	57000 m ³

序号	场地名称	目标污染物	规模
5	比利时某炼油厂	石油烃	194000 m ²
6	加拿大某场地 PAHs 污染土壤修复	石油烃	20000 m ³
7	加拿大某油田污染区修复	氯代溶剂	22000 t
8	美国某海军训练基地 TPH 污染土壤治理	石油烃	
9	美国某天然气厂污染场地修复	有机胺类	450 m ³
10	美国某居民区 PAHs 污染土壤修复	多环芳烃	150000 t
11	英国 Scunthorpe 地区污染土壤修复	石油烃+多环芳烃	1500 m ³
12	法国某军事基地石油污染场地治理	石油烃	1300 t

近年来，由于生物堆技术修复成本相对低廉，相关配套设施已能够成套化生产制造，在国内已广泛应用于石油烃、多环芳烃等易生物降解污染土壤的修复，技术成熟。在苯并(a)芘、二苯并(a,h)蒽等多环芳烃类及苯胺类有机污染场地均有成功应用。

5.5.2. 工程案例

(1) 加拿大魁北克水利局PAHs污染场地修复

1994~1996年，雷继雨等用生物堆法结合微生物筛选技术、固相真菌发酵技术和实地生物通风法、地下水曝气法等技术成功地修复了加拿大魁北克水利局的一块足球场大小、深10 m的PAHs污染场地。该项目进行了一种白腐真菌的筛选、驯化、培养并实地接种对PAHs进行生物降解，处理9000 t PAHs污染土壤，经过12星期的处理周期，污染物去除率达到了92%，该项目成为当时世界上首例应用生物堆法成功修复PAHs污染场地。

(2) 南澳大利亚某燃料油污染场地

1999年南澳大利亚某地的燃油泄漏导致污染物通过常年冻土层向下游迁移。在污染源周围的土壤中检测到很高浓度的烃类。因此需要一种适用于当地寒冷条件的低成本修复技术。

该项目结合土壤条件和当地寒冷作业条件以及环境风险防控要求而制定一个特定的修复工艺，场地首先采用渗透性反应墙（PRB）技术进行修复，之后结合生物堆技术进行异位土壤处置。场地采用粘土衬里、高密度聚乙烯（HDPE）土工膜和土工布的土工合成复合衬里系统防渗处理，之后将挖掘的污染土壤堆放在该场地单元中，防止污染物在环境中扩散，同时设置监测管路和取样检测区，实时监测运营参数。

(3) 中国香港北青衣土壤净化工程

早期北青衣船厂主要修理本地内河船，大约二百吨，但由于海外竞争增加，青衣的船厂面临迫迁的危机，因为青衣居民对船厂发出大量噪音而不满。政府将青衣变成居住用途的小岛后，政府希望将船厂一带填海，作为居住用地，以应对急剧增长的人口。

主要污染物：石油碳氢化合物、重金属、多环芳香族碳氢化合物、酚、苯、甲苯、乙苯、邻二甲苯。

该工程主要采用生物堆技术，将污泥堆成数个独立堤，向泥土中输入空气，加速石油烃的生物降解，泥土中的微生物将污染物分解成二氧化碳和水等无害物质，从而达到清除污染物的目的。

(4) 比利时某炼油厂

该场地原为两个炼油厂，占地面积约50公顷，其在50年代初至1990年生产期间对土壤和地下水造成严重污染，主要污染物为轻质和重质烃类、芳香族溶剂类、氯代烃以及多环芳烃类。该场地规划用于建设一个20公顷的公共休闲公园、一个1250 m²的住宅区以及一个大型购物中心，总投资1.5亿欧元。

该项目设置占地面积22600 m²的处置大棚用于194000 m²污染土壤生物堆处置，污染土壤首先经过预处理，然后进行特定生物制剂和营养物添加，之后转移至大棚内。定期进行土壤气含量和烃类降解量监测。处理后达到修复目标的土壤用于回填和公园建筑用土。

(5) 上海世博会有机污染土壤修复工程示范项目

a) 项目简介：2005~2008年期间，上海老港生活垃圾填埋场接收并暂存了来自上海世博会园区的有机污染土壤约19.34万m³，本示范工程修复土壤总量为7040 m³。主要污染物为苯并(a)芘、二苯并(a,h)蒽等多环芳烃类污染物。根据上海市环保局和世博局要求，必须对这些污染土壤进行修复和资源化利用，修复后污染物浓度需达到展览会用地土壤环境质量评价标准B级标准限值（苯并(a)芘0.66 mg/kg、二苯并(a,h)蒽0.66 mg/kg）。

b) 场地概况：土壤pH为7.2~8.9，土壤多环芳烃总浓度为1.41~192.93 mg/kg，土壤含水率约为10%，碳：氮：磷约为25:1:1。

c) 技术选择：经前期场地调查和修复目标确定，对植物修复、干化污泥混合以及生物堆法三种修复技术进行比选，由于生物堆法的可操作性适中、占地面积小、实施时间短、处理成本最低，同时该技术潜在二次污染低，结合上海世博局对项目实施时间、处理成本的要求，以及老港垃圾填埋场封场时间节点的要求，本工程采用生物堆法对暂存在老港填埋场的世博会园区约7040 m³有机污染土壤进行修复示范。

d) 工艺流程：①土壤预处理，包括筛分破碎、土质调节、pH调节、养分调节、土壤含

水率调节及混合搅拌；②场地准备及地基建设；③生物堆堆体构筑及通风系统、注/排水系统、监测系统建设；④运行生物堆对污染土壤进行处理，并定期监测污染物的去除程度和抽气量、压力、温度、湿度、堆内氧气含量等参数；⑤修复后的土壤中污染物浓度均符合展览用地B级标准，因此将其用于了老港生活填埋场的覆盖土。

e) 主要工艺及设备参数：共建造16列生物堆系统，每一个生物堆单元尺寸为20 m×11 m×2.0 m，土方量为440 m³，设计运行时间2.5个月。

该工程生物堆工艺系统主要包括通风系统、渗滤液收集与处理系统及自动灌溉系统。通风系统采用高压鼓风机进行通风作业；渗滤液收集与处理系统利用水分自然沉降至预先造好的生物堆地基沟槽中，定期用抽水泵进行收集，并根据渗滤液特性进行相应处置；自动灌溉系统，为了更好地保持覆盖层的完整性，将灌溉管路从混凝土层穿出，用于生物堆堆体中营养物与水分添加。

f) 修复效果：第三方监测单位根据技术和施工方案制定了污染土壤修复工程验收监测方案，并对超标PAHs污染物实施了监测，结果表明，大于80%土壤样品中超标PAHs浓度已低于修复标准（展览用地B级标准），因此可认为本次生物堆处理现场示范工程达到了预期修复目标，运行过程中的各项参数和调控管理方法是切实可行的。处理后土壤中污染物浓度已符合展览用地标准B级标准，因此将其用于了老港垃圾填埋场第三期场地封场的覆盖土。

(6) 某地铁线施工场地苯胺污染土壤的修复

a) 项目简介：某原化工区，场地调查与风险评估发现存在苯胺污染土壤约49920 m³。主要污染物及污染程度：主要污染物为苯胺，最大检出浓度为5.2 mg/kg。为满足项目施工进度及项目建设施工方案的要求，这部分污染土壤采用异位处理使苯胺浓度小于4 mg/kg。

b) 场地概况：污染土壤以中砂为主，有机质含量相对较低，污染物“拖尾”效应较弱。其通气性能较好，本征渗透系数达到10⁻⁶ cm²，有利于氧气的均匀传递。

c) 污染物特征分析：苯胺，饱和蒸汽压为0.3，辛醇-水分配系数为0.9，具备一定的挥发性，能在负压抽提下部分通过挥发而去除。同时，研究表明，其在好氧条件下的生物降解半衰期为5~25天，降解性能较好。

d) 技术选择：考虑到污染较轻，污染物的挥发性和生物易降解性，以及土壤有机质含量低、渗透性较好及修复成本等因素，选定批次处理能力大、设备成熟、运行管理简单、无二次污染且修复成本相对较低的生物堆技术。

e) 工艺流程：①污染土壤首先进入土壤暂存场暂存，然后根据土壤处置的进程安排，取土进行土壤筛分，筛分设施配备除尘和尾气净化设备，保证筛分过程中产生的粉尘和废气

能达到排放标准；②筛分后的土壤和卵石运入土壤处置场，卵石铺设在生物堆的最底层，用于抽气管网的气体分配和保护；③运行生物堆对污染土壤进行处理，并定期监测污染物的去除程度和抽气量、压力、温度、湿度、堆内氧气含量等参数；④处理过程中产生的废气进入尾气净化设备处理，渗滤液进入废水处理设施；⑤修复后的土壤达到修复目标后可用于填埋造地，尾气净化后达标排放，废水处理按照修复方案的废水利用标准进行回用。

f) 主要工艺及设备参数：考虑到该项目的土方量及甲方要求的修复工期，该项目采用模块化设计，单个批次总共建设3个堆体，批次处理能力为10000 m³，每个堆体配置独立的抽气控制设备进行控制，每个堆体的设计处理时间为1.5个月。

该项目生物堆的设备主要由抽气设备、气液分离设备和尾气净化设备组成。抽气设备主要由真空泵、空气真空球阀和系统排气口等组成；气液分离设备由真空平衡分离排液罐、自动排液泵、过滤器和空气真空球阀组成；尾气净化设备由活性炭吸附塔、取样口和排气口组成。

g) 成本分析：该项目包含建设施工投资、设备投资、运行管理费用的处理成本约350元/m³。

h) 修复效果：依据设计方案，该项目49920 m³污染土壤中苯胺的浓度均降低至修复目标4.0 mg/kg以下，满足修复要求并通过生态环境主管部门的修复验收。

5.5.3. 工程中存在的主要问题

为满足地块再开发建设的进度需求，很多污染场地往往均采用异地异位或原地异位的方式力求在较短的时间内对地块进行修复。在众多的异位修复技术中，生物堆技术针对挥发性有机物以及挥发性有机物与易生物降解有机物（如石油烃等）复合污染土壤具有较好的修复效果，其修复成本相对较低、设施运行维护相对简单、不易引起二次污染，在国内外均有较多的工程应用。据不完全统计，该技术在国外已应用于修复近100万m³石油烃为主的污染土壤，在国内，该技术应用的累计工程规模也达到近30万m³。同时，该技术也被列入原环境保护部2014年污染土壤修复的推荐技术名录。

为规范该技术的设计、施工以及运行维护等环节，美国环保局（US EPA）以及美国海军工程服务中心（US NFESC）先后发布了该技术的设计、施工与运行维护技术指南，有效的避免了该技术应用过程中二次环境污染的问题。我国虽然已有采用该技术修复污染土壤的大量工程实例，但至今未制定该技术的技术规范，多根据修复单位的经验开展修复工作。造成一方面，因技术规范的缺失导致修复单位在应用该技术进行污染土壤的修复过程中出现设

计、施工考虑不周全以及运行维护缺乏详细可行的方案等因素，最终项目的修复效果不理想，实际的修复周期远长于设计的修复周期，修复成本因此也增加。另一方面，因缺少相应的技术规范，修复公司在实施该技术的过程中，极易忽略二次污染防治方案的制定与实施，导致项目实施过程中因二次污染而引起修复企业与周边居民的纠纷。

综上所述，为给相关修复企业对该技术进行工艺、施工及运行维护方案设计提供技术参考，规范该技术在工程实施过程中的各个环节，避免实施过程中的二次环境污染，非常有必要综合国内外已有的工程技术经验，编制相应的工程技术规范，以指导相关企业更好的运用本项技术进行污染土壤的修复。

6. 主要技术内容及说明

6.1. 适用范围

规定了本标准的主要内容、适用主体与对象，明确了标准对污染土壤生物堆处理工程全过程的技术指导作用。

6.2. 规范性引用文件

引用了与本标准密切相关的法规、规范、标准和文件。现行的工业企业环保类标准（废水，废气，噪声等），是制定本标准修复目标的法律依据，其中有关条文是本标准的技术基础，引用此类文件，使标准具有合法性和权威性。

生物堆修复技术与现有很多工程技术有许多共同点，工程中关于平面布置、二次污染防治等方面的规定引用了现行的国家及部级标准和技术规范。同时，有关建设工程涉及配套专业和工程施工、安装、调试、验收规范均成为本标准的引用文件。

根据标准编制的项目背景，本标准也借鉴了编制单位前期中试及现场工作中积累的一些经验参数。

6.3. 术语和定义

标准在直接引用《建设用地土壤污染风险管控和修复术语》（HJ 682-2019）相关术语的基础上，补充了与本标准相关的定义，便于标准条文的理解。

6.4. 污染物与污染负荷

适用的污染物类型参考了US NFESC于1996年发布的《BIOPILE DESIGN AND

CONSTRUCTION MANUAL》技术手册。

二次污染特征的相关要求根据编制单位相关工程施工经验总结。

6.5. 总体要求

6.5.1. 一般规定

规定了生物堆修复工程选址和建设的一些原则性要求以及在运行过程中所产生的各种二次污染问题所应满足的环境管理要求。

6.5.2. 工程构成

在充分考虑国内修复行业背景，结合广泛的调研和工程实践的基础上，提出了生物堆工程的三大构成：主体工程、辅助工程及配套设施。

6.5.3. 场址选择与总图布置

结合场址地形、气候和地质条件，生物堆工程可有各种总体布置形式，必须经技术经济比较确定，本标准提出了一些原则要求。

区域气象气候条件，包括气温、降水量、主导风向等，是生物堆设置加温设施、渗滤液收集设施，合理布置厂区各设施的参考依据。

拟选场址地质和水文地质条件，包括地层结构，土壤渗透性，地下水位埋深等的调查，便于施工单位确定某区域地质情况是否具备承载堆体及辅助设施的可行性，也是防渗设施设置的基础依据。

拟选场址用途（现状及规划）、拟选场址周边敏感目标分布状况、交通条件、能源供应条件，包括燃气、电力供应等的情况调研及资料搜集，便于施工单位在场址选择上尽量避开学校，医院及居民楼敏感地点，减少转运成本，保证工程能够顺利实施并符合相关规划的需求。

本标准对场址选择、总图布置等应遵循的原则和标准进行了规定。场址选择与总图布置应参照GB 50187的规定执行。总体应合理布置，降低环境影响、方便施工及运行维护。

6.6. 工艺设计

6.6.1. 一般规定

本节规定了生物堆修复工程工艺设计方案及运行参数的确定依据和原则。

6.6.2. 工艺流程

生物堆修复工程主要用可生物降解的有机污染物污染土壤的修复。其工艺流程基于5.2所述工作原理设置。

6.6.3. 工艺设计要求

6.6.3.1. 预处理系统

预处理系统包括筛分、破碎与混合调理等预处理设施以及废气收集处理设施。

其中筛分破碎与混合调理等预处理设施主要是通过技术手段,将不满足其技术适用性的土壤调理至符合要求,土壤孔隙度、粒径、均匀性、pH值、含水率、微生物含量均可以通过标准中所述预处理技术调理。废气收集处理等二次污染防治设施是收集和处理预处理设施工作过程中产生的废气的相关设施及设备。各参数应满足的具体数值,主要参考了US NFESC于1996年发布的《BIOPILE DESIGN AND CONSTRUCTION MANUAL》技术手册中的经验参数,并结合了国内工程实践经验进行了优化调整。

6.6.3.2. 抽气系统

抽气系统的主要功能是克服气体在堆体土壤孔隙中运行的阻力,确保足量的新鲜空气在抽气作用下顺利进入堆体内部,在与含有挥发性有机污染物的土壤气进行对流传质的过程中将其带出堆体,同时为堆体内好氧微生物的生长繁殖提供氧气。抽气系统通常包括厚度约30 cm的砾石导气层、抽气管网、抽气设备及其控制系统等,文本中以附录形式体现了常见抽气系统的结构图。抽气支管的间距和管径参考范围主要依据编制单位工程经验及US NFESC的《BIOPILE DESIGN AND CONSTRUCTION MANUAL》技术手册。每根抽气支管上均应设置气量调节阀与流量计的主要目的是便于调节不同区域的供气量以维持微生物生长所需的含氧量。

6.6.3.3. 防渗系统及渗滤液收集系统

设计堆体基础防渗系统的目的在于防止生物堆运行过程中产生的渗滤液渗入堆体底部的土壤和地下水,导致周围环境受到二次污染。

堆体基础防渗系统可通过设置土壤或粘土地基、防渗衬垫、渗滤液流出通道和防渗衬垫保护层实施,推荐采用较为简单的铺设防渗膜或地面硬化的方式进行防渗。无条件铺设防渗装置的,本条也对土壤防渗系数提出了明确的要求,总体应满足渗透系数不低于 1×10^{-7} cm/s的防渗要求,一般采用15 cm到20 cm的压实粘土或现有的沥青或混凝土表面均能够满足作为

堆体和储存区的地基要求，保守起见本标准提出了夯实土壤厚度不应低于0.5 m的要求。

为确保渗滤液能够及时排出堆体，渗滤液收集管设置于堆体建设区地势最低处导气砾石层内，收集管一般设置1%到2%的坡度便于导排。

6.6.3.4. 生物堆堆体

在堆体体积确定的前提下，堆体尺寸设计应综合考虑堆体施工建设可行、运行管理操作便捷、运行工况易控制、堆内气体易均匀流动等限制因素，确定堆体的长、宽、高。根据国内外工程经验，为确保新鲜空气能够从堆体顶部的气体进口沿堆体纵剖面进入堆体并被设置在堆体底部的抽气管网收集，堆体污染土壤高度一般为2~2.5 m，高度过高则难以保证气体在堆体内部的流通性，考虑到国内常用的堆土机械设备臂长约5m，堆体宽度一般不超过10 m，侧面坡度一般控制在1:1~1:1.5以保证堆体的稳定性。

6.6.3.5. 土壤气监测系统

可以通过在堆体内监测土壤气中氧气及二氧化碳含量考察其运行效果，氧气监测的主要目的是了解其氧气含量是否满足微生物好养活动对氧气的需求，以便及时调整风机的运行工况，当堆体中氧气浓度高于或低于一定值（一般为体积含量10%）时，应降低或增加风机抽气流量，二氧化碳作为有机污染物生物好氧降解的最终产物之一，土壤气中二氧化碳浓度的逐渐上升标志着微生物数量及活性增加，其监测能够帮助运行管理人员间接了解堆体内微生物的降解速率及活性，以便于其及时采取相应的措施进行调控。

探头应设置在两根抽气支管距离中心等抽气过程中堆体内气体流动较差的区域，也就是理论处理效果最差的区域。相邻两个土壤气监测点水平向垂直距离通常为4~6 m，主要是结合了抽气支管的间距通常为2~3 m的规定进行设置。

土壤气监测点距离堆体顶部不宜小于1 m，距离堆体底部不宜小于0.3m。宜对堆体不同深度的土壤气进行监测。主要参考了《BIOPILE DESIGN AND CONSTRUCTION MANUAL》技术手册中的推荐数值，同时，结合了编制组在实施过程中发现（即距离堆体顶部距离小于1m的土壤，因距离进气口较近，内部土壤气中氧气浓度相对较均匀）。

6.6.3.6. 进气系统

为确保新鲜空气能够顺利进入堆体，应在堆体顶部设置一定数量的进气口并且进气口应高出顶部的防雨覆盖系统。利用新鲜空气在抽气作用下不断从设置在通风堆体顶部的进气口进入堆内并与堆体内含有目标污染物的土壤气进行对流传质，之后被设置在堆体底部的抽气

管网收集排出堆体。如此新鲜空气不断进入堆体，与堆体底部抽气系统共同作用，保证堆体内部的氧气含量与空气流通。进气系统的布置应充分考虑其作用范围及效果，顶部应连接三通并与堆体顶部覆盖系统连接处应进行有效焊接，应尽量避免因为设置过多的进气口导致运行过程中进气口与防雨覆盖膜焊接处出现裂口的几率增加，并进而增加运行管理的工作量。进气口处若存在缝隙，在雨季期间可能导致大量雨水通过裂口进入堆体，不但使系统产生大量渗滤液，影响堆体的正常运行及处理成本，更有可能导致堆体局部坍塌。根据国外的工程经验，进气口一般设置在堆体中气体流动最不利区域，主要是两抽气管距离的中点及堆体四周角落。

6.6.3.7. 营养水分调配系统

生物堆运行过程中，土壤水分的蒸发会导致水分含量难以一直维持在微生物生长繁殖所需的最佳含水量范围（重量含水率2%~30%）。因此可能需要在堆顶设置营养水分调节管网并将其与设置在堆体外部的营养水分调节系统连接，以便于项目实施单位通过监测反馈结果适当的增加堆体中土壤的水分含量，确保污染物生物降解的顺利进行。为确保水分能够在需要区域均匀的加入堆体土壤，应根据待修复土壤的性质确定适当的管间距及滴头之间的间距。同时，为避免滴水速率快于水分下渗的速率而导致在堆体顶部表面产生径流，进而影响系统的正常运行。

营养水分调配系统一般由循环管路，包括水泵、输送管道、雾化喷灌投加管、调节阀等组成，根据US NFESC《BIOPILE DESIGN AND CONSTRUCTION MANUAL》及相关工程经验，运行过程中堆体土壤的碳氮磷含量比值应控制在100: 10: 1~100: 10: 0.5，如果发现土堆中的营养物比例失调需要作出及时的调整。常见较经济的外源氮源包括尿素（ $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ ）、硝酸钾（ KNO_3 ）等，磷素包括磷酸二氢钾（ KH_2PO_4 ）等，也可以使用其他无生物毒性的酸或碱，但成本较高。

6.6.3.8. 覆盖系统

覆盖系统的主要目的是为了避免降雨导致堆体不稳定以及渗滤液产生量增加，堆体土壤含水量过高等不利后果，同时为堆体保温，在生物堆建设及相关设备安装调试完之后应当采用深色防水薄膜进行覆盖。防水薄膜需要固定以防止大风将其刮走。堆体覆盖材料可采用黑色线性低密度聚乙烯膜（LLDPE）进行覆盖，并且膜的尺寸大于基础的尺寸以利于顶部覆盖膜与底部防渗膜进行有效焊接，保证堆体的密闭性。膜与进气口连接处应用热熔焊接进行密闭，以防止出现裂缝而导致雨水进入堆体。

6.6.3.9. 二次污染控制措施

本标准规定了生物堆工程实施过程中大气、废水、固体废物及危险废物处理处置过程应如何防止二次污染。推荐了活性炭吸附处理废气、渗滤液回灌等成本经济、占地面积小、运行简便的处理工艺，也可根据运行成本及实际情况选择。

6.7. 主要工艺设备和材料

本条明确了生物堆生物堆修复工程系统包括的主要设备和材料，由于本工艺设备和材料均为可选购的定型设备，一般不存在定制设备，故提出对其可根据工艺设计要求进行产品选购。由于生物堆内部处于潮湿温润的环境，设备和材料易于腐蚀，故所用管道应采用稳定、不易腐蚀的材料，如聚氯乙烯（PVC）、纤维增强复合材料（FRP）、不锈钢等。风机、阀门、泵等配件也应满足相应防腐防爆要求。整个修复项目宜配置不少于1套备用抽气设备以便设备检修或停机时备用。

6.8. 检测与过程控制

6.8.1. 检测

检测分为污染物检测和工艺参数检测。

可根据修复成本，选取在线监测设备或采用便携设备定期检测堆体内氧气、二氧化碳及挥发性组分含量，并根据检测结果调整优化抽气系统的运行工况，确保堆体内氧气含量分布均匀，且体积含量不低于10%。必要时可以对堆体开展土壤取样，监测目标污染物浓度、土壤含水率等参数变化。

6.8.2. 过程控制

本标准提出修复工程抽气系统、营养及水分调配系统、废气处理系统等环节应采用自动控制系统，便于温度、压力、流量、液位等参数出现问题时能够及时自动调节。

6.9. 主要辅助工程

本节规定了生物堆修复工程的电气、给排水、暖通和通信系统的基本要求及参考标准。操作过程中可根据实际情况设置。

6.10. 劳动安全和职业卫生

污染土壤修复工程本身即是环保行为，但在建设、运行过程中会产生各种二次污染及安全隐患，对运行人员及周边群众健康造成危害，为保护人身安全和公众健康，标准对执行国家现行环境保护、劳动安全、职业卫生方面相关标准提出了明确要求。

劳动安全主要涉及到用电安全、燃气等易燃易爆品安全及操作安全等。本标准都做了相应的规定。

6.11. 施工与调试

施工是保证修复工程建设的重要环节。本标准规定了工程施工执行标准、使用设备、材料、器件与国家相关标准和产品质量验证文件等的符合性要求。

建构筑物基础设计与建设应按照GB 50007及JGJ 79的有关规定执行。

工程建设中使用的材料与配件如：管道，鼓风机，阀门，罐体等应就近取材，减少成本，其设计选型均应符合国家及行业技术规范的相关要求。修复工程的设计、施工、验收、运行除符合本规范规定外，还应遵守国家现行的有关法律法规、标准和行业规范的规定。

在系统正式满负荷运行前，需要对系统进行调试。其主要目的在于：1) 现场进行所有设备性能的整体联动试车，确保设备符合设计要求；2) 从小风量工况下开始运行，通过土壤气监测反馈的氧气浓度，逐步增加系统的抽气量，以确定最经济抽气风量，确保在堆内维持设定的氧气浓度，同时避免一开始就在大风量工况下运行导致堆体内形成气体流动的优先路径，产生气流短路现象，最终造成堆体内氧气浓度无法均匀分布，影响系统的整体去除效果。调试过程可利用设置的土壤气监测系统，主要监测土壤气中氧气、二氧化碳含量，采用便携设备现场进行即时监测，频率为每天1次。其中通过氧气浓度含量变化及其在堆土内的分布，可以实时调整风机抽气量、调节阀开启度、抽气管间距等，以确保堆内氧气分布均匀、氧气含量足以维持微生物好氧生长条件。通过二氧化碳浓度的变化，可以间接了解堆内土壤中微生物活性的变化。

6.12. 运行与维护

运行达标是修复工程的目的，维护和管理是保障系统长期正常运转的关键。

本标准规定了在工程营运、运行记录、指标监控、规章制度、岗位操作规程、维护保养、未达标时工程措施与管理等方面的内容。

堆体拆除前，应开展修复效果评估，效果评估总体上满足HJ 25.5中6.1.2.3.3和7.1.2的技术要求，土壤采样点数量和布置位置，应结合运行过程堆体不同区域抽气系统废气中污染物浓度变化、堆体土壤气中各指标含量变化及土壤监测结果确定，应重点设置在生物堆体底部、中间以及抽气支管之间位置等修复薄弱区域。

当修复工程出现紧急事故时，应立即采取相应措施进行处理，尽可能地降低事故影响，

包括对主体工程运行安全、人员伤亡、财产损失和环境破坏等，事故处理时应做好记录、分析原因，防止同类事故重复发生。

7. 标准实施的环境效益与技术经济分析

7.1. 环境和社会效益

根据广泛的调研和工程实践经验表明，本标准能够指导易降解有机污染物污染土壤的修复工程，经修复后的土壤满足修复标准，可进行再利用。

本标准的发布，有利于推进污染土壤的修复工作，有利于保护自然资源和提高资源利用率，利于真正规范和进一步推进我国污染土壤的治理工作，有利于突破土壤修复后再利用行业发展的环境制约，有利于对土壤环境污染的有效治理和监督管理，可实现经济、社会和环境效益的“三同时”，促进社会和谐发展。

7.2. 技术经济分析

通过大量的运行实践与《污染场地修复技术目录（第一批）》（2014年），在异位修复技术中，生物堆技术修复成本较低，通常其处理费用为300~400 元/m³，特定污染场地由于其污染物种类、处理土方量、土壤预处理和后处理方法以及尾气收集处理需求等各不相同，因此使用生物堆技术进行修复的成本差异较大，一般地，单位体积土壤的处理费用随着每一堆体处理次数的增加而减少。

8. 本标准的实施建议

（1）建议各级环境保护部门及相关监督管理部门在污染场地修复项目管理和日常环境监督管理等工作中积极采用本技术规范，以加强对污染地块运行的监管，同时建议其他类型的土壤处理工程也可参考执行。

（2）我国污染地块的整治工作，关系到国计民生而且目前形势依然严峻，特别是环保标准的提高，土地资源匮乏情况下。鉴于此，建议尽快将本标准发布实施。

（3）本标准的实施应该与生态环境部颁布的《建设用地土壤污染状况调查 技术导则》（HJ 25.1-2019）、《建设用地土壤污染风险管控和修复 监测技术导则》（HJ 25.2-2019）、《建设用地土壤污染风险评估技术导则》（HJ 25.3-2019）、《建设用地土壤修复技术导则》（HJ 25.4-2019）、《污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则》（HJ 25.5-2018）、

《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》（HJ 25.6-2019）等污染地块相关标准相配套。

（4）本标准为首次制订，随着经济的发展和技术的进步，以及对环保技术研究的不断深入及实践经验的积累，标准的内容应不断得到完善、拓展、深入和更新，以适应环境标准制修订工作的要求，使其实用性和可操作性与时俱进，不断满足环境管理和地块修复工程建设需要。