

《城市固体废物填埋场地下水污染风险管控与
原位修复技术指南》（征求意见稿）

编制说明

《城市固体废物填埋场地下水污染风险管控与原位修复技术指南》编制组

二〇二三年二月

目 录

1 项目背景	4
1.1 任务来源.....	4
1.2 工作过程.....	4
1.2.1 成立编制组，制定工作计划.....	4
1.2.2 提交立项申请.....	4
1.2.3 标准初稿起草.....	4
1.2.4 标准规范初审会.....	4
1.2.5 征求意见稿咨询会.....	5
2 国内外相关规范指南	6
2.1 主要国家、地区相关规范指南.....	6
2.2 国内相关规范指南.....	7
3 标准制定的必要性	8
4 标准制定的原则与技术路线	9
4.1 标准制定的原则.....	9
4.2 标准制定的技术路线.....	9
5 标准主要内容条文说明	10
5.1 适用范围.....	10
5.2 规范性引用文件.....	10
5.3 术语和定义.....	10
5.3.1 地下水污染风险管控.....	10
5.3.2 地下水原位修复.....	10
5.3.3 原位曝气.....	10
5.3.4 微纳米气泡液曝气.....	10
5.3.5 井群.....	11
5.3.6 脉冲注射.....	11
5.3.7 垂直阻隔.....	11
5.3.8 可渗透反应墙.....	11
5.3.9 活性填料.....	11
5.3.10 反应容量.....	12
5.4 总体要求.....	12
5.5 场地信息收集与分析.....	12
5.6 技术筛选及组合设计.....	13
5.6.1 技术初步筛选.....	13
5.6.2 技术可行性分析.....	13
5.6.3 技术组合设计.....	13
5.7 技术方案设计.....	13
5.7.1 原位曝气技术.....	13
5.7.2 可渗透反应墙技术.....	15
5.7.3 垂直阻隔技术.....	16
5.8 施工建设.....	16
5.8.1 原位曝气技术.....	16

5.8.2 可渗透反应墙技术.....	16
5.8.3 垂直阻隔技术.....	17
5.9 运行处置.....	17
5.9.1 原位曝气技术.....	17
5.9.2 可渗透反应墙技术.....	17
5.9.3 垂直阻隔技术.....	17
5.10 效果评估.....	18
5.10.1 原位曝气技术.....	18
5.10.2 可渗透反应墙技术.....	18
5.10.3 垂直阻隔技术.....	18
5.11 后期监管.....	18
5.11.1 原位曝气技术.....	18
5.11.2 可渗透反应墙技术.....	18
5.11.3 垂直阻隔技术.....	18
5.12 安全管理和二次污染防控措施.....	19
5.13 附录.....	19
6 标准实施建议	19
7 其它需要说明的事项	19

1 项目背景

1.1 任务来源

本文件来源于国家重点研发计划“场地土壤污染成因与治理技术重大专项固体废物填埋场地土壤污染风险管控与净化技术”项目中的“平原型填埋场土壤与地下水污染高效协同修复技术”课题（课题编号：2018YFC1802305）和《山谷型填埋场减压集流-高渗透反应墙协同净化受污染地下水技术》课题（课题编号：2018YFC1802306）任务要求。

细粒土层中微纳米气泡曝气强化溶解氧传质及降解有机污染物。填埋场地污染物多赋存于厌氧环境，通过向地下注氧，激发好氧微生物活性，实现有机污染物降解去除是此类场地最经济有效的修复方式。传统直接采用空气注入地下水原位曝气技术，所产生的气泡尺寸大、在地下滞留时间短，修复效率比较低。近几年微纳米气泡曝气方法因其在地下水中滞留时间长，且传质效率高而受到高度的关注，该技术特别有利于细粒土层中有机污染物的氧化和生物降解。如何在细粒土层中实现微纳米气泡强化溶解氧传质是填埋场污染地下水修复需解决的重点问题。

山谷型填埋场水力梯度大、地下水流速快、易向周边扩散、反应墙过水断面大，导致高成本低效率。通过减压集流的方法研究和设计，利用水力控制条件改变地下水流向，形成集水汇流区，通过布水设施将水流导向反应墙；在垂直水流的断面布置高渗透反应墙，使上游汇水流经墙体，并匹配水力及理化反应过程，通过多层填料高效去除地下水中的复合污染物，削减其向下游的迁移量，形成高效率、长寿命的反应墙风险管控与原位修复技术。

1.2 工作过程

标准编制组主要开展了以下调查和研究工作：

1.2.1 成立编制组，制定工作计划

2022年2月，课题承担单位中节能大地（杭州）环境修复有限公司和浙江大学在课题形成相关成果的同时组成标准编制组和工作团队，由中节能大地（杭州）环境修复有限公司和浙江大学为主编单位，东南大学、清华大学为参编单位。其中，中节能大地（杭州）环境修复有限公司和浙江大学主要负责标准文本编制、总体思路把握，东南大学和清华大学提供补充性的研究数据与实践经验。

1.2.2 提交立项申请

2022年5月，中节能大地（杭州）环境修复有限公司向中国环境科学学会申请《生活垃圾填埋场污染地下水风险管控与原位修复技术指南》（以下简称“指南”）立项，并填写了《中国环境科学学会标准制修订立项申请书》和申报说明。

1.2.3 标准初稿起草

在前期调研和研讨的基础上，2022年7月，标准编制组起草完成了指南初稿，并提交中国环境科学学会，获得了初步认可。

1.2.4 标准规范初审会

2022年7月21日，中国环境科学学会组织召开指南团体标准立项评审会。会议由中国环境科学学会主持，“固体废物填埋场地土壤污染风险管控与净化技术”相关项目和课题负责人、相关标准规范的研究骨干出席了会议。与会专家充分肯定了指南出台的必要性，指南顺利通过专家组审查，成功在环境科学学会团体标准中立项。

会后，根据专家意见，编制组对指南初稿进行了逐条修改和完善，形成指南征求意见稿。

1.2.5 征求意见稿咨询会

2023年1月13日，中国环境科学学会组织召开指南团体标准专家会。会议由中国环境科学学会主持，“固体废物填埋场地土壤污染风险管控与净化技术”相关项目和课题负责人、相关标准规范的研究骨干出席了会议。会上专家组及中国环境科学学会老师对指南征求意见稿提出了很多宝贵的建议和意见。

会后，根据各位专家和老师的建议和意见，编制组对指南征求意见稿及编制说明进行了细致的修改和完善。

2 国内外相关规范指南

2.1 主要国家、地区相关规范指南

美国在1974年的安全饮用水法案中规定了饮用水中污染物的最大浓度水平(MCLs)以及最大浓度水平目标(MCLGs)，该标准是美国地表水和地下水保护的基础。1998年，美国环保署发布了《Guidance on remedial actions for contaminated Ground Water superfund water at superfund sites》，介绍了地下水修复的法律和政策框架，确定地下水修复范围以及清理水平、修复技术、修复评价等原则。但美国联邦并没有专门针对地下水制定统一的环境质量标准。而是在超级基金场地中，制定了一系列规范和标准。其中，风险评价导则中给出了基于风险的计算修复目标值的方法，这也成为后来很多国家基于风险计算筛选值或目标值的基础。比如，2005年，美国北卡罗来纳州环保局发布了《Guidelines for establishing remediation goals at RCRA hazardous waste sites》，其作为地下水修复目标确定、评价及监测的指南，介绍了RCRA废弃物场址修复目标建立的方法。美国EPA2014最新地下水修复技术指南指出为了有效开展地下水修复项目，控制修复年限，地下水修复的实施策略的制定是关键。整个策略的制定及项目实施过程包括初期决策备忘、修复策略选择、场地施工与评估、成果验收及项目竣工五个主要步骤。初期决策决定了整个修复工程的趋势，因为该据测基于待修复污染物种类、潜在污染区域以及修复目标，决定了后续的项目实施步骤。而后续的施工评估与验收阶段又反过来指导和修正初期的决策，使整个工程能达到修复目标。

欧盟环境委员会统一制定水环境相关的法律、标准。欧洲的环境法律中有场地修复的内容，但并没有给出有约束力的标准。《欧盟水框架指令》要求所有欧盟成员国以及准备加入欧盟的国家都必须采用统一的水质标准。Directive 2006/118/EC 的附件中包括了一些欧洲的环境质量标准，包括地下水中硝酸盐和农药中活性物质的标准。由于地下水的化学成分因地区不同而有差异，为达到良好水质的要求，欧洲委员会要求各成员国确立污染物的阈值。地下水指令中给出了成员国在确定阈值时需要考虑的一些污染物和指标的列表，包括砷、铬、铅、汞、氨、氯化物、硫酸盐、三氯乙烯、四氯乙烯，以及阈值确定的指南。比如，2004年，荷兰发布了《Soil and Groundwater Remediation criteria》，具体规定了土壤和地下水的修复标准。

澳大利亚和新西兰1992年共同制定了改善水质的国家水质管理策略(NWQMS)。澳大利亚的《Guidelines for the Assessment and Remediation of GW Contamination》中规定，要采取修复措施，降低对人体健康的影响和环境风险。如果地下水污染在现在和可预见的将来对人体健康和环境没有风险，那地下水的修复措施将不同于居民区和会影响人类健康的地下水污染情况。

日本地下水污染防治相关法律法规较多，主要有《水质污浊防止法》、《土壤污染对策法》、《土壤污染对策法施行令》、《土壤污染对策法施行规则》等。《水质污浊防止法》是1970年（昭和四十五年）公布施行，其制订目的是为管制工厂及事业排放水，从而防止公共水域及地下水污染。该法主要在防止污染物渗入地下水方面制定相关规定、防治措施及罚

则：《土壤污染对策法》于2002年5月29日公布，2003年2月15日起正式施行。该法以保护国民健康为目的，涵盖了土壤污染状况的评估制度、防止土壤污染及地下水污染对人体健康造成损害的措施和土壤（涵盖地下水）污染防治措施的整体规划等内容；《土壤污染对策法施行令》和《土壤污染对策法施行规则》都是对《土壤污染对策法》的补充。近年来，很多地方自治体，也独立制定地下水污染防治相关条例或纲要，要求事业者等进行地下水污染调查。日本同时配套出台了土壤与地下水污染防治相关标准、指南等规范性文件，如《地下水调查作业规程》、《土壤环境基准》、《地下水环境基准》等。《地下水调查作业规程》明确了地下水水位调查相关工作程序和方法；《土壤环境基准》指出了25种特定有毒有害物质；《地下水环境基准》规定了28项指标参考值和测量方法。

2.2 国内相关规范指南

我国地下水污染形势日益严峻，地下水原位修复是环境岩土工程领域的重要研究课题。目前，我国地下水污染修复可参考的标准规范有《地下水质量标准》、《地下水污染（防控）修复指南》，但前者制定时间久远，污染物类别较少，不能满足目前地下水污染物种类繁多的现状，难以支撑修复目标确定。如目前地下水中大量检出的多环芳烃、总石油烃、MTBE等有机组分，都没有规定浓度限值，难以制定修复目标。后者为部门指导性规范，约束力较弱。

2022年5月，生态环境部颁布了《地下水污染可渗透反应格栅技术指南（试行）》。该指南主要针对工业退役场地的地下水治理。填埋场地下水污染特征与工业退役场地相差较大，因而该指南对填埋场地下水污染风险管控与原位修复的适用性不足。

3 标准制定的必要性

生活垃圾填埋场垃圾成分复杂、有机质含量高，在其自身分解、发酵以及雨水淋滤等作用下产生的渗滤液具有复合污染特点，特征污染物包含化学需氧量（COD）、氨氮和部分重金属。渗滤液流动缓慢、渗漏持续时间长，会成为周边土壤和地下水的集中污染源，对包气带和饱和带均会造成污染。地下水一旦受其污染就很难恢复，威胁周边城市安全供水，甚至会造成不堪设想的后果。国内外有关垃圾渗滤液污染地下水的事故屡有发生，例如，我国兰州东盆地雁滩水源地因垃圾渗滤液的污染而无法再利用，澳门与珠海交界处的茂盛围因澳门垃圾渗滤液污染，导致当地河流鱼虾绝迹、农田失收等严重后果。

依托国家重点研发计划“场地土壤污染成因与治理技术”重点专项2018年度项目《固体废物填埋场地土壤污染风险管控与净化技术》下设课题5《平原型填埋场土壤与地下水污染高效协同修复技术》和课题6《山谷型填埋场减压集流-高渗透反应墙协同净化受污染地下水技术》，开展了相关典型填埋场周边污染土壤与地下水风险管控与原位修复技术的研究。为保护生态环境，保障人体健康，实现填埋场周边地下水的风险管控和有效修复，根据《中华人民共和国环境保护法》、《中华人民共和国水污染防治法》和《中华人民共和国土壤污染防治法》，中节能大地（杭州）环境修复有限公司、浙江大学、东南大学和清华大学联合起草编制本技术指南。

目前，国内工业污染场地环境风险管控与修复领域的相关标准规范指南已基本形成体系，但垃圾填埋场污染地下水风险管控和修复领域的技术标准仍较为匮乏。填埋场周边地下水主要受垃圾渗滤液的污染，其污染特点与工业污染场地有所差异，复合污染物COD、氨氮等的浓度依填埋场使用年限而有所不同，简单粗暴地参照工业污染场地治理技术，修复成本较高、适用性较差。垃圾填埋场在城乡建设早期发挥着一定的作用，但随着社会的发展和城市的不断扩张，其环境问题越来越突出。同时，随着我国环境管理要求的逐步提升，环保督察工作的持续展开，填埋场渗漏造成周边地下水污染的问题被越来越多的暴露。国家在十三五、十四五期间出台相关政策，要求对填埋场污染开展整治。在这个背景下，随着各地对垃圾填埋场管理工作的日渐重视和逐步深入，亟需出台相关的填埋场污染地下水风险管控和修复技术指南。

本指南成果可为国内生活垃圾卫生填埋场和简易填埋场周边地下水污染治理工程提供技术支撑，显著改善填埋场周边地下水环境质量，促进城市和谐健康发展，社会、环境和经济效益显著。

4 标准制定的原则与技术路线

4.1 标准制定的原则

(1) 规范性原则

采取程序化、系统化的工作流程和技术要求，规范生活垃圾填埋场污染地下水原位风险管控与修复技术的筛选，原位曝气技术与、可渗透反应墙技术和垂直阻隔技术的方案设计、工程施工与建设、运行状况监测、效果评估、工程关闭等。

(2) 可行性原则

基于生活垃圾填埋场污染地块水文地质条件、环境敏感性、地下水使用功能、污染物特征、程度及范围，合理选择原位风险管控与修复技术，确保原位曝气技术与PRB技术可行，设计经济、合理的工程及施工方案。

(3) 安全性原则

原位风险管控与修复技术的方案制定、工程设计与施工过程中要确保安全，防止对施工人员、周边人群健康和生态环境产生危害及二次污染。

4.2 标准制定的技术路线

本标准首先对目标填埋场及周边地下水需要调查收集的信息及要求进行说明，包括填埋场建设的环评报告、污染调查报告、风险评估报告等资料，从中获得填埋场范围、场地工程地质、水文地质、土壤与地下水污染情况、周边环境敏感点、治理需求等信息，分析垃圾填埋场周边污染地下水的现状环境风险、潜在社会影响、场地开发经济价值等，确定是否需要进行治理。

接着，从技术可行性、经济性、安全性等角度对填埋场地下水的风险管控与原位修复进行分析，确定采用风险管控还是修复模式，并进行技术组合设计、试验确定工艺参数，从而完成治理技术的筛选。

然后，针对填埋场地下水的污染特点，选取了适用的原位曝气、可渗透反应墙和垂直阻隔技术，对技术的方案设计、施工建设、运行处置、效果监测与评估、后期监管、工程关闭等各阶段工作的要求及注意事项进行了较为详细地介绍，为相关主管部门、业主及施工单位等提供依据和参考。

最后，针对填埋场地下水治理领域的特点，对工程实施过程中的的安全管理与二次污染防治进行了说明，以提高项目实施的安全与环保目标。

5 标准主要内容条文说明

5.1 适用范围

本指南对生活垃圾填埋场污染地下水风险管控与原位修复技术的工作原则、工作内容和工作流程进行了论述，并重点对课题研究成果相关的原位曝气技术、可渗透反应墙技术和垂直阻隔技术的应用作了较为详细的说明，适用于应对生活垃圾填埋场污染地下水的原位风险管控与修复技术筛选、方案设计、工程建设与运行管理，可作为选用原位曝气技术、可渗透反应墙技术和垂直阻隔技术的参考依据，并为其具体方案设计、工程施工与建设、运行状况监测、效果评估、后期监管和工程关闭提供参考。对于该指南未涉及的治理地下水的技术，可参考《污染地块地下水修复和风险管控技术导则》（HJ25.6-2019）及其它相关标准、规范和指南。

5.2 规范性引用文件

给出了本文件引用的有关文件，凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本文件。引用文件主要包括排污许可管理相关文件或标准、监测相关文件等。

5.3 术语和定义

就地下水污染风险管控、地下水原位修复、原位曝气、微纳米气泡液曝气、井群、脉冲注射、垂直阻隔、可渗透反应墙、活性填料、反应容量等术语进行了定义。

5.3.1 地下水污染风险管控

我国两万余座城市固体废物填埋场普遍存在渗滤液渗漏污染土壤和地下水的风险，严重威胁城市环境安全，主要包含渗滤液污染源强高、渗漏点埋藏深面积大、复合污染特征、填埋场地差异大等主要风险因素。应基于渗滤液在不同水文地质环境中扩散-演化模式及场地复合污染特征，研究渗滤液击穿多层屏障行为及长效阻控机制用于切断污染源，然后通过土壤与地下水污染物传质强化、转化及渗流调控方法，原位解决地下水污染问题，最终实现风险管控。

5.3.2 地下水原位修复

污染地下水的原位修复技术主要包括注气技术、生物修复技术、原位化学修复技术、电动力学修复技术等。分别利用空气吹脱、微生物作用、外投化学试剂、外加电场等方法，在不抽提地下水的情况下进行污染修复，通常具有成本较低、操作简单、主要针对低浓度地下水污染等特点。

5.3.3 原位曝气

地下水原位曝气技术最早于1985年在德国开始应用。一般指在一定压力条件下，将一定体积的压缩空气注入含水层中，通过污染物的挥发或生物降解等作用将污染物去除。本文件拓展了定义，将注射的压缩空气扩大为含氧的气体或液体。在一定的压力作用下，将含氧的气体或液体注入地下饱和层，以促进地下水中污染物的挥发或者生物降解。

5.3.4 微纳米气泡液曝气

液体中存在的微小气泡，当气泡直径在50 μm以下称作微米气泡，直径为100 nm以下的气泡称为纳米气泡。微纳米气泡是指气泡发生时直径在数十微米到数百纳米之间的气泡，这种气

泡是介于微米气泡和纳米气泡之间，具有常规气泡所不具备的物理与化学特性。微纳米气泡发生技术是20世纪90年代后期产生的，21世纪初在日本得到了蓬勃的发展。目前，微纳米气泡液在工厂化渔业养殖、无土栽培、有机废水处理、恶臭河道治理等领域有一定应用，但在地下水原位修复方面基本处于空白。本文件将其定义为富含直径在数百纳米到数十微米之间气泡的液体。

5.3.5 井群

地下水原位治理过程中主要涉及监测井、曝气井和抽提井三类。其中，根据筛管开孔位置可将监测井分为浅层监测井和深层监测井；根据注射介质可将曝气井分为注液井和注气井；根据抽提介质可将抽提井分为抽水井、抽气井、双相抽提井等。根据填埋场地质、水文地质、地下水污染状况等条件，将不同类型的井按一定的间距和空间布置进行排列组合，以满足原位曝气修复要求。本文件将其定义为按特定顺序排列以实现污染场地修复与监测的多种功能井的组合。

5.3.6 脉冲注射

对于渗透性较差的污染地层，持续地进行曝气，可能会引起地层开裂，导致注入介质通过裂缝直接从地表冒出或者沿注射井从地表冒出，不仅破坏注射井，而且影响修复效果。采用一定规律的间歇性注射，即脉冲注射，可将修复介质有序注入地下，促进其扩散、反应，实现较好的修复效率。本文件将其定义为一种可避免产生地层裂缝并对地下水具有搅拌作用以提高原位曝气效果的非连续性注射。

5.3.7 垂直阻隔

《土壤环境 词汇》（HJ 1231-2022）提到“阻隔”的定义为阻止气体、液或固污染物质从其产生地点向周围迁移扩散的一系列控制措施，如添加覆盖物，修建垂直或水平屏障；提到“垂直屏障”的定义为用于阻隔污染物的地下垂直结构。

5.3.8 可渗透反应墙

可渗透反应墙技术的修复原理是，在污染物场地下游垂直于地下水流方向设置渗透性反应墙，使含有污染物的地下水流经墙内的反应区，通过墙内填料与污染物发生物理化学反应，以使污染物达到修复浓度目标的目的。

5.3.9 活性填料

渗透性反应墙内，具有污染物去除效果的填充材料称为活性填料。渗透性反应墙技术的修复原理是由污染物和活性填料之间反应机制决定的。针对地下水不同的污染物，所有选用的修复填料不尽相同，其反应机理也不同。填料主要去除污染物的机理包括吸附、沉淀、氧化还原和生物降解等。填料的选用，应从其反应能力、稳定性、有效性、成本以及环境友好性等因素考虑。这些填料的理想特征有：对污染物修复能力强；活性保持时间长；取材容易且价格便宜；颗粒粒径不能太小，要均匀，不会造成孔隙堵塞（颗粒粒径最好是单峰型的）；不会对环境造成二次污染；施工方便（US EPA, 1998）。实验室研究中最常用的填料有零价铁（ZVI）、

活性炭和沸石等，其他活性材料有钢渣、陶粒、废橡胶、石灰石和麦饭石等；工程中最常用的是零价铁和沸石。

5.3.10 反应容量

反应容量是指吸附量是指单位面积的表层中所含溶质的物质的量与同量容积在溶液本体中所含溶质物质的量的差值。在渗透性反应墙中，污染地下水流经活性填料的时候会逐渐消耗填料的活性点位实现污染物的去除。除填料活性再生手段外，一般活性点位的消耗是不可逆的，单位质量的活性填料对特定污染物的吸附量有上限。活性填料的反应容量越大，能吸附的污染物总量越多，活性填料的设计厚度就应相应减小，反之活性填料的反应容量越小，能吸附的污染物总量越少，活性填料的设计厚度就应相应增加。

5.4 总体要求

指南编制应满足规范性、可行性、安全性要求。

指南建议的工作流程应包含场地信息收集与分析、技术筛选与组合设计、技术方案设计、施工建设、运行处置、效果评估、后期监管等七方面内容。

5.5 场地信息收集与分析

城市固体废物填埋场地下水具有典型复合污染特征。一般污染场地中，土壤污染轻，达到建设用地二类用地筛选值要求；而地下水污染较为严重，且随时间增加污染范围有扩大趋势。场地地下水中特征污染物主要包括有机物、无机盐、重金属、细菌类、异性生物有机化合物、新兴污染物等，其中填埋场龄期及所填垃圾成分对地下水中COD和氨氮的浓度影响显著；且随着距离污染源距离增大，地下水中的主要污染物成分显著变化。

我国填埋场地渗滤液与地下水复合污染分布特征

类别	主要污染物	特征	调研场地渗滤液浓度区间	调研场地高浓度区间	调研场地低浓度区间	V类地下水质量标准值
有机物	化学需氧量 COD、高锰酸盐指数等	水溶性好，可降解，可转化	COD: 193~10000 mg/L	COD: 40.2~1720 mg/L	COD: 10~40.2 mg/L	COD: 10 mg/L
无机盐	氨氮、氯化物、硝酸盐、硫酸盐等	对水泥基阻隔材料具有腐蚀作用	氨氮: 203~6391 mg/L	氨氮: 6.1~933 mg/L	氨氮: 1.5~6.1 mg/L	氨氮: 1.5 mg/L
重金属	铁、锰、锌、汞、镉、铅等	与工业固废混填场地含量高	铁: ≤36.6 mg/L	铁: 10.1~22.8 mg/L 锰: 1.1~38 mg/L 锌: 2.8~10 mg/L	铁: ≤10.1 mg/L 锰: ≤1.1 mg/L 锌: ≤2.8 mg/L	铁: 2.0 mg/L 锰: 1.5 mg/L 锌: 5.0 mg/L

对于地下水污染的填埋场，应充分分析污染地下水对周边生态环境、居民健康、社会稳定等影响，以及场地使用规划、潜在的开发利用价值等，作为是否进行治理的依据。如果需要进行治疗，则进一步分析填埋场水文地质、工程地质条件及污染特征，并进行风险评估，确定地下水特征污染因子风险管控值或修复值，为场地风险管控与修复技术筛选提供有力支撑。

5.6 技术筛选及组合设计

5.6.1 技术初步筛选

生活垃圾填埋场主要以生活垃圾为主，有时混杂一些建筑垃圾或者工业固废。因而，受垃圾渗滤液污染的地下水一般是氨氮、COD等指标较高，与工业退役场地地下水的特征污染因子有较大差别。因而，适用于生活垃圾填埋场污染地下水修复的技术相对较少，可供选择的技术列于文件附录A的表格中，实际应用时可以单独使用，也可以组合使用，视实际情况而定。

5.6.2 技术可行性分析

通过小试试验和中试试验考察风险管控或修复技术的可行性。小试试验在实验室内进行，对于阻隔技术，主要检测阻隔材料的渗透系数，通过理论计算确定阻隔材料的厚度等要求；对于修复技术，主要考察修复工艺参数对污染物浓度的影响及效果。中试试验可通过模拟装置或者在现场选取典型的区域，开展风险管控或修复技术的效果验证试验，同时还需要监测分析技术应用过程中存在的二次污染风险，确保在治理过程中不产生新的污染。

5.6.3 技术组合设计

对于一些具有典型特征的填埋场，采用单一技术治理效果可能达不到预期目标，可采用组合技术来提高综合治理效果。本指南附表B根据填埋场地形、地下水径流强度、污染扩散特征（扩散距离及浓度梯度）等参数将典型填埋场分为七种类型，并分别推荐了相应的组合技术供参考，在实施过程中应根据实际情况进行相应调整。

在技术可行的前提下，还需要根据中试实施情况、方案设计等技术实施、运维等费用进行综合分析，并与业主进行沟通，确保所采用的技术在成本方面能够获得业主的认可。需要注意的是，地下水治理过程中有许多不可预测的干扰因素，因而在成本计算时应留有充足的余量。

除了技术、经济可行性外，在技术筛选时还需要考虑技术实施的周期，对生态环境、水文地质的影响，以及技术实施后对场地后期使用的影响等，需要同业主、当地主管部门进行沟通商议。

5.7 技术方案设计

5.7.1 原位曝气技术

生活垃圾填埋场周边地下水一般为垃圾渗滤液污染，主要是COD、氨氮等指标较高，通过曝气处理提高地下水中的溶解氧含量，促进好氧微生物降解，同时科学合理设计抽水井，通过抽提同步降低地下水中的污染物含量。而对于挥发性有机污染物污染地下水，提高挥发性有机污染物和氧气在气液之间的传质速率可以提高地下水中污染物的去除率。通过气液界面的传质

速率在很大程度上取决于气液表面积（以及污染物的亨利常数），设计原位曝气系统背后的策略必须集中于气液最大化接触。根据具体污染物类型、污染特征和工期要求等影响因素，可以单独使用曝气技术或抽提技术，也可以进行联合使用。

为了优化传质速率，需要充分了解控制通道形成和传输的机制，空气（或其他气体）在压力下注入曝气井。空气进入曝气井后，只要能直接连通连续通道，那么其运动会受空气和水之间的压差控制。如果通道“断开”，产生的气泡移动由气相和水相之间的密度差（浮力）驱动。地层结构决定了空气通道的分布。层状沉积物区的空气通道密度一般较低，主要是由于上覆岩层限制了空气的横向扩散。如果空气通道彼此相距较远，就无法提供足够的空气，也无法有效去除污染物。如果小半径通道内的空气饱和度较低，界面面积就会很小，因而传质也很低。如果空气饱和度高、通道半径较大，即使界面面积很小，扩散距离仍然会比较大。只有在高空气饱和度和小通道半径的情况下，界面面积才会充足，扩散路径长度足够短，实现中等的传质速率。这个最佳值可以通过以下方法确定：在分步流量测试中，在不同阶段对地下水位以下不同位置进行中子探针或ERT测量或压力测试。

原位曝气技术设计主要是井群设计、曝气工艺设计、抽提工艺设计、废水处置工艺设计等。

井群设计主要针对曝气井、抽提井和监测井，包括井管材质、管径、开孔位置、井间距等。一般情况下，三类井都可以使用PVC-U材质的井管，为了避免井管的脱落和腐蚀，同口井需要使用相同的材质。当建井深度较大或者曝气压力较大，且地下水pH值为中性或偏碱性时，可以选用无缝钢管或不锈钢管，以提高井管强度。各类井的具体建设可以参照HJ 164。曝气井间距的设置基于污染地下水所处地层的渗透系数、水力梯度、以及在设计注射工艺参数的曝气影响半径。抽提井主要用于快速抽出高浓度的污染地下水，以及通过在地下形成水力梯度，提高曝气井影响半径，其间距没有严格的规定，可根据场地的实际情况进行设置，一般推荐间距为曝气井间距的2倍以上。监测井的位置设置参考HJ 25.6。

曝气工艺设计主要是曝气类型的选择及工艺参数的设计。对于空气曝气，首先是空压机/鼓风机的选择，目前可供选择的空压机/鼓风机种类较多，需要充分考虑空气流速、装置压损和运行环境。具体型号的选择主要依据中试过程中对注射流速和压力要求。原则是在设计压力下可以提供足够的空气，同时性能稳定，能够长期低损耗运行，而且运行成本较低，在项目可承受范围内。同时，空气曝气时还需要设计合理的空气流速和注射压力，可通过经验公式进行确定，具体在指南中已经说明。微纳米曝气设计主要气源选择，具体和污染物浓度、污染范围、修复周期和资金预期投入等因素相关，一般含氧量越高的气源其修复效果越佳。微纳米曝气运行时主要需要控制微纳米气泡液浓度、注射流量、注射压力和水温等因素，确保地下水中溶液氧含量达到较高水平，才能起到较好的曝气效果。同时，微纳米过程中水温会逐渐上升，当水温达到25℃以上时，水中的溶解氧含量会随着温度的上升也下降。因而需要在微纳米曝气过程中监测地下水温度，确保地下水处于适宜的温度。

注射压力的设计举例。

土壤比重为2.7，地下水比重1.0；水位深度5.5 m；筛管深度为9.1 m~10.7 m；孔隙率40%；土壤均质、松散。根据上述公式计算，

$$\text{土柱压力}=\text{土壤质量}/\text{m}^2=(9.1\text{ m})\times(2.7)\times(1-0.4)\times(9.8\text{ kN}/\text{m}^3)=144\text{ kN}/\text{m}^2$$

$$\text{水柱压力}=\text{地下水质量}/\text{m}^2=(9.1\text{ m}-5.5\text{ m})\times(0.4)\times(9.8\text{ kN}/\text{m}^3)=14\text{ kN}/\text{m}^2$$

$$\text{土水总重}/\text{m}^2=144+14=158\text{ kN}/\text{m}^2$$

$$\text{总超载压}=(158\text{ kN}/\text{m}^2)/1(\text{ kPa}/[\text{kN}/\text{m}^2])=158\text{ kPa}$$

抽提工艺设计主要涉及抽水工艺和抽气工艺。抽水主要用于快速降低含水层中的污染物含量，缩短修复周期，同时改变地下水水力梯度。通过对污染羽含水层进行抽提，可以抽出重金属等污染物，并扩大曝气影响半径，提高曝气处置效率。抽水速度与水文地质、工程地质、污染情况，以及项目废水处理能力相关。如果地下水污染较轻，则可以降低抽水速度，甚至不进行抽水。对于存在挥发性有机物或者挥发性无机物污染的地下水，地下水原位曝气过程中，这类污染物会扩散到包气带中，因而需要进行抽气处理，以控制并消除污染物的扩散。

废水处置可采用常规的工艺，具体可参照HJ 2015及相关工程技术规范执行。处置标准根据排水方式相关标准，排入环境水体时，设计出水水质与排入水域或海域类型有关，具体参照GB 8978；处置后废水排入污水管网时，设计出水水质应达到当地纳管排放标准，具体参照GB/T 31962。对于施工或运行过程中收集到的垃圾渗滤液，其排放标准参照GB 16889。

5.7.2 可渗透反应墙技术

可渗透反应墙的处置对象是受低浓度COD、氨氮、重金属等污染的地下水。根据现场调查64个填埋场统计得到，可渗透反应墙的适用条件一般要求地下水达西流速在0.01 m/d~1.81 m/d之间，入流COD浓度在0 mg/L~500 mg/L，氨氮浓度在0 mg/L~350 mg/L，重金属浓度在0 mg/L~60 mg/L。经过渗透性反应墙的修复，出流水质一般可以达到COD和氨氮去除率大于90%，重金属去除率大于70%，当源浓度本身较低时，出流水质可以达到地下水IV类标准。当地下水中COD浓度>500 mg/L，或氨氮浓度>350 mg/L时，建议采取抽提处置。

当地下水埋深较浅且污染羽规模较小时，直接用地下连续墙结构的可渗透反应墙捕获；当地下水埋深较浅但污染羽规模较大时，需要通过“导水门-漏斗”结构或其他结构手段引水至渗透性反应墙，实现地下水的减压集流，集中处理污染羽，控制因活性填料范围太大而引发的成本问题；当地下水埋深较深且含水层渗透性较好时，位于地表的可渗透反应墙捕集污染羽效率低，注入式结构可以解决深层污染修复问题；可渗透反应墙也可同原位曝气及抽提技术配合使用，通过原位曝气抽提技术降低污染浓度，减少PRB运行负荷。

反应墙填料配方设计上，必须尽可能满足反应容量大、反应速率快、渗透系数为原位土2~10倍、绿色无二次污染、来源广泛成本低廉、耐久性和稳定性好等要求。其中绿色无二次污染为必须要求。因为不同类型的污染物特征多样，适用的去除机理多样，建议填料类型一般也比较多，所以反应墙填料配方的确定必须经过批试验初筛和柱试验验证两个环节，以确定最优填料组合。

根据功能层分类，建议采用氧化层-沉淀层-吸附层的组合结构，依次去除COD、重金属及

其他污染物。若吸附层前置，会出现显著的生物膜淤堵，过度消耗沸石的兜底吸附能力；若沉淀层前置，则无法控制氧化层去除COD过程中可能产生的重金属催化剂溶出问题，导致总体出流水质中重金属浓度超标。

各功能层的厚度设计主要是在传统的最大吸附量法、反应半衰期法、阻滞因子法的基础上，结合地下水运移模拟软件Visual Modflow和地球化学模拟软件PHREEQC进一步优化细节参数，尽可能的优化可渗透反应墙的污染羽捕集效率以及净化效果。

5.7.3 垂直阻隔技术

垂直阻隔设计主要包括墙体材料设计与厚度设计。

垂直阻隔墙体材料主要有水泥、膨润土、HDPE膜等，每类材料有不同的规格和性能，不同类型材料的组合往往可以提高阻隔墙的综合性能。因而在墙体材料设计方面，需要充分考虑垂直阻隔使用场景，包括地层渗透系数、地下水位、水力梯度、地下水中的污染物成分和浓度、服役寿命要求、周边环境等多种因素。一般推荐使用膨润土或土-膨润土墙体。施工技术较为成熟的前提下，可设置膨润土-HDPE膜复合墙体。

垂直阻隔墙的厚度可参考理论计算，主要是计算阻隔墙的击穿时间，可采用阻隔墙外侧污染物浓度达到污染源位置处浓度10%作为阻隔墙的击穿标准。在条件允许情况下，需保守设计阻隔墙的厚度。

5.8 施工建设

5.8.1 原位曝气技术

原位曝气施工主要是井群建设、洗井等工作。在生活垃圾填埋场建井时，主要是避免在填埋场内建井，避免打穿填埋场防渗层，引起渗滤液泄露进一步污染地下水。在填埋堆体外围建井时，总体参照DZ/T 0148和DZ/T 0270执行。当地下存在双层及以上地下水时，如果只是上层污染，则在建井时应避免打穿不同层地下水的隔水层。洗井操作要求可参照DZ/T 0148执行。抽出的废水必须进行集中收集处置，不可随意倾倒。清洗不同井管时，必须使用洁净的清水对洗井工具进行清洗，避免交叉污染。抽水/注水/微水试验主要用于测定地层的渗透系数，每一层都需要进行测试。测试的监测井只在相应地层范围内开孔，避免跨地层进行开孔而影响测试结果。曝气技术涉及曝气系统、抽提装置和废水/废气装置，应提前进行设计和加工。现场具备条件后，应及时吊运至指定区域，并开展调试工作，确保各设备、仪表、阀门等可正常使用。

5.8.2 可渗透反应墙技术

可渗透反应墙施工主要是反应墙建设、导流墙建设、活性填料回填、监测系统建设等工作。反应墙的建设主要是浅基坑工程，具体参照《基坑工程技术标准》DGTJ08-61-2018实施。导流墙的建设主要是低渗透性系数阻隔的建设，具体参照5.9节垂直阻隔墙技术实施。活性填料回填主要控制均匀性指标和压实性指标，前者可有效避免优势流产生，后者防止开始过水后填料区出现显著沉降。因此建议分层回填并逐层夯实。夯实过程中应注意，活性炭等非砾石填料

硬度小，相对易破碎，应小心夯实，以保证填料区渗透系数与设计一致。监测系统建设主要参照USEPA于1998年发布的污染物修复PRB技术手册实施。

5.8.3 垂直阻隔技术

阻隔墙的建设主要包括导墙的建设、沟槽开挖、阻隔墙材料配制、阻隔墙材料回填。

导墙主要起引导作用，控制阻隔墙的范围和方位，同时防止槽口坍塌，因而对阻隔墙设置的成败起到较为重要的作用。一些生活垃圾填埋场地势复杂，设置导墙时需要采取一些工程措施改善作业条件。具体施工要求应符合GB 5104的相关规定。

开挖沟槽时，需要采取泥浆护壁的措施，避免沟槽壁出现塌方。当阻隔墙深度较浅，对泥浆性能要求较低时，可考虑使用阻隔墙体材料作为泥浆主要成分，从而降低成本，并解决泥浆的去向问题。

墙体材料的配制可采用不加水的干法形式，也可以采用加水的湿法形式。干法配制工艺简单，湿法配制工艺复杂，具体根据施工现场条件进行选择。

回填阻隔墙材料时，一般采取导管回填或从已形成的墙体材料斜面顶部滑入，不应将墙体材料从地表直接推入沟槽内的膨润土泥浆中，避免沟槽壁发生坍塌。遭遇极端天气时，应停止现场施工作业。对于性能不达标的墙体材料不能回填沟槽。完成阻隔墙施工后，需要对其顶部进行覆盖，避免阻隔墙体受到破坏或者缺水干裂。

5.9 运行处置

5.9.1 原位曝气技术

原位曝气系统的运行关键是保持不同曝气井之间的气流平衡，否则往往会向压力较小的曝气井一口或几口井方向移动，从而影响整体的曝气效果。可以设计气体均布器，连接区域内的所有曝气井，确保该区域地层的气流平衡。运行过程中需要做好运行记录，以备后期出现问题时溯源，同时在运行过程中需要对处置系统做好维护工作，避免出现故障，影响正常的施工作业。原位曝气施工运行过程中，需要对地下水质量进行不定期监测。运行过程中的监测指标和监测频次主要参考HJ 25.6。

5.9.2 可渗透反应墙技术

可渗透反应墙的运行关键是保持活性填料的渗透系数能有效的捕集原位土中的污染羽，以及活性填料本身在运行期限内保持活性。否则会降低可渗透反应墙的修复效果，甚至产生可能的环境副产物。运行过程中需要做好运行和监测记录，以备后期出现问题时溯源，同时在运行监测过程中需要对整个反应墙系统做好维护工作，避免因环境变化影响修复效果。可渗透反应墙运行监测主要包括监测指标和监测频次，具体可参考HJ 25.6。

5.9.3 垂直阻隔技术

垂直阻隔墙运行过程中的监测、记录和维护参考HJ25.6、HG/T 20715。主要监测墙体两侧监测井地下水水位、目标污染物浓度、地球物理化学参数信息（水温、pH、Eh）等，如果运行过程中墙体地下水下游一侧的目标污染物浓度出现反弹等情况，可能是阻隔墙已被污染物穿

透，或者墙体出现破损，需要采取措施进行补救。

5.10 效果评估

5.10.1 原位曝气技术

地下水中污染物浓度稳定达标且地下水流场达到稳定状态时，可进入修复效果评估阶段。地下水监测点布设、采样持续时间及频次、检测指标设置等可参考HJ25.6。采样、样品保存与运输可参照HJ/T 164执行。当特征污染物难以在施工周期内达到修复标准时，需要及时调整工艺或对方案进行重新评估。

5.10.2 可渗透反应墙技术

可渗透反应墙运行过程中，需要对地下水质量进行不定期监测。检测指标主要是特征污染物，以及地下水常规指标。具体监测点布设、采样持续时间及频次、检测指标等参考HJ 25.6。采样、样品保存与运输可参照HJ/T 164执行。当特征污染物难以在施工周期内达到修复标准时，需要及时调整工艺或对方案进行重新评估。

5.10.3 垂直阻隔技术

完成垂直阻隔墙设置后，需要及时对墙体结构、墙体外地下水水质进行采样检测，以考察阻隔墙的实施效果。一般需要在完成垂直阻隔墙设置后一年内开展，之后仍然需要持续一段时间的监测。可参考HJ 25.6布设监测点、确定采样时间、频次及检测指标。在评估实施效果时，主要需要注意阻隔墙下游本身是否存在污染源，如果不存在污染源时，随着时间的推移，阻隔墙下游监测井的水质应该是逐渐提高。

5.11 后期监管

5.11.1 原位曝气技术

对于填埋堆体存在的场地，后期仍然可能出现渗滤液泄露风险，从而再次引起填埋场周边地下水污染超标。因此，在原位曝气修复效果评估合格后，仍需对填埋场周边水质进行长期监测。采样点的布设、采样频次、采样方法及分析方法应符合GB/T 18772的有关规定。

5.11.2 可渗透反应墙技术

可渗透反应墙修复后，由于地下水水质的季节性变化以及可能的暴雨工况，可能在污染浓度较低的丰水期有原本吸附的污染物溶出，导致出流水质波动，因而需要对地下水进行长期的监测，监测频次及要求具体可参照HJ 25.6执行。当满足反应墙关闭条件后，需评估活性填料是否会产生二次污染，是否会影响原场地长期生态环境，从而决定就地保留或者开挖处理。

5.11.3 垂直阻隔技术

无论是柔性还是刚性阻隔墙体，均会在地质运动或者外力作用下遭到破坏，因此后期需要定期对墙体性能进行测试和评估。如果墙体性能达不到使用要求，需要进行修复或者重新设置。当填埋场堆体移除，阻隔墙上游地下水的污染物浓度已达到风险控制值，或者采用其他技术进行修复时，无需再对场地污染区进行风险管控，因而可关闭垂直阻隔墙工程。

5.12 安全管理和二次污染防治措施

现场安全隐患包括堆体滑坡、基坑坍塌、周边建筑物侧移、管线破坏、火灾爆炸、人员中毒、机械伤害、药剂伤害、交通事故等。施工作业过程中，现场扰动污染区产生的恶臭，可渗透反应墙设置过程中产生的药剂粉尘，原位曝气挥发性气体扩散等均可能对作业人员身体健康造成危害。现场应根据实际情况针对性制定安全管理制度，加强人员安全教育，并针对各类事故制定应急措施。

二次污染防治主要针对地下水治理过程中的废气、废水、固废、噪声等污染进行预防与控制。应根据填埋场地下水污染治理的行业特点和现场实际问题，设计针对性的工程措施。

5.13 附录

本文件附录均属于资料性附录，附录A提供了填埋场地下水风险管控与原位修复技术筛选条件，附录B提供了城市固体废物填埋场地下水污染风险管控与原位修复技术组合推荐表，附录C提供了原位气体曝气时的空压机/鼓风机类型选择依据。

6 标准实施建议

填埋场地下水的污染特点和治理技术与工业污染场地地下水有一定差异性，直接照搬工业污染场地地下水治理技术来治理填埋场污染地下水可能无法获取较好的效果，因而本指南对生活垃圾填埋场污染地下水风险管控与原位修复具有较好的参考价值。但是，目前国内在生活垃圾填埋场地下水治理方面的工程还比较少，参编单位相关经验也较为有限，因而建议在本指南实施过程中，还需持续广泛听取和收集各方面的意见和建议，并根据实际应用情况，对本指南进行不断的修订与完善，以满足环境治理的需要。

7 其它需要说明的事项

在指南立项评审会和征求意见稿咨询会中，专家组提出了许多宝贵建议和意见，编制组逐条梳理并认真对指南内容进行了相应的修改与完善。

立项评审会意见修改说明：对于专家组提到的针对城市固体废物填埋场地下水污染特征，梳理适用技术路线，筛选适用技术或组合的意见，编制组主要新增5.2.1填埋场地类型和6.3技术组合设计内容。对于专家组提到的加强与国家和行业相关标准的衔接的意见，编制组基于填埋场地的特征重点参考了《污染场地地下水修复和风险管控技术导则》（HJ 25.6）、《地下水污染可渗透反应格栅技术指南（试行）》等相关标准指南，避免技术或管理方面的冲突和矛盾。对于专家提到的第5章有关填埋场地信息不全，对渗滤液信息、地下水污染信息、周边敏感受体信息等进行了补充。对于专家提到的污染物的分类需强化，考虑新污染物类型的意见，编制组在第5章进行了补充。对于专家提到的一些过于详细的描述放到编制说明的意见，编制组主要对原位曝气技术的内容进行了精简。对于专家提到的第10章内容繁杂、相关性不强的意见，编制组紧扣填埋场地特点进行了内容精简。

征求意见稿咨询会修改说明：对于专家组提到的进一步梳理与其它导则的关联性，明确适用范围，优化技术路线的意见，编制组对规范性引用文件进行梳理，增加引用的规范，删减未引用的规范，相关章节对具体的引用内容也做了说明，对于指南使用范围，编制组将原先的单段改成了三段式，分别是规定了…适用于…不适用于…，明确了适用于“历史遗留或在运行的城市固体废物填埋场地下水污染的风险管控与原位修复工作…”，不适用于“岩溶含水层为主的填埋场地”，优化技术路线方面，根据地形分类、地下水径流强度、污染扩散特征（扩散距离及浓度梯度），将填埋场地分为7大类，并将相关内容放在场地信息收集与分析章节，作为风险评估的基础信息。对于专家组提到的进一步规范标准文本，完善编制说明的意见，编制组在调研和咨询相关领域专家的基础上，对文本进行了修改完善。对于专家提到的部分术语描述不够精准的意见，编制组参考了相关文件对一些术语进行了修改。对于专家提到的第5章信息不全，指标细化，编制组补充5.2.1填埋场类型，补充地下水污染指标和周边敏感受体等信息，将最后两节合并，并补充风险评估内容。对于专家提到的指南题目较大，实际只介绍了3项技术，其它技术也需要说明的意见，编制组基于附录A，对其他几项技术也在指南中进行了介绍。对于专家提到的7~9章的效果评估和后期监管建议合并，单独成章的意见，编制组进行了相应的调整。