

前 言

随着现代垃圾处理技术的进步和发展，卫生填埋场逐步演化为焚烧残渣、飞灰或者不可利用物等非原生垃圾的终端处置设施，同时具备极端情况下原生垃圾的应急处置和兜底处置功能，在城市生活垃圾处理体系和“韧性城市”建设中具有不可替代、不可或缺的作用。处理技术越进步，卫生填埋兜底保障就越重要，现代卫生填埋技术正向系统化、集成化、智能化、精准化、可控化方向发展，在技术储备和推广应用方面需要予以更多关注。

卫生填埋场由垃圾土、环境场地和设施构筑物共同组成，垃圾填埋过程可视为填埋场的二次建设过程，即垃圾土作为一种水、气、土三相耦合的特殊介质材料，继续在填埋场中和周围介质发生系列物理、化学、生物的综合反应，对填埋场环境和工程本身持续产生影响。垃圾填埋是一个动态变化的过程，垃圾成分、填埋作业条件、环境气象等因素都是动态变化的，垃圾填埋后还会发生生物降解等系列反应，即使在填埋场封场后这些反应都还会持续一段时间，这些反应和变化过程也会对填埋场运行管理带来次生影响，以及一系列的环境土工问题和环境安全风险。

立足环境工程和土木工程视野，对填埋场涉及的安全稳定、沉降变形、渗流扩散等典型环境土工和安全风险问题，从理论探索、试验分析到工程应用开展全链条研究和系统阐释，既是本书的出发点，也是一大特色。首先，根据垃圾土的组分、物理、生化和力学特性，对垃圾土的形成机理、生化稳定过程进行阐释，在此基础上建立了垃圾土本构模型和有限元分析模型。其次，针对垃圾填埋场比较典型的稳定、沉降、渗流扩散等环境土工问题，分析了垃圾土强度、渗沥液水位、接触面强度参数对填埋场稳定性的影响，建立了垃圾土沉降模型并分析了总沉降和不均匀沉降对填埋场设计的影响，提出了利用土工格栅加固提高稳定性和抵抗不均匀沉降的措施，根据垃圾土水力特性建立了填埋场渗流模型和渗沥液迁移扩散模型并进行了验证，对不同防渗结构污染防治效果进行了分析，提出了防渗系统的优化方案，介绍了防渗膜渗漏检测的有关方法。最后，结合垃圾填埋场扩建工程典型案例，提出了填埋场稳定、沉降、渗流扩散等环境安全风险防控的具体措施，并在工程实践中加以应用。

本书的出版不仅是对填埋场环境土工和环境安全风险的一次系统性总结，更是对我国环境岩土工程学科发展的有力推动。它既为工程设计、施工与管理人员提供了宝贵的理论指导与实用技术参考，也为相关领域的研究者展示了前沿问题的研究思路与方法。在全面推进城乡人居环境整治、加强固体废物综合治理的今天，本书的出版对于提升我国卫生填埋场建设与运营的科技水平、促进环境卫生事业的可持续发展、推动固废处理和环境岩土等相关交叉学科融合都具有重要的学术价值与现实意义。

本书凝聚了研究团队多年潜心研究和辛勤劳动成果，引用了一些试验研究报告和典型

工程案例，在撰写过程中得到了诸多同事及同行的悉心指导和无私帮助，在此对提供资料报告的单位和给予指导帮助的同志一并致以衷心的感谢！

限于作者水平，书中难免存在疏漏和不足之处，部分观点也仅是作者浅见，敬请读者见谅并不吝批评指正！

张乾飞

2026年6月

| 目 录 |

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 我国生活垃圾卫生填埋发展历程及展望	1
1.2 现代卫生填埋技术	7
1.3 卫生填埋场环境安全风险隐患	11
第 2 章 卫生填埋场典型环境土工问题	15
2.1 堆体稳定	15
2.2 垃圾沉降	22
2.3 渗漏扩散	25
第 3 章 生活垃圾组分及物理特性	29
3.1 新生垃圾组分特点	29
3.2 陈年垃圾组分特点	35
3.3 垃圾土形成机理	42
3.4 小结	45
第 4 章 垃圾土强度及变形特性	46
4.1 垃圾土强度特性	46
4.2 强度变化规律	49
4.3 强度参数影响因素	54
4.4 垃圾土本构模型	58
4.5 填埋场变形分析	61
4.6 小结	69
第 5 章 填埋场稳定性分析	71
5.1 填埋场稳定性问题	71
5.2 稳定性分析方法	74
5.3 扩建填埋场稳定性分析	76
5.4 渗沥液水位对稳定性的影响	81
5.5 新老垃圾堆体接触面的稳定性分析	86
5.6 小结	94
第 6 章 填埋场沉降分析	95
6.1 沉降机理	95
6.2 沉降模型	100
6.3 沉降计算参数	104

6.4	扩建填埋场沉降分析	113
6.5	小结	118
第7章	填埋场渗流扩散分析	119
7.1	填埋场水力特性	119
7.2	垃圾土饱和-非饱和渗流模型	124
7.3	渗沥液迁移扩散模型	127
7.4	扩建填埋场渗流扩散分析	133
7.5	小结	138
第8章	水平防渗衬垫系统优化	140
8.1	水平防渗衬垫系统类型	140
8.2	水平防渗衬垫渗漏率分析	142
8.3	水平防渗衬垫污染扩散分析	147
8.4	土工格栅加筋设计及应用	152
8.5	接触面防渗衬垫系统优化	159
8.6	小结	163
第9章	防渗膜渗漏检测	164
9.1	渗漏检测方法	164
9.2	双电极法及应用	168
9.3	高密度电阻率法及应用	171
9.4	小结	177
第10章	环境安全风险防控技术及应用	178
10.1	环境安全风险防控技术	178
10.2	渗沥液降水导排方案	187
10.3	老场垃圾坝及调节池改建	191
10.4	垂直防渗帷幕加固	196
10.5	水平防渗衬垫系统施工工艺	204
10.6	小结	206
参考文献		207

第 1 章 | 绪 论

1.1 我国生活垃圾卫生填埋发展历程及展望

1.1.1 我国生活垃圾卫生填埋的起步探索

城市生活垃圾是城市全生命周期生态系统的终端产物，近年来伴随着城市化进程的加速发展，城市生活垃圾产量呈现持续增长态势，城市生活垃圾的治理日益成为现代城市治理和生态文明建设的重点课题。我国生活垃圾处理发展历程和其他国家一样，都经历了从早期的简易填埋、粗放填埋，再到规范有序的卫生填埋为主，逐步过渡到源头分类后焚烧发电为主、生物处理和综合利用为辅、卫生填埋兜底的分类分质处理阶段。但无论采用何种处理模式，最终产生的不可利用物或残渣都需要进入填埋场进行末端处置，在无法实现“零填埋”的现实困境下，垃圾填埋场作为城市生活垃圾处理系统中末端消纳处置设施，在现代城市生活垃圾处理全生命周期系统中具有不可替代的作用，同时也是城市更新体系中建设“韧性城市”必须具备的应急保障性基础设施。

我国城市生活垃圾处理相对国外发达国家起步较晚，自 20 世纪 80 年代起一些大城市才逐步建立常态化的收运体系，城市生活垃圾处理才逐渐纳入城市治理的议事日程。最初的生活垃圾处理，缺乏规范有效的处理设施，只是将收集起来的垃圾集中运输到储存点，采取露天堆放、沟壑填埋等方式进行简易堆填或者临时堆放，不可避免地对填埋点周边区域环境造成如蚊蝇滋生、恶臭污染、水体污染、土壤侵蚀等环境问题。但就当时经济社会发展水平而言，将暴露在城市人群中的遍地垃圾收集后转运到远离人群、隔离条件相对较好的储存点集中堆放，变面上污染为集中控制，一定程度上大幅改善了城市人居环境，降低了城市生活垃圾的健康管理与环境防控风险，具有积极正面的环境效益，在当时对城市文明建设仍具有积极意义。

同一时期，许多城市对改善和控制简易填埋中存在的环境风险进行了有益探索，如采用局部覆盖、区域性雨水收集等方式减少或降低雨水对填埋区域的影响，进而减少垃圾渗沥液的产生，减轻水体和土壤污染等，为我国卫生填埋场的建设积累了宝贵经验。1988 年我国第一部卫生填埋技术标准 CJJ 17—1988 正式发布，标志着我国生活垃圾填埋处置进入了规范有序、有章可循的阶段，在我国生活垃圾卫生填埋进程中具有划时代的意义。

20 世纪 90 年代初，伴随着我国水利水电技术的发展，坝工技术被借鉴应用到填埋场建设中，在山区峡谷地带基于“独立水文地质单元”理念，以垂直防渗帷幕为主构建垃圾坝围挡形成填埋库容的填埋场应运而生，如杭州市天子岭垃圾填埋场、苏州市七子山垃圾

填埋场成为当时垂直防渗帷幕主导的山谷型填埋场代表，一定程度上代表了我国 20 世纪 90 年代初期卫生填埋技术的最新成就，对后来一段时期内山谷型填埋场的建设起到了示范引领作用。同期，一些平原地区的填埋场也借鉴山谷型填埋场理念，如上海市浦东黎明垃圾填埋场，在库区开挖后四周构建垂直防渗帷幕，在一定程度上减轻了填埋场渗沥液向四周渗漏扩散的问题，对平原地区垃圾卫生填埋处理是一种有益的尝试。

虽然垂直防渗帷幕一定程度上解决了渗沥液扩散问题，但从技术上存在先天不足，其基于“独立水文地质单元”的假设是理想状态，真正完全符合“独立水文地质单元”的地质条件并不多，当这一条件不成立或不完全成立时，填埋场或多或少存在绕过防渗帷幕向填埋场底部或山谷两侧渗漏的风险，同时由于缺乏有效可控的雨污分流和地下水导排措施，雨季大量雨水和周边地下水均会进入库区产生大量渗沥液，严重时甚至存在渗沥液溢库风险。

1.1.2 我国生活垃圾卫生填埋的规范发展

进入 20 世纪 90 年代，我国卫生填埋技术在杭州、上海、北京、深圳、广州等地得到了广泛运用^[1]，一批超大型填埋场基础设施的建设运营，为我国生活垃圾卫生填埋处置积累了丰富的经验。我国生活垃圾卫生填埋技术进入了规范发展的快车道，大致经历了经验积累、成熟发展、系统治理三个阶段。

第一阶段，经验积累阶段。从 20 世纪 90 年代初期到 21 世纪初期，以 1997 年颁布实施的《生活垃圾填埋污染控制标准》（GB 16889—1997）为标志，我国生活垃圾填埋技术对填埋场选址、防渗与衬垫设计及其性能指标、渗沥液收集与处理、填埋气导排与控制、封场覆盖及修复、环境监测、日常运营监管等均提出明确要求。在 20 世纪 90 年代末期，以 HDPE 膜防渗为主导的水平防渗技术开始在我国逐步应用，1997 年我国建成第一个采用 HDPE 膜全场水平防渗的现代卫生填埋场——深圳市下坪固体废弃物填埋场一期工程并投入使用^[1]，标志着我国生活垃圾填埋技术逐步走向与国际接轨的新阶段。

第二阶段，成熟发展阶段。从 21 世纪初期到 2015 年左右，大致经历了从“十五”规划到“十二五”规划阶段，我国从大中小城市再到县城全面开始建设垃圾卫生填埋场的阶段，这一阶段广泛消化吸收国际先进的 HDPE 膜水平防渗系统理念，结合国内平原型、山区峡谷型等不同地形地貌地质条件创新提出复合衬垫防渗、双层防渗、垂直+水平组合防渗理念，并广泛应用于工程中。这一时期重点攻克了单一 HDPE 膜防渗技术容易发生穿刺渗漏等带来的技术难题，在填埋场渗沥液收集、填埋气体导排、渗沥液水位控制、地下水控制、环境污染监测、运营维护管理等方面开展了大量技术攻关和案例运用，相关研究成果逐步转化为国家和行业标准规范。以 2008 年修订实施的《生活垃圾填埋污染控制标准》（GB 16889—2008）为标志，我国生活垃圾卫生填埋技术在工程设计、建设、运营管理、污染控制、环境监测、生态修复和产品应用等方面“四梁八柱”标准体系基本形成（表 1-1），并在实施过程中逐步完善，填埋技术与管理日趋成熟。GB 16889—2008 对生活垃圾卫生填埋处理提出了更高的要求，一方面要求渗滤液必须经严格处理达到标准后才能排放，另一方面允许焚烧飞灰经固化稳定达到一定标准后进入填埋场分区填埋，这些要求都

对填埋场的日常运营维护和监督管理提出了更多挑战。

表 1-1 我国生活垃圾填埋处理相关技术标准^[1]

标准用途	标准名称	标准编号
设计建设	城市生活垃圾卫生填埋技术规范	CJJ 17—2001/2004
	生活垃圾卫生填埋场防渗系统工程技术规范	CJJ 113—2007
	生活垃圾填埋场填埋气体收集处理及利用工程技术规范	CJJ 133—2009
	生活垃圾卫生填埋处理工程项目建设标准	建标 124—2009
	生活垃圾填埋场封场工程项目建设标准	建标 140—2010
	生活垃圾渗沥液处理技术规范	CJJ /T 150—2010
	生活垃圾填埋场渗滤液处理工程技术规范（试行）	HJ 564—2010
	生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范	CJJ 176—2012
	生活垃圾卫生填埋处理技术规范	GB 50869—2013
运营维护	生活垃圾卫生填埋场运行维护技术规程	CJJ 93—2003/2011
	生活垃圾卫生填埋场封场技术规程	CJJ 112—2007
	生活垃圾卫生填埋气体收集处理及利用工程运行维护技术规程	CJJ 175—2012
	生活垃圾填埋场防渗土工膜渗漏破损探测技术规程	CJJ/T 214—2016
污染控制及 监督管理	生活垃圾填埋场环境监测技术要求	GB/T 18772—2002/2008
	生活垃圾填埋场无害化评价标准	CJJ/T 107—2005
	生活垃圾填埋场污染控制标准	GB 16889—2008
	生活垃圾填埋场降解治理的监测与检测	GB/T 23857—2009
	生活垃圾填埋场稳定化场地利用技术要求	GB/T 25179—2010
	生活垃圾卫生填埋场运行监管标准	CJJ/T 213—2016
产品标准	垃圾填埋场高密度聚乙烯土工膜	CJ/T 234—2006
	垃圾填埋场用土工网垫	CJ/T 436—2013
	垃圾填埋场用土工滤网	CJ/T 437—2013
	垃圾填埋场用土工排水网	CJ/T 452—2014

第三阶段，系统治理阶段。从 2015 年左右至今，大致经历了从“十二五”规划末到“十四五”规划阶段，2012 年颁布实施的《生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范》（CJJ 176—2012），标志着我国生活垃圾卫生填埋处理从环境卫生治理到环境岩土系统治理的综合转变，国内大量学者围绕填埋场固、液、气多相耦合及环境土力学机理开展了大量研究，聚焦填埋场稳定、渗流、变形、气体迁移等突出环境岩土问题建立了相应的理论模型、进行了实验试验、数值模拟、监测检测，提出了工程治理措施^[2-16]。在此期间，我国生活垃圾卫生填埋相关学科研究也取得了丰硕成果，涉及环境科学、环境工程、环境卫生工程、岩土工程、地质环境学、环境岩土力学、环境水力学等相关交叉学科，得到了广泛发展，以“填埋”为主题，关键词涵盖渗滤液、填埋气、地下水、环境岩土、飞灰、场地利用、生态修复、堆体稳定、不均匀沉降、存量治理、垃圾开挖等领域，有力支撑了我国

生活垃圾卫生填埋技术的提质升级，促进了我国卫生填埋事业迈入世界先进水平前列。随着填埋学科研究的不断深入和领域拓展，填埋场相关规范标准也进一步迭代升级（表 1-2），部分行业标准 CJJ 113—2007、CJJ 176—2012 上升为国家标准 GB/T 51403—2021、GB/T 51451—2025，部分条文变更为强制性条文，对生活垃圾卫生填埋场的建设运营和监督管理提出了更高要求。

表 1-2 我国生活垃圾填埋处理相关技术标准更新

标准用途	标准名称	标准编号
设计建设	环境卫生技术规范	GB 51260—2017
	生活垃圾处理处置工程项目规范（修编）	GB 55012—2021
	生活垃圾卫生填埋场防渗系统工程技术标准（修编）	GB/T 51403—2021
	生活垃圾渗沥液处理技术标准（修编）	CJJ/T 150—2023
	生活垃圾卫生填埋处理岩土工程技术标准（修编）	GB/T 51451—2025
	生活垃圾卫生填埋处理技术标准（2025 年局部修订）	GB/T 50869—2013
运营维护	生活垃圾卫生填埋场封场技术规范（修编）	GB 51220—2017
	生活垃圾卫生填埋场填埋气体收集处理及利用工程技术标准（修编）	CJJ/T 133—2024
污染控制及 监督管理	生活垃圾卫生填埋场环境监测技术要求（修编）	GB/T 18772—2017
	生活垃圾填埋场无害化评价标准（修编）	CJJ/T 107—2019
	生活垃圾填埋场污染控制标准（修编）	GB 16889—2024
拟发布标准	生活垃圾填埋场生态修复技术标准	
	存量生活垃圾治理工程项目建设标准	
	生活垃圾填埋场开挖治理污染防治技术指南	

新修订的《生活垃圾填埋场污染控制标准》（GB 16889—2024）增加了渗滤液进入城镇污水处理厂合并处理路径，有效防范了生活垃圾填埋场渗滤液间接排放可能带来的次生环境风险。新修订的 GB/T 51451—2025 增加了“填埋场污染阻隔”技术要求，为填埋场生态修复提供了重要技术支撑。同时，随着焚烧技术的推广普及，原有垃圾填埋场的封场利用和存量垃圾治理、开挖治理等逐步提上议事日程，需要一些新的标准规范，如《生活垃圾填埋场生态修复技术标准》《存量生活垃圾治理工程项目建设标准》《生活垃圾填埋场开挖治理污染防治技术指南》正处于报批或者征求意见阶段，这些标准的实施将有利于垃圾填埋场的生态修复和存量垃圾治理决策、建设和管理水平的提高。

1.1.3 我国生活垃圾卫生填埋的前景展望

2017 年以来，我国大力推行生活垃圾源头分类和“无废城市”建设，生活垃圾卫生填埋量开始出现负增长，2019 年填埋处理量占比首次被焚烧发电处理量超越。截至 2023 年年底，我国城市和县城生活垃圾卫生填埋处理量占比已下降至 13%，日均处理规模约 28 万 t，仍在运营的卫生填埋设施缩减至 1200 余座^[1]。2021 年发布的《减污降碳协同增

效实施方案》指出要“减少有机垃圾填埋，加强生活垃圾填埋场垃圾渗滤液、恶臭和温室气体协同控制，推动垃圾填埋场填埋气收集和利用设施建设”，从而“推动固体废物污染防治协同控制”。“十四五”以来，受“双碳”政策和绿色能源政策的双向驱动，我国固废处理产业政策也相应进行了较大调整，焚烧发电技术越来越受到青睐并得到广泛应用，原生垃圾填埋量日益减少，填埋场逐步演化为焚烧残渣、飞灰或者不可利用物的终端处置设施，部分填埋场甚至面临着已填埋垃圾再次开挖利用的机遇与挑战，部分地方甚至盲目提出“零填埋”“去存量”“全开挖”“无填埋”等极端口号，给未来填埋技术的发展带来不确定性。当前，以垃圾焚烧发电为主、生物处理和综合利用为辅、卫生填埋兜底的生活垃圾分类处理技术格局已基本形成，填埋场的功能也逐步向应急保障、资源储存和碳储存设施转变。

卫生填埋场作为“韧性城市”建设中城市生活垃圾处理体系不可或缺的终端基础设施之一，具有应急保障和兜底处置的功能，一方面面临既有填埋处理设施的封场、生态修复、存量治理、风险隐患整治等，另一方面又面临着填埋库容消耗完毕后客观需要填埋处理设施的需求。截至2023年末，我国还有327个城市没有建设生活垃圾卫生填埋场^[1]，从保障城市安全运行角度出发，仍需统筹规划新建一批卫生填埋场；一些城市建成的卫生填埋场服务期已满，存在新建卫生填埋场或在已有填埋场基础上进行改扩建的实际需求。各地还需根据经济发展水平、交通运输条件、水文气象条件、城市管理水平等因素，因地制宜统筹谋划填埋处理设施的规划建设。同时，从单一填埋处理设施，转向区域内多种废物协同处理、物质能量循环、多种设施生态链接的循环经济产业园区或静脉园区，是城市固体废物园区化、集约化处理的现实路径。

由此来看，只要城市生活垃圾不能完全“吃干榨净”，卫生填埋在我国仍有一定的发展空间。展望未来，垃圾卫生填埋场作为垃圾处理系统不可或缺的终端处理设施之一，需要着力解决生态修复、存量治理、场地利用、风险管控等问题，才能有力保障我国垃圾处理事业健康有序发展。

现有填埋场的封场和生态修复是今后一段时期的工作重点，《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》《生活垃圾填埋场封场修复工程项目规范》等规范文件，明确提出对现有不达标填埋设施实施生态封场、污染治理与土地可持续利用，鼓励采取库容腾退、生态修复、景观营造等措施推动封场整治。“十五五”期间将系统摸排并整治填埋场环境污染隐患，对2024年年底停用的填埋场，原则上到2027年完成封场。对已经达到填埋设计标高、填埋区域不再利用的填埋场，在垃圾堆体稳定后应实施封场和生态修复，封场前应开展填埋场周边地下水、地表水、填埋气、大气环境调查，根据填埋区域垃圾堆体的面积、高度、形状、环境影响状况、安全性、既有设施情况、土地利用规划等因素综合考虑设计总体方案。对仍在运行使用的卫生填埋场，需要精打细算利用剩余库容，接纳符合国家相关标准要求的垃圾焚烧飞灰等入场填埋，并制定特殊情况下处理大量垃圾的应急预案，为“韧性城市”建设的基础设施应急响应作出贡献。

存量垃圾治理也是今后城镇生活垃圾治理工作的热点之一，《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》首次指出“存量填埋设施成为生态环境新的风险点”，以环境风险管控与服务功能提升为目标的存量垃圾填埋场整治，已成为卫生填埋事业转型发展

的重要战略方向。一方面，存量垃圾是可以再生利用的资源，通过开挖、筛分、分选可以分类利用；另一方面，存量垃圾尤其是不规范填埋处置的存量垃圾，对周边环境存在堆体失稳、渗漏污染、环境损害等不良环境影响，需要在治理过程中一并消除。目前，存量垃圾治理有就地封场处置和易地搬迁处理两类处理方式，具体采用哪种方式，需要根据场地现状、环境影响、利用价值等因素经风险评估和技术经济评估后综合确定。虽然易地搬迁处理是解决存量垃圾污染的有效手段，但在开挖、筛分、储存、转运过程中，垃圾土中的渗滤液、恶臭气体、重金属等均可能对周边大气、土壤和地下水产生二次污染，需严格做好开挖、储存、分选、筛分产物利用处置、运输等过程的污染防治，控制生活垃圾填埋场内渗滤液水位以及填埋气，采取除臭、降尘等措施，减少或消除开挖治理过程的二次污染。目前，各地生活垃圾填埋场开挖治理已从“被动封场”转向“主动开挖+环境控制+全量修复+资源化利用”。

场地利用是现有垃圾填埋场实现生态价值转换的重要途径，无论是封场修复还是存量治理，在治理环境污染隐患问题的同时，如何实现场地的最大化利用，取决于垃圾治理决策能力和管理水平。场地利用需要考虑经济利用价值和环境治理成本之间的综合权衡，要实现经济价值的最大化利用，就需要花费更多环境治理成本。根据《生活垃圾填埋场稳定化场地利用技术要求》（GB/T 25179—2010），目前垃圾填埋场的场地利用有三条途径：一是人类活动与场地非长期接触，在封场修复后环境可控的前提下，作为林地、草地等，成为城市生态系统的有益补充，其经济价值转换有限，相应的环境治理成本较低；二是人类活动与场地不定期接触，一般地处城市近郊的填埋设施，经生态修复并实施严格的水、气管控措施后，成为城市生态公园、环保科普基地、运动休闲设施等，具有一定城市功能和经济价值，环境管控的要求相对较高；三是人类活动与场地长期接触，这类场地一般填埋时间较长，原有填埋设施所在区域已被城市发展包围或者已发展为产业园区等，需要场地充分稳定并实施严格环境管控后，作为城市公用设施和园区用地等，这种方式能实现场地价值的最大化利用，但环境治理成本较高，在无法实现就地环境管控的情况下，一般采用易地搬迁、生态修复方式对原有垃圾进行再利用、对生态环境再修复，如深圳市玉龙垃圾填埋场自1983年启用，2005年底封场，占地近11.69万 m^2 ，填埋垃圾量近255万 m^3 ，2024年投资21.7亿元实施开挖搬迁和生态修复后，转型为集聚人工智能、生命健康、数字经济于一体的“数创智谷”产城融合新空间，为城市发展注入新的生命活力。

风险隐患排查和风险评估是既有填埋场迫切需要解决的问题之一，尤其是我国早期建设的第一批填埋场，限于当时社会经济发展水平，还只能部分达到卫生填埋场要求，防渗结构简化、渗滤液处理系统缺失、覆盖不及时、雨污分流不及时、截排洪沟失效、地下水管控缺失、调节池规模不足、混合填埋污泥、导气系统堵塞等问题广泛存在；一批卫生填埋场的选址存在岩溶裂隙发育、地下水位较高等先天不足或并非“独立水文地质单元”；填埋场建设过程存在“重设计、轻施工”的问题，在防渗材料性能保障及防渗结构施工质量控制方面存在一定的薄弱环节，尤其是防渗膜的焊接处理工艺存在质量缺陷，导致部分填埋场存在渗漏风险；一些中小型填埋场运行过程也存在不按程序、不守规范、简单粗放等问题。上述问题的存在也为我国卫生填埋场后期渗漏问题多发埋下较大隐患。2025年6月，生态环境部联合国家发展和改革委员会、财政部、住房和城乡建设部发布的《生活垃

圾填埋场环境污染隐患排查治理工作方案》要求，全面排查治理生活垃圾填埋场环境污染隐患，对高风险填埋场，优先采取异位修复等措施进行治疗。2025年12月，住房和城乡建设部、生态环境部印发《生活垃圾填埋场环境污染隐患风险评估与治理技术指南》，明确要求从安全隐患风险、环境隐患风险等八个方面进行风险隐患排查，根据排查情况综合评估后按疑似高风险、疑似中风险、低风险和基本无风险进行分级管理，并对垃圾堆体垮塌、填埋气迁移爆炸、坝体失稳、截排洪设施损毁、渗滤液收集处理系统失效、渗滤液渗漏、地下水污染等七个方面提出了风险治理的技术要求。

当前，垃圾填埋处理技术已从原来单一的环境治理技术向环境土木技术、环境岩土技术综合治理转变，涉及环境卫生学、环境工程学、生态学、生物学、岩土力学、地质水文学、水力学、水文气象学等多学科多领域的交叉融合。在运行管理和日常监督方面，随着人工智能和数字孪生技术的广泛应用，数字化、信息化、智能化是未来填埋技术发展的必然趋势，构建立体化、全时空、全过程的数字监测、智能感知、精准识别、智能学习、快速响应的智能填埋大模型，将有力提高填埋场科学管理和智慧运行的精准性、可靠性、有效性。

1.2 现代卫生填埋技术

1.2.1 现代卫生填埋场建设标准

根据现行的《生活垃圾填埋场污染控制标准》（GB 16889—2024）、《生活垃圾卫生填埋处理技术标准》（GB/T 50869—2013）、《生活垃圾卫生填埋场防渗系统工程技术标准》（GB/T 51403—2021）、《生活垃圾卫生填埋场封场技术规范》（GB 51220—2017）、《生活垃圾卫生填埋处理岩土工程技术标准》（GB/T 51451—2025）等国家及行业标准规范，目前国内公认的现代卫生填埋场建设应达到以下标准^[17,18]。

（1）充分研究填埋场选址特点，拟定合理的填埋场库区发展规划和分期实施计划，最大程度减少废弃工程，减少一次性资金投入，提高资金利用率。

（2）分析场址的工程地质与水文地质条件，从库区库容、堆体稳定和填埋作业要求等多方面进行充分论证，合理确定库底标高和高维填埋堆体的封场标高，最大限度增加场址的填埋库容，显著提高土地利用率，节约土地资源。

（3）采用现代化沼气收集、利用系统，实现沼气资源化回收利用，有效减少温室效应。

（4）填埋场库底单元划分应有利于运行管理，即各单元应基于内向水力梯度控制技术构建独立的水文地质单元，具备独立的地下水控制系统、渗沥液导排系统，且各单元衔接具有可靠的雨污分流措施，从根本上实现有效的雨污分流，有效减少渗沥液产生量。

（5）采用安全可靠的防渗系统，防止垃圾渗沥液渗漏，并有针对性地对渗漏情况开展动态监测。

（6）具有完备的封场计划，实现封场后渐进的生态修复，根据场地环境现状和土地利

用规划合理确定场地的再利用途径。

(7) 针对高维填埋作业的特点,拟定详细的填埋动态发展规划,包括分期土方平衡规划、填埋单元与作业道路发展规划以及分期投资计划,有利于实现现代化的运营管理。

(8) 采取全方位的环保措施,建设渗沥液调蓄处理设施,将渗沥液安全可靠稳定处理后达标排放。

1.2.2 现代卫生填埋技术核心要点

填埋场安全稳定设计、水平防渗衬垫系统、高维填埋技术、分期填埋发展规划、基于内向水力梯度的独立水文地质单元技术、雨污分流及地表水管控技术、渗沥液收集导排处理及水位控制技术、填埋气收集导排系统、地下水位管控及污染防控技术、封场及生态修复技术等是现代卫生填埋场设计的重要标志,一个完善的卫生填埋场必须具备以上特征。

1. 稳定控制技术

强度稳定是保障填埋场安全稳定运行的决定性因素,填埋场建设过程中,涉及地基土强度、坝体构筑物强度、边坡抗滑稳定强度带来的地基稳定、边坡稳定、垃圾坝体稳定问题。填埋运营过程可以视为填埋场建设的延续,即继续用“垃圾土”这种特殊建筑材料进行建设,垃圾土作为一种固、液、气三相耦合的特殊介质,与场地及边坡地基、垃圾坝体等构筑物、底部防渗衬垫系统、顶部封场覆盖系统共同构成一个堆体复合体,其安全稳定受垃圾堆体渗沥液水位、场地地下水位、表面雨水冲刷影响,需对不同工况组合下垃圾堆体稳定、底部防渗系统稳定、防渗系统拉伸锚固稳定、不同接触界面稳定、边坡抗滑及地基稳定、垃圾坝体稳定、封场系统稳定、动力稳定等进行专门研究设计,确保各种复杂条件下填埋场的稳定性,对存在安全稳定问题的填埋场应采取必要的工程措施和填埋工艺管控措施,如限制填埋高度、控制渗沥液水位和地下水位、实施有效雨污分流等。

2. 防渗衬垫系统

防渗衬垫系统是现代卫生填埋场的标配,对防止渗沥液渗漏污染扩散具有显著作用。根据场地水文地质条件,防渗衬垫系统可分为天然黏土、单层人工合成材料、单层复合人工合成材料、双层复合人工合成材料等几大类型。击穿时间是衡量防渗系统污染阻隔性能的标志指标,理论分析表明,只要防渗衬垫系统材料技术指标可控、施工质量可靠、填埋工艺规范,击穿时间都是可控的。防渗系统施工质量和初期填埋工艺是控制防渗系统质量的关键,我国第一批建设的防渗衬垫系统,尤其在山谷型填埋场衬垫系统,由于受施工焊接质量和粗放填埋影响,存在不同程度防渗膜渗漏的情况,需加强后续渗漏检测和跟踪维护。

3. 渗沥液导排及水位控制

垃圾渗沥液是垃圾填埋过程中,垃圾降解和生化反应后形成的水体污染物,既有垃

圾自身降解产生的污染源，也有外部表面雨水侵入或地下水侵入混合后产生的污染源。垃圾渗沥液是填埋场的重要污染源，一方面处理不当会对周围地下水和土壤环境造成污染，另一方面如果堆体内渗沥液水位过高会引发堆体和坝体失稳等问题。渗沥液水位控制是填埋场设计的关键指标之一，将直接决定填埋场稳定性和填埋堆体高度。现代卫生填埋场一般在设计底部防渗衬垫系统的同时，会同步设计底部渗沥液收集导排系统，将库区渗沥液有组织地导排至渗沥液调节池，经调节后再进行后续处理达标排放。根据填埋作业实际和场地条件，还可有组织地设置渗沥液收集导排竖井或在不同填埋标高设置渗沥液水平导排系统，旨在降低垃圾堆体内渗沥液水位，增强堆体稳定性和填埋可靠性。

4. 地下水导排及水位控制

在地下水富集或裂隙发育地区，地下水导排及水位控制对填埋场设计十分关键，过高的地下水位会对底部防渗衬垫系统产生顶托影响，同时也不利于场地稳定性。在平原型填埋场地区，当地下水位较高时一般会设置地下水主动抽排系统，将场地地下水导排至库区外围；在山谷型填埋场地区，一般也会在场底部铺设地下水导排盲沟或导排管，在雨季或汛期时将地下水有组织地导排到库区下游。

5. 地表水导排及雨污分流

有组织地将场地周围地表水和填埋库区表面雨水导排至场地外围，是现代卫生填埋场的基本要求之一。填埋场一般会在库区四周设置截排洪沟，汇水面积较大的填埋场还会分区域分标高设置不同层次的截排洪沟，填埋场使用期间需加强截排洪沟的日常检查和运营维护，尤其在汛期需制定专门的排查巡查方案，确保排洪截洪功能有效。填埋库区表面雨污分流是现代填埋作业工艺的必然要求，也是日常填埋作业维护和管控的难点，通常会在汛期采用临时覆盖和有组织的排水措施，尽量减少地表雨水进入库区。

6. 填埋气收集导排及利用

填埋气收集导排及利用是现代卫生填埋场的必然要求，填埋气收集处理不当容易导致填埋气积聚，引发火灾爆炸风险，进而影响填埋堆体稳定。现代卫生填埋场一般采用有组织的填埋气导排及利用设施，在填埋库区规范设置导气竖井后，将填埋气抽排至指定地点进行集中燃烧排放，或根据填埋气产量情况有组织地进行沼气发电或提纯后再利用。

7. 封场覆盖及生态修复

当填埋场达到设计标高或局部不利用时，需对填埋场进行封场覆盖和生态修复，确保填埋场堆体内部处于一个封闭稳定的状态。根据场地周边条件 and 环境管控要求，可以有规划地对封场后的填埋场开展土地再利用，实现填埋场经济价值、环境价值和社会价值的最大化。

1.2.3 卫生填埋场改扩建关键技术

1. 卫生填埋场改扩建工程特征

垃圾处理设施“邻避效应”问题是当前城市环境治理中突出的社会问题之一，对于必须新增填埋库容以保障垃圾应急处理需求的地区而言，在土地资源日益紧张、新场选址愈发困难的现实条件下，对现有填埋场实施改建或扩建，通过竖向扩容等方式增加填埋库容，具有一定的现实需求和发展需要。

卫生填埋场改扩建是在原有填埋场封场的基础上，进行新填埋场的建设（俗称“piggyback”），扩建填埋场作为原有填埋场的延伸，有其作为垃圾填埋场的普遍性，也有其特殊性，不仅需要高标准完成新场的建设，同时还需对原有填埋场中存在的问题进行改进提高，以使得整个改扩建工程建设标准满足相关规范要求。卫生填埋场改扩建在我国已有成功应用的案例，主要是针对 20 世纪 90 年代建设的第一批卫生填埋场，其建设标准相对较低，填埋作业也不完全规范，需在改扩建时一并解决原有填埋场存在的环境污染问题。21 世纪初期对杭州市天子岭垃圾填埋场、上海市浦东黎明垃圾填埋场、苏州市七子山垃圾填埋场进行了改建或扩建，在有效增加填埋库容的同时对原有填埋场遗留的环境问题同步开展了整治提升。

改扩建工程的普遍性在于新场和其他卫生填埋场一样，存在防渗衬垫系统、渗沥液导排、地下水导排控制、雨污分流、填埋气导排利用等问题，而其特殊性在于新场是建立在原有垃圾堆体的基础上，通过对原有填埋场进行水平拓展和竖向堆高构建新的填埋场，由于原有填埋场存在建设标准偏低、设施不完善、部分设施损毁或失效等诸多不利因素，扩建工程垃圾堆体的稳定以及原有填埋场垃圾堆体的沉降将是改扩建填埋场能否正常运行的关键，较一般填埋场更为突出和重要。以苏州市七子山垃圾填埋场改扩建工程为例，原填埋场于 1993 年启用，设计时并未采取水平防渗衬垫系统，仅在下游豁口处设置垂直防渗帷幕以构建独立的水文单元，阻止填埋场渗沥液向下渗漏污染下游地表水或土壤。实际运营过程中，受当时填埋作业工艺和管理水平所限，存在垃圾堆体中渗沥液水位较高、水量较大，垃圾沉降较大等现象，给填埋场的后续改扩建带来许多不便。该填埋场在 2007 年实施改扩建时，结合原有填埋场填埋历史和现状依据，以及新场填埋规划，对扩建垃圾堆体稳定、垃圾堆体沉降、老场渗沥液迁移扩散等问题进行理论分析和科学设计，有针对性地采取合理的防渗衬垫系统加固、垂直防渗加固、降低老场渗沥液水位等工程措施，在新增填埋库容的同时有效解决了原有填埋场遗留的环境隐患问题。

2. 卫生填埋场改扩建关键技术问题

根据国内外类似扩建工程的研究成果和工程实践经验，强度稳定、沉降变形、渗流扩散是填埋场改扩建工程存在的关键技术问题，表现为垃圾堆体稳定、垃圾堆体沉降、原有填埋场顶部防渗衬垫系统结构选型、原有填埋场渗沥液迁移扩散、原有填埋场渗沥液导排管控等。