DOI: 10.15986/j.1006-7930.2026.04.008

垃圾填埋场高液气形成机制及主动调控效果评价

姜惟惟[1], 吴泉钱[1], 王 凯[2], 冷 奇[1], 张晓磊[2], 董夏伟[1], 陆东亮[1]

(1. 无锡市城市环境科技有限公司,江苏 无锡 214000; 2. 同济大学 土木工程学院,上海 200092)

摘要: 针对我国高水位填埋场高饱和域内的液气形成与运移机制的复杂问题,本文运用考虑重力、浮力、气液表面张力和多孔介质阻力的气泡受力平衡方程与液气流动阶段建立起的双流体模型,以华东某填埋场为例,通过数值模型探讨了典型高液气垃圾填埋场水位以下的液气的形成机制以及随时间的赋存状态。建立竖井抽提条件下的液气主动调控模型,模拟了该填埋场在竖井抽提条件下的水位变化和抽提流量变化,并给出了液气联合抽提对典型高液气垃圾填埋场的稳定性影响,提出针对高水位填埋场的安全运营工程建议。

关键词: 高水位; 填埋场; 气泡积聚; 液气流动; 液气导排

中图分类号: TU 443 **文献标志码**: A **文章编号**: 1006-7930(2026)04-0540-10

Formation mechanisms of high leachate and landfill gas levels in municipal solid waste landfills and evaluation of active control measures

JIANG Weiwei[1], *WU Quanqian*[1], *WANG Kai*[2], *LENG Qi*[1],

ZHANG Xiaolei[1], *DONG Xiawei*[2], *LU Dongliang*[1]

(1. Wuxi Urban Environmental Technology Co., Ltd., Wuxi 214000, China;
2. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To address the complex mechanisms of liquid-gas formation and migration in high-water-level landfills, this study employs a force balance equation accounting for gravity, buoyancy, gas-liquid surface tension, and porous media resistance, along with a two-fluid model describing liquid-gas flow phases. Taking a landfill in Eastern China as a case study, a numerical model was developed to investigate the formation mechanisms and temporal evolution of liquid-gas accumulation below the water table in typical high-liquid-gas landfills. An active control model for liquid-gas extraction under vertical well pumping conditions was established to simulate variations in water level and extraction flow rate. The impact of combined liquid-gas extraction on the stability of high-liquid-gas landfills was evaluated, and engineering recommendations for the safe operation of high-water-level landfills were proposed.

Key words: high water level; landfill; bubble accumulation; liquid-gas flow; liquid-gas drainage and extraction

城市生活垃圾指的是城市的居民在日常生活、城市参与等过程中,所产出的固相废弃物。填埋场产出的渗滤液主要由三部分构成:一是垃圾自身携带的原生水分,二是垃圾在厌氧分解反应期间产生并析出的水分,三是降水下渗及渗滤液回灌等外界补给进入堆体的水分。垃圾初始含水量与组成密切相关,尤其受厨余有机物比例影响[1]。尽管近年垃圾分类在部分地区推行后初始含水率的重要性有所下降,但在仍以混合填埋为主的多数场地中,初始含水量仍是渗滤液产生的主要来源。我国许多填埋场位于湿润或半湿润气候区,且垃圾原始含水率普遍高于发达国家水平,这些因素共同导致我国填埋场渗滤液产量整体偏高并引发高水位问题。

从赋存形式来看,垃圾中的水分可分为自由水、结合水与胞内水三类。自由水游离于孔隙中参与流动,结合水与垃圾固相结合保持在固相表面,而胞内水储存在有机质细胞结构内并可在生化降解或压实过程中逐步释放为自由水,从而增大孔隙水饱和度并改变局部水力条件[2-3]。高饱和区内的持续厌氧降解过程会产生大量填埋气体(主要为甲

收稿日期: 2025-11-04 **修回日期**: 2026-06-03

基金项目:无锡市城市环境科技有限公司项目(WXTHS-JC-2025-01)

第一作者:姜惟惟(1985—),女,硕士,高级工程师,主要从事企业环保转型、绿色发展方面研究。E-mail:wk143399@163.com

通信作者:张晓磊(1987—),男,博士,高级工程师,主要从事岩土地下结构安全识别与风险预测研究。E-mail:Xiaolei_zhang@tongji.edu.cn

烷和二氧化碳），当气体在饱和层内形成并受限于低渗层或覆盖层时，易在水位以下积聚为封闭气泡或气包带，导致局部孔隙气压升高并影响堆体稳定与气体排放行为[4]。大尺度试验与田野观测均指出，水位以下的封闭气包带可产生可观的孔隙气压波动并呈现周期性变化特征。

国外关于填埋场液—气耦合过程的研究起步较早，已有研究从多相流理论、孔隙尺度机制与数值模拟多角度展开。多相耦合数值模型（包括传质量、动量与能量耦合）被用于描述生物反应器填埋场（bioreactor landfill）中渗滤液与填埋气的共同迁移，揭示了温度、湿度、渗透率分布等因素对气液传输行为的影响[5-7]。近年来，随着计算力和数值方法的发展，研究者开始尝试在三维、耦合的数值框架下模拟气泡生成、迁移与聚集过程，并评估不同导排/处理策略对渗滤液与填埋气的协同控制效果。

国内研究主要集中在渗滤液产量特征、渗滤液处理技术与填埋气排放治理等工程问题上。部分研究开展了物理模型或数值模拟以考察高水位条件下气体积聚与孔隙气压演化过程[8-11]，但总体上对水位以下封闭气泡形成机理、气泡—孔隙流耦合的受力与运动模式、以及面向工程的可实施调控（如竖井/盲沟导排）量化评估等方面的系统性、定量化研究仍明显不足。国内外研究成果显示：当研究对象为高含水、非均质的填埋体时，传统的单相或弱耦合模型往往难以准确再现气泡的聚集、脱离及对局部渗流阻抗的影响，因此需要在模型中显式考虑气泡浮力、表面张力、毛细与介质阻力等受力项并对气泡运动态进行判定[12-14]。

现有文献对气体在高饱和多孔介质中的运移提出了两类主要观点：一类将气体运移解释为主导扩散（包括主体扩散、Knudsen扩散和表面扩散等）为主的连续或准连续迁移过程；另一类则以孔隙尺度的非连续气泡或气包体迁移为主，强调气泡在孔隙网络内的成核、长大、上浮与捕捉机制[15-18]。在填埋场这一高含水、易降解有机质富集的复杂体系中，两种机制可能同时存在且局部转换，气泡的形态与运动轨迹高度依赖孔隙结构、局部饱和度、界面张力与渗透性分异。

尽管已有若干三维耦合模型与多物理场模拟框架被提出用于研究生物反应器填埋场中的渗滤液—气体耦合过程，但在以下方面依然存在不足并限制了其工程应用：

首先，针对高水位区内“气泡聚集—脱离”过程的受力判据和临界条件尚未形成统一、可操作的工程尺度表达，并且现有模型在处理高孔隙率、强非均质填埋体时参数标定难、耦合非线性导致计算不稳定；其次，关于主动导排对液气双相场的联合调控效果，缺乏系统的数值对比与现场/模型验证。上述空白直接限制了对高水位填埋场安全运营的量化评估与工程决策支持。

为填补上述空白，本文以包含重力、浮力、气液表面张力和多孔介质阻力的气泡受力平衡方程，用以判定气泡运动形态（滞留/运动/脱离）；在此基础上通过宏观尺度上的液气双流体模型以描述水位以下的液—气耦合运移过程，并基于华东某高水位填埋场的典型工况开展数值模拟。通过对比竖井与水平盲沟等导排方案的模拟结果，本文将量化评估不同导排策略对气泡积聚、孔隙气压演化以及渗滤液导排效率的影响，从而为高水位填埋场的安全管理与工程设计提供可操作的理论依据与技术建议。

1　工程概况

华东某在役卫生填埋场为坐落于山坳之间为典型的山谷型填埋场，其卫星图如图1所示[19]。本填埋场包括主填埋区以及配套渗滤液处理厂，总面积约为135 000 m^2，长宽分别超过500 m和400 m。在2009年进行封场后，为了应对以后该市的生活垃圾处置需求不断增长的问题，相关部门对该谷地型填埋场实施了扩容改造，规划填埋终高程达到90 m，同时在场地下游区域新建了拦挡垃圾坝。填埋区整体边坡坡比控制在约1∶3，各级作业平台间距设置为10～20 m。垃圾堆填采用分层作业方式，单层堆填厚度约10 m，日均垃圾处理规模约为1 500～3 000 t。

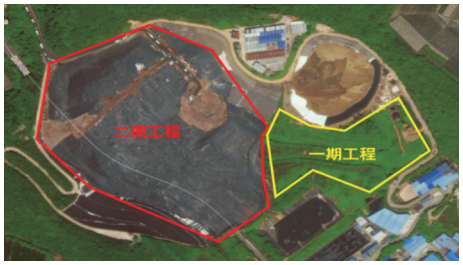


图1　填埋场卫星图[20]

Fig. 1　Satellite images of the landfill

桃花山填埋场西边山梁为门后山、舜柯山，北面为顾山，其山脊向东南延伸，构成一个三面环山，中间为一向东南倾斜开口洼谷地，地形起伏较大，地形特点是由西、北、东三面高地向中间洼谷倾斜。填埋区西北—北部低山呈NE向延伸，高程63～130 m，

坡底脚高程30～32 m,相对高差33～98 m,自西向北高程逐渐增加;东部低山呈近SN向延伸,中间顶部最大高程89 m,坡脚高程21～23 m,相对高差68 m处中间向南北两侧高程逐渐降低;东南部低山则呈近EW向延伸,顶面最大高程51 m,坡脚高程20 m左右,相对高差31 m。

根据Feng等[20]对该填埋场的实地踏勘结果,整体来看,填埋堆体内渗滤液液位与堆体高度之比(h/H)已经接近0.8,液位长期处于较高水平,对堆体稳定性产生了明显的不利影响。与此同时,现场变形监测结果显示,填埋库区的边坡中,约长30 m、宽40 m的区域已经发生较为明显的滑移变形,且滑动迹象较为突出。由于填埋场下游紧邻工业园区,一旦发生堆体失稳或滑坡事故,不仅会对周边人员及工程安全造成严重威胁,还可能引发渗滤液外泄,进而污染周边生活饮用水及工农业用水水源。

2 高水位生活垃圾填埋场液气产生与运移模型

2.1 高饱和域内垃圾气泡积聚与脱离模型

填埋场高饱和区域内液体与气体的生成及迁移过程具有明显的阶段性特征,其中首先表现为气泡的形成与聚集。与普通土体中的渗流行为相比,填埋场高含水区域内部的液气运移机制更加复杂,其根本原因在于垃圾填埋后持续发生微生物降解及多种生化反应,从而不断生成渗滤液与填埋气。在高液位运行条件下,即便位于地下水位以下,垃圾堆体内部依然存在持续产气现象。由于该区域初始阶段处于近饱和状态,新生成的填埋气通常以离散气泡的形式赋存于堆体孔隙之中,而非形成连续气相通道。随着产气过程不断进行,气泡体积逐渐增大,并对周围液相压力场产生扰动,进而改变堆体内部原有的压力分布状态。与此同时,气泡所受浮力、表面张力及周围介质约束等因素共同决定其存在形态与迁移方式。因此,有必要基于单个气泡的力学平衡关系开展分析,以识别气泡流动所处的发展阶段,并进一步揭示高饱和填埋场内液气耦合迁移机制。

本课题组已建立考虑气体生成过程的饱和多孔介质气泡压力平衡方程[21],将高水位填埋场液气运移模型主要分为液相连续方程和饱和多孔介质气体生成模型和气泡受力平衡模型三个部分。

式(1)用于表征填埋场内部液体介质的压力变化规律;式(2)主要反映垃圾堆体内气体产生后在孔隙中的聚集与存在形式;式(3)则针对饱和区域内气泡所受到的浮力、压力等作用关系建立平衡分析模型。

$$\frac{\mathrm{d}\theta_{\mathrm{g}}}{\mathrm{d}t}=-k_{\mathrm{w}}\frac{\partial^2 h_{\mathrm{l}}(z,t)}{\partial z^2} \tag{1}$$

$$p_{\mathrm{g}}^2\nabla^2\left(p_{\mathrm{g}}-\mathrm{A}p_{\mathrm{g}}^{\frac{1}{3}}\right)=\mathrm{B}\frac{\partial p_{\mathrm{g}}}{\partial t}-\mathrm{C}p_{\mathrm{g}} \tag{2}$$

$$\rho_{\mathrm{l}}g\frac{V_{\mathrm{g}}}{m_{\mathrm{g}}}-g-A\left[\frac{150\mu_{\mathrm{b}}(1-n)^2}{d_{\mathrm{p}}^2n^3}+\frac{1.75\rho_{\mathrm{g}}u_{\mathrm{b}}(1-n)}{d_{\mathrm{p}}n^3}\right]\frac{V_{\mathrm{g}}}{m_{\mathrm{g}}}u_{\mathrm{b}}-\frac{2T_{\mathrm{s}}\cos(\theta)}{m_{\mathrm{g}}R_{\mathrm{g}}}=\frac{\partial u_{\mathrm{b}}}{\partial t}+u_{\mathrm{b}}\nabla u_{\mathrm{b}} \tag{3}$$

2.2 高饱和域内液气双流体模型

第二阶段主要表现为气泡从原始赋存位置脱离后所产生的液、气两相相对迁移过程。此时,气体以分散气泡的形式存在于连续液相之中,属于典型的非连续气相流动状态。因此,在分析其运移机制时,除了需要考虑高饱和域气泡与渗滤液之间的互相耦合外,还应该对气、液两相在多孔介质中迁移过程中产生的能量衰减与耗散机制进行重点刻画。

通常通过构建气体—液体耦合运移分析模型,并结合室内试验及现场监测数据,采用VGM函数刻画基质吸力与介质含水状态之间的非线性对应关系,以此对非饱和垃圾堆体内渗滤液及填埋气的迁移与渗透行为进行定量分析。该类方法在非饱和区的应用已经较为完善,计算结果也具有较高可靠性。然而,对于高饱和区域而言,上述模型往往需要引入较多理想化假设,同时普遍默认气泡难以在高饱和多孔介质中发生迁移,这与实际填埋场内液气共存及动态运移的客观情况存在一定差异。

本课题组建立填埋场高饱和域内液气双流体模型来模拟渗滤液和填埋气的运动过程[21],通过在经典Navier-Stokes方程的基础上引入多孔介质阻力条件,描述液气两相流体在多孔介质中的非连续流动,最终通过体积分数模型来描述液气的非连续分布区域,建立以体积分数为关键变量的相方程(式4)和相动量方程(式5)。

$$\frac{D\alpha}{Dt}=\frac{\partial\alpha}{\partial t}+\boldsymbol{u}\cdot\nabla\alpha=0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial\boldsymbol{u}_i}{\partial t}+\boldsymbol{u}_i\cdot\nabla\boldsymbol{u}_i+\frac{\boldsymbol{u}_iQ_i}{\alpha_i\rho_i}-v_{eff,i}\frac{\nabla\alpha_i}{\alpha_i}\cdot(\nabla\boldsymbol{u}_i)+\frac{\nabla\alpha_i}{\alpha_i}\cdot\boldsymbol{R}_{c,i}-\nabla(v_{eff,i}\nabla\boldsymbol{u}_i)+\nabla\cdot\boldsymbol{R}_{c,i}=\frac{\nabla P_i}{\rho_i}+g+\frac{s_{i,j}}{\alpha_i\rho_i}+\frac{S_{Ergun,i}}{\alpha_i\rho_i}0 \tag{5}$$

3　基于模型的高水位填埋场液气运移及分布模拟

3.1　三维数值分析模型建立

本节以该填埋场二期工程东南侧堆填区域为研究对象，选取其中一处近似方形场地建立高液位条件下的三维数值分析模型，见图 2。模型范围内，边坡衬垫系统底部高程为 40 m，顶部高程为 80 m，整体长度约 160 m、宽度约 200 m，边坡坡率取 1∶3。该模型被导入本课题组自主改进的 OpenFOAM 平台进行数值模拟与计算。通过六面体非结构化网络，将模型划分为越 260 000 个计算单元。在边界条件的设置上，两侧边界设置为固定边界，顶部设定为自由边界，允许液体与气体自由交换，其边界压力条件取 Pl＝0 kPa、Pg＝0 kPa；边坡表面则设置为不透水、不透气边界，同样采用零梯度形式处理。整体边界条件的设定能够较好反映三维工况下实际填埋场内部液气运移的边界特征。

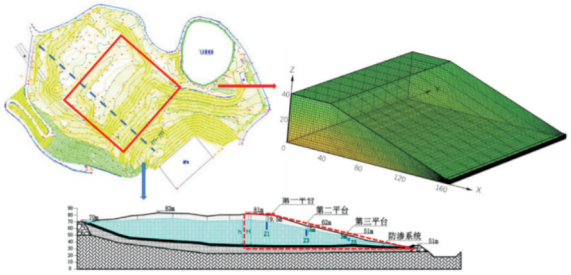


图 2　某填埋场三维数值分析模型建立

Fig. 2　Development of a three-dimensional numerical model for a landfill

表 1 列出了该填埋场的三维数值模型的主要计算参数，参数的设定主要参考该填埋场的前期工程勘测资料以及相关的文献经验估计结果。

3.2　液气分布模拟

以上文所提出的气泡聚集与液气运移理论为基础，建立了典型高水位填埋场的内部液气演化模型。图 3 展示了在高水位填埋场持续产气条件下，其内部的气相饱和度随时间的演化特征。

在早期堆填阶段，即 t＝0～40 d，填埋体整体仍处于相对均一的非饱和初始状态。随着有机垃圾的持续降解以及产生的渗滤液不断下渗与重分布，堆体孔隙中的液相含量逐步增加，整体饱和程度不断抬升。在边坡区域首先出现气体生成并发生局部富集，随后沿坡向发生上移扩散；而在堆体内部空间，气体主要以分散气团或气簇形式存在。靠近堆体上部的气泡尺度相对较大，其浮升驱动力更强，可在一定程度上克服多孔介质阻力及气液界面

表 1　填埋场三维数值模型计算参数

Tab. 1　Parameters for the three-dimensional numerical model of the landfill

	参数	单位	值
填埋垃圾基本参数	固相干密度 ρ_d	kg/m^3	1 980
	液相渗滤液密度 ρ_l	kg/m^3	1 000
	正常大气压下内部气体密度 ρ_g	kg/m^3	1.2
产气模型参数	生化降解组分含量系数 A		230
	生化降解反应速率系数 B	s^{-1}	6.55×10^{-7}
	渗滤液反应系数 η	/	0.64
	填埋气反应系数 $1-\eta$	/	0.36
流体特性参数	液相动力粘滞系数 μ_l	N·s/m^2	0.001
	气泡动力粘滞系数 μ_g	N·s/m^2	1.8×10^{-5}
	湍流动能参数 $\kappa_{l,t},\kappa_{g,t}$	m^2/s^2	1.0×10^{-8}
	湍能耗散速率 ε	m^2/s^3	0.1
	动能耗散模型系数 $C_{v,l}$	/	1.44
	动能耗散模型系数 $C_{v,g}$	/	1.92
阻力模型参数	升力模型系数 C_l	/	1
	虚拟质量力系数 C_{vm}	/	0.5
	固相颗粒的平均粒径 d_p	m	0.01
	孔隙率	/	0.4.
其他常量	温度 T	K	293
	理想气体常数 R	J/mol/K	8.314 4
	表面张力系数 T_s	kN/m	3×10^{-5}
	大气压力 P_{atm}	kPa	101.325
	气液接触角 θ	°	71
	液膜接触面修正因子 A	/	1

约束，实现向上迁移；相较而言，底部区域气泡尺度较小、聚并程度有限，浮力不足以驱动其有效上升，因此更易在堆体底部滞留与累积。

进入气液耦合迁移阶段，即 t＝40～120 d 后，气体与液体的生成过程持续进行，使得底部气体不断富集并导致局部气相压力逐渐抬升。同时，在重力势能与毛细作用共同控制下，液相整体呈向下调整趋势，从而形成显著的气上移、液下渗的反向迁移格局。上升气流对液相渗流通道产生阻隔作用，尤其当边坡区域气簇向内部扩展时，易造成局部孔隙空间被占据，进而形成滞水区域。此外，底部气体累积所引起的压力增长，会进一步强化气液之间的相对运动与再分配过程。

在高水位稳定演化阶段，即 t＝120～240 d，由于气、液二相不断生成，堆体内部压力水平持续升

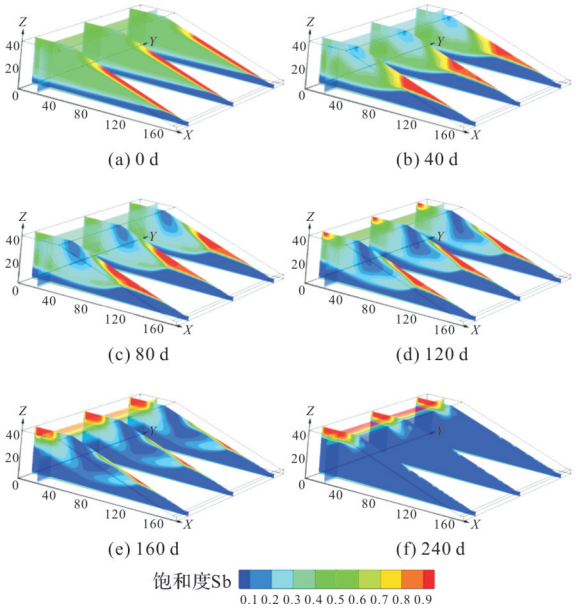


图 3 气相饱和度随时间变化过程

Fig. 3 Temporal variation of gas saturation

高,使两相的耦合迁移效应进一步增强。随着底部气体不断聚集并加速向上释放,在重力影响下,渗滤液会持续发生迁移并重新形成新的分布格局。同时,随着垃圾内部生物化学降解过程逐步减弱,气体产生量不断下降,系统逐渐由活跃状态转向稳定状态,最终形成相对稳定的高水位饱和堆体结构。

图 4 给出了在初始堆填阶段中,填埋场内部的气相压力随时间变化的演化特征。整体而言,其变化规律与气相饱和度的时序发展表现出较高的一致性。在 t=0~40 d 的初始阶段,由于填埋气持续生成并在堆体底部聚集,底部区域气体压力不断升高,且随着填埋深度增加,压力增幅更加明显。

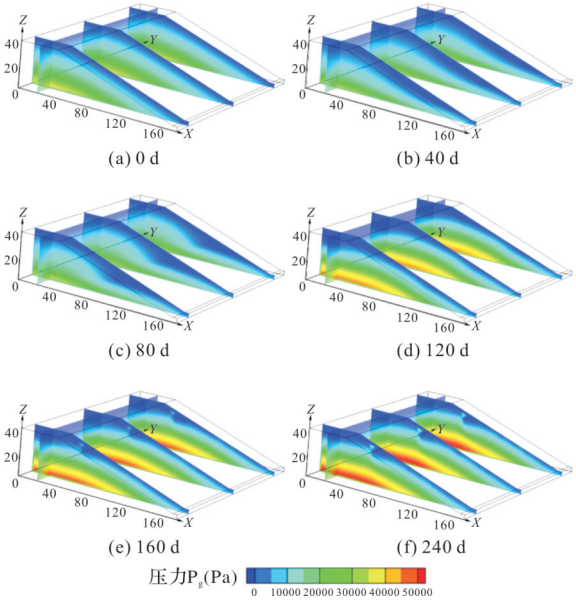


图 4 气相压力变化过程

Fig. 4 Temporal variation of gas phase pressure

当进入液气相对运移阶段(t=40~120 d)后,堆体内部局部区域逐渐形成滞水现象,使气相压力分布呈现出较强的不均匀性。其中,靠近边坡位置以及液相迁移受阻区域,由于气体聚集程度较高,局部气压明显增大。

在高液位稳定形成阶段(t=120~240 d),随着垃圾生化降解速率逐渐降低,填埋气产生速率趋于平缓。在液相与气相重新分布过程基本结束后,堆体内部压力场逐渐达到稳定状态,气液两相压力分布不再出现明显波动。

图 5 反映了填埋场内部液气压力沿堆体高度方向随时间的演化规律。在填埋高度 0~20 m 范围内,受底部填埋气持续聚集影响,液相与气相压力均随时间推移而逐渐升高;

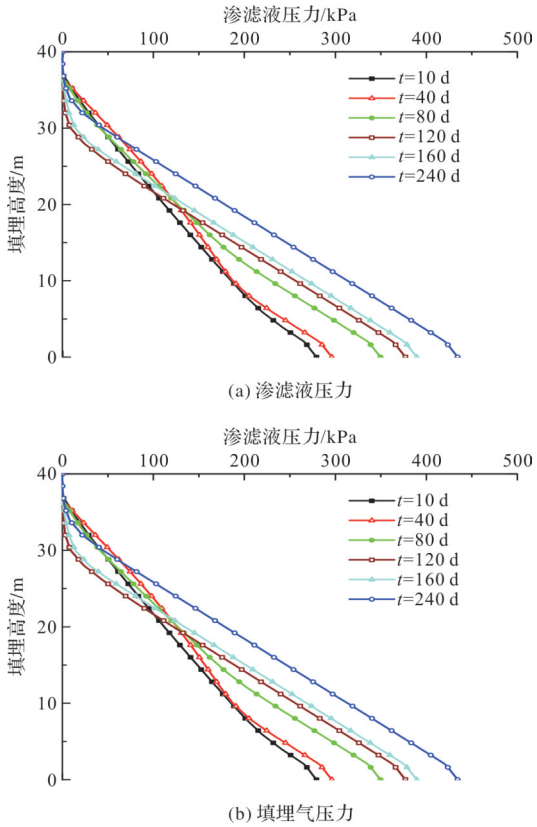


图 5 液气压力沿高度分布随时间的变化过程

Fig. 5 Temporal evolution of the vertical pressure profiles

在 20~40 m 的高度范围内,堆体上部压力在填埋初期表现为逐步抬升;当进入气液耦合迁移的阶段后,受底部气体的持续上浮及两相相对重分布影响,局部压力的积聚状态得到一定程度的缓解与重构。在高液位体系逐渐趋于稳定后,堆体内部气液压力分布最终演化为沿高度方向近似线性变化的格局。相较而言,界面张力量级明显低于气相与液相主导压力项,因此在时空的变化特征上,液相的压力场与气相的压力场有着较为明显的一致趋势。

图 6 则描述了在产气过程不中断的条件下，高水位填埋场内部气相流速及主流路径随时间演变的过程。在初始阶段底部区域持续产气并发生累积，在液相浮力的作用下突破多孔介质阻力及界面约束，整体呈现向上迁移的动力学特征。但由于该阶段气体尚处于初始生成与聚集阶段，流动强度整体偏弱，流速水平较低；相比之下，边坡附近由于气团尺度相对较大，其浮升驱动效应更为显著，影响范围也更为突出。

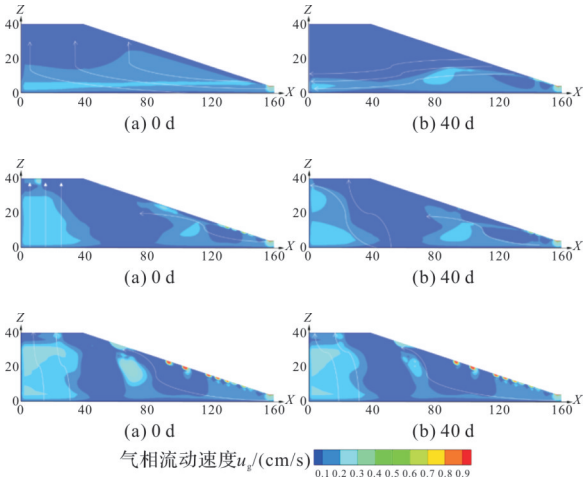


图 6　气相流速分布变化过程

Fig. 6　Evolution of the gas phase velocity distribution

进入液气相对运移阶段（t=40～120 d）后，气相流速分布逐渐呈现明显非均匀性。边坡附近区域的气体流动表现出较强紊动特征，其总体迁移方向由边坡向堆体内部扩展；与此同时，堆体内部气簇聚集区形成局部上升通道，气流沿通道持续向上运移。

在高水位稳定形成阶段（t=120～240 d），随着堆体内部液相饱和度进一步提高，大部分区域气体迁移能力显著减弱，仅在靠近边坡的位置仍存在少量气簇沿坡面方向持续上升。

5　基于模型的高水位填埋场液气主动调控效果评价

5.1　液气联合抽提过程模拟

本节以华东地区一处生活垃圾填埋场为研究对象，建立了对应的三维数值计算模型，分析了竖向抽排工况下填埋场内部液位及抽排量的时序变化规律，并结合现场实测结果对模型计算精度进行了验证。基于这点，进一步研究了联合降排过程中液体与气体抽提流量的组成特征及水位动态变化规律，并引入经典的边坡稳定性分析模型，对该工况下填埋场边坡稳定性的响应特征进行评价分析。图 7 给出了各平台的高程分布及整体的构型，所采用的各项计算参数、边界条件等均与前文所使用的液气运移数值模型相同。

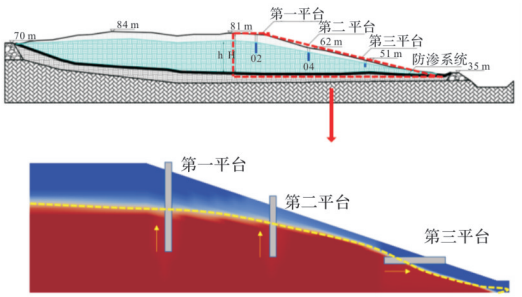


图 7　边坡平台高度位置及模型示意图

Fig. 7　Schematic diagram showing the location and elevation of the berm and the numerical model

Feng 等[20]对该填埋场开展了现场水位监测，在前两个平台均布设一口水位监测井，用于获取填埋场运行期间的液位变化情况。图 8 给出了填埋场的实际水位监测结果。监测数据表明，在初始运营阶段（2018 年 6 月—2019 年 8 月），顶部平台的水位长期稳定于距堆体顶部约 8～10 m 范围内，而中间的二平台水位则基本分布在 5～7 m 深度区间。自联合导排措施开始（2019 年 8 月）后，堆体内部的液位出现了十分明显的下降趋势。

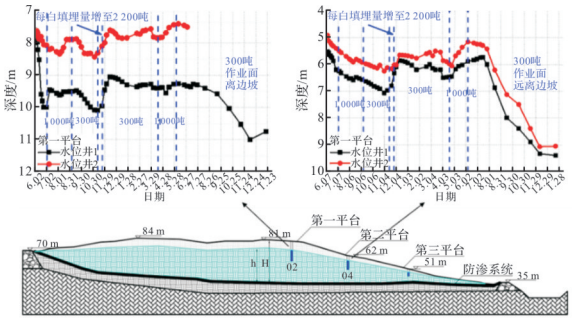


图 8　填埋场水位监测结果[20]

Fig. 8　Measured landfill water levels[20]

通过所建立的堆体三维数值模型，对竖井导排工况下，渗滤液位随抽排时间的演化过程进行了模拟，并将该结果与现场的实测结果进行了对比。图 9 展示了抽排持续时间内（2019 年 8 月 1 日—2019 年 12 月 4 日），第一、二平台的现场监测结果与模拟结果的对比。实际监测结果表明一平台的水位由 32.5 m 持续下降至 29.5 m，与该模型的模拟结果下降趋势基本吻合。二平台则从 28.3 m 的水位逐步下降至 19.3 m，同样和模拟结果基本吻合。该结果说明本节所建立的三维数值模型与实际工程情况具有较好的一致性。

图 10 对比展示了竖井抽提工况下单井日均抽提流量的模拟结果与现场实测数据。根据现场监

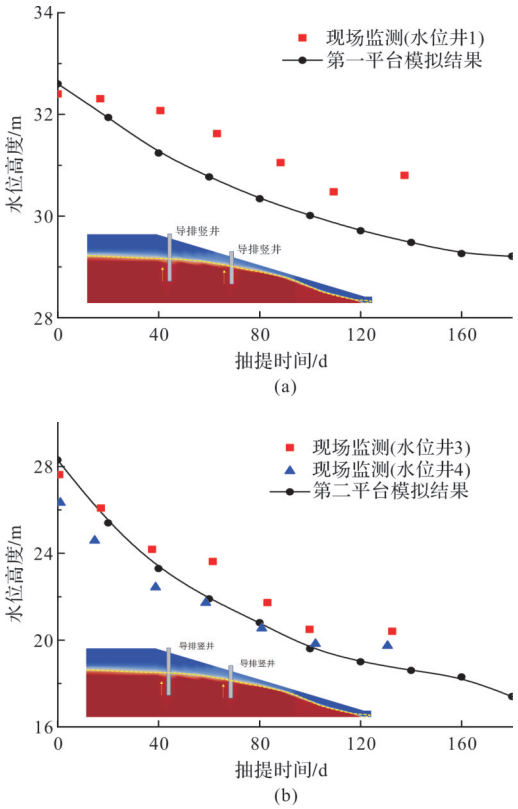


图 9 竖井导排下渗滤液变化过程对比

Fig. 9 Comparison of temporal water level variations under vertical well extraction conditions

测结果,在导排的前期(8 月 1 日～8 月 28 日),每口导排井日均导排量约为 3.45 m^3/d;在 9.25 之后,每口井的平均导排量由明显下降,约 1.85 m^3/d。数值模拟结果同样显示,单井液相抽提流量随抽提历时延长呈逐渐衰减趋势,与现场变化规律一致。但在量值上,模拟结果前后期平均分别为 4.12 m^3/d 和 2.50 m^3/d,整体较实测值偏高约 15%。该偏差主要源于实际工程中竖井抽提多采用间歇运行方式,且运行过程中存在一定程度的井壁淤堵现象,而数值模型未完全考虑上述工况影响。与此同时,模拟结果表明气相的导排量随导排的时间呈逐步增加趋势,这说明随着液位的降低,堆积的气体能更轻易的从竖井通道中进行排出。

在竖井抽提工况下,数值模拟结果与现场监测数据整体吻合较好,表明所建立的三维模型能够较为可靠地反映实际的工程项目中,气相与液相的导排过程。为了进一步分析联合导排措施的实际效果,本研究在第三平台处增设一套水平盲沟导排系统,并结合该三维数值模型,对竖井与水平盲沟联合导排下的液气变化情况进行分析计算,结果如图 11 所示。

结合本课题组关于高水位填埋场竖井与水平

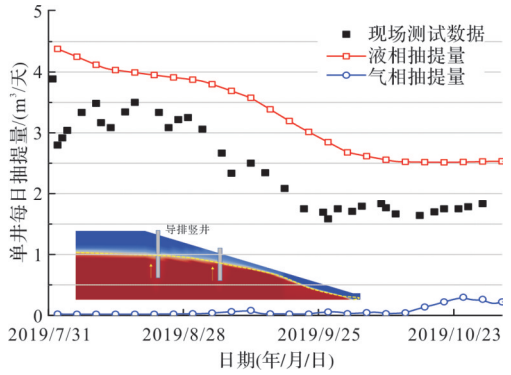


图 10 导排条件下每口井日均抽提流量对比

Fig. 10 Comparison of daily extraction flow rates for a single well under vertical well pumping conditions

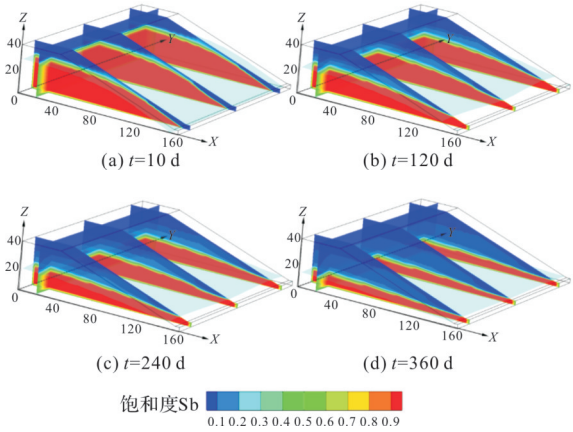


图 11 联合抽排条件下液相饱和度变化过程

Fig. 11 Temporal evolution of liquid phase saturation under combined pumping conditions

盲沟协同导排机制的相关研究成果(见图 12、图 13),其中图 12 给出了导排井中液相与气相抽提量占比的计算方法,定义液相与气相抽提比例分别为 $\eta l=\Phi l/\Phi w$、$\eta g=\Phi g/\Phi w$。在竖井抽提压力设定为 −1.8 kPa 的情况下,图 13 表明抽提过程中,液相的占比高达 73% 左右,是气相抽提量的近三倍;而水平盲沟的抽泣压力设置为 −2 kPa 时,其所对应的液相比例有少许的提升,为接近 76%.

综合完整的导排过程来看,在导排初期的联合导排作用下,填埋场的渗滤液位下降十分显著。在导排的前 120 d 内,水位由 32.5 m 快速降至约 28 m。但是当渗滤液位下降至竖井的井口以下后,该工况下的排水功能逐渐由水平盲沟来主导。随着抽排过程持续进行至约 360 d,最终,堆体的水位稳定于距离填埋场底部 15 m 附近的位置。

下图反映了联合导排工况下两个平台区域液位随时间变化的规律。计算结果表明,在抽排启动后的初始阶段,即 120 d 内,上部平台区域的水位下降速度相对较慢,而靠近边坡位置的平台则表现出更加明显的降幅。这是由于抽排过程中堆体内部

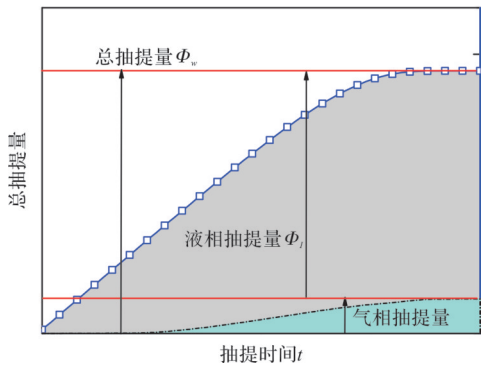


图 12　液相及气相抽提量占比计算

Fig. 12　Calculation of the proportion of liquid and gas extraction volumes

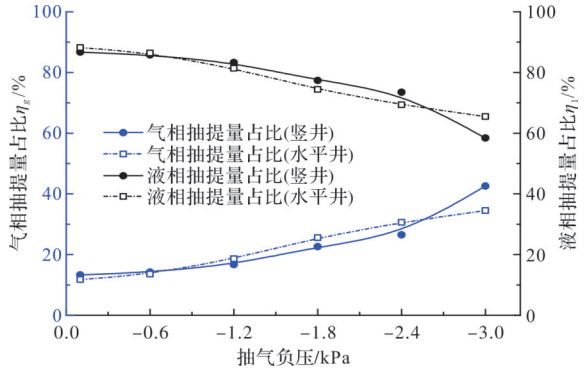


图 13　联合工况下双相抽提量占比随抽气负压的变化

Fig. 13　Variation in the proportion of extraction volume from vertical wells and horizontal trenches with gas extraction pressure

液体与气体整体向场区内部迁移，边坡附近区域在液位降低后较难获得周边渗流补给，因此其液位衰减更加迅速。

相比单独采用竖向导排措施，在系统中增加水平盲沟后，填埋场整体排水能力得到明显增强。当运行至 120 d 时，第一平台区域液位由 32.3 m 降低至 28.1 m，第二平台区域则由 28.1 m 下降至 17 m。与传统竖井抽排方案相比，联合导排模式在两个平台位置的液位控制能力分别提升约 26.1% 和 53.6%。结果说明，多方式协同导排能够更有效地促进堆体内部渗滤液排出，并加快高水位填埋场液位衰减过程。

5.2　液气联合抽提对边坡稳定性影响

为评估高水位填埋场液气对稳定性的影响，采用考虑液气压力的填埋场沉降变形计算模型[22]和基于强度折减法的填埋场稳定性评价模型，嵌入到填埋场耦合模型计算框架中。强度折减法在土质边坡稳定性分析上有广泛的应用[23-24]，边坡安全系数可以定义为使边坡刚好达到临界破坏状态时，对土的剪切强度进行折减的程度。在堆体边坡的稳定性模拟中，以位移的大规模突变作为判定边坡失稳的指标，见图 14。在逐步轮的折减计算后，对边坡坡面各计算单元节点的位移进行遍历提取，并记录其最大位移值；当出现明显的位移突变时，其所对应的强度折减系数，作为本模型中的边坡安全系数 FS，获得的边坡稳定系数随时间的变化过程如图 15 所示，该结果表明竖井与水平盲沟的联合措施能够明显的提高边坡的安全性，且该系数随抽排时间延长整体呈上升趋势，说明边坡稳定性逐步增强，从而有效降低失稳滑移风险。在导排初期（t= 0～80 d），安全系数由 1.119 快速提升至 1.752，稳定性提高约 56.6%。当进入 t= 80～160 d 阶段后，安全系数增长趋于缓慢，其主要原因在于水位已下降至第一平台竖井井口以下，抽排驱动力减弱，导致导排效率降低。至 t= 240～360 d 阶段，场内水位基本趋于稳定状态，继续抽排对边坡稳定性的提升作用已较为有限。

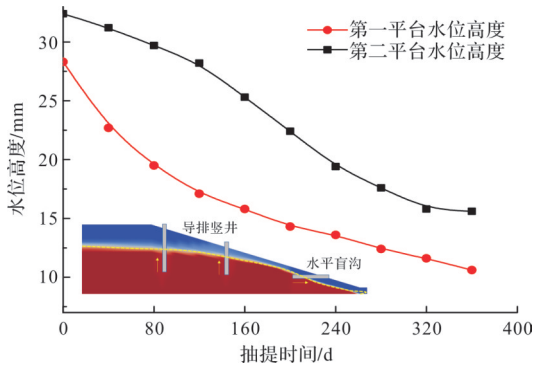


图 14　联合抽排条件下水位高度变化过程

Fig. 14　Temporal evolution of water level under combined pumping conditions

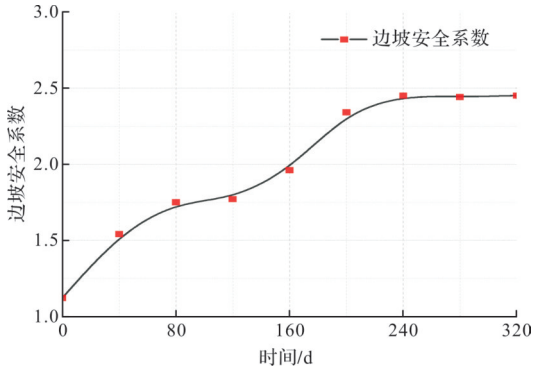


图 15　安全系数随时间变化过程

Fig. 15　Temporal variation of the factor of safety

图 16 表明了不同的时间下，堆体边坡在失稳状态时的变形情况。在历时 80 d 时，边坡的安全系数为 1.753，此状态下最大位移约为 1.93×10^{-3} m，并且主要在坡顶区域，向坡脚方向形成近似圆弧形潜在滑移带延伸。

当导排时间分别达到160 d和240 d时,安全系数提升至1.90和2.46。此时边坡临界失稳状态下的位移场分布形态基本一致,最大变形仍出现在坡顶附近区域,但位移幅值较导排初期显著减小。该结果表明,随着水位持续降低,边坡整体稳定性得到增强,同时变形发展受到明显抑制。

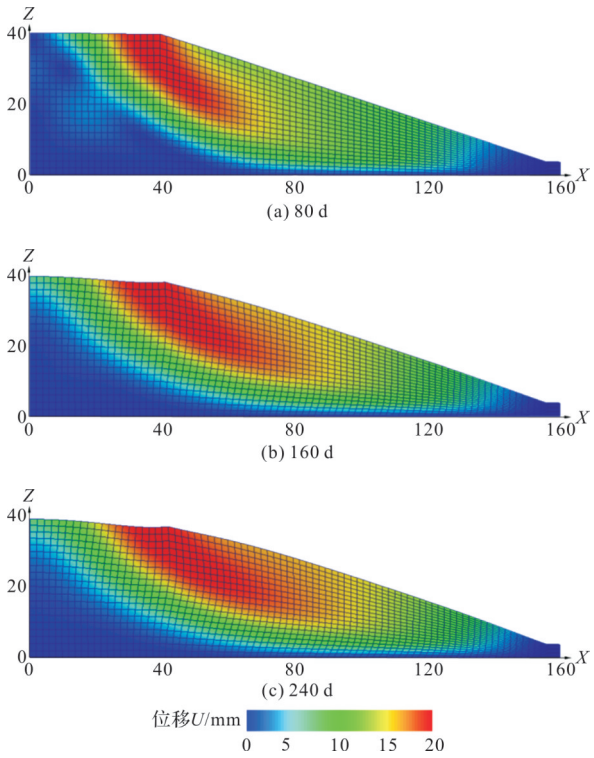


图16 边坡折减条件下的时序变形情况

Fig. 16 Deformation of the slope with strength reduction at different pumping times

高水位运行状态会显著削弱填埋场边坡的稳定性,使其处于较高的失稳风险之中。通过采用竖井与水平盲沟相结合的联合导排主动控制手段,可有效实现堆体水位的降低,从而减小变形发展程度,并提升边坡安全系数,进而降低滑坡等灾变发生的可能性。建议在工程运行与管理阶段持续开展水位及变形的动态监测。

6 结论

本文利用考虑气泡积聚和液气双相流动的耦合模型,结合过某仍处在运营的填埋场,建立三维数值模型,并采用考虑气泡积聚及液气相对流动的双域耦合模型,分析填埋场液气分布及填埋气流动规律,同时评估竖井与联合导排等应急措施的治理效果。主要结论如下:

(1)在填埋场的运营过程中,其堆体内部气泡不断富集,边坡周围的的气簇沿着边坡逐渐上升,形成液气相对流动。气体积聚在液面上方,当产气量趋于稳定时,填埋场形成稳定的高水位状态,液气压力分布呈特定规律。

(2)竖井抽提调控效果:液相抽提量随时间递减,气相抽提量随时间增加,表明水位下降后积聚气体更易通过竖井排出。

(3)联合导排与边坡安全:通过边坡变形沉降和稳定性计算,竖井与水平盲沟联合导排能够有效降低液气压力积聚,提升边坡安全系数,为高水位填埋场的安全运营提供可行工程措施。

参考文献 References

[1] GLAZYRIN SA, AIBULDINOV YK, Kopishev EE, et al. Analysis of the composition and properties of municipal solid waste from various cities in Kazakhstan [J]. Energies, 2024,17(24): 6426-6449.

[2] CHEN Yunmin, GUO Ruyang, LI Yuchao, et al. A degradation model for high kitchen waste content municipal solid waste [J]. Waste management, 2016, 58(12):376-385.

[3] 郭汝阳,陈云敏,李育超,等. 考虑pH值和挥发性脂肪酸影响的填埋城市固废厌氧降解模型[J]. 中国环境科学,2015,35(1):147-156.
GUO Ruyang, CHEN Yunmin, LI Yuchao, et al. Anaerobic degradation model of municipal solid waste in landfills considering the effects of pH value and volatile fatty acids[J]. China Environmental Science, 2015, 35(1):147-156.

[4] 程磊,刘意立,杨妍妍,等. 我国生活垃圾填埋场特征性问题原因分析与对策探讨[J]. 环境卫生工程,2019, 27(04):1-4.
CHENG Lei, LIU Yili, YANG Yanyan, et al. Discussions and suggestions on characteristic problems of landfills in China [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2019, 27(4): 1-4.

[5] HU Jie, LAN Jiwu, CHEN Yunmin, et al. Foam flow model of municipal solid waste and its application in landfill gas pressure prediction [J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2023,149(3): 1-11.

[6] JIN J, SUN W, LI M, et al. Modeling the clogging process of leachate collection systems in municipal solid waste landfills: The role of temperature [J]. Computers and Geotechnics, 2024,175: 1-16.

[7] TIAN Angran, TANG Hengliang, CHEN Wei, et al. A multi-field coupling model for municipal solid waste degradation in landfills: Integrating microbial, chemical, thermal, and hydraulic processes [J]. Sustainability, 2025,17(21):1-20.

[8] 郑奇腾，吴少杰，冯世进，等. 好氧修复下填埋场稳定化综合评价方法及其应用[J]. 岩土工程学报，2024，46(04)：890-897.
ZHENG Qiteng, WU Shaojie, FENG Shijin, et al. A comprehensive evaluation method for landfill stabilization under aeration and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(4): 890-897.

[9] 王湘徽，黄俊龙，陈俊杰，等. 填埋场原位注气好氧稳定化工程中的全域优先流效应[J]. 环境工程技术学报，2024，14(06)：1857-1866.
WANG Xianghui, HUANG Junlong, CHEN Junjie, et al. Field-scale preferential flow effect in landfill in-situ gas injection aerobic stabilization project [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2024, 14(6): 1857-1866.

[10] 陈宏信，吕东江，冯世进，等. 某低厨余填埋场垃圾物理力学特性演化规律[J]. 岩土工程学报，2023，45(09)：1850-1858.
CHEN Hongxin, LÜ Dongjiang, FENG Shijin, et al. Evolution of physical and mechanical properties of municipal solid waste in a landfill with low kitchen waste content [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(9): 1850-1858.

[11] 兰吉武. 填埋场渗滤液产生、运移及水位雍高机理和控制[D]. 杭州：浙江大学，2012.
LAN Jiwu. Mechanism of leachate generation, transport and mound in MSW landfills and control of leachate level [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.

[12] 能昌信，张弦，刘景财，等. 受HDPE膜影响下的垃圾填埋场渗滤液水位探测方法研究[J]. 环境工程技术学报，2023，13(01)：325-331.
NAI Changxin, ZHANG Xian, LIU Jingcai, et al. Study on detection method of landfill leachate level affected by HDPE membrane [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(1): 325-331.

[13] 詹良通，赵润泽，吴林波，等. 平原型固废填埋场地下水污染物迁移距离估算[J]. 安全与环境学报，2025，25(5)：1958-1968.
ZHAN Liangtong, ZHAO Runze, WU Linbo, et al. Estimation of groundwater pollutant migration distance in plain solid waste landfills[J]. Journal of Safety and Environment, 2025, 25(5): 1958-1968.

[14] 陈云敏，詹良通，胡杰，等. 高厨余垃圾填埋场降解稳定化规律及分阶段治理方式[J]. 环境卫生工程，2024，32(S1)：1-12.
CHEN Yunmin, ZHAN Liangtong, HU Jie, et al. Degradation and stabilization behaviors of high kitchen waste landfills and phased treatment methods [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2024, 32(S1): 1-12.

[15] CUI Linyong, MASUM Shakil A, YE Weimin, et al. Numerical investigation of gas migration behaviour in saturated bentonite with consideration of temperature [J]. Acta Geotechnica, 2024, 19(5): 2381-2393.

[16] WU Tao, YANG Huaning, CHENG Jiankang, et al. Theoretical analysis of landfill gas migration in capillary barrier covers considering effects of waste temperature [J]. Applied Sciences, 2024, 14(20): 1-12.

[17] LIU Jiangfeng, SONG Yang, SKOCZYLAS Frederic, et al. Gas migration through water-saturated bentonite-sand mixtures, cox argillite, and their interfaces [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(1): 60-71.

[18] 朱前林，李小春，魏宁，等. 多孔介质中气泡尺寸对流动阻力的影响[J]. 岩土力学，2012，33(3)：913-918.
ZHU Qianlin, LI Xiaochun, WEI Ning, et al. Influence of bubble size on flow resistance in porous media[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3): 913-918.

[19] 施皓. 山谷型填埋场垃圾堆体稳定性分析与治理措施研究[D]. 上海：同济大学，2020.
SHI Hao. Study on stability analysis and remediation measures of waste mass in valley-type landfills[D]. Shanghai: Tongji University, 2020.

[20] FENG Shijin, CHANG Jiyun, ZHANG Xiaolei, et al. Stability analysis and control measures of a sanitary landfill with high leachate level [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2021, 147(10): 1-13.

[21] ZHENG Qiteng, JU Jinshui, FU Wending, et al. Study of LFG bubble accumulation and discontinuous flow in the highly saturated region of landfill below the leachate level[J]. Waste Management 2024, 189(12): 334-347.

[22] FENG S J, CAO B Y, BAI Z B, et al. Constitutive model for municipal solid waste considering the effect of biodegradation [J]. Géotechnique Letters, 2016, 6(4): 244-249.

[23] KELESOGLU M. The evaluation of three-dimensional effects on slope stability by the strength reduction method [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2016, 20(1): 229-242.

[24] TU Yiliang, LIU Xinrong, ZHONG Zuliang, et al. New criteria for defining slope failure using the strength reduction method [J]. Engineering Geology, 2016, 212: 63-71.

（编辑　吴海西）