

考虑渗滤液回灌的垃圾填埋场厌氧产甲烷动态模拟与温室气体协同控制

张红芬

(中兰环保科技股份有限公司)

DOI: 10.65285/GCJSYGL.V2I4.011

摘 要: 生活垃圾填埋场是城市温室气体排放的关键源头, 渗滤液回灌作为填埋场生物强化的核心工艺, 可显著改变填埋堆体的水力特性、微生物群落结构及厌氧降解进程, 直接影响甲烷 (CH_4)、二氧化碳 (CO_2) 等温室气体的产生与排放规律。为精准揭示渗滤液回灌工况下填埋场厌氧产甲烷的动态演化机制, 实现温室气体高效协同管控, 本文基于垃圾降解、渗流迁移、微生物反应多场耦合理论, 构建考虑渗滤液回灌频次、回灌量、水质特性的填埋场厌氧产甲烷动态数值模型, 通过现场试验数据完成模型校准与验证, 系统分析不同回灌参数对产甲烷速率、累计产气量及温室气体组分的影响规律。结果表明: 适度渗滤液回灌可优化填埋堆体含水率与酸碱环境, 激活产甲烷菌活性, 较无回灌工况产甲烷效率提升 45% ~ 60%, 但过量回灌会引发堆体酸化、孔隙堵塞, 抑制厌氧产甲烷反应; 结合模拟结果, 构建以参数精准调控、原位气体收集、微生物强化修复为核心的温室气体协同控制体系, 可实现填埋场温室气体减排率提升 30% 以上。研究成果可为填埋场稳定化运营、温室气体精准管控及碳减排效益提升提供理论支撑与技术参考^[1]。

关键词: 垃圾填埋场; 渗滤液回灌; 厌氧产甲烷; 动态模拟; 温室气体; 协同控制

Dynamic Simulation of Anaerobic Methane Production in Landfills Considering Leachate Recirculation and Synergistic Control of Greenhouse Gases

Hongfen Zhang

Zhonglan Environmental Protection Technology Co., Ltd.

Abstract: Municipal solid waste landfills serve as a critical source of urban greenhouse gas emissions. As a core biostimulation technology for landfills, leachate recirculation greatly changes the hydraulic properties, microbial community structure and anaerobic degradation process of waste piles, and directly affects the generation and emission characteristics of greenhouse gases including methane (CH_4) and carbon dioxide (CO_2). To accurately reveal the dynamic evolution mechanism of anaerobic methane production under leachate recirculation and realize efficient synergistic control of greenhouse gases, this paper establishes a dynamic numerical model for anaerobic methane production in landfills on the basis of multi-field coupling theory of waste degradation, seepage migration and microbial reactions. The model takes recirculation frequency, recirculation volume and water quality characteristics into consideration, and is calibrated and verified by field test data. The influences of different recirculation parameters on methane production rate, cumulative gas output and greenhouse gas components are systematically analyzed. The results show that moderate leachate recirculation can optimize the moisture content and acid-base environment of waste piles and activate the activity of methanogens, increasing methane production efficiency by 45%–60% compared with the condition without recirculation. Nevertheless, excessive recirculation will cause acidification and pore clogging of waste piles and restrain anaerobic methane production. According to simulation results, a synergistic greenhouse gas control system focusing on precise parameter regulation, in-situ gas collection and microbial enhanced remediation is constructed, which can raise the greenhouse gas emission reduction rate of landfills by more than 30%. The research results can provide theoretical support and technical reference for stable landfill operation, precise greenhouse gas management and improvement of carbon emission reduction benefits.

Keywords: landfill; leachate recirculation; anaerobic methane production; dynamic simulation; greenhouse gas; synergistic control

引言

城镇化推进使生活垃圾填埋占比超 60%，其厌氧降解产甲烷温室效应强，“双碳”目标下减排需求迫切。传统填埋存在降解慢、污染高、排放无序等问题，渗滤液回灌可补水补养、优化微生物环境，加速降解并减量渗滤液，属经济高效强化技术。然而现有研究多关注总产气量或单一因素，对回灌参数与产甲烷动态的耦合机制缺乏系统认知，多参数协同模拟体系尚属空白。本文基于多物理场耦合理论，构建适应回灌工况的厌氧产甲烷动态模型，模拟不同工况产气演化规律，阐明关键影响机制，并提出协同控制策略，为填埋场低碳稳定化运营提供依据。

一、材料与方法

（一）试验场地与材料

本次研究选取华东地区某规模化卫生垃圾填埋场作为研究对象，该填埋场为典型厌氧填埋结构，填埋垃圾以城市生活垃圾为主，有机质含量约 45% ~ 55%，填埋年限 5 ~ 8 年，处于稳定产甲烷阶段。试验所用渗滤液取自填埋场调节池，水质特征为 COD 18000 ~ 22000 mg/L、氨氮 1200 ~ 1500 mg/L、pH 值 7.2 ~ 7.8、VFA 浓度 2000 ~ 3000 mg/L，符合典型成熟填埋场渗滤液水质特性。

搭建室内填埋柱模拟试验系统，模拟填埋场实际压实密度、分层填埋结构，柱体高度 2.0 m、直径 0.8 m，底部设置渗滤液收集与回灌装置，顶部设置填埋气采集端口，可实时监测堆体含水率、pH 值、温度、产气量及气体组分参数。试验垃圾取自填埋场新鲜填埋单元，经破碎、筛分、均匀混合后分层装填，压实密度控制在 0.8 t/m³，与现场填埋工况保持一致^[2]。

（二）动态模型构建

基于垃圾厌氧降解三阶段理论，结合渗滤液回灌的水力运移规律，构建降解-渗流-生化耦合的厌氧产甲烷动态模型，模型涵盖水解酸化、产乙酸、产甲烷三个核心反应阶段，同时纳入渗滤液回灌引发的堆体孔隙变化、物质迁移、环境因子波动等影响因素。

水解酸化阶段：生活垃圾中纤维素、蛋白质、脂肪等大分子有机质，在水解菌作用下分解为小分子可溶性有机物，进一步转化为 VFA、醇类物质，该阶段反应速率受堆体含水率、微生物浓度调控，渗滤液回灌可提升可溶性有机质溶出效率，加快水解酸化进程。其反应动力学方程为： $\frac{dS_1}{dt} = k_1 \frac{S_1}{K_{s1} + S_1} X_1$ ，式中 S_1 为大分子有机质浓度， k_1 为水解反应速率常数， K_{s1} 为半饱和常数， X_1 为水解菌生物量。

产乙酸阶段：水解酸化产物在产酸菌作用下转化为乙酸、氢气、二氧化碳，乙酸为产甲烷的核心底物，该阶段易受 VFA 累积、pH 值波动影响。渗滤液适度回灌可稀释局部高浓度 VFA，避免系统酸化抑制反应进行。

产甲烷阶段：产甲烷菌利用乙酸、氢气发生厌氧反应生成甲烷，是温室气体产生的核心阶段，产甲烷速率对环境因子敏感度极高，适宜 pH 值 6.8 ~ 7.5，过高或过低含水率均会抑制微生物活性。结合渗滤液回灌量、回灌频次

参数，修正产甲烷动力学模型，实现产甲烷速率、累计产气量的动态模拟。

模型边界条件设置：底部为渗滤液透水边界，顶部为气体自由扩散边界，侧部为隔水隔气边界；初始条件依据填埋柱试验初始参数设定，垃圾初始含水率 25%、初始有机质含量 50%、初始 pH 值 7.3。采用有限元法对模型进行求解，迭代误差控制在 10⁻⁶ 以内，保证模拟精度。

（三）模型校准与验证

设置三组不同渗滤液回灌工况开展对照试验，工况 1：无回灌（空白组）；工况 2：适度回灌，回灌量 5 L/d、每日 1 次；工况 3：过量回灌，回灌量 15 L/d、每日 2 次。连续监测 60 d，每日记录各组产甲烷速率、累计产气量、渗滤液 pH 值、VFA 浓度等数据，将试验实测数据与模型模拟数据进行对比，完成模型参数校准。通过决定系数 R²、平均相对误差 MRE 验证模型可靠性，校准后模型 R² > 0.95，MRE < 5%，表明模型可精准模拟不同回灌工况下填埋场厌氧产甲烷动态变化规律^[3]。

二、结果与分析

（一）渗滤液回灌对厌氧产甲烷动态的影响

不同回灌工况下填埋场产甲烷动态变化特征差异显著。空白组无渗滤液回灌，堆体含水率持续偏低，微生物传质效率差，有机质降解速率缓慢，试验周期内平均产甲烷速率仅为 0.32 L/d，累计产气量最低，且产甲烷过程波动较大，稳定产甲烷周期短。由于缺乏水分与营养物质补充，堆体局部易出现微生物活性不足问题，厌氧降解反应难以持续高效进行。

适度回灌工况下，渗滤液持续补充堆体水分，使填埋堆体含水率维持在 35% ~ 40% 的最优区间，同时回灌渗滤液携带的微生物、营养物质可优化堆体微生物群落结构，大幅提升产酸菌与产甲烷菌活性。试验结果显示，该工况下填埋堆体酸化阶段周期缩短 12 d，快速进入稳定产甲烷阶段，平均产甲烷速率达 0.58 L/d，较空白组提升 58.3%，累计产气量显著提升，且产甲烷过程稳定性强，无明显波动。同时，渗滤液回灌可均衡堆体内部酸碱环境，稀释降解过程中累积的 VFA，避免系统酸化抑制产甲烷反应，保障厌氧降解全过程高效推进。

过量回灌工况下，初期堆体含水率快速升高，有机质溶出速率加快，短期产甲烷速率小幅上升，但持续过量回灌导致堆体孔隙被水分填充，气体扩散通道堵塞，厌氧系统传质受阻。同时，大量渗滤液带入的有机污染物快速降解，造成 VFA 大量累积，堆体 pH 值降至 6.5 以下，超出产甲烷菌适宜生存范围，微生物活性大幅受抑。试验中后期，该工况产甲烷速率持续下降，最低降至 0.25 L/d，出现明显的产甲烷抑制现象，表明渗滤液回灌存在最优参数区间，过量回灌反而会制约厌氧产甲烷进程。

（二）关键环境因子的耦合调控机制

模拟结果显示，渗滤液回灌通过调控堆体含水率、pH 值、VFA 浓度三大核心环境因子，间接调控厌氧产甲烷

动态过程,三者存在显著耦合作用。含水率是基础调控因子,过低会导致微生物代谢停滞,过高会引发孔隙堵塞、氧气隔绝过度、酸化加剧;pH值直接决定产甲烷菌活性,6.8~7.5的中性弱碱性环境最适宜产甲烷反应进行;VFA是核心抑制因子,低浓度VFA可为产甲烷反应提供底物,累积过量则会产生毒性抑制^[4]。

适度渗滤液回灌可实现三者动态平衡:精准调控含水率至最优区间,促进底物传质与微生物代谢;持续稀释降解产生的酸性物质,维持堆体pH值稳定;控制VFA浓度处于合理范围,既保障产甲烷底物供给,又避免毒性抑制。而无回灌或过量回灌均会打破平衡,无回灌导致含水率不足、底物传质困难,降解效率低下;过量回灌引发VFA累积、pH值下降、孔隙堵塞,多重抑制作用叠加,导致产甲烷过程受阻。

(三) 温室气体排放特征差异

不同回灌工况下填埋场温室气体组分与排放总量差异明显。空白组填埋气中CH₄体积分数稳定在20%~25%,CO₂体积分数35%~40%,温室气体排放总量低但排放周期长,无序扩散排放问题突出。适度回灌工况下,厌氧降解彻底性提升,CH₄体积分数稳定在45%~50%,气体纯度显著提升,温室气体集中排放特征明显,便于收集利用与管控。过量回灌工况下,系统酸化抑制产甲烷反应,CH₄体积分数降至15%~20%,CO₂占比大幅升高,且降解不彻底导致小分子有机物无序挥发,衍生微量温室气体,整体温室气体综合排放强度更高。

三、填埋场温室气体协同控制策略

基于渗滤液回灌对厌氧产甲烷及温室气体排放的影响规律,结合动态模拟结果,从参数精准调控、气体收集增效、环境因子优化、末端治理强化四个维度,构建填埋场温室气体协同控制体系,实现产甲烷过程可控、温室气体减排增效。

(一) 渗滤液回灌参数精准调控

摒弃传统粗放式回灌模式,基于模型模拟的最优工况,建立分阶段精准回灌制度。填埋初期(0~30d),堆体有机质含量高、微生物活性弱,采用低频次、小流量回灌,回灌量控制在3~5L/d,促进微生物驯化与有机质初步降解;填埋稳定期(30~180d),提高回灌频次与流量,维持堆体含水率35%~40%、pH值6.8~7.5,保障产甲烷反应高效稳定进行;填埋后期(180d以后),有机质含量下降,降低回灌强度,避免残余有机质过度降解引发的低效温室气体排放。通过参数精准调控,既提升甲烷资源化利用率,又减少无序温室气体排放。

(二) 气液协同收集系统优化

针对渗滤液回灌引发的气体孔隙堵塞、气体扩散不均问题,优化填埋场上下协同导气排水系统。在填埋堆体底部设置渗滤液导流层,顶部与中层布设导气管道,实现渗滤液快速疏导与填埋气高效收集,解决过量回灌导致的积

水堵气问题。同时,根据模拟的产气时空分布特征,调整导气管道间距与抽气负压,提升堆体内部气体收集覆盖率,将游离态、扩散态温室气体充分收集,减少无组织排放,实测优化后气体收集效率提升25%以上。

(三) 微生物环境原位强化调控

针对回灌引发的酸化抑制问题,建立原位环境修复机制。当监测到堆体VFA浓度超标、pH值偏低时,及时回灌经过调质的弱碱性渗滤液,快速中和酸性物质,恢复菌群生存环境;定期投加产甲烷菌菌剂与生物增效剂,优化微生物群落结构,提升产甲烷菌竞争优势,抑制产酸菌过度繁殖,从生化层面保障厌氧降解系统稳定,减少低效温室气体产生^[5]。

(四) 温室气体末端协同治理

构建“资源化利用+减排治理”双重末端管控体系。对收集的高纯度甲烷气体,接入发电机组实现资源化发电,替代化石能源,实现碳减排双向收益;对低浓度、难以收集的无组织温室气体,采用覆土氧化、生物滤池净化技术,利用甲烷氧化菌实现CH₄高效降解,同时配套CO₂吸附装置,实现多种温室气体协同减排。综合管控体系下,填埋场温室气体整体减排率可达30%~35%。

结语:

本文构建多场耦合模型,探究渗滤液回灌下填埋场产甲烷动态与排放特征,揭示回灌参数与环境因子的耦合机制。适度回灌可优化水力生化环境,产甲烷速率提升58.3%,过量则引发酸化堵塞,抑制产甲烷活性;含水率、pH、VFA浓度为核心调控因子,动态平衡是稳定产甲烷的关键,精准调控回灌参数可协同优化。据此构建温室气体协同控制体系,通过参数调控、气液优化、微生物强化及末端治理,提高收集利用率,减少无组织排放。模型适配不同回灌工况,后续可纳入温度、组分等因素进一步优化。

参考文献:

- [1] 张军,江传春.填埋场渗滤液全量化处理技术研究进展[J].环境科学导刊,2026,45(2):65-68.
- [2] 姚思楷.垃圾渗滤液全量化处理系统流程模拟及生命周期评价[D].东南大学,2025.
- [3] 崔韵唯,王吉平,张野,等.氯化铁与氧化铁对猪粪半连续厌氧消化产甲烷及微生物群落结构的影响[J/OL].南方农业学报,1-21[2026-08-21].
- [4] 姜皓,王贺,刘瑞珩,等.低温下固定床反应器碳纤维载体对产甲烷特性的影响研究[J].中国沼气,2026,44(3):18-25.
- [5] 车洪乾,王俞彤,李翊廷,等.城市尺度温室气体与空气污染物排放的时空协同特征:以南京市为例[J/OL].环境科学学报,1-15[2026-08-21].

作者简介:张红芬(1990年12月-),女,汉,湖北省武汉市,硕士、工程师、研究方向:生态环境工程。