

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2013.01.008

水分运移对填埋垃圾降解过程的影响模拟研究

周效志, 桑树勋, 曹丽文, 刘会虎

(中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:模拟填埋实验对比研究了渗滤液定期排放、降雨入渗及渗滤液全量回灌对垃圾生物质降解过程的影响,探讨了生物气资源化填埋水分运移的调控措施。结果表明:渗滤液定期排放难以形成产甲烷菌适宜的 Eh、pH 及湿度条件,垃圾生物质降解表现为持续的水解产酸过程。降雨入渗对环境因子的调控作用微弱,且在入渗水持续冲刷下, COD_{Cr} 累计净溶出量增加了 67.8%。15±2℃ 下的渗滤液回灌使微生物代谢受到抑制,渗滤液累计产生量与 COD_{Cr} 累计净溶出量分别下降了 70.9% 与 88.5%;反应温度升高至 35±2℃,产甲烷菌适宜的环境条件快速形成,但也造成了 NH₄⁺-N 的快速积累。减少地表水入渗量,合理控制渗滤液回灌温度,并在回灌前进行脱氮处理,可显著提高垃圾填埋处理的无害化与资源化水平。

关键词:水分运移;填埋场;生活垃圾;渗滤液;回灌

中图分类号:X705 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)01-0046-06

Simulation of the Effects of Water Migration on Municipal Solid Waste Biodegradation Process in Landfill

Zhou Xiaozhi, Sang Shuxun, Cao Liwen, Liu Huihu

(School of Resources and Geoscience, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: By operating an anaerobic degradation experiment of municipal solid waste landfill, the effects of periodic leachate emission, rainfall infiltration and full leachate recirculation on biodegradation process in landfill were investigated. And the control measures of water migration in biogas resources landfill were discussed. The results show that: in the case of leachate emission, it is difficult to form the suitable environmental factors of Eh, pH and humidity for methanogens. Rainfall infiltration plays a faint adjective function on microbiology environment. Under the continuous erosion action of infiltration rainfall, cumulative net COD_{Cr} leaching load increases by 67.8%. Leachate recirculation causes its cumulative production and net COD_{Cr} leaching load decreases by 70.9% and 88.5% respectively, which shows an obvious inhibited effect on microbial metabolism at 15±2℃. With the temperature increases to 35±2℃, methanogens-suitable environment forms rapidly, but it causes the rapid accumulation of NH₄⁺-N in leachate. The measures, such as reducing the infiltration volume, controlling recirculation temperature reasonably and dealing with nitrogen removal before recirculation, can significantly improve the harmless and resources level of landfill disposal.

Key words: water migration; landfill; municipal solid waste; leachate; recirculation

收稿日期:2012-06-14

基金项目:国家自然科学基金(41072236);江苏省自然科学基金(BK2008133);江苏高校优势学科建设工程资助项目(2011-2013);中国矿业大学青年科研基金(2009A027)

作者简介:周效志(1982-),男,博士,主要从事生活垃圾填埋处置与生物气资源化研究,(E-mail)cumtzzx@163.com。

垃圾填埋场中既存在水分在重力作用下的自然运移,又存在渗滤液回灌作业下的人工运移,填埋体系水质水量变化必然对微生物代谢产生影响。对比研究不同水分运移方式下微生物代谢环境演化及垃圾生物质降解过程,对于揭示生物反应器填埋处置机理,实现垃圾填埋处理目标具有重要的指导意义。当前,国内外学者多从宏观角度研究生物反应器填埋渗滤液回灌作业对流体产生^[1]、污染物去除^[2-3]及填埋场稳定化的控制作用^[4-6],而从实际填埋场水力学特征入手,特别是多因素控制下的水分运移对微生物协同代谢环境影响的研究工作开展较少。

结合生活垃圾填埋场实际情况,通过室内模拟填埋实验对比研究了长期的渗滤液定期排放、大气降雨入渗与渗滤液全量回灌 3 种水分运移方式对填埋体系微生物代谢环境及生物质降解过程的影响,探讨了以促进微生物协同代谢为目的的生物气资源化填埋水分运移调控措施。

1 材料与方法

1.1 实验装置

模拟填埋实验装置如图 1。反应器由 PVC 材料制成,内径 $\phi=9.0$ cm,高 $H=100.0$ cm,底部铺设 $d_1=5.0$ cm 粗砾石层,中部为 $d_2=80.0$ cm 垃圾层,上部覆盖 $d_3=5.0$ cm 粗砂层。导气管与水封瓶相连,及时排出垃圾降解产生的气体。

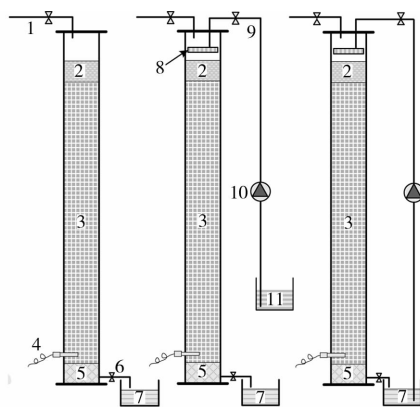


图 1 模拟填埋实验装置

A 装置渗滤液定期排放,模拟填埋场内部水分重力运移;B 装置渗滤液定期排放结合雨水顶部喷洒,模拟填埋场大气降雨及地表径流入渗;C 装置渗滤液定期回灌,模拟填埋场水分人工运移。

1.2 垃圾组成

装填垃圾由人工配比而成,组成及各组分含量

参照中国城市生活垃圾典型特征,又兼顾到高含水率及易降解性^[7]。实验垃圾组成及各组分湿基含量见表 1。

表 1 装填垃圾组成及含量(湿基%)

垃圾组成	有机组分			无机组分		混合组分	
	厨余	果蔬	落叶	废纸	炉渣	煤灰	泥土
含量	15.7	61.9	3.1	3.2	4.2	8.1	3.8

将各组分机械破碎至 2.0 cm 以下,然后均匀混合。测定垃圾初始含水率 $W=73.6\%$,挥发性固体 $VS=64.5\%$,灰分 $A=35.5\%$ 。

1.3 实验过程

按图 1 装填实验材料,各反应器装填垃圾质量 $m=5\ 000$ g,初始容重 $D=0.98$ g/cm³。向各反应器添加悬浮污泥浓度 $MLSS=6.42$ g/L,挥发性悬浮污泥与悬浮性污泥比值 $MLVSS/MLSS=74.7\%$ 的厌氧活性污泥 250 mL 接种启动。实验过程中,采用局限空间调温方式控制环境温度。根据环境温度的变化,将实验过程划分为 2 个阶段:

1) 实验 I 期(1~150 d):反应温度控制在 15 ± 2 °C,每 10 d A 装置渗滤液排空 1 次,B 装置渗滤液排空后以模拟雨水自顶部喷洒,C 装置以 NaOH 溶液调节渗滤液 pH 值至 7.2 后全量回灌。B 装置模拟降雨入渗频率为 10 d/次,入渗量根据徐州市 2000—2004 年降雨量确定为 110 mL/次,pH=6.58。

2) 实验 II 期(151~330 d):提高反应温度至 35 ± 2 °C,除 C 装置渗滤液全量回灌前不再调节 pH 值外,各装置其它操作方式及频率不变。

1.4 监测指标与方法

填埋体系 Eh 值采用 ORP-411 测定仪监测,渗滤液 pH 值采用 PHS-3C 型精密酸度计测定。碳酸氢盐碱度 ALK 及 NH_4^+-N 浓度采用联合蒸馏滴定法测定, COD_{Cr} 采用重铬酸钾氧化法测定。为了减少取样损失,使渗滤液尽可能全量回灌,C 装置渗滤液 pH 值调节前采集少量样品(2 mL),样品稀释后进行 ALK、 NH_4^+-N 浓度及 COD_{Cr} 测定。

2 实验结果

2.1 Eh 值

各装置 Eh 值变化过程如图 2 所示。

实验 I 期,各装置 Eh 值随渗滤液排放及回灌呈周期性波动,说明样品采集及装置操作导致外界空气进入对密闭反应器内部环境产生了一定影响,且渗滤液回灌情况下的 Eh 值波动幅度较小。进入实验 II 期,Eh(C)呈逐渐下降趋势,说明周期性取样

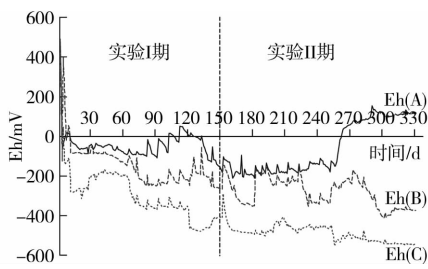


图 2 填埋体系环境 Eh 值变化过程

回灌对填埋体系 Eh 值波动的影响已逐渐消除。

2.2 pH 值

各装置渗滤液 pH 值变化过程如图 3 所示。

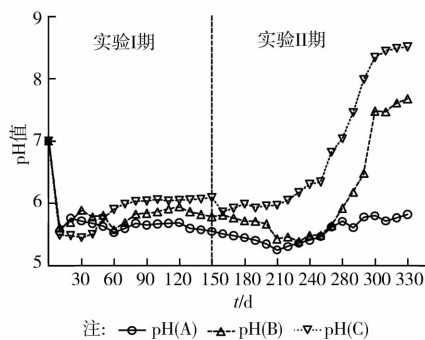
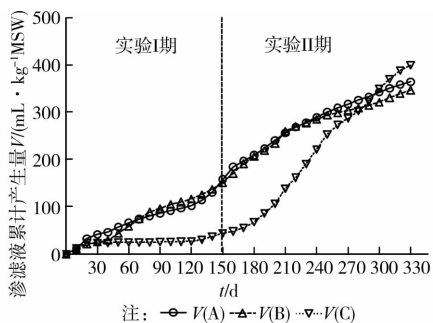


图 3 填埋体系环境 pH 值变化过程

实验 I 期,各装置 pH 值快速下降并长期稳定在 5.5~6.0。尽管 C 装置渗滤液回灌前进行了 pH 值调节,但各装置 pH 值差异并不明显,pH(C)仅略高于 pH(A)与 pH(B)。进入实验 II 期,pH(B)与 pH(C)快速升高,pH(A)长期稳定在 5.5 左右,三者间差异显著增大。

2.3 渗滤液产生量

各装置渗滤液累计产生量变化如图 4 所示。



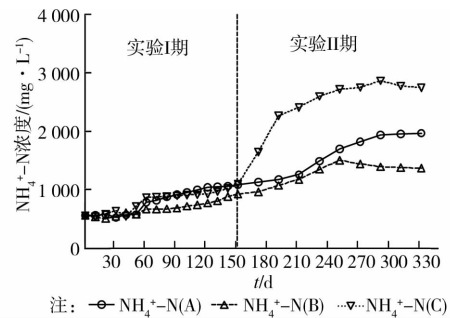
注: 渗滤液累计产生量为填埋垃圾降解自身产生的渗滤液,不包括 B 装置模拟降雨及 C 装置渗滤液回灌导致的渗滤液体积增加部分。

图 4 渗滤液累计产生量变化过程

实验 I 期,V(A)、V(B)逐渐增加,V(C)长期稳定在 25 ml/kg MSW。进入实验 II 期,V(C)快速增加,实验结束时略高于 V(A)与 V(B)。

2.4 NH₄⁺-N 浓度

各装置渗滤液 NH₄⁺-N 浓度变化如图 5 所示。

图 5 渗滤液 NH₄⁺-N 浓度变化过程

实验 I 期,各装置渗滤液 NH₄⁺-N 浓度缓慢升高,且无明显差异。进入实验 II 期,NH₄⁺-N(C)快速升高,并在实验后期稳定在 2 400~2 900 mg/L。

3 讨论

3.1 渗滤液排放对微生物代谢环境的影响

渗滤液定期排放对填埋体系最直接的影响在于改变了垃圾含水率。在不考虑垃圾固相生物物质减少的前提下,计算各装置垃圾含水率的变化如图 6 所示。

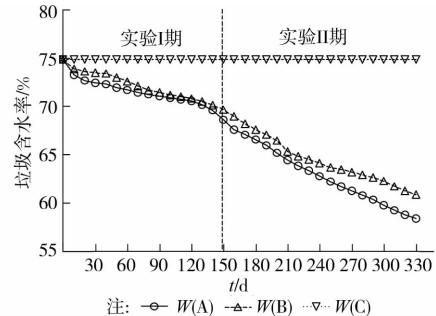


图 6 各装置垃圾含水率变化过程

渗滤液定期排放使 A 装置垃圾含水率由 74.9% 下降至 58.4%,且实验 II 期下降更快,因此难以长期维持微生物代谢适宜的湿度条件。随着反应的进行,环境湿度因子对微生物代谢的抑制作用将逐渐增强,并最终导致垃圾生物降解的停滞^[8]。

渗滤液定期排放使环境 Eh 值相对较高,长期维持在兼性厌氧微生物适宜的范围,且 Eh 值产生明显的周期性波动。由于 Eh > -300 mV 不利于专性厌氧产甲烷菌的代谢活动,因此 A 装置填埋垃圾降解以兼性厌氧微生物的水解产酸作用为主。持续的水解产酸主导作用使渗滤液 pH 值长期维持在 5.5 左右,对水解产酸与产甲烷微生物协同代谢也产生了一定的抑制^[9]。

分析渗滤液定期排放使环境 Eh 值升高并产生

周期性波动主要有 2 个原因:1) 填埋场内部微生物随渗滤液排放而减少,造成微生物对生物质降解作用的不稳定;2) 渗滤液排放使垃圾体部分饱水孔隙变为不饱水状态,导致垃圾体内部压力下降,外界 O_2 通过气液疏排管道或覆盖层进入垃圾体,使环境 Eh 值迅速升高。在实验 I 期,渗滤液定期排放使垃圾体中不饱水孔隙及微生物损失量不断增加,使 Eh 值波动具有明显的周期性;进入实验 II 期,较高的反应温度促进了兼性厌氧微生物对填埋垃圾孔隙中 O_2 的快速消耗,使填埋体系环境 Eh 值的波动幅度明显减小;当含水率降至湿度因子抑制微生物代谢时,Eh 值在实验后期快速升高。

3.2 降雨入渗对垃圾生物质降解过程的影响

大气降雨与地表径流入渗向填埋体系补充了少量水分,使垃圾含水率下降速率变缓。与 A 装置相比,B 装置垃圾含水率由 74.9% 下降至 60.9%,说明地表水入渗对垃圾含水率调节作用较小(图 6)。随着反应的进行,填埋体系环境湿度条件仍不能满足微生物长期稳定代谢的要求。

实验进行前 300 d,B 装置 Eh 值在 $-300 \sim -100$ mV 范围内波动,环境 Eh 因子适于专性厌氧水解产酸菌代谢。由于 B 装置适于产甲烷菌代谢的 Eh 与 pH 环境条件在实验进行 300 d 后才基本形成,因此垃圾生物质降解仍以微生物的水解酸化作用为主。在长期的水解酸化主导作用下,B 装置 COD_{Cr} 累计净溶出量逐渐升高,且由于入渗水的持续冲刷作用, COD_{Cr} 累计净溶出量与 A 装置相比增加了 67.8%(图 7)。

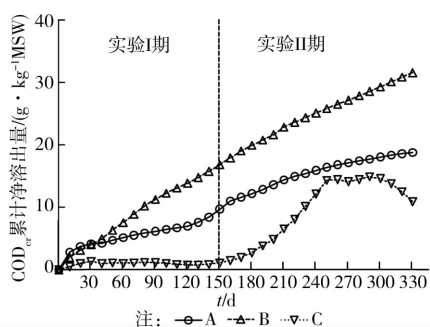


图 7 各装置 COD_{Cr} 累计净溶出量变化过程

大气降雨与地表径流入渗减少了垃圾体中不饱水孔隙,一定程度上抑制了外界 O_2 的进入,导致环境 Eh 值相对较低。然而,由于入渗水与渗滤液水质存在较大差异,因此周期性的渗滤液排放与模拟降雨入渗对填埋体系微生物代谢造成了较大冲击,这就导致 B 装置环境 Eh 值发生频繁的大幅度波动,严重影响了产甲烷菌为代表的厌氧微生物

代谢^[10]。

3.3 渗滤液回灌对垃圾生物质降解过程的影响

渗滤液全量回灌不仅减少了不饱水孔隙,避免了填埋体系微生物数量损失,而且使垃圾含水率始终维持在较高水平,使 C 装置 Eh 值相对稳定且呈逐渐下降趋势,为微生物种群间协同代谢创造了环境条件^[11]。

实验进行 70 d 后,渗滤液全量回灌 C 装置环境 Eh 值下降至 -300 mV,快速形成了专性厌氧产甲烷菌适宜的环境 Eh 条件。然而,由于实验 I 期渗滤液 pH 值维持在 6.0 左右,不利于产甲烷菌的代谢,因此垃圾生物质降解以专性厌氧菌水解产酸作用为主。进入实验 II 期,随着较高温度下产甲烷菌对有机酸的快速消耗导致 pH 值逐渐升高,Eh 值进一步降至 -450 mV 以下,适宜产甲烷菌代谢的环境 Eh 与 pH 条件才逐渐形成。可见,实验 II 期 C 装置垃圾生物质降解在专性厌氧水解产酸菌与产甲烷菌的交替主导作用下进行。在这种交替的主导作用下,C 装置 COD_{Cr} 累计净溶出量经历了先升后降的变化过程(图 7)。

在实验 I 期,尽管 C 装置采取了渗滤液 pH 值调节回灌措施,但填埋体系环境 pH 值并无明显升高,仍长期稳定在 6.0 左右。图 8 渗滤液碳酸氢盐碱度 ALK 监测结果表明:在实验 I 期,C 装置渗滤液 ALK 较低,对固相垃圾水解酸化产物的缓冲能力弱,是造成微生物代谢环境 pH 值持续较低的原因。在填埋场水解产酸主导作用阶段,仅通过碱性溶液调节渗滤液 pH 值的方式难以快速形成产甲烷菌适宜的 pH 条件。实验 II 期,不进行渗滤液 pH 调节而采用渗滤液直接回灌,随着较高反应温度下产甲烷菌代谢活性增强造成有机酸的快速消耗,填埋体系环境 ALK 及 pH 值逐渐升高。因此,提高填埋体系产甲烷菌对水解酸化产物的代谢能力,形成多种微生物菌群的协同代谢作用,成为促进微生物协同代谢环境快速形成的根本措施。

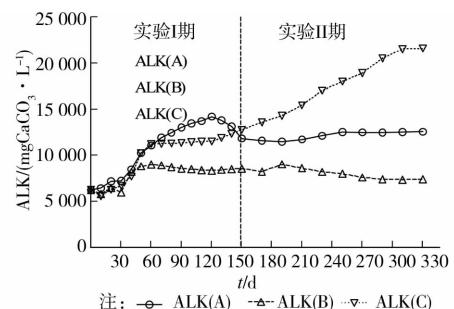


图 8 各装置渗滤液 ALK 变化过程

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 是微生物生长所需的基本氮源,但高 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度也会对其产生毒性作用^[12-13]。已有的研究表明:当 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度达到 1 500 mg/L 就会对产甲烷菌产生一定的抑制作用^[7],当 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度达到 3 000 mg/L 时,这种抑制作用更为明显^[14]。与 A、B 装置相比,C 装置 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度在实验 II 期迅速升高,实验进行 210 d 后长期稳定在 2 400~2 900 mg/L 的较高水平,表明长期的渗滤液全量回灌对产甲烷菌代谢产生了不利影响(图 5)。因此,渗滤液回灌前进行脱氮处理,可保证微生物协同代谢的顺利进行,进一步提高垃圾生物质产能。

3.4 反应温度对渗滤液回灌效果的影响

温度对埋垃圾微生物降解过程影响显著^[15-16]。当前研究表明:在 15~35℃ 的中低温范围内,反应温度升高可显著增强微生物的降解能力^[17]。在 15±2℃ 的环境温度下,尽管渗滤液回灌使环境 Eh、pH 因子向适宜产甲烷微生物生长代谢的方向快速演化,但较低的反应温度影响了产甲烷微生物细胞内酶的活性,抑制了其液相生物质的快速分解,因此 15±2℃ 下的渗滤液回灌使埋垃圾降解仍表现为持续的水解酸化过程。此外,由于渗滤液回灌使埋垃圾时刻处于高浓度液相有机质环境中,对固相垃圾生物质水解也产生了明显的抑制作用。在这种抑制作用下,实验 I 期 C 装置渗滤液累计产生量与 A 装置相比下降了 70.9%, COD_{Cr} 累计净溶出量与 A 装置相比下降了 88.5%。当环境温度升高至 35±2℃,埋体系微生物细胞内酶的活性显著增强,在渗滤液回灌快速形成产甲烷菌适宜环境条件的配合下,埋体系微生物菌群生长及优势菌群更替速率加快,导致回灌渗滤液中有有机污染物的快速积累与消耗, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度迅速升高, COD_{Cr} 累计净溶出量呈先升后降的变化趋势。

可见,埋垃圾生物质的快速降解不仅需要适宜的埋体系微生物代谢环境,还需要微生物菌群具有较强的生长及代谢能力。渗滤液回灌的调节作用可促进产甲烷微生物适宜环境的快速形成,控制合理的反应温度能够提高埋体系微生物体内酶的活性,加快微生物的生长及代谢速率,因此环境温度的配合是对埋体系渗滤液回灌作业的基本要求。

3.5 生物气资源化地质埋水分运移调控措施

对比不同水分运移方式对埋体系稳定化过程的影响,结果如表 2 所示。

表 2 水分运移方式对埋体系稳定化过程的影响

水分运移方式	水解产酸作用	产甲烷作用	稳定化周期	污染控制	生物质产能
定期排放	抑制	抑制	延长	困难	气量少
地表入渗	促进	抑制	缩短	困难	气量少
低温回灌	抑制	抑制	延长	容易	气量少
高温回灌	促进	促进	缩短	容易	气量多

从不同水分运移方式下的埋垃圾降解过程对比来看:渗滤液定期排放、地表水入渗及渗滤液低温回灌都难以兼顾到埋垃圾处理的快速减量化、环境无害化与高效资源化目标,只有在较高反应温度下的渗滤液回灌才能够满足缩短埋体系稳定化周期、降低埋体系环境污染控制难度、提高垃圾生物质产能的目的。

埋垃圾埋体系内部温度受到气候、地热及埋垃圾降解生物能等多因素的共同影响。在低纬度地区或夏季,随着深度的增加,埋体系内部温度逐渐降低,高纬度地区或冬季则相反^[18]。为了保证埋垃圾生物气资源化埋体系渗滤液回灌的增产效果,需要根据埋体系所处环境温度的差异合理选择渗滤液回灌方式。我国北方埋体系环境温度较低,宜采用地表下竖井式回灌的方式^[19];而南方埋体系环境温度较高,宜采用埋体系运行期间直接回灌或表面回灌的方式^[7],最终通过控制渗滤液回灌反应温度增强埋体系埋垃圾无害化、资源化处置能力。此外,较高反应温度下的渗滤液回灌可造成 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 快速积累,并对产甲烷微生物代谢产生抑制作用,因此渗滤液回灌前需根据 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度监测结果进行必要的脱氮处理,以保证渗滤液回灌效果。

4 结 论

1) 渗滤液定期排放难以形成产甲烷菌适宜的环境 Eh、pH 及湿度条件,埋垃圾生物质降解表现为持续的水解产酸过程。大气降雨及地表径流入渗对环境湿度因子的调节作用微弱,产甲烷菌代谢适宜的环境条件形成缓慢,且在入渗水持续的冲刷作用下,渗滤液 COD_{Cr} 累计净溶出量增加了 67.8%。

2) 15±2℃ 环境下的渗滤液回灌使其累计产生量减少了 70.9%, COD_{Cr} 累计净溶出量下降了 88.5%,对水解产酸及产甲烷代谢产生了明显的抑制作用。当反应温度升高至 35±2℃ 时,产甲烷菌适宜的环境条件快速形成,促进了埋体系微生物的协同代谢。

3)反应温度对渗滤液回灌处理效果影响显著,环境温度的配合是对填埋场渗滤液回灌作业的基本要求。减少填埋场地表水入渗量、合理控制渗滤液回灌反应温度,并在渗滤液回灌前进行脱氮处理,可显著提高生活垃圾填埋处理的无害化与资源化水平。

参考文献:

- [1] Sanphoti N, Towprayoon S, Chairasert P, et al. The effects of leachate recirculation with supplemental water addition on methane production and waste decomposition in a simulated tropical landfill [J]. *Journal of Environmental Management*, 2006, 81: 27-35.
- [2] Zhao Q L, Liu X Y, Qi X D, et al. Landfill leachate production, quality and recirculation treatment in northeast China [J]. *Journal of Environmental Science*, 2006, 18(4): 625-628.
- [3] Li Y, Wang L, Zheng S Z, et al. Removal of pollutants of landfill leachate by recirculation [J]. *Journal Wuhan University of Technology: Material Science Edition*, 2008, 23(2): 281-284.
- [4] Delia T S, Osman N. Impact of leachate recirculation and recirculation volume on stabilization of municipal solid wastes in simulated anaerobic bioreactors [J]. *Process Biochemistry*, 2004, 39(12): 2157-2165.
- [5] Sunil K, Chart C, Ackmez M. Bioreactor landfill technology in municipal solid waste treatment: An overview [J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2011, 31(1): 77-97.
- [6] Reddy K R, Hettiarachchi H, Gangathulasi J, et al. Geotechnical properties of municipal solid waste at different phases of biodegradation [J]. *Waste Management*, 2011, 31(11): 2275-2286.
- [7] 沈东升. 生活垃圾填埋生物处理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [8] 刘海春, 束琴霞, 李兰兰, 等. 水分对垃圾填埋降解及渗滤液特性的影响研究[J]. *科技通报*, 2011, 27(4): 610-614.
- Liu H C, Shu Q X, Li L L, et al. Research on the effects of moisture on landfill waste degradation and leachate feature [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2011, 27(4): 610-614.
- [9] 江娟, 詹爱平, 冯斌. 调节渗滤液 pH 回灌对厌氧填埋的影响[J]. *环境科学*, 2010, 31(10): 2500-2506.
- Jiang J, Zhan A P, Feng B. Effects of the leachate recirculation with pH adjusted on anaerobic landfill [J]. *Environmental Science*, 2010, 31(10): 2500-2506.
- [10] 赵颖, 梁冰, 薛强, 等. 地表水入渗对垃圾填埋场水质水量影响的数值模拟分析[J]. *岩土力学*, 2010, 31(7): 2295-2302.
- Zhao Y, Liang B, Xue Q, et al. Numerical simulation analysis of effect of surface water infiltration on water quality and quantity in landfills [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(7): 2295-2302.
- [11] Alkaabi S, Van G P J, Warith M A. Effect of saline water and sludge addition on biodegradation of municipal solid waste in bioreactor landfills [J]. *Waste Management and Research*, 2009, 27(1): 59-69.
- [12] He S J, Wang J L, Zhao X. Effect of ammonium concentration on the methanogenic activity of anaerobic granular sludge [J]. *Journal of Tsinghua University*, 2005, 45(9): 1294-1296.
- [13] Valencia R, Van D Z W, Woelders H, et al. Anammox: An option for ammonium removal in bioreactor landfills [J]. *Waste Management*, 2011, 31(11): 2287-2293.
- [14] 于芳芳, 伍健东. 氨氮对厌氧颗粒污泥产甲烷菌的毒性研究[J]. *化学与生物工程*, 2008, 25(4): 75-78.
- Yu F F, Wu J D. Toxicity study of ammonium on methanogenic bacteria in anaerobic granular sludge [J]. *Chemistry & Bioengineering*, 2008, 25(4): 75-78.
- [15] 黄涛, 刘辉, 张西华. 温度对垃圾渗滤液污染特性影响试验研究[J]. *水处理技术*, 2010, 36(3): 70-73.
- Huang T, Liu H, Zhang X H. Experimental study on pollution character of landfill leachate [J]. *Technology of Water Treatment*, 2010, 36(3): 70-73.
- [16] 赵宋敏, 李定龙, 戴肖云, 等. 温度对厨余垃圾厌氧发酵产酸的影响[J]. *环境污染与防治*, 2011, 33(3): 44-47.
- Zhao S M, Li D D, Dai X Y, et al. The influence of temperature on acid production during anaerobic fermentation of kitchen garbage [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2011, 33(3): 44-47.
- [17] 李启彬, 刘丹, 欧阳峰. 生物反应器填埋场固相垃圾的水解速率[J]. *西南交通大学学报*, 2005, 40(1): 126-130.
- Li Q B, Liu D, Ouyang F. Hydrolysis rate of solid waste in bioreactor landfill [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2005, 40(1): 126-130.
- [18] 张纬, 薛强, 刘磊, 等. 季节性气候变化对填埋场温度分布影响的研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2007, 3(8): 1541-1573.
- Zhang W, Xue Q, Liu L, et al. Research on the impact of seasonal climate change on the distribution of temperature in landfill [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineer*, 2007, 3(8): 1541-1544.
- [19] 殷勇, 王洪涛, 张相锋. 垃圾填埋场水分迁移模型的应用研究[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2002, 3(10): 36-40.
- Yin Y, Wang H T, Zhang X F. Numerical simulation of moisture movement in landfill bioreactors under the condition of leachate recirculation [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2002, 3(10): 36-40.