寒冷地区垃圾渗滤液产生量预测研究

赵庆良, 刘雪雁, 刘志刚, 邱微, 齐旭东
(哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要: 东北地区 4 季变化明显, 冬季寒冷, 冰冻期较长, 渗滤液的产生具有明显的不连续性. 为了考查该气候条件下渗滤液产生量的变化情况以及回灌对渗滤液产生量的影响, 在室外建立 2 个处理同类生活垃圾的模拟垃圾填埋场, 其中 1 个渗滤液不回灌做为对照, 另 1 个带有渗滤液回流装置, 进行全年渗滤液产生量的跟踪监测. 在对垃圾渗滤液产生量预测模型进行综合比较的基础上, 基于全年降雨量和渗滤液产生量的实测数据, 采用线性回归确定了经验公式法的模型参数, 通过模型预测值与现场实测值的对比, 分析了预测模型的可靠性与准确性, 从而为寒冷地区垃圾填埋场渗滤液产生量的预测、收集和处理系统的设计以及渗滤液回灌技术的推广应用提供科学依据.

关键词: 卫生填埋场; 垃圾渗滤液产生量; 回灌; 预测模型
中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2005)06-0190-05

Prediction of Landfill Leachate Production in Cold Area

ZHAO Qing-liang, LIU Xue-yan, LIU Zhi-gang, QIU Wei, QI Xu-dong
(School of Municipal & Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Leachate production is evidently discontinuous in the chilly northeast areas because of the distinct 4-seasons conversion and long frozen time. In order to investigate into the leachate production variability and the impact of leachate recirculation on sanitary landfill, two simulated landfill reactors were constructed outdoors, which were filled with the same municipal solid waste. One reactor was provided with leachate recirculation and the other without as a control. On the basis of the obtained leachate production data and evaluation of the available leachate predictive models, the empirical model was recommended and the parameters within the formula were determined through linear regression analysis, which was proved to be reliable and practical. The results provided a scientific basis for the prediction of leachate production, design of leachate collection and treatment system. Besides, this study indicated that leachate recirculation was feasible for leachate treatment in the cold areas.

Key words: sanitary landfill; leachate production; recirculation; prediction model

垃圾渗滤液的产生量直接决定其收集和处理系统的规模、构筑物的占地面积和其他经济指标, 是垃圾填埋场设计和管理的关键问题之一. 受降雨、地形条件、填埋操作方式和气候条件等诸多复杂因素的影响, 垃圾渗滤液产生量具有明显的区域性和季节变化性[1]. 国外研究人员对地中海气候条件下的希腊、中东干旱气候条件下的科威特和临近海边的垃圾填埋场进行了实地考察, 现场监测数据结果差异性很大, 没有明显的规律可循[2~4]. 即使同一填埋场, 在干、湿(渗滤液回灌)环境下的水量差别甚至可以达到 28 倍[5]. 国内有报道指出, 在积雪地区渗滤液的日平均产生量最高值和最低值之比为 10∶1, 而在非积雪地区仅为 4∶1[6]. 哈尔滨地处中国北方寒冷地区, 冬长夏短, 四季分明. 结冻期在 10 月下旬~11 月初, 解冻期在 4 月下旬~5 月初. 全年降水量为 360~747 mm, 且 50%左右都集中在 7、8 月份; 全年蒸发量为 1 200~1 814 mm, 为降水量的 2~4 倍. 该地区的各垃圾填埋场渗滤液产生均具有不连续性, 但是水量和水质等基础资料的监测数据缺乏, 限制了设计参数的准确选择.

填埋场相当于一个以垃圾层为填料的厌氧生物反应器. 目前, 垃圾渗滤液回灌技术在理论和实践上均已证明是有效可行的, 渗滤液回灌能促进垃圾的分解和稳定化进程, 明显改善水质、减少水量[7,8]. 该技术在 4 季变化明显、冰冻期较长、蒸发量大于降雨量的东北寒冷地区尤具有广阔地应用前景. 渗滤液回灌的水量平衡问题是研究的要点与难点, 也是工程应用的关键问题. 为此, 本文开展了东北寒冷地区垃圾渗滤液产生量变化情况、回灌对其影响以及渗滤液产生量的预测模型等基础性研究, 以便为实际工程设计提供科学依据.

1 实验设施与方法

本实验设计 2 个长 × 宽 × 高 = 750 mm ×

收稿日期: 2004-09-24; 修订日期: 2005-02-18
基金项目: 黑龙江省科技厅重点攻关项目(GB01C204-02)
作者简介: 赵庆良(1962~), 男, 博士, 教授, 主要从事废水处理、垃圾渗滤液处理与污泥处理与处置方面的研究.

700 mm×1 000 mm的模拟垃圾填埋场装置,其中 1 号装置渗滤液不回灌,2 号装置渗滤液通过回流泵均匀回灌到垃圾填埋场内,具体装置如图 1 所示.考虑到渗滤液的产生量主要受到降雨量而非垃圾层本身分解影响,试验装置置于室外环境中.

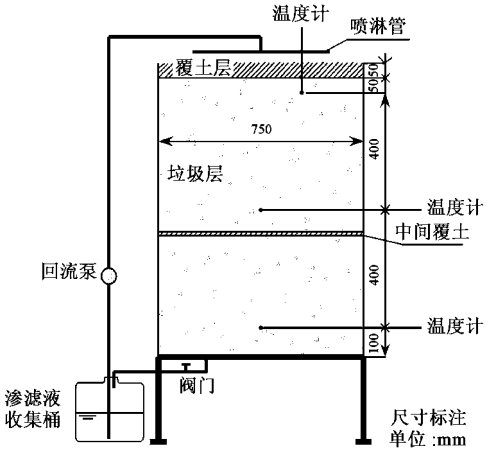

图 1　带渗滤液回灌装置的模拟垃圾填埋场

Fig.1　Pilot-scale landfill reactor with leachate recirculation

实验用生活垃圾样品取自哈尔滨工业大学家属区,其组分和性质见表 1.

表 1　垃圾样品组分及性质

Table 1　Solid waste composition and characteristics

组分	质量/kg	比例(质量分数)/%
厨余物	492	82
纸类	48	8
塑料、橡胶	36	6
丝织品	9	1.5
砖头、沙石	9	1.5
玻璃、金属	6	1
含水率		39.2

垃圾经分拣、称重、均匀混合后按照 600kg/m^3 的填埋密度[9]分 2 批进行投加、夯实,最后覆盖 50 mm 的土层作封场处理.操作过程中始终保持 1 号和 2 号垃圾填埋量和操作方式完全相同.每 d 收集并用容积法测量渗滤液产生量,取样 100 mL 进行水质分析,1 号剩余渗滤液留待处理所用,2 号剩余渗滤液按 4 200 mL/d [即 8 mm/(m^2·d)] 均匀回灌[9],不足4 200 mL 时全部均匀回灌.

本实验第 1 批垃圾于 2003-05-26 装填完毕,2003-06-05 装填完第 2 批垃圾后并进行封场处理.自 2003-05-28 开始产生渗滤液,到 2003-11-05 因冰冻停止产生渗滤液,渗滤液产生历时为 162d.

2　渗滤液产生量随时间的变化规律

渗滤液的日产生量变化曲线见图 2.渗滤液产生量波动范围非常大,随着降雨量的多少而相应地增减,并存在 10 ~ 20 d 的滞后时间;而对于场龄为 7a 的新垃圾填埋场,降雨对渗滤液的滞后期大约是 1 ~ 2 个月[10].在填埋初期(0 ~ 10d),内部垃圾经过短暂调整后开始分解,渗滤液呈现缓慢增长趋势,渗滤液产生量维持在 300 mL/d 左右;由于受第 10d 第 2 批垃圾填埋夯实和挤压以及第 11 d 强降雨的影响,渗滤液在第 11 d 和第 13d 出现大幅度增加,最高产生量达到 4 080 mL/d;在降雨多发时段(30 ~ 88d),由于前期雨量的影响,内部垃圾的含水率和土壤的持水能力均已达到饱和状态,垃圾层的截流作用减弱,降雨量几乎全部转化为渗滤液,表现为该时段渗滤液产生量整体上高于其他时段的渗滤液产生量.随着填埋时间的延续和降雨的减少,垃圾层进入稳定时期,渗滤液随着降雨的变化而相应变化.

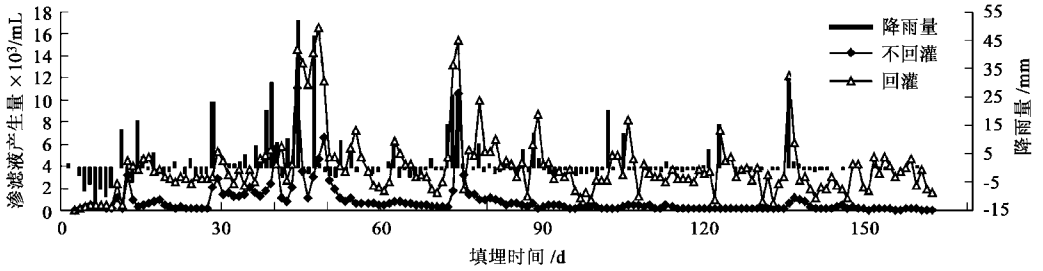

图 2　日降雨量与渗滤液日产生量变化曲线

Fig.2　Variation curves of rainfall and leachate production versus time

对比考察试验期间渗滤液产生总量,1 号装置渗滤液总量为日产生量的总和,累计136 117 mL,渗滤液产生期间日平均产量为 1.60 × 10^{-3} m^3/(m^2·d);而 2 号装置渗滤液产生总量为实验期间最后 1 d 的产生量和水质测量所消耗的总和,累计 17 622 mL,渗滤液产生期间日平均产量为 2.07 ×

$10^{-4}m^3/(m^2 \cdot d)$,仅为 1 号渗滤液的 12.95%.减少的水量除了由于蒸发作用散失到大气中外,一部分被垃圾拦截吸收以提高垃圾自身含水率或填充垃圾层内的孔隙,还有一部分则被微生物自身生长利用并加速垃圾的分解.

3 垃圾渗滤液产生量预测模型与评判

渗滤液产生量的影响因素包括降水、蒸发及气候状况、垃圾的性质与成分、填埋场水文地质条件、地下水入侵、场底防渗、覆土层状况、地表植被、填埋场作业区大小及作业方式等,并且各因素相互交叉共同影响,其中自然降水是决定因素.

垃圾填埋场运行期间,降水渗入系数是地表径流、蒸发、土壤与垃圾含水率的函数,并随着填埋时间的延伸而变化.另外由于填埋层中不光是压实的垃圾体,还有中间覆土层.一般来说,垃圾层的渗透系数比覆土层的渗透系数大得多,而且即使在同一垃圾层中,其含水率不同,腐熟程度不一致,渗透系数也不相同.因此,下渗的水分不是在一个均质介质中运动,而是在垂直方向与水平方向渗透性能差异都很大的复杂介质中流动.实际上求解水分在填埋场内的运动规律、预测渗滤液产生量是一个非常复杂的问题.目前国内外提出的多种计算方法,基本都是依据水量平衡和损益原理建立的.

国内外计算渗滤液的方法多为水量平衡法[11]、经验公式法[12]、经验统计法[13]和 HELP 模型[14].水量平衡法是严格根据水量平衡关系推导出的计算模式,但该法没有考虑填埋场内水分的运动过程,计算出的渗滤液量偏高;另外其参数较多,部分参数的取值难以准确确定,所以在实际计算和预测中一般不采用.经验统计法要求已建填埋场有完整且准确的渗滤液产生量数据,并保证两填埋场的各种条件应该相同或者相近,这在实践中非常难做到,用该法估计出的结果误差也比较大.HELP 模型认为重力是产生渗滤液的唯一动力,没有考虑覆土和垃圾层之间空隙的毛细作用,计算过程比较复杂,且针对性较强.

经验公式法考虑降雨量是渗滤液产生的主导因素,将其他各种因素的影响归纳为简单参数.由于模型简单且易于计算,在实际工程中多采用该模型进行渗滤液量的计算和预测.当以降雨量作为计算渗滤液产生量的依据时,其表达式为:

$$Q = C \times I \times A \times 10^{-3} \quad (1)$$

式(1)中,Q 为渗滤液产生量,m^3/d;I 为日降雨量,mm/d;A 为填埋场面积(包括作业区和完成区),m^2;C 为渗出系数,在 0.2~0.8 之间.

本实验模拟垃圾填埋场装置采取了防渗防漏等阻水措施,自然降水是影响垃圾渗滤液产生的决定因素,故选择经验公式法对渗滤液产生量进行拟合.

4 寒冷地区垃圾渗滤液产生量预测模型

4.1 无回灌操作时渗滤液产生量预测模型

无回灌操作时渗滤液的产生量可直接由公式(1)进行计算.式(1)中 Q 为 1 号装置渗滤液产生量实测值,I 为降雨量实测值,汇水面积 A 为 $0.525\ m^2$.通过直线拟合回归分析,得到渗出系数 C 的数值见表 2.

表 2 无回灌操作渗滤液产生量预测模型渗出系数

Table 2 Leaching coefficient for leachate production model without recirculation

旬降雨量 I/mm	<20	20~50	50~100	>100
渗出系数 C	0.8	0.309	0.611	0.445

从表 2 可以看出,旬降雨量偏低(<20 mm)时,垃圾层处于较干燥状态,吸水能力最强.降雨大部分被吸收进而转化为渗滤液流出,其渗出系数达到最大值 0.8.旬降雨量介于 20~100 mm 时,随着垃圾层含水率的不断增加,其吸水能力逐渐下降,降雨转变为渗滤液的比例在增加,渗出系数增加.旬降雨量偏高(>100 mm)时,内部垃圾的含水率和土壤持水能力均已达到饱和状态,吸水能力最差.同时多余的水分在垃圾表面形成水膜,降雨更加难以进入垃圾体内部,通过蒸发作用散失到空气中的比例升高,其渗出系数变小.

为了考察预测模型的准确性和适用性,对模型预测值与实测值进行了对比分析,结果见图 3.

从图 3 可以看出,无回灌操作条件下渗滤液产生量模型预测值与实测值的总体变化趋势一致,两条曲线的拟合程度比较好.由于受第 10d 第二批垃圾填埋的挤压作用和持续影响,6 月上旬(15d)和下旬(35d)的渗滤液实测值偏高.受 7 月上旬(45d)强降雨量的滞后影响,7 月中下旬(55~66d)的渗滤液实测值偏高.9 月下旬和 10 月上旬(127~137d)的渗滤液实测值低于预测值,是由于 9 月中旬(117d)降雨太少,垃圾和土壤的含水率降低,垃圾层对水分的吸收能力增加,降雨转化为渗滤液的比例下降.这也是渗滤液产生量滞后于降雨量的具体体现.

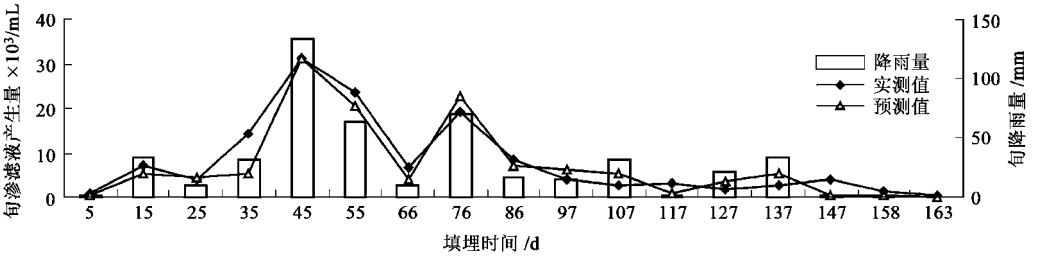

图 3　无回灌操作渗滤液产生量模型预测值与实测值的对比

Fig.3　Comparison of predictive and actual leachate production without recirculation

4.2　回灌操作时渗滤液产生量预测模型

在回灌操作条件下,除前面提及影响因素之外,渗滤液回灌的水力负荷、有机负荷、回灌量的多少和频率等也对渗滤液产生量有或大或小的影响.有学者用 SUTRA 模型(即饱和-非饱和三维非稳定数学模型),引入填埋介质概念,考虑不同填埋介质的持水能力和含水率,通过求有限单元数值解,来定量模拟和预测不同回灌条件下的渗滤液产生量[15,16];本研究仅考虑回灌量的影响.假设降雨对渗滤液产生量的影响与无回灌操作时完全相同,即两者渗出系数相同,而回灌的渗滤液除了蒸发损失外,大部分进入垃圾体并最终转化为渗滤液流出,其对渗滤液产生量贡献系数为 a,则式(1)修正为:

$$Q = C \times I \times A \times 10^{-3} + aQ_h \qquad (2)$$

式(2)中,Q_h 为回灌渗滤液量,m^3/d;其他符号含义同前.通过直线拟合回归分析,得到回灌渗滤液对当日产生渗滤液的贡献系数 a 的数值,具体见表 3.

表 3　回灌操作垃圾渗滤液产生量预测模型渗出系数与回灌贡献系数

Table 3　Leaching and contribution coefficients for leachate production model with recirculation

模型参数	旬降雨量 I/mm			
	<20	20~50	50~100	>100
C	0.8	0.309	0.611	0.445
a	0.684	0.776	1	0.772

从表 3 可以看出,当旬降雨量介于 <20~100mm 时,回灌的渗滤液使垃圾层含水率不断增加,其吸水能力逐渐下降,回灌的渗滤液大部分流出垃圾体,贡献系数 a 逐渐增加.当旬降雨量偏高(>100mm)时,内部垃圾的含水率和土壤的持水能力均已达到饱和状态,吸水能力最差.同时由于垃圾表面水膜的存在,回灌渗滤液更加难以进入垃圾体内部,在表面被蒸发损失的比例升高,其贡献系数 a 变小.由于研究期间多处在雨季,回灌渗滤液通过蒸发作用损失得较少,对渗滤液产生量的贡献比较大,贡献系数 a 均在 0.6 以上.

为了考察该预测模型的准确性和适用性,对模型预测值与实测值进行了对比分析(图 4),从中可以看出,预测值与实测量的总体变化趋势基本一致,2 条曲线的拟合程度也比较好.由于第 10d 第 2 批垃圾填埋的挤压作用,6 月中下旬(25~35d)的渗滤液实测值偏高.受到 7 月上旬(45d)强雨量的滞后影响,7 月中下旬(55~66d)的渗滤液实测值偏高.由于回灌渗滤液能维持垃圾体具有一定的含水率,所以较低的降雨量对后期渗滤液影响不明显.例如 9 月中旬(117d)几乎没有降雨,但 9 月下旬和 10 月上旬(127~137d)的渗滤液实测值与预测值的偏差没有无回灌操作的幅度大(参见图 3).这也是回灌技术值得在降雨量少的地区推广应用的依据.

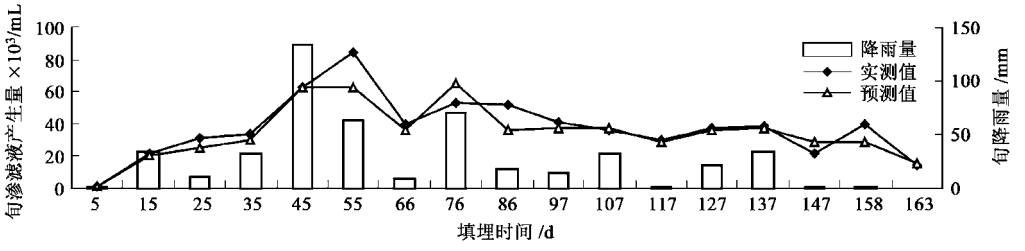

图 4　回灌操作渗滤液产生量模型预测值与实测值的对比

Fig.4　Comparison of predictive and actual leachate production with recirculation

综上,无论是在无渗滤液回灌还是在有回灌的情形下,预测模型所计算的渗滤液产生量与实测值均基本相符,可以用来对后期渗滤液产生量进行预测分析,为渗滤液收集和处理系统的设计提供参考依据.但在实际工程应用中,还应根据填埋的具体操作方式、前期降雨量的累积以及对渗滤液产生的滞后影响、回灌的频率与强度等对参数进行适当地修正.

5 结论

(1) 寒冷地区垃圾渗滤液的产生具有不连续性,日产生量变化幅度较大.渗滤液产生量随降雨量的变化而变化,降雨对渗滤液产生的滞后时间约为10~20d.

(2) 回灌操作能减少87.05%的渗滤液,可降低渗滤液收集和处理设施的规模.

(3) 根据实测降雨量和渗滤液产生量数据,通过直线拟合回归得到的渗滤液产生量预测模型符合实际情况,可用来预测后期渗滤液产生量的变化,为渗滤液收集和处理系统的设计、现场运行管理提供参考依据.

(4) 渗滤液回灌技术可以作为在东北寒冷地区垃圾填埋场渗滤液处理工艺选择应用中参考.

参考文献:

[1] Akesson M, Nilsson P. Seasonal changes of leachate production and quality from test cells [J]. J. Environ. Eng., 1997, **123**(9): 892~900.

[2] Al-Yaqout A F, Hamoda M F. Evaluation of landfill leachate in arid climate-a case study [J]. Environ. Int., 2003, **29**(5): 593~600.

[3] Tatsi A A, Zouboulis A I. A field investigation of the quantity and quality of leachate from a municipal solid waste landfill in a Mediterranean climate (Thessaloniki, Greece) [J]. Adv. Environ. Res., 2002, **6**(3): 207~219.

[4] Khoury R, El-Fadel M, Sadek S, *et al*. Temporal variation of leachate quality in seawater saturated fills [J]. Adv. Environ. Res., 2000, **4**(4): 313~323.

[5] Yuen S T S, Wang Q J, Styles J R, *et al*. Water balance comparison between a dry and a wet landfill——a full-scale experiment [J]. J. Hydrol., 2001, **251**(1-2): 29~48.

[6] 卢贤飞. 城市垃圾卫生填埋场渗滤液的控制和处理[J]. 给水排水, 1999, **25**(6): 4~6.

[7] Pohland F G, Kim J C. In situ anaerobic treatment of leachate in landfill bioreactors [J]. Wat. Sci. Technol., 1999, **40**(8): 203~210.

[8] Warith M. Bioreactor landfills: experimental and field results [J]. Was. Manage., 2002, **22**(1): 7~17.

[9] Reinhart D R, Townsend T G. Landfill bioreactor design and operation [M]. Lewis Publishers, 1998.

[10] Bendz D, Singh V P, Akesson M. Accumulation of water and generation of leachate in a young landfill [J]. J. Hydrol., 1997, **203**(1-4): 1~10.

[11] 赵庆良, 李伟光. 特种水处理技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2003.

[12] 蒋建国, 梁顺文, 陈石, 等. 深圳下坪填埋场渗滤液产生量预测研究[J]. 新疆环境保护, 2002, **24**(3): 1~4.

[13] 冯明谦, 李强. 城市生活垃圾卫生填埋场渗滤液水量水质的确定[J]. 四川环境, 2001, **20**(2): 52~54.

[14] Berger K, Melchior S, Miehlich G. Suitability of hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model of the US Environmental Protection Agency for the simulation of the water balance of landfill cover systems [J]. Environ. Geology, 1996, **28**(4): 181~189.

[15] 王洪涛, 殷勇. 渗滤液回灌条件下生化反应器填埋场水分运移数值模拟[J]. 环境科学, 2003, **24**(2): 66~72.

[16] McCreanor P T, Reinhart D R. Mathematical modeling of leachate routing in a leachate recirculating landfill [J]. Wat. Res., 2000, **34**(4): 1285~1295.