

# 渗滤液回灌条件下生化反应器填埋场水分运移数值模拟

王洪涛, 殷勇(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 渗滤液回灌的填埋场生化反应器具有减少渗滤液处理难度, 加速填埋场稳定化的作用, 其中控制填埋场水分是研究的关键。通过对填埋场水分运移特征的分析, 建立了渗滤液回灌条件下, 生化反应器填埋场水分迁移的饱和-非饱和和三维非稳定数学模型, 并求其有限单元数值解, 以此定量模拟和预报不同回灌条件下填埋场水分的时空分布规律并进行实用研究, 从而可为生化反应器填埋场的设计和运行提供理论依据。

关键词: 生化反应器; 填埋场; 渗滤液回灌; 数学模型; 数值模拟

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2003)02-07-0066

## Numerical Simulation of Moisture Movement in Landfill Bioreactors under the Condition of Leachate Recirculation

Wang Hongtao, Yin Yong( Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Landfill bioreactor is a new international development field in the municipal solid waste management. It can reduce the difficulty of leachate treatment and accelerate the landfill stability process. The general moisture distribution rules in landfills were analyzed in this paper and a three dimensional transient mathematical model was established to simulate the saturated-unsaturated moisture movement under the condition of leachate recirculation to landfills. The model was solved by Galerkin finite element method and tested with Theis well formula. The functions of different leachate recirculation designs in landfill bioreactors were implemented in the model. Thus, the moisture movement in the landfill could be simulated under the condition of leachate recirculation, which provides theoretical basis for the effective design and operation of landfill bioreactor.

**Key words:** bioreactor; landfill; leachate recirculation; mathematical model; numerical simulation

垃圾填埋场经历了从简单堆放的自然衰减型到有密封系统的卫生填埋场的发展过程, 目前正向生化反应器填埋场方向发展, 强调其作为废物处理设施的功能, 从控制外部向既控制外部又控制内部的方向发展<sup>[1]</sup>。在发达国家, 渗滤液回灌和加速填埋场稳定化研究经过了从理论研究、试验研究到现场研究的发展阶段, 并向实用方向发展<sup>[2,3]</sup>。以渗滤液回灌为核心的填埋场生化反应器具有通过生物反应和物化反应来降低废物污染的能力; 缩短产酸阶段时间, 减少重金属溶出量; 降低渗滤液有机物浓度; 加速有机物降解和稳定化进程等。国外研究显示可将填埋场稳定化时间从 15 年缩短到 3~4 年<sup>[1,4]</sup>。这一研究在国内还刚刚起步<sup>[5,6]</sup>。

控制填埋场水分是研究的关键。本文通过

理论分析和现场研究, 建立了渗滤液回灌条件下生化反应器填埋场水运移的数值模拟模型, 确定不同渗滤液回灌方式的源汇表示形式, 并进行理论和实际应用研究。模型实现了饱和流、非饱和流的统一分析, 在三维空间上模拟填埋场水运移, 从而弥补了国内外同类研究中仅考虑垂向一维或平面二维问题或分开模拟饱和与非饱和流所存在的缺欠<sup>[1,7,8]</sup>, 为填埋场渗滤液回灌系统设计和运行管理提供了科学依据。

### 1 概念模型

首先引进填埋介质的概念。本文所指的填

基金项目: 清华大学 985 重点科研项目

作者简介: 王洪涛(1960~), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为固体废物/危险废物处理、处置与资源化技术。

收稿日期: 2002-04-18; 修订日期: 2002-06-28

埋介质是在填埋场内由人工填入的固体废物和覆盖物质所构成的多孔介质,具有多孔介质的一般性质,可用代表性单元体的特性描述其中的水运移和污染物迁移规律.不过,与天然地质介质相比,填埋介质也有其特殊性,主要表现为:①填埋垃圾密度比地质介质小,可压缩性大,在自身重量和上覆压力作用下发生压缩变形,回灌水的入渗会加速变形过程.②受压实和有机物降解过程的影响,填埋介质的渗透性质随填埋时间变化.我国垃圾的成分仍以灰土为主,有机物含量不高,且主要为可快速降解的厨余废物,在填埋中后期废物的渗透性质趋于稳定,变化不大.③垃圾成分复杂,具有非均质性.但对于给定垃圾填埋场而言,非均质性变化通常不大,不会像地质介质那样,出现砂砾石层的渗透系数比粘土大几个数量级的现象.④随着填埋作业的进行,填埋介质范围扩大,存在可变域问题.

填埋介质的含水性质比较复杂.填埋场钻孔剖面显示,在压实较好的填埋介质附近可能出现多个饱和带和非饱和带的交互.饱水性受含水量、持水能力和介质渗透性质等多方面因素的影响,其横向变化亦不稳定,且随时间变化,无法预知其饱水性.生化反应器填埋场引入的渗滤液回灌措施使介质的含水性质进一步复杂化,回灌水不仅造成填埋介质水分的空间不均匀分布,而当回灌强度大于填埋介质的渗透系数时还将在回灌设施附近形成局部饱和区.传统方法将饱和流和非饱和流分开描述是不能有效说明这样的含水性质的.

$$\left( C(h) + \mu^* \right) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_{xx}(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_{yy}(h) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_{zz}(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right] + \frac{\partial K_{zz}(h)}{\partial z} + W$$

$$x, y, z \in G \quad t > 0 \quad (1)$$

式中,  $h$ : 饱和条件下为压力势,非饱和条件下是填埋介质的基质势;  $\mu^*$ : 贮水率,非饱和条件下为 0;  $C(h)$ : 容水度,饱和时为 0;  $K(h)$ : 渗透系数张量;  $W$ : 源汇项;  $G$ : 研究域,可以是整个填埋场,也可以是一个填埋单元.

## 2.2 模型边界条件

填埋场顶部为给定水流通量的 Neumann

填埋场中的水运移受控于势能.在非饱水带,在重力作用下垂直下移是水分的主要运移方向;在饱水带,水分以横向运动为主,若其下不是防渗衬层,则还要向下渗漏.对于生化反应器填埋场或填埋单元而言,水运移还受到回灌方式的影响,属于空间三维运动.

基于上述认识来建立生化反应器填埋场水运移的概念模型.①介质条件,假设填埋介质是非均质各向异性介质,但模型不考虑可能存在的强渗透通道问题.研究表明,当压实密度大于  $600 \sim 700 \text{ kg/m}^3$ ,且有机物分布较为均匀时,通常不会形成强渗透通道<sup>[1]</sup>.②含水性条件,填埋介质的饱水性可以随时间和空间位置变化,模型建立统一表示的饱和-非饱和水运移微分方程来描述.③水运移条件,填埋介质中的水分在三维空间上进行非稳定运动,但忽略汽化运动.④边界条件,模型域为整个填埋场,其边界主要按水流通量边界处理.为了放宽模型应用条件,允许存在给定压力水头或含水率边界条件.⑤回灌和排水条件,模型域内可以有生化反应器填埋场的各种回灌设施和排水设施,按其特点概化成点、面、线 3 种注排水源汇.在上述概念模型基础上建立填埋场水运移的数值模拟模型,模拟不同回灌条件下垃圾含水率的时空分布.

## 2 数学模型与数值

### 2.1 三维饱和-非饱和水运移数学模型

在研究域填埋介质中任选代表性单元体,建立单元体的水均衡方程并带入非饱和 Darcy 定律,由此可以得到填埋场条件下水分运移的三维饱和-非饱和非稳定微分方程:

边界,可能的流入通量包括降雨入渗和渗滤液回灌入渗等,流出作用主要是蒸发.除排水管道所处的位置属于 Dirichlet 边界之外,填埋场四周及底部亦为 Neumann 通量边界.我国山谷型填埋场较多,虽有防渗系统或垂直防渗措施,但地下水的侧向入渗量仍很大,致使填埋场渗滤液产生量偏大.地下水侧向入渗量可以作为

Neumann 边界条件使用,也可以通过模型反求之.具有良好周边和底部防渗衬层系统和渗滤液收集系统的生活垃圾卫生填埋场,其泄漏量很小,好的防渗衬层系统[如高密度聚乙烯(HDPE)膜等]其泄漏量近乎于 0.边界条件用数学公式描述如下:

Dirichlet 边界条件

$$h(x, y, z, t) \Big|_{\Gamma_1} = h_1(x, y, z, t) \quad (2)$$

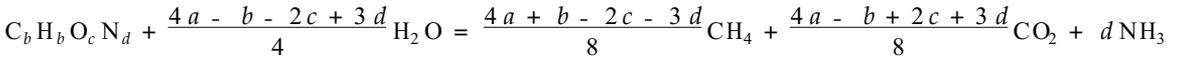
$$x, y, z \in \Gamma_1 \quad t > 0$$

Neumann 边界条件

$$-K(h) \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = q(x, y, z, t) \quad (3)$$

$$x, y, z \in \Gamma_2 \quad t > 0$$

式中,  $h$ :饱和条件下为压力势,非饱和条件下是填埋介质的基质势;  $K(h)$ :渗透系数张量;  $h_1(x, y, z, t)$ :Dirichlet 边界  $\Gamma_1$  上的基质势(或压力势);  $q(x, y, z, t)$ :Neumann 边界  $\Gamma_2$  上垂



式中,  $C_a H_b O_c N_d$ :降解有机物的概化分子式;  $a, b, c, d$ :有机物中 C、H、O、N 的含量比例确定.由(4)式可以得到理论需水量和理论产气量.实际应用中还可根据可降解有机物比率和生物降解度确定实际需水量和实际产气量.

由(4)式确定的是填埋场总的产气量.产气量的时间分布需要运用产气速率模型加以确定.可以使用 2 种类型的产气速率模型,既三角形模型和二阶段模型.现以后者为例加以说明.填埋场有机物降解产气可以分成 2 个阶段,从

$$q_p(t) = \begin{cases} 0 & t < t_b \\ \frac{2k(t - t_b) Y_0}{k(t_p - t_b)^2 + 2(t_p - t_b)} & t_b < t \leq t_p \\ \frac{2k Y_0}{k(t_p - t_b) + 2} \exp[-k(t - t_p)] & t \geq t_p \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $q_p(t)$ :产气速率;  $t$ :填埋时间,从单堆填埋开始算起;  $t_b$ :开始产气之前的停滞时间;  $t_p$ :达到最大产气速率的时间;  $k$ :第 2 阶段产气速率常数,为潜在产气量为 1 时的产气率;  $Y_0$ :单

直通过边界的水通量;  $n$ :边界外法线向量;  $\Gamma$ :研究域的边界,  $\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2$ .

### 2.3 模型源汇项

(1)降雨入渗 根据填埋场最终盖层的渗透系数、厚度,以及植被恢复情况和当地降雨量确定.降雨入渗属于面源,而以线代面会增加计算量,所以这里将降雨入渗量看作 Neumann 边界的垂直水通量.

(2)以水蒸气形式散失的水分 依据填埋场内的温度和该温度下饱和蒸汽压及产气速率确定由填埋气体所带出的水分量.

(3)垃圾生物降解耗水 填埋气体主要由  $CO_2$  和  $CH_4$  组成,各占约 50%左右,可认为甲烷中的氢元素主要来自于有机物和水的厌氧分解.根据填埋垃圾中可生物降解有机物的概化分子式和产气速率可近似求得垃圾降解所需的水量.厌氧反应方程式为:

(4) 有机物发生降解到产气高峰为第 1 阶段,从产气高峰到产气结束(有机物降解完毕)为第 2 阶段. Scholl Canyon 产气模型可以有效模拟至关重要的第 2 阶段的产气过程,所以应用较为广泛<sup>[3]</sup>,但它没有考虑第 1 阶段的产气过程,而在许多情况下,第 1 阶段也不可忽略.二阶段填埋场气体产气速率模型用直线关系模拟第 1 阶段,用指数关系(类似于 Scholl Canyon 模型)模拟第 2 阶段.模型基本形式如下:

堆垃圾的潜在产气量,由(4)式确定.在已知有机物的构成和含量的情况下,运算(4)和(5)式既可求得不同时刻的耗水量和产气量.

### 2.4 在模型中实现填埋场的沉降过程

填埋介质的沉降过程主要受上覆物质压力和有机物降解的影响.研究表明,填埋介质在上覆压力作用下的密度变化可以用下式表示<sup>[9]</sup>:

$$S_p = S_0 + \frac{p}{C_0 + C_1 p} \quad (6)$$

式中,  $S_p$ : 压力  $p$  下的密度;  $S_0$ : 初始压实密度;  $p$ : 压力;  $C_0$ 、 $C_1$ : 反映填埋介质压缩性质的参数.

有机物在不同时间的降解量可以用(4)和(5)式计算.在已知有机物降解所造成填埋介质密度变化的条件下,若已知有机物的密度和填埋介质密度,则可以计算得到填埋场不同空间位置在不同时刻的沉降量.由于本文使用数值方法求解模型,所以只要按沉降量对相关点的坐标位置进行修正即可反映填埋场的沉降过程.

## 2.5 模型参数的确定

模型中,容水度  $C(h)$  和渗透系数  $K(h)$  是十分重要的参数,用于表征填埋介质的渗透性质.关于这些参数的研究目前国内还没有相关报道,主要参考国外有关研究成果<sup>[11]</sup>.用户可以将实测关系曲线直接带入模型之中,同时模型中给出了多种形式的经验公式,其中 Straub 和 Lynch 等人建立的基质势、含水率、容水度和渗透系数之间的关系式最为典型.在不考虑水分

特征曲线滞后现象的情况下,容水度  $C(h)$  和渗透系数  $K(h)$  都是填埋介质基质势的单值函数, Straub 和 Lynch 等人针对填埋场中的垃圾介质建立了非饱和流幂定律方程,以此确定基质势、含水率和渗透系数之间的关系如下:

$$h = h_s \left| \frac{\theta}{\theta_s} \right|^{-b} \quad K(\theta) = K_s \left| \frac{\theta}{\theta_s} \right|^B \quad (7)$$

式中,  $h$ : 基质势;  $h_s$ : 饱和基质势;  $\theta$ : 含水率;  $\theta_s$ : 饱和含水率;  $b$ : 基质势修正系数;  $K(\theta)$ : 渗透系数;  $K_s$ : 饱和渗透系数;  $B$ : 渗透系数修正参数.

对式(7)求偏导数可得容水度:

$$C(h) = \frac{\partial \theta}{\partial h} = - \frac{\theta_s}{bh} \left| \frac{h_s}{h} \right|^{1/b} \quad (8)$$

幂定律方程中的参数通过试验确定.在缺省条件下,取值可以参考 Korfiatis 等人的实验结果,  $h_s = -6.00 \times 98.0665 \text{ Pa}$ ;  $\theta_s = 0.5 \sim 0.6$ ;  $b = 4$ ;  $K_s = 0.001 \text{ cm/s}$ ;  $B = 11$ .

## 2.6 数学模型有限单元数值解

所建立的填埋场水运移数学模型为抛物线型的二阶非线性偏微分方程,一般要通过数值方法来求解,这里使用 Galerkin 有限单元法.首先,根据变分原理导出填埋场三维饱和-非饱和水运移数学模型的泛函(9),使泛函达到极值时的基

$$\Pi(h) = \int_G \left[ \frac{1}{2} K_{xx} \left| \frac{\partial h}{\partial x} \right|^2 + \frac{1}{2} K_{yy} \left| \frac{\partial h}{\partial y} \right|^2 + \frac{1}{2} K_{zz} \left| \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right|^2 - Wh + (C(h) + \mu^*) h \frac{\partial h}{\partial t} \right] dx dy dz - \int_{\Gamma_2} q(x, y, z, t) h d\Gamma \quad (9)$$

质势(或压力势)函数  $h$  就是数学模型的解.

将区域  $G$  剖分为  $m$  个六面体等参单元,共  $n$  个节点,函数  $h$  离散为  $h_1, h_2, \dots, h_n$  共  $n$  个节点的待定值,则函数  $h$  可用  $n$  个节点基质势

(或压力势)  $h_i$  的片等参插值函数近似表示.于是,对泛函  $\Pi(h)$  求极值的问题就变成解方程组  $\partial \Pi(h) / \partial h_i = 0 (i = 1, 2, \dots, n)$ .取其中一个单元  $e$ ,可得单元节点变分方程:

$$\frac{\partial \Pi_e}{\partial h_i} = \iiint \left[ K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial}{\partial h_i} \left| \frac{\partial h}{\partial x} \right| + K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\partial}{\partial h_i} \left| \frac{\partial h}{\partial y} \right| + K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \frac{\partial}{\partial h_i} \left| \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right| + K_{zz} \frac{\partial}{\partial h_i} \left| \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right| - W \frac{\partial h}{\partial h_i} + (C(h) + \mu^*) \frac{\partial h}{\partial h_i} \frac{\partial h}{\partial t} \right] dx dy dz - \iint_{se} q \frac{\partial h}{\partial h_i} ds \quad (10)$$

再将插值函数代入单元节点变分方程,并用高斯数值积分求解,将方程  $\partial \Pi_e / \partial h_i$  联立,即可求出单元渗透矩阵、单元贮水矩阵与  $F$  项.最后合成单元变分线性方程组,将基质势(或压力势)

$h$  对时间  $t$  的导数用中心差分代替,得到:

$$[H] \{h_{t+\Delta t/2}\} + [P] \frac{\{h_{t+\Delta t}\} - \{h_t\}}{\Delta t} - F = 0 \quad (11)$$

其中  $[H]$  和  $[P]$  分别称为渗透矩阵和贮水矩阵.

利用线性插值关系  $\{h_{t+\Delta t}\} = 2\{h_{t+\Delta t/2}\} - \{h_t\}$  代入得:

$$[K]\{h_{t+\Delta t/2}\} = [E]\{h_t\} - F \quad (12)$$

式中,  $[K] = [H] + \frac{2}{\Delta t}[P]$ ,  $[E] = \frac{2}{\Delta t}[P]$ ;  $\{h_t\}$ :  $t$  时刻已知向量,  $\{h_{t+\Delta t/2}\}$ :  $t + \Delta t/2$  时刻待求向量.

需要特别说明的是,对于非饱和水运移数学模型而言,渗透系数  $K$  是基质势(或压力势)  $h$  的函数,但模型是非线性模型不能直接求出  $h$ .可以使用迭代法求解该模型,具体步骤如下:根据基质势(或压力势)  $h$  及  $K$  与  $h$  的关系确定  $K$ ,求解模型得到第 1 次迭代解  $h$ ;运用迭代解  $h$  和本时间段初始  $h$  的平均值确定  $K$ ;已知  $K$  值,求解模型得到本次迭代解  $h$ ;重复上述步骤,直至达到迭代精度为止.

### 3 渗滤液回灌和排泄条件的模型实验解

#### 3.1 点源回灌

将底部穿孔的管道插入填埋场内,再用泵将渗滤液通过管道注入填埋场中,这种形式称为点源回灌.把管道底部理想化为一个点,则可将这种回灌看作点源来处理.

#### 3.2 竖井和水平井/沟回灌

水平沟回灌通常用穿孔管或砾石等高渗透性材料置于水平沟中,渗滤液主要从其底部下渗,渗透强度沿沟方向均匀分布.竖式井回灌采用底端密封的穿孔管,由于重力作用,竖式井内不同深度的流量不同,根据定水头小孔口自由流出公式可知,竖式井单位长度流量与井深的平方根成正比:

$$q = \frac{3}{2} Ql^{-\frac{3}{2}} h^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

式中,  $Q$ :单井流量;  $l$ :井总长度;  $h$ :该点深度.模型中在实现这 2 种最常用的回灌方式时忽略其尺寸大小,作为源汇项  $w$  中的线源来考虑.

#### 3.3 表面喷灌

表面喷灌是用水灌车或压力管道将渗滤液直接喷洒到填埋场盖层顶部,受蒸腾作用影响,

回灌渗滤液的入渗量将大大减少.这种回灌方式可当作面源来处理,但考虑到以线代面将会增加计算量,而回灌又恰巧发生在填埋场 Neumann 上边界,因此只需将喷灌量叠加至 Neumann 上边界的垂直水通量即可.

#### 3.4 渗滤液排水管道

渗滤液排水管道沿程开有许多小孔,能及时收集下渗的渗滤液,避免填埋场底部渗滤液蓄积.通常排水管道位于研究域的下边界上,用 Dirichlet 基质势(或压力势)边界来实现填埋场渗滤液排水管道对水分迁移规律的影响.

### 4 模型和数值解的检验

选用无限流场中的 Theis 井流问题来检验模型和数值解.研究域上、下边界及四周均为隔水边界.初始全区土水势一致,为  $40 \times 9806.65 \text{ Pa}$ .研究域中央有一完整井,模型中以线源代替完整井,流量  $Q = 20 \text{ m}^3/\text{d}$ ,从初始时刻开始排水.研究域的长宽均为  $200 \text{ m}$ ,厚度  $M = 20 \text{ m}$ ,被剖分成  $4800$  个节点和  $3042$  个六面体单元.饱和渗透系数  $K = 0.06 \text{ m/d}$ ,单位储水系数  $\mu^* = 2.0 \times 10^{-6}$ .在开采没有达到边界之前,上述问题可用 Theis 井流公式描述:

$$s = \frac{Q}{4\pi KM} W(u), \quad u = \frac{\mu^* r^2}{3KMt}$$

式中,  $s$ :降深;  $r$ :离井距离;  $W(u)$ :Theis 函数.

应用 Theis 公式得到的解析解与本文得到的有限单元数值解的对比见图 1.可见除  $t = 2.00 \text{ h}$  时因开采已达到边界,而造成临近边界的压力势

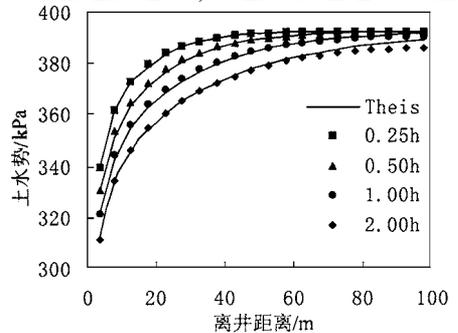


图 1 模拟结果与解析解对比

Fig.1 Comparison between simulated and theoretical pressure heads

稍有偏差外,模型的数值解与解析解吻合程度很好,说明该模型及其解法程序是正确的.

### 5 重庆市长生桥卫生填埋场水运移模拟分析

#### 5.1 填埋场基本情况

长生桥垃圾卫生填埋场位于重庆市南岸长生桥镇的茶园村和凉风村,距市区 20km.填埋场分 A、B 两区,其中 A 区面积 21.55 万 m<sup>2</sup>,容积 820 万 m<sup>3</sup>.该场区内地下水贫乏,泥岩及页岩为大面积的隔水层.防渗工程方案为整个库底与四周全部采用 HDPE 膜衬层.场区多年平均气温 18.4℃,年平均降雨量 1081.6 mm,最终垃圾层上覆盖 0.5~0.8 m 厚的渗透系数小的粘土,其上覆盖 0.5 m 厚的自然土和营养土,并恢复植被.因此,封场后的下渗补给系数取 0.15.填埋场处理的重庆生活垃圾中可生物降解有机物的概化分子式为 C<sub>22.7</sub>H<sub>32.1</sub>O<sub>16.3</sub>N.垃圾含水率较高,压实后理论平均值约为 0.48,考虑到垃圾在运输、填埋过程中的水分损失,填埋场内垃圾的初始含水率取值 0.4,相对应的初始基质势为 -0.1465 × 9806.65 Pa.有机物的降解产气参数见表 1.

#### 5.2 模拟预测结果及分析

在影响填埋场稳定化的诸多因素中含水率

是中心环节,渗滤液回灌可提高垃圾含水率.微生物接种,提供大量可降解有机物,加快产气速率和产气量,垃圾降解进入产甲烷阶段后进行回灌的效果更佳.因此,下面将运用水运移模型模拟封场后渗滤液回灌条件下填埋场中水分分布情况.

表 1 产气模型中参数取值

Table 1 Parameters for gas generation model

参数名称	符号	参数值
产气速率常数/a <sup>-1</sup>	k	0.182
垃圾潜在产气量	Y <sub>0</sub>	54.8
产气前停滞时间/a	t <sub>b</sub>	0
产气速率最大的时间/a	t <sub>p</sub>	2

(1) 竖井渗滤液回灌 因回灌后渗滤液的产生量会相应增加,且垃圾厌氧降解耗水和以水蒸气形式散失的水分不足降雨入渗量的 10%,因此,这里假设回灌后渗滤液产生量为降雨入渗量的 2 倍,并全部用于回灌,回灌从封场后第 3 年开始.为更准确地模拟竖式井回灌时填埋场内水运移规律,将研究域缩小至一个回灌井单元 40 m × 40 m × 40 m,剖分为 8000 个单元,9261 个节点.回灌井深 20 m,井间距 40 m,单井流量 1.554624 m<sup>3</sup>/d.竖式井回灌 45 d、300 d

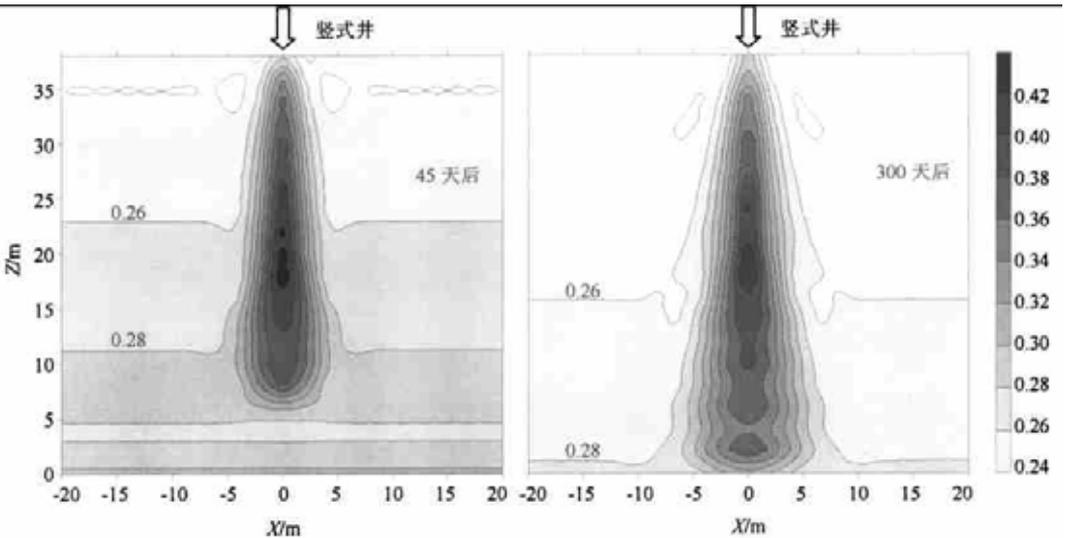


图 2 竖式井回灌不同时段填埋场中垃圾含水率的等值线

Fig.2 The contour of MSW moisture content in leachate recirculating landfill by vertical infiltration well at different time

后过井剖面含水率的分布如图 2 所示.

由图 2 可知,竖式井回灌对局部地区见效

快,45d后润湿锋面已下移近15m,锋面内含水率提升效果明显,比周围高出近10个百分点.竖式井回灌影响范围随深度的增加而扩大,但仍十分有限,尤其是上半部分局限于距井5m左右的区域内,向外围的含水率则迅速降低.这主要是由垃圾本身的渗透特性所致.由式(7)可知,渗透系数对含水率的变化十分敏感,若含水率增加10%,渗透系数将增大185%,而渗透系数的增大反过来又会导致水分迅速下渗,极大地强化了重力作用对水运移的影响,导致水平方向上水分分布不均.在井周围地区的含水率虽有所升高,就整个填埋场而言平均含水率并没有多大的提高,但适当的增加回灌井密度能改善水平方向上的水分分布情况.

(2)水平沟渗滤液回灌 水平沟渗滤液回灌总量、模拟计算区域、回灌起始时间以及剖分单元与竖式井相同.井间距40m,水平沟回灌单宽流量 $0.037\text{ m}^3/(d\cdot\text{m})$ .水平沟回灌45d,300d后垂直于井的剖面内含水率的分布如图3所示.由图3可知,水平沟回灌水分迁移速度慢,45d后润湿锋面仅下移8m左右,约为竖式井的一半,实际操作时应比预期提前进行回灌.水平沟的覆盖面较之竖式井稍广,其作用范围与竖式井略有不同,主要位于填埋场上半部分,同样也仅限于水平沟附近区域.但可以预见,通过水平沟和竖式井的协同使用,可以弥补相互的不足,将水平沟和竖式井交替布置于填埋场会得到比较满意的效果.

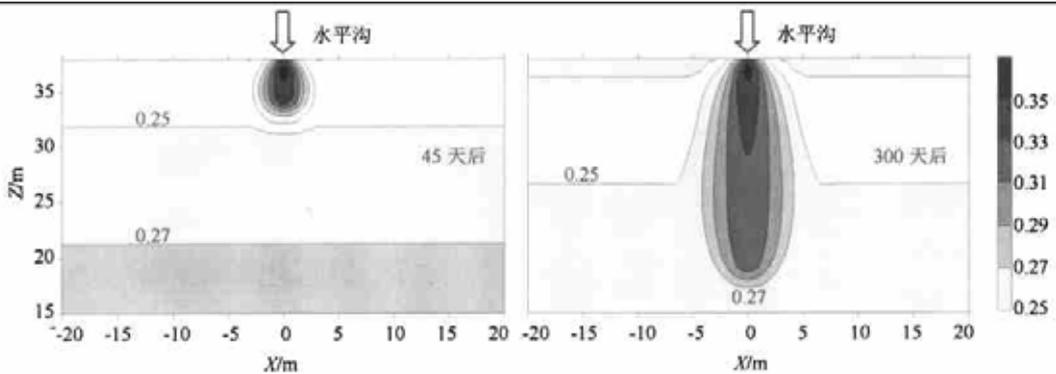


图3 水平沟回灌不同时段填埋场中垃圾含水率等值线图

Fig.3 The contour of MSW moisture content in leachate recirculating landfill by trench at different periods of time

## 6 结论

本文针对渗滤液回灌条件下,生化反应器填埋场建立了三维饱和-非饱和非稳定水分迁移数值模型,给出了各种源汇项的计算方法,并确定了不同渗滤液回灌方式的表达形式,较之目前国外常用的垂向一维、平面二维模型或者分开模拟饱和、非饱和流模型,能够更准确地模拟和预报不同回灌条件下填埋场水分的时空分布规律,为合理地优化填埋场渗滤液回灌的系统设计和运行管理提供理论依据.

### 参考文献:

- Reinhart D R, T G Townsend. Landfill Bioreactor Design & Operation. Lewis Publishers, 1998, 25 ~ 115.
- Bendz D, V P Singh, M Akesson. Accumulation of water and generation of leachate in a young landfill. J. of Hydrol., 1997, 203:1 ~ 10.
- Pohland F G, A Af Yousfi. Design and operation of landfills for optimum stabilization and biogas production. Water Sci. and Technol., 1991 30(12): 117 ~ 124.
- Wall D K, C Zeiss. Municipal landfill biodegradation and settlement. J. Environ. Eng. ASCE, 1995, 121(3): 214 ~ 224.
- Wang H T, Y F Nie. Municipal solid waste characteristics and management in China. J. Air & Waste Manag. Assoc., 2001, 51:250 ~ 263.
- 王罗春,李华等.垃圾填埋场渗滤液回灌及其影响.城市环境与城市生态,1999,12(1):44 ~ 46.
- McCreanor P T, Reinhart D R. Mathematical modeling of leachate routing in a leachate recirculating landfill. Water Research, 2000, 34(4): 1285 ~ 1295.
- Garwell E J, R J Murphy. Environmental landfill flow models: an overview Proc. Air & Waste Manag. Assoc., 1998. 23 ~ 34.
- Tchobanoglous G, Theisen H, Vigil S. Integrated Solid Waste Management-Engineering Principles and Management Issues. McGraw-Hill Inc, 1993.16 ~ 83.