

DOI: 10.11779/CJGE201807019

# 城市生活垃圾中优先流规律的穿透试验研究

张文杰, 严宏罡, 孙 铖

(上海大学土木工程系, 上海 200072)

**摘 要:** 城市生活垃圾具有大孔隙特性, 优先流是垃圾中水分运动的重要形式, 目前垃圾中优先流基本规律尚不明确, 优先流数值分析时相关参数的选取尚缺乏依据。通过垃圾柱穿透试验研究城市生活垃圾中的优先流, 以  $\text{Cl}^-$  为示踪剂, 进行了不同埋深和龄期试样、不同高度试样和不同入渗强度的穿透试验, 得到溶质穿透曲线, 运用对数正态分布模型和双峰概率密度模型拟合试验结果, 定量分析了垃圾中优先流规律。结果表明, 通过大孔隙运移的溶液占比在 55%~70% 之间, 垃圾中优先流现象明显。随着垃圾的埋深和龄期增加, 参与溶质运移的孔隙比例增加, 但通过大孔隙运移的比例减少, 优先流程度降低; 试样高度增加, 参与溶质运移的孔隙比例增加, 但其内部大孔隙贯通性变差, 通过大孔隙运移占比减小, 优先流程度降低; 入渗强度增大, 参与溶质运移的大孔隙占比增加, 优先流程度增大。双峰概率密度模型比对数正态分布模型能更好地描述垃圾中溶质运移的优先流规律, 同时为使用两域模型进行垃圾水分运移分析时的参数取值提供了依据。

**关键词:** 城市生活垃圾; 优先流; 穿透试验; 回归分析

中图分类号: TU449

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)07-1316-06

**作者简介:** 张文杰(1978-), 男, 博士, 副教授, 主要从事环境土工方面的研究工作。E-mail: zhwjlyl@163.com。

## Breakthrough tests on preferential flow in municipal solid waste

ZHANG Wen-jie, YAN Hong-gang, SUN Cheng

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** The municipal solid waste (MSW) is characterized by large pores, so the water flow in MSW often takes the form of preferential flow. The fundamental rules of the preferential flow in MSW has not been revealed thoroughly at present, and parameters in numerical analysis still need to be studied further. The solute breakthrough tests are carried out by using  $\text{Cl}^-$  as a tracer to investigate the preferential flow in MSW. The influences of depth and age, sample heights and infiltration rates on the preferential flow are considered. The regression analysis is performed using the log-normal probability distribution model and bimodal probability density model. The results show that 55% to 70% of the total solute is transported through large pores, indicating that the preferential flow is obvious in MSW. The proportion of pores that participates in solute movement increases as the depth and ages increase, but the proportion of solute movement through large pores decreases, such that the degree of preferential flow decreases. As heights of the MSW sample increase, the connectivity of large pores in MSW decreases and the proportion of solute movement through large pores decreases, so the degree of preferential flow decreases. As the infiltration rate increases, the proportion of solute movement through large pores increases and the degree of preferential flow increases. The bimodal probability density model is more suitable than the log-normal probability distribution model to characterize the preferential flow in MSW. The analysis helps to determine the parameters in two-domain model in analysis of water movement in MSW.

**Key words:** municipal solid waste; preferential flow; breakthrough test; regression analysis

## 0 引 言

伴随着中国经济高速发展和城市化进程迅速推进, 城市生活垃圾排放也急剧增加, 由生活垃圾引发的环境问题日益突出。填埋是中国垃圾处理的主要方法, 填埋场内集中的大量生活垃圾可能对周边土壤和地下水造成污染, 另外填埋场还存在堆体稳定、垃圾

稳定化和渗滤液导排等问题, 这些问题都与填埋场中水(即渗滤液)的运移有关。城市生活垃圾最突出的特性在于其高度非均质, 垃圾成分复杂, 除含有渣土、腐殖质等细粒基质外, 还含有砖石、竹木、塑料等大

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478256, 41772300)

收稿日期: 2017-04-26



表 1 浅层、中层、深层垃圾指标  
Table 1 Parameters of landfilled waste at different depths

指标	埋深 /m	龄期 /a	天然密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙 比	试验控制孔 隙比	相对 密度	有机物含 量/%	塑料含量 /%	无机废品含 量/%	纤维类含 量/%	腐殖类含 量/%	渣土含量 /%
浅层垃圾	0~10	0~3	0.79	2.7	3.0	1.51	37.86	23.5	3.28	20.46	17.42	35.34
中层垃圾	10~20	3~6	0.97	2.2	2.5	1.91	29.27	11.83	1.18	13.49	16.83	56.67
深层垃圾	20~30	6~10	1.25	1.6	2.0	2.10	18.70	4.91	1.10	3.75	14.92	75.32

尺寸组分, 具有大孔隙特性, 除基质流外, 大孔隙流也是垃圾中水分运动的重要方式, 因此垃圾中水分运移呈现出优先流的特点。通常的渗流理论将垃圾视为具有一定渗透系数的均质体进行研究, 不符合垃圾物理本质, 不能准确分析垃圾中水分运移及相关问题, 考虑垃圾大孔隙特性开展填埋场中水分运移的优先流研究具有重要实践和科学意义。

优先流的本质是水分或溶质绕过大部分基质而从优先路径向下快速流动, 优先流可分为大孔隙流、漏斗流和指流。垃圾中的优先流是以大孔隙为优先路径的水分非均匀入渗, 其大孔隙中流速和流量远大于达西定律描述的运动特征<sup>[1]</sup>。对大孔隙和优先流的研究可采用染色示踪试验、图象处理与解析、分形和数理统计方法等<sup>[2-5]</sup>, 目前这些方法多用于农、林业中地表壤土的优先流研究, 极少用于研究生活垃圾大孔隙特征和优先流规律。土壤中的大孔隙主要包括表层裂隙、植物根痕和虫洞等, 而在垃圾中, 较多的大尺寸组分(或说细颗粒充填不足)是导致其中存在大量大孔隙的主要原因。据笔者调查<sup>[6]</sup>, 国内生活垃圾孔隙比多在 1.5~4.0, 垃圾中大孔隙数量和规模远大于一般土壤, 但目前鲜有垃圾大孔隙组成方面的研究。Watson 等<sup>[7]</sup>采用 CT 扫描、示踪试验、切片等方法研究了 50 kPa 和 600 kPa 荷载下两个垃圾样的孔隙组成, 并探讨了试验的尺度问题。Rosqvist 等<sup>[8]</sup>通过垃圾柱淋滤示踪试验研究垃圾中的优先流, 发现体积含水率的 19%~41%参与了优先流运移。Öman 等<sup>[9]</sup>在中试规模垃圾填埋场中进行示踪试验, 发现存在明显的优先流, 并建议在模拟垃圾填埋场渗滤液排放时考虑优先流的影响。Fellner 等<sup>[10]</sup>提出, 土中主要是大孔隙补给基质域, 而垃圾中两域补给更趋于双向, 且垃圾中在相对干燥时也可存在优先流, 但目前尚未有试验研究证明其观点, 这也反映出垃圾中的大孔隙及优先流要比土中复杂得多。综上所述, 当前对垃圾中优先流的基本规律尚存争议, 定量化结论或参数选取依据方面的研究成果更是相当缺乏。

掌握垃圾中优先流基本规律和参数变化规律是按优先流理论进行垃圾中水分运移分析的关键, 本文采

用 CI 作为示踪剂进行垃圾柱溶质穿透试验, 研究了各因素对垃圾中优先流的影响规律, 运用对数正态运移模型和双峰概率模型拟合试验结果, 定量分析了参与溶质运移的大、小孔隙比例及其变化规律, 为采用两域模型进行垃圾中水分运移分析时的参数取值提供了依据。

1 模型试验设计

1.1 垃圾试样

试验所用城市生活垃圾试样取自苏州七子山填埋场, 在现场钻孔取得深度 0~30 m 间的垃圾样, 所得试样的组成和密度等离散性较大, 表现出明显的非均质特性, 但总体上, 因新填垃圾在上, 老垃圾在下, 各钻孔处随埋深增大, 垃圾龄期增大, 降解程度提高, 同时上覆压力增大, 孔隙比减小。因此, 将各钻孔取得的试样按埋深分成浅层(0~10 m)、中层(10~20 m)和深层(20~30 m)垃圾样 3 类, 以考虑垃圾组分、龄期、孔隙比等参数的时空变化特性, 经统计后的参数列于表 1。在本文穿透试验中, 为避免垃圾高度非均质造成的试验结果离散性, 按表 1 中各指标对垃圾试样组成进行了控制。

考虑模型试验尺度, 用剪刀、钳子等将垃圾中大尺寸的塑料、纤维、砖石、竹木等处理成直径小于 2 cm。在裁剪时, 用水喷淋垃圾样使之稍微湿润, 使渣土等细小颗粒在毛细作用下能附着在大尺寸组分上不至脱落。往模型桶中装填时分层适当压实, 对于不同深度的垃圾样, 按干密度控制其接近现场孔隙比, 装填后, 用去离子水进行淋滤, 使垃圾样中自带的 CI<sup>-</sup>浓度降低至 30 ppm 以内, 以减小背景浓度对后续 CI<sup>-</sup>穿透试验的干扰。

1.2 试验方案

穿透试验装置主要包括模型桶(内径  $d=200$  mm)、降雨模拟器和出流收集量测 3 个部分(图 1)。模型桶底部斜面上铺一层碎石(导排), 上覆针刺土工布(反滤), 之后分层装填垃圾样形成垃圾柱, 在垃圾柱顶部铺一层土工布以使喷洒的溶液入渗时更加均匀, 并减少对垃圾表面冲刷。降雨模拟器由动力装置(恒流泵)、

储水装置（马氏瓶）和喷淋装置（洒水器）组成，通过橡胶软管连接。模型桶底部溶液出流后，用量筒测出流量，用离子浓度计（Bante 公司，931 型，量程 0.001~19999 ppm）测 Cl<sup>-</sup> 浓度。

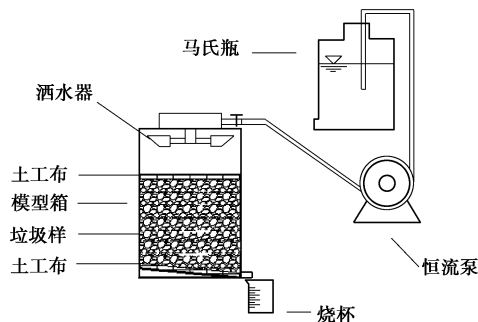


图 1 垃圾柱溶质穿透试验装置示意图

Fig. 1 Set-up for solute breakthrough tests

每次试验开始时先使用去离子水匀速淋滤垃圾柱，直到底部出流基本达到匀速，此时测量垃圾的体积含水率，之后将 300 g 浓度为 10000 ppm 的 Cl<sup>-</sup> 示踪剂注入淋滤装置，以同一速率继续淋滤，同时开始计时。每隔 10 min 收集一次出流溶液，量测出流溶液的体积和浓度，后期随着出流溶液浓度降低，数据测量间隔增加至 30 min，当出流溶液的浓度接近试验开始前的背景浓度时结束试验。

为了分析埋深（龄期）、试验尺度和边界入渗强度对垃圾中优先流的影响规律，共设计 7 个平行试验，其中试验 1, 2, 3 分别使用浅层、中层和深层垃圾样，试验 1, 4, 5 的垃圾样高度分别为 20, 40, 60 cm，试验 2, 6, 7 顶部入渗强度分别为 35, 13, 60 mm/h。各试验具体控制条件列入表 2。

表 2 垃圾柱穿透试验设计

Table 2 Programs of solute breakthrough tests

试验序号	孔隙比	入渗强度/(mm·h <sup>-1</sup> )	试样高度/cm
1	3.0	35	20
2	2.5	35	20
3	2.0	35	20
4	3.0	35	40
5	3.0	35	60
6	2.5	13	20
7	2.5	60	20

2 试验结果

2.1 穿透曲线的标准化处理

将单位时间内经过单位横截面出流的溶质质量定义为出流质量  $s$ ，则试验过程中， $t$  时刻的出流质量  $s(t)$  受出流浓度  $C_{ex}(t)$  和出流速度  $q$  共同控制，即

$$s(t) = C_{ex}(t)q \quad (1)$$

绘制溶质穿透曲线时，采用标准化的质量流量  $s/\rho_A$  (min<sup>-1</sup>)，即

$$s(t)/\rho_A = \frac{C_{ex}(t)q}{\rho_A} \quad (2)$$

式中， $\rho_A$  为对应原溶液的单位横截面内的溶质质量。由此可以得到经标准化处理后的溶质出流曲线，即穿透曲线。

2.2 不同埋深垃圾样试验结果

试验 1~3 中垃圾样依次为浅层、中层、深层，对应的孔隙比分别为 3.0, 2.5, 2.0，此外，试验使用的入渗强度均为 35 mm/h，试样高度均为 20 cm。试验得到穿透曲线如图 2 所示，初始时刻 Cl<sup>-</sup> 出流量为 0，随后各试样出流量迅速增加，分别在第 75, 80, 85 min 达到峰值，达到峰值之后 Cl<sup>-</sup> 出流有明显的拖尾现象，曲线形状关于峰值时刻明显（左右）不对称，整条曲线反映了 Cl<sup>-</sup> 先从较大孔隙快速出流（曲线上升段），到 Cl<sup>-</sup> 从较大孔隙出流完毕（峰值），到 Cl<sup>-</sup> 从小孔隙中慢速出流（拖尾段）的整个过程，说明 3 组试验均具有明显的优先流特点。其中浅层垃圾出流达到峰值的速度最快，但峰值稍低，深层最慢但峰值稍高，说明浅层垃圾中参与流动的孔隙较大（故速度快），而深层垃圾中参与流动的孔隙相对小些，但参与优先流动的孔隙数量更多（故峰值高）。

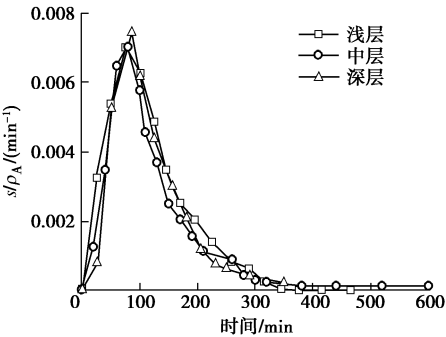


图 2 不同埋深试样的溶质穿透曲线

Fig. 2 Breakthrough curves of MSW at different depths

2.3 不同试样高度试验结果

使用浅层垃圾样在 35 mm/h 边界入渗强度下进行试验，分别取试样高度为 20, 40, 60 cm 以研究尺度对优先流的影响，得到穿透曲线如图 3 所示。可以看出，高度 20 cm 试样的穿透曲线形状关于峰值时刻明显不对称，拖尾明显；而高度 60 cm 试样的穿透曲线大致上左右对称，Cl<sup>-</sup> 从开始出流到全部出流的渗流过程稳定。说明在大、小孔隙比例相同情况下，随着垃圾柱高度增加，参与溶液快速流动的贯通大孔隙数量减少，优先流程度降低。另外，3 条穿透曲线峰值时刻分别为 70, 150, 435 min，时间比值为 1:2.14:6.21，考虑 3 个试样的高度比例（1:2:3），也说明

随试样高度增加孔隙内的流速减缓, 即优先流通道减少。

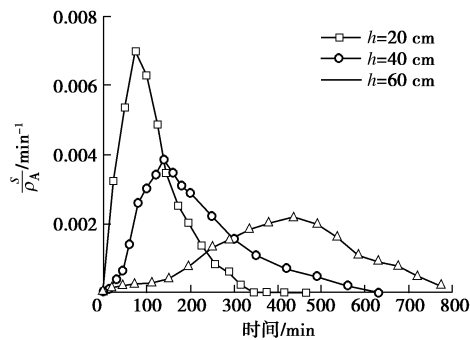


图 3 不同高度试样的溶质穿透曲线

Fig. 3 Breakthrough curves of samples with different heights

2.4 不同入渗强度试验结果

取试样高度 20 cm 的中层垃圾样, 分别在 13, 35, 60 mm/h 的上边界入渗强度下进行试验, 研究边界条件对优先流的影响规律, 得到穿透曲线如图 4 所示, 可以看出, 入渗强度为 13, 35, 60 mm/h 时 CI 出流峰值分别发生在第 200, 80, 55 分钟。入渗强度较小时, 穿透曲线接近对称, CI 从较小孔隙缓慢出流, 其形式更接近均匀的非饱和流; 随入渗强度增大, 出流曲线形状向左偏离对称, 且峰值变大, 说明随入渗强度增大, 参与流动的大孔隙增多, 溶液通过更大孔隙快速穿透垃圾样形成出流, 优先流越来越明显。

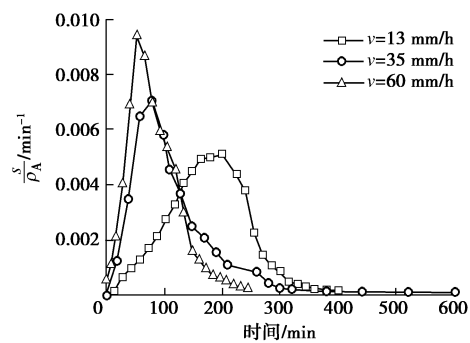


图 4 不同入渗边界下的溶质穿透曲线

Fig. 4 Breakthrough curves of different infiltration boundary conditions

3 回归分析

3.1 对数正态分布模型回归分析

前面通过对穿透试验结果的分析得出了一些定性结论, 下面进行回归分析, 以进一步定量揭示优先流规律。本文试验中示踪剂以瞬时脉冲方式施加, 溶质运移概率密度方程可用式 (2) 表示<sup>[11]</sup>。由于标准化的质量流量与时间的函数关系符合归一化条件<sup>[12]</sup>, 故可采用概率密度模型对试验结果进行回归分析。采用对数正态分布函数对试验结果进行拟合分析, 其表达式为

$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t} \exp\left(\frac{-(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad , \quad (3)$$

式中,  $\mu$  和  $\sigma^2$  为拟合参数, 分别为  $\ln t$  的算术平均值和方差。

此溶质运移概率密度函数可以用于估计溶质平均出流时间, 峰值出流时间和参与溶液运移的含水率。溶质平均出流时间  $T_{ex}$  和峰值出流时间  $T_M$  分别为

$$T_{ex} = \exp(\mu + \sigma^2 / 2) \quad , \quad (4)$$

$$T_M = \exp(\mu - \sigma^2) \quad . \quad (5)$$

参与溶液流动的体积含水率  $\theta_{st}$  可表示为

$$\theta_{st} = qe^\mu / L \quad , \quad (6)$$

式中,  $L$  为试样高度。 $\theta_{st}$  为参与溶质运移的较为活跃的孔隙率, 视其变化可以反映试样内部孔隙结构对溶质运移的影响, 为方便理解, 将其称为参与溶液流动的含水率。对各试验结果进行回归分析得到的参数值列入表 3。因为垃圾中溶液流动的复杂性, 表 3 中回归分析所得峰值出流时间  $T_M$  和实际峰值出流时间  $T_R$  稍有出入, 但总体上拟合相关度较高, 回归参数的变化反映出了一些规律。

表 3 中试验 1~3 分别为浅层、中层、深层垃圾样, 对比可见, 随着埋深增加, 参与溶液运移的孔隙占比 ( $\theta_{st}/n$ ) 从 0.42 增大到 0.47。在相同入渗强度下, 含大孔隙较多的浅层垃圾中主要是大孔隙参与了溶液流动, 而含大孔隙相对较少 (含渣土更多) 的深层垃圾

表 3 对数正态分布回归分析参数值

Table 3 Parameter values of regression model

试验 编号	平均值 $\mu$	方差 $\sigma^2$	平均出流 时间 $T_{ex}$ /min	拟合峰值出流时 间 $T_M$ /min	实际峰值出流 时间 $T_R$ /min	相关度 $R^2$	参与运移 孔隙率 $\theta_{st}$	孔隙率 $n$	运移孔隙 占比 $\theta_{st}/n$
1	4.670	0.684	134.90	66.84	75	0.973	0.31	0.75	0.42
2	4.712	0.685	140.80	69.58	80	0.935	0.32	0.71	0.46
3	4.678	0.597	128.52	75.28	85	0.956	0.31	0.67	0.47
4	5.354	0.654	261.89	137.81	150	0.985	0.31	0.75	0.42
5	6.138	0.459	514.53	375.17	435	0.912	0.45	0.75	0.60
6	5.258	0.443	211.85	157.77	200	0.835	0.21	0.71	0.29
7	4.450	0.626	104.18	57.87	55	0.927	0.43	0.71	0.60

中, 除大孔隙外, 更多的小孔隙参与了流动, 因此深层垃圾中  $\theta_{st}/n$  更大。优先流是与大孔隙有关的水分快速流动, 从这一角度来说, 深层垃圾中优先流程度降低。试验 1~5 使用浅层垃圾和相同的入渗强度, 仅垃圾柱高度不同, 由表 3 可知, 随高度由 20 cm (试验 1) 增大到 60 cm (试验 5),  $\theta_{st}$  从 0.31 增大到 0.45, 这是因为随试样高度增大, 垃圾中相互贯通的大孔隙减少, 导致更多的小孔隙参与溶液运移, 因此优先流程度随试样高度增加而减弱。

试验 6, 2, 7 采用不同的入渗强度, 表 3 中随入渗强度由 13 mm/h (试验 6) 增大到 60 mm/h (试验 7), 参与运移的孔隙率  $\theta_{st}$  从 0.21 增大到 0.43。在稳态入渗时, 垃圾中的水流通通道 (过水断面) 与入渗强度相对应, 因此在入渗强度较小情况下, 过水断面较小, 且对应含水率低, 由于基质吸力的作用, 水先通过小孔隙流动, 因此参与运移的大孔隙较少; 随着入渗强度增大, 过水断面增大, 基质吸力减小, 更多溶液从大孔隙中运移, 而大孔隙中的流速较快, 导致溶质的平均出流时间和峰值出流时间减小, 优先流现象更明显。但此处回归分析所得出的  $\theta_{st}$  包含参与运移的大孔隙和小孔隙, 无法进一步区分出大、小孔隙运移占比。

### 3.2 双峰概率密度模型回归分析

双峰概率密度模型是对数正态分布模型的进一步深入, 对于瞬时脉冲式施加溶质的稳态流情况, 标准化的溶质质量可看作关于时间  $t$  和深度  $z$  的概率密度函数  $f(t, z)$ :

$$s(t, z)/\rho_A = f(t, z) \quad (7)$$

溶液同时在垃圾基质和大孔隙中发生流动时, 概率密度函数可表示为双峰概率密度形式<sup>[13]</sup>:

$$f(t, z) = mf_1(t, z) + (1-m)f_2(t, z) \quad (8)$$

式中,  $m$  为权重调整参数,  $f_1(t, z)$  和  $f_2(t, z)$  分别为溶液流经路径为基质域和大孔隙域的概率密度函数, 均服从基于时间  $t(z)$  的对数正态分布:

$$f_i(t, z) = \frac{1}{t\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \exp\left[\frac{(\ln t - \ln T_i^G)^2}{-2\sigma_i^2}\right] \quad (9)$$

式中  $i=1, 2$  分别代表基质域和大孔隙域;  $T_i^G$  为几何均值;  $\sigma_i^2$  为  $\ln(t)$  的方差。相应的, 双峰概率密度模型的出流量  $Q$  和体积含水率  $\theta$  也划分为基质域和大孔隙域两部分:

$$Q = Q_1 + Q_2 = mQ + (1-m)Q \quad (10)$$

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 \quad (11)$$

式中,  $Q_1$  和  $Q_2$  分别为流经基质域和大孔隙域的流量,  $\theta_1$  表示基质域参与流动的体积含水率,  $\theta_2$  表示大孔隙域参与流动的体积含水率, 即

$$\theta_1 = V_{w1}/V, \theta_2 = V_{w2}/V \quad (12)$$

式中,  $V_{w1}$  为基质域中溶液体积,  $V_{w2}$  为大孔隙域中溶

液体积,  $V$  为试样总体积。定义  $\bar{T}_1$  和  $\bar{T}_2$  分别表示基质域和大孔隙域中的溶液平均运移时间,

$$\bar{T}_i = T_i^G \exp(\sigma_i^2/2) \quad (13)$$

则

$$V_{w1} = Q_1 \cdot \bar{T}_1, V_{w2} = Q_2 \cdot \bar{T}_2 \quad (14)$$

由式 (10) ~ (14) 可得

$$\theta = m \frac{\bar{T}_1 Q}{V} + (1-m) \frac{\bar{T}_2 Q}{V} \quad (15)$$

式 (15) 中的待定参数  $\bar{T}_1$ ,  $\bar{T}_2$  和  $m$  可通过双峰概率密度模型回归分析得到, 之后可根据式 (12) 和 (14) 求得基质和大孔隙参与流动的含水率  $\theta_1$  和  $\theta_2$ 。回归分析得到的参数值列入表 4, 总体上拟合相关度较高, 各试验拟合所得的权重值  $(1-m)$  表明, 通过大孔隙运移的溶液占比在 55%~70%。

表 4 中试验 1, 2, 3 分别为浅层、中层和深层垃圾, 随着垃圾埋深和龄期增加, 体积含水率  $\theta$  从 0.45 增大到 0.58, 但大孔隙域体积含水率  $\theta_2$  由 0.25 减少到 0.16,  $\theta_2/\theta$  从 0.55 减少到 0.28, 通过大孔隙运移的流量比例  $(1-m)$  由 0.7 减少到 0.55, 说明随垃圾埋深和龄期增加, 基质含量增加, 大孔隙的孔径和数量均下降, 通过大孔隙运移的溶液比例减少, 而通过基质域小孔隙运移的比例增加, 优先流程度降低。

比较表 4 中的试验 1, 4, 5, 随着垃圾柱高度由 20 cm (试验 1) 增大到 60 cm (试验 5), 体积含水率  $\theta$  由 0.45 增大到 0.60, 而大孔隙含水率比例  $\theta_2/\theta$  从 0.55 减少到 0.42, 通过大孔隙运移的流量比例  $(1-m)$  由 0.7 减少到 0.55, 可见随试样高度增加, 大孔隙贯通性变差, 基质小孔隙中含水率增加, 大孔隙中的含水率比例相应减小, 通过大孔隙域运移的溶液比例下降, 优先流程度降低。

比较表 4 中的试验 6, 2, 7, 随着上边界入渗强度从 13 mm/h (试验 6) 升至 60 mm/h (试验 7), 体积含水率  $\theta$  由 0.39 增大到 0.71, 其中大孔隙域体积含水率  $\theta_2$  由 0.12 增大到 0.29,  $\theta_2/\theta$  从 0.3 增大到 0.41, 通过大孔隙运移的流量比例  $(1-m)$  由 0.55 增大到 0.67。说明入渗强度的增大后, 垃圾含水率的增加主要是由饱水大孔隙增多所致, 溶液通过大孔隙运移的比例增大, 优先流程度增大。

与对数正态分布模型相比, 双峰概率密度模型采用双对数正态分布函数, 通过回归分析分别得到基质域和大孔隙域的参数, 更好地揭示了垃圾中的优先流规律, 同时也为优先流数值分析 (如使用两域模型) 时参数设定提供了依据, 如本文试验范围内, 参与溶液运移的大孔隙占比 ( $\theta_2/n$ ) 在 0.16~0.41, 大孔隙运移的流量占比在 0.55~0.70, 具体可按各影响因素的变化规律进行取值。

表 4 双峰概率密度模型参数值  
Table 4 Parameter values of BIM model

试验序号	$1-m$	$\sigma_1$	$T_1^G$	$\sigma_2$	$T_2^G$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta$	$R^2$	$n$	$\theta_2/n$	$\theta_2/\theta$
1	0.70	1.26	100.00	0.53	105.39	0.20	0.25	0.45	0.98	0.75	0.33	0.55
2	0.61	1.10	180.00	0.47	92.25	0.38	0.18	0.56	0.965	0.71	0.26	0.33
3	0.55	0.95	201.07	0.43	90.77	0.42	0.16	0.58	0.990	0.67	0.24	0.28
4	0.65	1.00	309.29	0.65	197.31	0.26	0.23	0.49	0.947	0.75	0.31	0.47
5	0.55	0.94	507.04	0.33	440.58	0.35	0.25	0.60	0.951	0.75	0.33	0.42
6	0.55	1.12	300.00	0.29	186.66	0.27	0.12	0.39	0.918	0.71	0.16	0.30
7	0.67	1.01	15.00	0.48	78.63	0.42	0.29	0.71	0.946	0.71	0.41	0.41

4 结 论

本文通过垃圾柱 CI 穿透试验研究城市生活垃圾中的优先流特性, 得到穿透曲线并运用对数正态分布模型和双峰概率密度模型进行回归分析, 揭示了填埋场垃圾中的优先流规律, 得到以下 5 点结论。

- (1) 垃圾中存在明显的优先流现象, 通过大孔隙运移的溶液占比在 55%~70%。
- (2) 随着垃圾的深度和龄期增加, 基质含量增加, 孔隙比降低, 在相同入渗强度下参与溶质运移的体积含水率增加, 但通过大孔隙运移的比例下降, 优先流程度降低。
- (3) 试样高度变大, 垃圾中的大孔隙贯通性变差, 溶液在垃圾中滞留时间更长, 基质域含水率增加, 参与运移的体积含水率增加, 但大孔隙域含水率占比减少, 通过大孔隙运移的溶液比例减少, 优先流程度降低。
- (4) 入渗强度增加, 参与运移的体积含水率和大孔隙域中的含水率均增加, 通过大孔隙域运移的溶液比例增大, 优先流程度增大。
- (5) 双峰概率密度模型回归分析能同时得到基质域和大孔隙域的参数, 能更好地描述垃圾中优先流的基本规律, 同时为优先流模拟时参数取值提供了参考依据。

参考文献:

[1] ZEISS C, UGUCCIONI M. Mechanisms and patterns of leachate flow in municipal solid waste landfills[J]. Journal of Environmental Systems, 1994, **23**(3): 247 - 270.

[2] HENDRICKX J M H, FLURY M. Uniform and preferential flow mechanisms in the vadose zone. Conceptual models of flow and transport in the fractured vadose zone[M]. Washington D C: National Academy Press, 2001: 149 - 187.

[3] WEILER M, NAEF F. An experimental tracer study of the role of macropores in infiltration in grassland soils[J]. Hydrological Processes, 2003, **17**(2): 477 - 493.

[4] KULLI B, GYSI M, FLÜHLER H. Visualizing soil

compaction based on flow pattern analysis[J]. Soil & Tillage Research, 2003, **70**(1): 29 - 40.

[5] 牛健植, 余新晓, 邵文伟, 等. 森林生态系统优先流研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2013: 81 - 87. (NIU Jian-zhi, YU Xin-xiao, SHAO Wen-wei, et al. Study of soil preferential flow in the ecological system of forest[M]. Beijing: Science Press, 2013: 81 - 87. (in Chinese))

[6] 张文杰. 城市生活垃圾填埋场中水分运移规律研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007. (ZHANG Wen-jie. Experimental and numerical study on water/leachate transport in landfill of municipal solid waste[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese))

[7] WATSON G, WOODMAN N. Laboratory scale delineation of ‘preferential flow’ in landfill[C]// 2nd Workshop on Geophysical Measurements at Landfills. Malmö, 2012.

[8] ROSQVIST N H, DOLLAR L H, FOURIE A B. Preferential flow in municipal solid waste and implications for long-term leachate quality: valuation of laboratory-scale experiments[J]. Waste Management Research, 2005, **23**(4): 285 - 295.

[9] ÖMAN C, ROSQVIST H. Transport fate of organic compounds with water through landfills[J]. Water Research, 1999, **33**(10): 2247 - 2254.

[10] FELLNER J, BRUNNER P H. Modeling of leachate generation from MSW landfills by a 2-dimensional 2-domain approach[J]. Waste Management, 2010, **30**(11): 2084 - 2095.

[11] WHITE R E, DYSON J S, HAIGH R A, et al. A transfer function model of solute transport through soil 2: illustrative applications[J]. Water Resources Research, 1986, **22**(2): 248 - 254.

[12] JURY W A. Simulation of solute transport using a transfer function model[J]. Water Resources Research, 1982, **18**(2): 363 - 368.

[13] GUPTA A, DESTOUNI G, JENSENB M B. Modelling tritium and phosphorus transport by preferential flow in structured soil[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 1999, **35**(4): 389 - 407.