

DOI: 10.11779/CJGE201808015

# 填埋场内垃圾的持水特性和孔径分布研究

张文杰, 陈 鲁, 严宏罡

(上海大学土木工程系, 上海 200072)

**摘 要:** 土-水特征曲线 (SWCC) 描述了含水率和基质吸力的关系, 并在一定程度上反映了孔隙组成, 然而生活垃圾具有大孔隙特性, 采用常规的压力板仪试验难以准确获得大孔隙对应的低基质吸力范围内的数据点。通过压力板仪试验确定小孔隙对应的数据点, 通过水分穿透试验, 基于 Poiseuille 定律和 Young-Laplace 方程, 对大孔隙对应的数据点进行补充, 之后, 基于 Van Genuchten 方程, 提出具有双峰孔隙分布特征垃圾的 SWCC 模型, 进一步分析得到垃圾的孔径分布规律。结果表明, 改进的 SWCC 方程可更好反映垃圾持水特性及孔径特征; 垃圾饱和含水率和残余含水率较高, 浅层、中层、深层垃圾的田间持水率分别为 38.5%, 42.2% 和 45.8%, 对应的基质吸力约为 3~8 kPa, 随着埋深和龄期的增加, 垃圾的有效含水率区间和给水度减小; 以基质吸力 1 kPa 对应的孔径为界限, 垃圾中孔隙可分为大小两组, 孔径概率密度呈双峰分布, 随着埋深和龄期的增加, 垃圾的大孔隙占比减小, 大孔隙平均孔径减小, 小孔隙占比增加, 小孔隙平均孔径减小。

**关键词:** 城市生活垃圾; 大孔隙; 双重孔隙度; 土-水特征曲线

中图分类号: TU449

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)08-1491-07

**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。

## Water retention characteristics and pore size distribution of landfilled municipal solid waste

ZHANG Wen-jie, CHEN Lu, YAN Hong-gang

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

**Abstract:** The soil-water characteristic curve (SWCC) is usually used to describe the relation between water content and matric suction, and to some extent the pore distribution. However, the data at low matric suction are difficult to achieve by using the pressure plate extractor because of the macropore characteristic of municipal solid waste. The SWCCs corresponding to small pores are measured by the pressure plate extractor, and those corresponding to large pores are determined by means of the water breakthrough curves, in which the Poiseuille equation and Young-Laplace equation are used to calculate the pore radius. Based on the dual-porosity feature of landfilled waste, a SWCC equation is proposed by modifying the Van Genuchten equation. The pore-size distribution of landfilled waste is investigated. The results show that the modified equation can describe the water retention characteristics and the features of pores of landfilled waste very well. The saturated and residual water content of the municipal solid waste is high. The field capacity of shallow, middle and deep waste is 38.5%, 42.2% and 46.8%, respectively, corresponding to a matric suction range of 3~8 kPa. As the depth and age increase, the effective water content interval and specific yield decrease. Taking the matric suction of 1 kPa as the limit, the pores in waste can be divided into macropores and micropores. The probability density function of pore radius is bimodal. As the depth and age increase, the amount of macropores and their radii decrease, at the same time, the amount of micropores increases and the average pore size becomes smaller.

**Key words:** municipal solid waste; macropore; dual-porosity; soil-water characteristic curve

## 0 引 言

随着城市垃圾排放量的急剧增加, 中国垃圾填埋场的数量也在不断增加。垃圾中有害有毒物质随渗滤液迁移会对土壤和地下水造成污染, 研究垃圾的持水和导水特性对于解决生活垃圾环境污染问题具有重要意义。垃圾具有高度非均质特性, 其组成复杂,

除含有渣土、腐殖质等细粒(基质)成分外, 还含有竹木、砖石、塑料等大尺寸组分, 且通常由于细颗粒充填不足, 导致垃圾中存在很多大孔隙, 因此垃圾中同时存在基质流和大孔隙流, 呈现出优先流的特点。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478256, 41772300)

收稿日期: 2017-07-21

从非均质的角度研究垃圾中水分运移具有重要科学意义，研究垃圾持水特性和孔隙组成是研究优先流这一复杂问题的基础。

垃圾田间持水率是指饱和和垃圾在重力作用下排水后仍能吸持的水量，生活垃圾的田间持水率多在 22%~55% 之间，陈云敏等<sup>[1]</sup>建议垃圾的田间持水率与基质吸力 10kPa 相对应。目前一般通过土-水特征曲线（SWCC）来研究不同基质吸力下垃圾的持水规律，Kazimoglu 等<sup>[2]</sup>用改进的体积压力板仪测量了人工配置垃圾样的 SWCC，并发现曲线可用 Van Genuchten 公式较好地拟合；魏海云等<sup>[3]</sup>采用 Tempe 仪和压力板仪研究了垃圾组分和孔隙比对 SWCC 的影响；张文杰等<sup>[4]</sup>取现场不同埋深垃圾试样测试了 SWCC，发现垃圾饱和含水率和残余含水率较高，进气值很小，土-水特征曲线在低基质吸力时存在陡降段，SWCC 斜率随埋深和渣土含量增大而减小；Wu 等<sup>[5]</sup>通过压力板仪得到填埋场中不同深度垃圾试样的 SWCC，发现随着埋深增加，试样饱和含水率减小，进气值和残余含水率增加。上述使用压力板仪测得 SWCC 能体现垃圾中基质的持水特性，但也明显存在不足——由于垃圾中存在很多大孔隙，给准确获得完整的 SWCC 造成困难，如在试验初始阶段，即使压力板仪中不加气压，大孔隙中的水也会在重力作用下出流（至陶土板上），理论上直至含水率降低至田间持水率，此时加任意一个较小的气压（比如 3 kPa 或 5 kPa）都可以使这些大孔隙中的水排出压力板仪，因此，从饱和至田间持水率只能获得一个含水率 and 对应基质吸力值，故低基质吸力部分的 SWCC 不准确，这对一般的土而言问题不大，而在垃圾中，上述大孔隙占比很高，由于缺失低基质吸力段数据点所造成的误差很大。

垃圾土中同时含有大尺寸组分和细粒成分，且通常细颗粒填充不足，与颗粒级配不均的土中孔隙系统相似。Burger 等<sup>[6]</sup>试验发现由于硅藻土和砂土混合物中存在 2 种不同尺寸的孔隙体系，致使此混合介质的 SWCC 呈现双峰特性；Zhang 等<sup>[7]</sup>的研究也表明，当土体中含有 2 个或多个孔隙体系时，其对应的 SWCC 一般呈双峰或多峰特性。垃圾具有大孔隙和基质孔隙两种孔隙体系，因此可以用具有双峰特征的 SWCC 来描述

其持水特性。

本文利用填埋场现场钻孔取得的不同埋深垃圾样，在室内使用压力板仪测得其 SWCC，通过水分穿透试验对低基质吸力段的 SWCC 进行补充，基于 Van Genuchten 方程提出具有双峰孔隙分布特征的垃圾 SWCC 公式，进一步分析得到填埋场内不同埋深垃圾的孔径分布规律。

1 试验材料

试验所用试样取自苏州七子山生活垃圾卫生填埋场。在现场布置 5 个钻孔，取得深度 0 至 30 m 间的垃圾样共 109 个，所得试样的组成和性质离散性较大，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，同时随上覆压力增大，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。在本文后续试验中，为克服垃圾组成的离散性以便获得更一般的规律，按表 1 中各指标对垃圾试样组成进行了控制。

将垃圾样放入 65℃ 的烘箱中烘干 48 h 后，通过筛分法和密度计法试验，得到不同埋深（龄期）垃圾的颗粒级配曲线如图 1 所示。分别取曲线上  $d_{10}$ ， $d_{60}$ ， $d_{30}$ ，计算得到浅层、中层和深层垃圾不均匀系数  $C_u$  分别为 173，121，21，说明垃圾中粒径变化范围很大，颗粒不均匀，曲率系数  $C_c$  分别为 0.54，0.17，0.73，说明缺少中间粒组，大孔隙中细颗粒填充不足。对比各曲线和数据可知，随埋深（龄期）增大垃圾中粗粒含量减少，而细粒含量增加。

2 压力板仪试验

采用体积压力板仪（soil moisture ltd，2bar）测各埋深垃圾试样的 SWCC。称取一定质量烘干后的垃圾，喷少量水后（防止渣土脱落）将其中大尺寸成分破碎至直径小于 1 cm，拌合均匀后装入直径 7.0 cm，高 5.2 cm 的环刀中，并分层压实到接近其天然孔隙比（按干

表 1 浅层、中层、深层垃圾指标

Table 1 Parameters of landfilled wastes at different depths

土层	埋深 /m	龄期 /a	天然密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙比	颗粒相对 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	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	1.91	29.77	11.83	1.18	13.49	16.83	56.67
深层垃圾	20~30	6~10	1.25	1.6	2.10	18.70	4.91	1.10	3.75	14.92	75.32

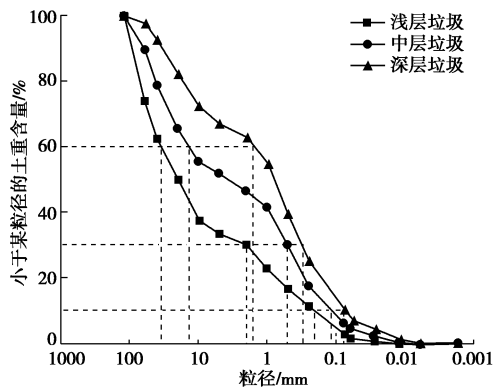


图 1 各层垃圾颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle-size distributions of landfilled wastes

密度控制)。将环刀用土样饱和器固定,放入饱和缸中抽真空饱和。

用无气水饱和压力板仪的陶土板后,放入饱和和垃圾样进行脱湿试验,由低到高施加各级气压,各级气压下平衡后测量排出水的体积。判断平衡的标准为:在 24 h 内垃圾试样的含水率变化小于 0.2%。本试验中一次平衡的时间大约为 2~3 d,考虑到垃圾中细粒基质含量总体不多,试验最大加压到 100 kPa。脱湿试验结束后,逐级减小气压进行吸湿试验。吸湿试验结束后将垃圾试样取出,放在烘箱内烘干测含水率,以与逐级排水(吸水)的数据进行校核。绘制气压力与体积含水率的关系曲线,即 SWCC 如图 2 所示。

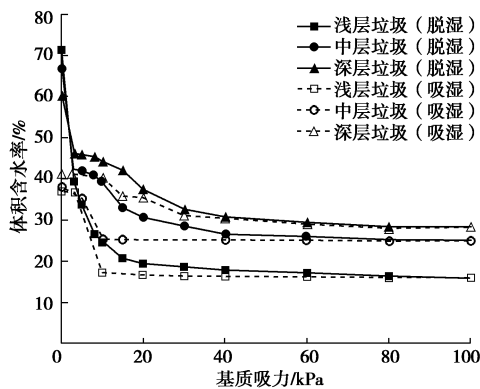


图 2 垃圾的土-水特征曲线

Fig. 2 Soil-water characteristic curves of landfilled waste

由图 2 脱湿曲线可知,在低基质吸力范围内,随着气压的增加,垃圾体积含水率显著下降,SWCC 存在陡降段,这与垃圾大孔隙中水的排出相对应。如前所述,图中将饱和含水率的数据点与第一个非零气压力的数据点相连,得到的 SWCC 初始直线段并不准确,也不能反映这部分的孔径变化。图中吸湿曲线与脱湿曲线之间滞回现象明显,这主要是由于孔隙的变径效应<sup>[8]</sup>所致,特别是在低基质吸力区段,吸湿 SWCC

无陡降段,这使得吸湿试验结束时垃圾试样含水率远低于饱和含水率。

### 3 水分穿透曲线试验

将垃圾中大孔隙定义为在重力作用下能自由排水的孔隙<sup>[9]</sup>,即田间持水率到饱和含水率之间充水的孔隙(与“给水度”的概念对应),水分穿透试验中,初始含水率为田间持水率的试样顶部维持常水头,在重力作用下从底部排水,因为大孔隙中水流速度快,故首先排水的是大孔隙,随着稍小孔隙中的水开始排出,水流流速逐渐增加。这样,最大孔隙半径就是首先出水时对应的孔隙半径,而最小半径就是当水流开始达到稳定时对应的半径<sup>[9]</sup>。试验中水分运动速率较慢,处于层流范围,假设垃圾中孔隙均为圆孔,则流量方程为

$$Q = Av = \pi r^2 \tau L / t \quad (1)$$

Poiseuille 定律描述了圆管中流量与压力差的关系,可表述为

$$Q = \pi r^4 \Delta P / (8 \eta \tau L) \quad (2)$$

联立两式,得到按流量相等定义的孔隙“当量孔径”

$$r = \tau L [8 \eta / (t \Delta P)]^{1/2} \quad (3)$$

式中,  $Q$  为流量 ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ),  $A$  为孔隙面积 ( $\text{cm}^2$ ),  $v$  为孔隙水流速 ( $\text{cm}/\text{s}$ ),  $\tau$  为迂曲度,  $L$  为试样长度 ( $\text{cm}$ ),  $t$  为从加水开始记时的时间 ( $\text{s}$ ),  $\Delta P$  为压力水头 ( $\text{Pa}$ ),  $\eta$  为水的黏滞系数 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ),  $r$  为大孔隙的当量半径 ( $\text{cm}$ )。需要说明,研究垃圾中孔径分布的最终目的是为了揭示水流动规律,因此,虽然垃圾中孔隙的实际截面形状偏离圆形,但从透水能力和计算实现来考虑,这里将其简化成圆孔,称为当量孔径。对每时刻的出流流量进行观测,利用式(3)可计算出相应的孔隙半径。按照一定间隔划分孔径范围,以每个间隔孔径平均值作为计算值,当间隔流量为  $\Delta Q$  时,计算相应的孔隙数量为  $\Delta Q/Q$ ,从而计算出这一孔径的体积,除以总孔隙体积得到该级孔隙占比。

水分穿透试验装置示意图见图 3,模型桶直径为 10 cm,顶部控制 2.5 cm 的常水头,底部设滤网并进行出流收集,垃圾样高度为 18 cm。考虑模型试验尺度,将垃圾中特大尺寸组分处理成直径小于 2 cm,往模型桶中装填时分层适当压实,对于不同埋深的垃圾样,按干密度控制接近表 1 中孔隙比,试验时试样的实际参数列于表 2。试样饱和后,使其自由排水 24~48 h 以达到田间持水率,然后,试样顶部加水保持常水头,并开始计时,当试样底部有水流出时,通过测量累计出流的水分质量,获得每 5 s 间隔的流量  $\Delta Q$ ,直至  $\Delta Q$  达到稳定,从而得到水分穿透曲线如图 4 所

示, 各曲线反映了水从最大孔隙出流直至稳定的全过程。

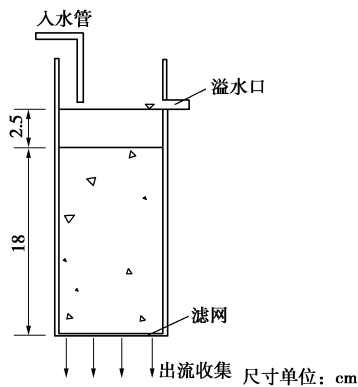


图 3 垃圾水分穿透试验装置示意图

Fig. 3 Diagram of water breakthrough tests

表 2 水分穿透试验中各垃圾样参数

Table 2 Parameters of landfilled wastes in water breakthrough tests

试样	孔隙比	干密度 ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	田间持水率 /%	饱和含水率 /%
浅层垃圾	2.65	0.41	38.45	71.52
中层垃圾	2.14	0.60	42.15	66.70
深层垃圾	1.65	0.79	45.80	60.54

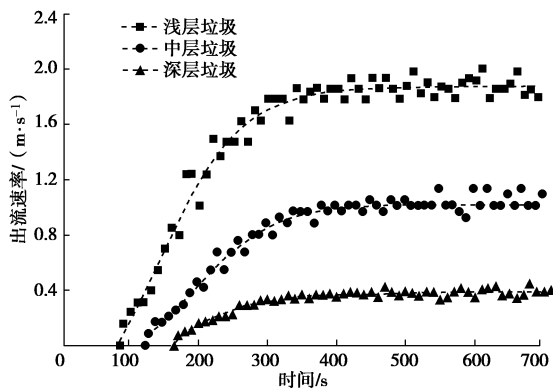


图 4 垃圾水分穿透曲线

Fig. 4 Water breakthrough curves of landfilled waste

分析时, 式 (3) 中孔隙迂曲度  $\tau$  的值未知, 为此, 需要先确定大、小孔隙的界限值。目前对大孔隙的界定没有一个明确的固定值, 通常取某个基质吸力范围 (如  $\psi=0.3\sim 5\text{ kPa}$ ) 对应的孔径作为大、小孔径的界限值<sup>[9-11]</sup>, 这个基质吸力范围对应排空大孔隙内的水所需施加的压力, 本文将 (对数中间值取整后的)  $\psi=1\text{ kPa}$  对应的孔径作为大、小孔隙界限值, 换算得  $r$  为  $0.145\text{ mm}$ 。通过式 (3) 计算得到水流通过长度为  $L$ 、半径  $r$  为  $0.145\text{ mm}$  的孔隙所需的时间, 用实际测得 (出

流达到稳态) 的时间除以计算所得时间最终可以得到孔隙迂曲度。计算得到浅、中、深层垃圾中大孔隙的迂曲度分别为 7.7, 8.2, 9.0。

大孔隙优先流的根本特征在于: 大孔隙中水流流速和流量大于达西定律所能描述的范围。因此也可以将达西定律适用的界限作为大、小孔隙的分界点。一般认为, 适用于饱和水流动的达西定律多数情况下也同样适用于非饱和土壤水分流动<sup>[12]</sup>。试验表明, 存在一个临界雷诺数  $Re_{cr}$  ( $1\sim 10$ ), 仅当实际雷诺数  $Re$  低于  $Re_{cr}$  时达西定律才适用<sup>[12]</sup>。雷诺数计算公式为

$$Re = \rho v d / \eta \quad (4)$$

式中,  $\rho$  为水的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $d$  为孔隙直径 ( $\text{m}$ )。将式 (1)、(3) 代入式 (4) 得到雷诺数与迂曲度的关系式:

$$Re = 2\rho\tau^2 L^2 [8\eta / (t\Delta P)]^{1/2} / t \quad (5)$$

取  $Re$  等于 1 ( $Re_{cr}$  的下限), 由式 (5) 可算得浅、中、深层垃圾中大孔隙的迂曲度分别为 7.3, 8.2, 9.3, 得到对应的  $r$  分别为  $0.14, 0.14, 0.15\text{ mm}$ , 这与前述将  $\psi=1\text{ kPa}$  作为大、小孔隙分界线吻合。因此, 取  $\psi=1\text{ kPa}$  对应的孔径作为大小孔径界限值, 符合优先流的基本特点。

按上述方法根据图 4 曲线计算, 得到浅层、中层、深层垃圾中不同尺寸大孔隙的体积占比列入表 3。

表 3 水分穿透试验所得垃圾各级大孔隙占比

Table 3 Pore size distributions of landfilled wastes by water breakthrough tests			
孔径/mm	浅层垃圾/%	中层垃圾/%	深层垃圾/%
0.30~0.27	1.77	—	—
0.25~0.27	1.80	1.41	—
0.23~0.25	2.17	1.63	2.00
0.21~0.23	4.37	2.81	1.66
0.19~0.21	5.51	4.32	1.58
0.17~0.19	6.97	4.11	1.50
0.15~0.17	5.25	4.17	1.15
0.145~0.15	0.85	0.81	0.28

Young-Laplace 公式描述了附加压力与曲率半径之间的关系, 应用在毛细管中, 可得到基质吸力和孔径的关系:

$$\psi = \frac{2T \cos \alpha}{r} \quad (6)$$

式中,  $\psi$  为基质吸力,  $T$  为表面张力,  $\alpha$  为水土界面浸润角。根据 Young-Laplace 公式和表 3 数据, 可计算出垃圾大孔径对应的基质吸力和体积含水率, 将计算得到的数据点与压力板仪得到的脱湿 SWCC 数据点共同绘于图 5 得到改进后完整的 SWCC (脱湿), 图中横坐标为对数形式。由图 5 可见, 低基质吸力时

的 SWCC 陡降段出现在 0.5~1 kPa 范围内, 说明对应的大孔隙集中在这一范围, 而之后一段曲线较平缓, 说明对应这一基质吸力范围的孔径较少, 因此, 垃圾中明显存在大小两种孔隙体系, 而缺少中间的孔隙。

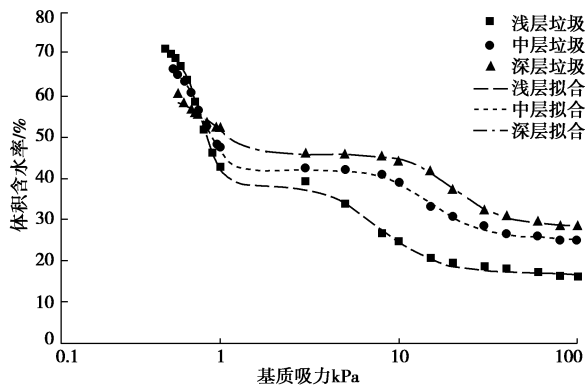


图 5 完整的垃圾土-水特征曲线及其拟合

Fig. 5 Complete SWCCs and fitting

#### 4 基于双峰孔隙分布的 SWCC 模型

此处仍把垃圾中的孔隙看作成由不同孔径的圆管组成的孔隙集合, 体积含水率  $\theta$  可以表示为

$$\theta(R) = \int_{R_{\min}}^R f(r) dr, \quad (7)$$

式中,  $\theta(R)$  为半径小于等于  $R$  的所有孔隙充满水时垃圾的体积含水率,  $R_{\min}$  为垃圾中的最小孔隙半径,  $f(r)$  为孔径概率密度函数。当  $R=R_{\max}$  时,  $\theta(R_{\max})$  等于饱和含水率  $\theta_s$ , 也即孔隙率  $n$ 。

根据 Young-Laplace 公式, 基质吸力和孔径成反比, 两种极端情况基质吸力定义如下:

$$\psi_{\max} = \frac{2T \cos \alpha}{R_{\min}}, \quad (8)$$

$$\psi_{\text{aev}} = \frac{2T \cos \alpha}{R_{\max}}. \quad (9)$$

式中,  $\psi_{\max}$  表示最小孔隙半径所对应的基质吸力,  $\psi_{\text{aev}}$  为进气值。把 Young-Laplace 公式代入式 (7) 得到 SWCC 的通用形式:

$$\theta(\psi) = \theta_s \int_{\psi}^{\infty} g(\psi) d\psi, \quad (10)$$

式中,  $g(\psi)$  为由基质吸力表示的孔径分布函数。当垃圾完全饱和时,  $\psi=0$ ,  $\int_0^{\infty} g(\psi) d\psi = 1$ 。

垃圾中存在双重孔隙, 则垃圾孔隙的孔径概率密度函数  $f(r)$  可看作大孔隙概率密度函数  $f_1(r)$  和小孔隙概率密度函数  $f_2(r)$  的线性叠加, 即

$$f(r) = f_1(r) + f_2(r). \quad (11)$$

由于垃圾的孔隙内部连通, 则两个孔隙系统的基质吸力保持一致, 根据以上假设和毛管理论, 垃圾的体积

含水率可表示为

$$\begin{aligned} \theta(\psi) &= \int_{R_{\min}}^R f_1(r) dr + \int_{R_{\min}}^R f_2(r) dr \\ &= \theta_{s1} \int_{\psi}^{\infty} g_1(\psi) d\psi + \theta_{s2} \int_{\psi}^{\infty} g_2(\psi) d\psi. \end{aligned} \quad (12)$$

式中  $\theta_{s1}$  表示大孔隙完全饱和时所占的体积含水率,  $\theta_{s2}$  表示小孔隙完全饱和时所占的体积含水率, 二者满足

$$\theta_s = w_1 \theta_{s1} + w_2 \theta_{s2} = \theta_{s1} + \theta_{s2}. \quad (13)$$

式中,  $w_1$ ,  $w_2$  是描述大小孔隙比例的权重参数,  $w_1 + w_2 = 1$ 。将式 (13) 代入式 (12) 得

$$\theta(\psi) = w_1 \theta_{s1} \int_{\psi}^{\infty} g_1(\psi) d\psi + w_2 \theta_{s2} \int_{\psi}^{\infty} g_2(\psi) d\psi. \quad (14)$$

在实际试验中, 把  $\psi_{\max}$  近似为残余含水率  $\theta_r$  对应的基质吸力  $\psi_r$ , 则式 (14) 可变换为

$$\begin{aligned} \theta(\psi) &= w_1 (\theta_s - \theta_{r1}) \int_{\psi}^{\psi_{r1}} g_1(\psi) d\psi + \theta_{r1} + \\ &\quad w_2 (\theta_s - \theta_{r2}) \int_{\psi}^{\psi_{r2}} g_2(\psi) d\psi + \theta_{r2} \\ &= w_1 (\theta_s - \theta_r) \theta_1(\psi) + w_2 (\theta_s - \theta_r) \theta_2(\psi) + \theta_r \\ &= \theta_{s1} \theta_1(\psi) + (\theta_{rc} - \theta_r) \theta_2(\psi) + \theta_r. \end{aligned} \quad (15)$$

式中  $\theta_{r1}$  和  $\theta_{r2}$  分别为大孔隙和小孔隙的残余含水率, 由于大孔隙持水性差,  $\theta_{r1}=0$ , 故  $\theta_{r2}=\theta_r$ ;  $\psi_{r1}$  和  $\psi_{r2}$  分别为各自残余含水率对应的基质吸力;  $\theta_{rc}$  为田间持水率。

用 Van Genuchten 方程<sup>[13]</sup>表达 SWCC, 结合式 (15) 可得

$$\theta_e = \sum_{i=1}^2 w_i \left[ \frac{1}{1 + (\alpha_i \psi)^{n_i}} \right]^{m_i}, \quad (16)$$

式中,  $i=1$  代表大孔隙,  $i=2$  代表小孔隙,  $\theta_e$  为有效含水率,  $\theta_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ ,  $w_i$  为权重参数,  $\alpha_i$  为与进气值有关的参数,  $n_i$  为与孔径分布有关的参数,  $m_i$  为体现曲线不对称性的参数, 通常认为  $m_i = 1 - 1/n_i$ 。

孔径分布函数可写成

$$F(r) = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \sum_{i=1}^2 w_i \left[ \frac{1}{1 + (\alpha_i \cdot 0.1455/r)^{n_i}} \right]^{m_i}. \quad (17)$$

将式 (17) 对  $\lg r$  求导<sup>[14]</sup>, 得到 (在对数坐标系下) 能体现双峰特性的孔径概率密度函数:

$$\begin{aligned} f(r) &= \frac{dF(r)}{d(\lg r)} = \ln 10 \sum_{i=1}^2 w_i m_i n_i (\alpha_i \cdot 0.1455/r)^{n_i} \cdot \\ &\quad \left[ \frac{1}{1 + (\alpha_i \cdot 0.1455/r)^{n_i}} \right]^{m_i + 1}. \end{aligned} \quad (18)$$

#### 5 垃圾持水特性和孔径分布分析

##### 5.1 双峰 SWCC 拟合

利用式 (16) 拟合试验的 SWCC 数据, 结果示于

表 4 双峰模型回归分析参数值  
Table 4 Parameter values of bimodal water retention curves

试样	$W_1$	$\theta_{s1}$	$\alpha_1$	$n_1$	$\theta_{s2}$	$\alpha_2$	$n_2$	$\theta_r$	$\theta_s$	$R^2$
浅层垃圾	0.6062	0.3307	1.3270	7.9480	0.3845	0.1514	3.1210	0.1697	0.715	0.999
中层垃圾	0.5932	0.2455	1.2646	7.5960	0.4215	0.0755	3.4030	0.2532	0.667	0.999
深层垃圾	0.4607	0.1474	1.1906	4.6430	0.4580	0.0544	3.7060	0.2855	0.605	0.998

图 5，相应的参数列于表 4。可见各层垃圾 SWCC 的拟合相关度均较高 ( $R^2>0.998$ )，大孔隙占有效孔隙度的比重  $w_1$  在 0.6 左右，随深度增加略有减小。随埋深增加， $\alpha_1$  由 1.327 减小到 1.191， $\alpha_2$  由 0.151 减小到 0.054，参照 Fredlund 对 SWCC 图形及参数的研究<sup>[15]</sup>和图 6 可知，随埋深增加垃圾大、小孔隙的进气值均增大。随埋深增加， $n_1$  由 7.948 减小到 4.643，表明在大孔隙区段(前述陡降段)SWCC 斜率减小； $n_2$  由 3.121 增大到 3.706，表明在基质区段，随埋深增大含水率下降变快。

5.2 垃圾持水特性分析

垃圾的饱和含水率、田间持水率和残余含水率均随埋深和龄期而变化，如图 6 所示。浅层、中层、深层垃圾的饱和含水率  $\theta_s$  均较高，分别为 71.5%，66.7%，60.5%，这与垃圾大孔隙特性相对应，随着龄期增加，垃圾中部分大尺寸成分发生降解，同时随埋深增大，孔隙比减小，饱和含水率下降。由拟合所得的 SWCC 可知，SWCC 陡降段和基质段中间存在一水平段，代表大孔隙中水已经排出、基质小孔隙尚未排水的状态，这与田间持水率的概念相对应，由此可确定浅层、中层、深层垃圾田间持水率  $\theta_{fc}$  分别为 38.5%，42.2%，45.8%，对应的基质吸力是一个区间，约为 3~8 kPa。随着垃圾埋深和龄期的增加，上覆压力增大，孔隙比减小，基质含量增加，细小孔隙的数量增加，因此田间持水率  $\theta_{fc}$  逐渐增加。残余含水率  $\theta_r$  是指当体积含水率低于该值时，基质吸力的增加并不引起体积含水率的显著变化。本文试验(拟合后)所得残余含水率  $\theta_r$  较高，分别为 17.0%，25.3%，28.6%，这一一定程度上反映出垃圾的孔隙组成特点：根据压力板仪的测试原理，只有与陶土板微孔隙相连的饱水孔隙才会在气压下排水，而垃圾中大孔隙多，当压力板仪内达到某一气压后，饱水小孔隙彼此不再连通，或与陶土板微孔隙不再连通，则排水终止，而这些饱水小孔隙中的水最终都被视作了残余含水率部分。由于大孔隙多，导致含水率低时小孔隙彼此不连通，这与一般土的孔隙组成明显不同。随着埋深和龄期增加，垃圾饱和含水率减少而残余含水率增加，所以垃圾有效含水率区间(从饱和到残余持水率的区间)减小，同时伴随着

田间持水率增加，给水度(从饱和到田间持水率的区间)减小。

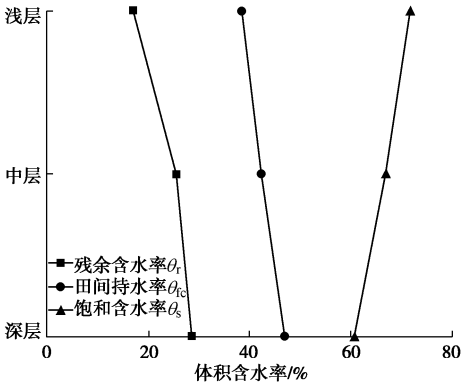


图 6 浅层、中层、深层垃圾含水率分布变化示意图  
Fig. 6 Variation in water content distribution of landfilled wastes at different layers

5.3 垃圾的孔径分布

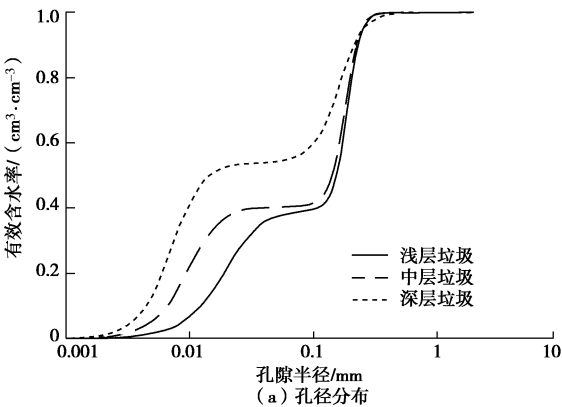
将表 4 中的拟合参数代入式(17)、(18)可得孔径分布曲线和孔径概率密度曲线如图 7 所示。将式(17)对  $r$  求导，得到孔径概率密度函数：

$$f(r) = \sum_{i=1}^2 w_i m_i n_i \frac{(\alpha_i \cdot 0.1455 / r)^{n_i}}{r} \cdot \left[ \frac{1}{1 + (\alpha_i \cdot 0.1455 / r)^{n_i}} \right]^{m_i + 1} \quad (19)$$

利用式(19)计算大、小孔隙的平均孔径：

$$d(r) = \int x f(x) dx \quad (20)$$

得到浅层、中层、深层垃圾的大孔隙半径平均值分别为 0.193，0.184，0.173 mm，小孔隙平均半径分别为 0.022，0.011，0.008 mm。



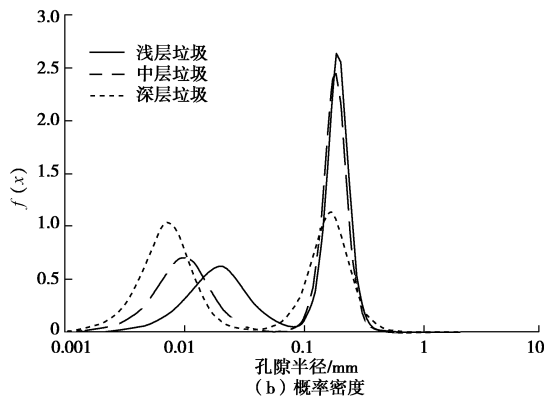


图7 浅层、中层、深层垃圾孔径分布和概率密度曲线

Fig. 7 Pore-size distribution and probability density distribution curves of landfilled waste at different depths

因此,垃圾中孔隙明显可分为大、小两组,孔径概率密度曲线呈明显的双峰特征。随着埋深和龄期增加,大孔隙的概率密度峰值逐渐减小,说明大孔隙占总孔隙体积的比例减小;平均孔径逐渐减小,这是由于随着降解和上覆压力的增加,垃圾中大尺寸组分破碎分解,大孔隙尺寸变小且被压密所致。随着埋深和龄期的增加,小孔隙的概率密度峰值逐渐变大,说明小孔隙占比增加;平均孔径逐渐减小,这是由上覆压力增大和降解造成的细粒成分比例增大所致。

## 6 结 论

本文基于填埋场内生活垃圾的组成特点研究垃圾持水特性和孔径分布,主要得到以下3点结论。

(1) 通过出流试验结合 Poiseuille 定律和 Young-Laplace 方程,对大孔隙对应的 SWCC 数据点进行补充,得到完整的 SWCC,从而可以更好地反映垃圾持水特性。

(2) 垃圾饱和含水率和残余含水率较高,浅层、中层、深层垃圾的田间持水率分别为 38.5%, 42.2%, 45.8%, 对应的基质吸力约为 3~8 kPa,随埋深和龄期增加,垃圾的有效含水率区间和给水度减小。

(3) 以 1 kPa 基质吸力为界限将垃圾中孔隙分为大、小两组,孔径概率密度曲线呈双峰特性,随着埋深和龄期增加,垃圾的大孔隙占比减小,大孔隙平均孔径减小,小孔隙占比增加,小孔隙平均孔径减小。

## 参考文献:

[1] CJJ176—2011 生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范[S]. 2011. (CJJ176—2011 Technical code for geotechnical engineering of municipal solid waste sanitary landfills[S]. 2011. (in Chinese))

[2] KAZIMOGLU Y K, MCDOUGALL J, PYRAH I. Unsaturated hydraulic conductivity of landfilled waste[J]. International

Conference on Unsaturated Soils, 2006, 79(2): 1525-1534.

- [3] 魏海云, 詹良通, 陈云敏. 城市生活垃圾持水曲线的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 712 - 716. (WEI Hai-yun, ZHAN Liang-tong, CHEN Yun-min. Experimental study on soil water characteristic curve of municipal solid waste[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(5): 712 - 716. (in Chinese))
- [4] 张文杰, 陈云敏, 邱战洪. 垃圾土渗透性和持水性的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3313 - 3317. (ZHANG Wen-jie, CHEN Yun-min, QIU Zhan-hong. Laboratory and field tests on hydraulic properties of landfilled waste[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3313 - 3317. (in Chinese))
- [5] WU H, WANG H, ZHAO Y, et al. Evolution of unsaturated hydraulic properties of municipal solid waste with landfill depth and age[J]. Waste Management, 2012, 32(3): 463 - 470.
- [6] BURGER C A, SHACKELFORD C D. Evaluating dual porosity of pelletized diatomaceous earth using bimodal soil water characteristic cure functions[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38(1): 53 - 66.
- [7] ZHANG L M, CHEN Q. Predicting bimodal soil water characteristic curves[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(5): 666 - 670.
- [8] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1993.
- [9] RADULOVICH R, SOLORZANO E, SOLLINS P. Soil macropore size distribution from water breakthrough curves[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(2): 556 - 559.
- [10] LUXMOORE R J. Micro-, meso-, and macroporosity of soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45(6): 671 - 672.
- [11] GERMANN P, BEVEN K. Water flow in soil macro-pores I. An experimental approach[J]. Journal of Soil Science, 1981, 32: 1 - 13.
- [12] JACOB B. Dynamics of fluids in porous media[M]. New York: American Elsevier Publishing Company Inc, 1972.
- [13] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980(4): 892 - 898.
- [14] DURNER W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure[J]. Water Resources Research, 1994, 30(2): 211 - 223.
- [15] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(3): 521 - 532.