

垃圾填埋场封顶系统的设计与水分平衡

陆海军^{1,2}, 栾茂田², 张金利²

(1. 武汉工业学院 多孔介质力学研究所, 武汉 430023;

2. 大连理工大学 土木水利学院岩土工程研究所, 辽宁 大连 116024)

摘要:为了解决传统压实黏土封顶系统在干旱及半干旱地区存在干燥开裂的问题,三种新型的 ET (Evapotranspiration) 封顶系统的设计方案被提出了。其中,一种 ET 封顶系统设计方案的结构由上下各 1m 厚的植物生长土层和阻隔土层构成,另外两种 ET 封顶系统分别在中间与底部增设了一层生物阻隔层。在考虑降水与蒸发蒸腾循环补给的条件下,建立了水汽在多层非饱和土壤中迁移的一维数学模型。以 1976 年大连市全年的降水与蒸发蒸腾强度为边界条件,模拟了水汽在四种封顶系统中的迁移规律。计算结果表明,在传统压实黏土封顶系统中,由于压实黏土层具有极低的渗透性,致使整层土壤不能得到有效的水分补给;ET 封顶系统中整个土层可以在降水的过程中有效地从边界得到补给,同时在蒸发蒸腾的条件下,把土层中的储水释放;ET 封顶系统设计方案 2 中设置的生物阻隔层,不仅可以防止生物对阻隔土壤层的破坏,而且起到了排水作用。

关键词:垃圾填埋场;封顶系统;降水;蒸发蒸腾;非饱和土

中图分类号:TV131.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)02-0108-06

Hydraulic Balance and Design of Covering System in Landfills

LU Hai-Jun^{1,2}, LUAN Mao-Tian², ZHANG Jin-Li²

(1. Institute of Porous Mechanics, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, P. R. China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, P. R. China)

Abstract: In order to solve desiccation cracks of conventional compacted clay cover system in arid and semi-arid areas, three alternative evapotranspiration (ET) covers were proposed. One alternative option configuration consisted of 1m vegetation soil layer and 1m barrier soil layer, while two additional alternatives contained biointrusion barriers layer placed at different depths within the structural profile. Considering precipitation and evapotranspiration, a one-dimensional moisture transport model through multilayer unsaturated soil was developed. By the case study of four covering systems under precipitation and evapotranspiration intensity of Dalian city at 1976, it was shown that the compacted clay layer of the traditional landfill cover could not get effective moisture charge. ET cover act as a reservoir during precipitation events and subsequently returned it to atmosphere as evapotranspiration. The biointrusion barriers layer located in the second ET cover design would restrict animal movement and play a key role in drainage. Consequently, these results would be used to assist in decisions-making of the landfill cover system in semi-arid areas.

Key words: landfills; cover system; precipitation; evapotranspiration; unsaturated soil

收稿日期:2009-11-13

基金项目:国家自然科学基金项目(50679015);中科院武汉岩土力学研究所湖北省环境岩土工程重点实验室开放课题资助项目(T110504)

作者简介:陆海军(1979-),男,博士,主要从事渗流与环境岩土工程方面研究,(E-mail)luhaijun111@163.com。

为了控制垃圾填埋对周围土壤与地下水环境的长期影响,在垃圾填埋场的上面通常建有封顶系统,已达到把垃圾与外界环境隔离的目的。封顶系统的主要作用是阻止水分进入到垃圾体中,减小渗滤液产量,降低填埋场运行成本。如果水分一旦进入垃圾体中,就可能携带污染物穿透底部的衬垫层渗透到周围的土壤与地下水中,造成环境的污染,进而威胁人类的生活^[1-3]。

至今为止,国内外垃圾填埋场的封顶大多采用传统的压实黏土封顶系统,这种封顶主要由顶层的植物生长层和下面的压实粘土层组成。Khire、Benson、Dwyer 等许多研究者对垃圾填埋场压实黏土封顶系统进行了现场的监测与研究,结果发现这种传统的压实黏土封顶在干旱与半干旱地区不能达到工程期望的效果,并出现透水的现象^[4-8]。研究者经现场观测还发现,在第一次干湿循环过程中穿透传统封顶压实黏土层的水明显增加^[9]。为了解决传统压实黏土封顶系统的缺陷,一些研究者和机构开始研究新型的封顶系统去代替传统封顶。美国爱达荷州国家工程与环境试验室(INEEL)于1993年建成了一种蒸发传输(ET)封顶,并在相同的气候条件下与压实黏土封顶的运行进行了比较^[6];Dwyer对压实黏土封顶系统和新型封顶系统的运行情况进行了现场模型试验研究^[7];Schnabel和Wayllace等人对在不同气候条件下建造ET封顶系统的可行性进行了数值分析研究^[10-11]。ET封顶系统的土壤在降水过程中作为一个储水库来储存降水时来不及蒸发掉的水分,然后通过蒸发与植物蒸腾作用从土壤中吸取水分然后释放到大气中^[12-14]。ET封顶系统不但具有比较大的抗干燥开裂的能力,同时还具有造价低、服务年限长和效果好等优点,估计这种垃圾填埋场的封顶系统将逐步取代现有的压实黏土的封顶系统^[15]。

基于压实黏土封顶和ET封顶系统的工作机理,在考虑降水和蒸发循环作用的边界条件下,建立了一维非饱和土水汽运移的数值模型,并结合大连市实际气象统计资料,比较分析了传统压实黏土封顶与3种新型ET封顶系统的水分平衡规律,以此评价新型ET封顶系统在干旱与半干旱地区的适用性。

1 数学模型

1.1 水汽在非饱和土壤中运移的数学模型

假设垃圾填埋场封顶系统的各层土壤为均质、各向同性的多孔介质,建立了水汽在垃圾填埋场压

实黏土封顶与新型蒸发传输(ET)封顶中运移的数学模型^[16],

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \pm Q \quad (1)$$

式中, θ 为体积含水量; h 为基质压力势; K 为渗透系数; t 为时间; z 为土壤的剖面纵向深度坐标,以向下为正; Q 为源汇项。

土水特征函数采用Van Genuchten(1978)模型定义^[16],当 $h < 0$,

$$S_e = (1 + |ah|^\beta)^{-\gamma} \quad (2)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3)$$

$$K_r = K_s S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/\gamma})^\gamma]^2 \quad (4)$$

式中, S_e 为有效饱和度; θ_r 为残余含水率; θ_s 为饱和含水率; K_s 为饱和渗透系数; K_r 为相对渗透系数; α , β , γ 为土水特性参数,且 β , γ 满足 $\gamma = 1 - 1/\beta$ 。

1.2 定解条件

模型的初始条件假定封顶系统各层土壤的初始含水率是均匀的,

$$\theta(z, t) = \theta_i, t = 0 \quad (5)$$

式中, θ_i 为植物生长层土壤、排水层、生物阻隔层、压实黏土层和阻隔土壤层的初始体积含水率。

边界条件为^[17]:

(1) 上边界即是渗流边界又是蒸发边界

$$\left[-K_p \frac{\partial h}{\partial z} + K_p \right]_{z=0} = q(t) - e(t) \quad (6)$$

式中, K_p 为压实黏土与ET封顶系统中植物生长层的水力传导系数; $q(t)$ 为降水强度; $e(t)$ 为蒸发蒸腾强度。

(2) 下边界是自由排水边界

$$\left[-K_x \frac{\partial h}{\partial z} + K_x \right]_{z=H} = K_x, x = c, b \quad (7)$$

式中, K_c 和 K_b 分别为压实黏土层和阻隔土壤层的水力传导系数, H 为整个封顶系统的厚度。

(3) 两层土壤的交界面必须保证水流的连续性

$$\left[-K_t \frac{\partial h}{\partial z} + K_t \right]_{z=H_1} = \left[-K_l \frac{\partial h}{\partial z} + K_l \right]_{z=H_1} \quad (8)$$

式中, K_t 和 K_l 分别为上层和下层土壤的水力传导系数, H_t 和 H_l 分别为上层和下层土壤的厚度。

1.3 模拟区域与材料特性

1.3.1 模拟区域 压实黏土封顶和ET封顶系统的模型如图1所示。传统的压实黏土封顶由0.6m厚的植物生长土层、0.3m厚的细沙排水层以及0.6m厚的压实黏土层组成。ET封顶系统设计方案1的基本结构由上层厚为1m的植物生长土层和下层

厚为 1 m 的阻隔土层构成;设计方案 2 由厚 1 m 的植物生长层、0.5 m 厚的生物阻隔层(0.1 m 的细沙层、0.3 m 的砂砾层和 0.1 m 的细沙层)以及 1 m 厚

的阻隔土层构成;设计方案 3 由 1 m 厚植物生长土层,1 m 厚的阻隔土层以及最下面的 0.5 m 厚的生物阻隔层构成。

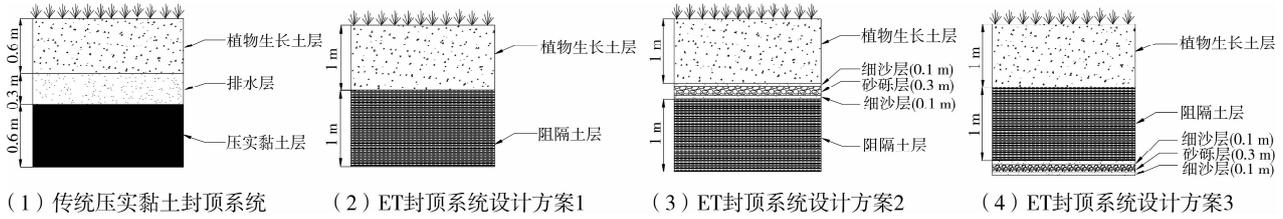


图 1 垃圾填埋场封顶系统结构图

1.3.2 材料与计算参数 土样(A)、(B)、(C)分别取自大连本地的粉质粘土和黏土。通过室内土工试验确定土壤的基本特性,包括土壤的液限 W_L 、塑限 W_P 、塑性指数 I_P 、最大干密度 ρ_{dmax} 、最优含水量 W_{opt} 、

孔隙比 e 、比重 G_s 、饱和渗透系数 K_s 。土水特征曲线 SWCC 采用压力板仪测定。土特性参数与计算参数列于表 1,土水特征曲线如图 2 所示。

表 1 土壤工程特性与计算参数

土样	W_L	W_P	I_P	$\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$	W_{opt}	e	G_s	$K_s/(cm \cdot s^{-1})$	α/cm^{-1}	β	γ	θ_r	θ_s
A	33.7	20.1	13.6	1.74	18.4%	0.52	2.63	8.02×10^{-5}	0.026	1.26	0.206	0	0.363
B	29.9	15.7	14.2	1.72	14.2%	0.54	2.66	1.11×10^{-6}	0.031	1.28	0.219	0	0.343
C	41.67	20.56	21.11	1.68	16.2%	0.59	2.68	4.18×10^{-9}	0.017	1.11	0.099	0	0.350
D								2.43×10^{-3}	0.0104	6.9	0.855	0.072	0.377
E								0.463	0.0431	3.1	0.677	0.022	0.375 5

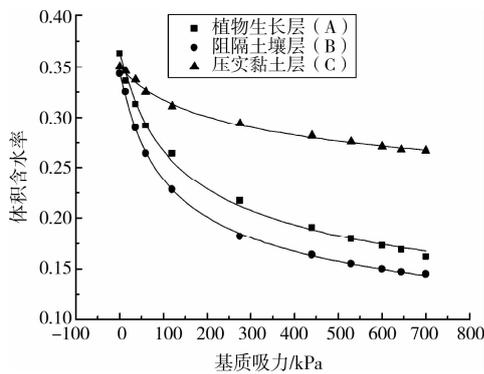


图 2 压实黏土封顶和 ET 封顶的土水特征曲线

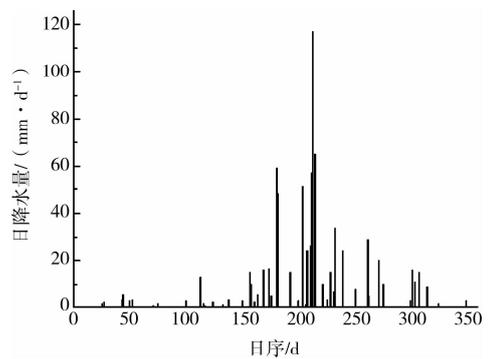


图 3 1976 年大连日降水量直方图

1.4 初始条件与边界条件的确定

植物生长层、阻隔土层以及压实黏土层的初始体积含水率分别为 0.184、0.142 和 0.162;细沙与砂砾层的初始体积含水率为 0.20。根据大连市气象局资料显示^[18],1976 年是大连市近 48 年来汛期降水强度最大的年份,短时间内的强降水对垃圾填埋场封顶系统的冲击力比较大,其全年的日降水量分布如图 3 所示。全年的日平均蒸发与蒸腾强度如表 2 所示,1 个月内每天的蒸发与蒸腾强度均相同。

表 2 日平均蒸发与蒸腾强度

月份	日平均蒸发与蒸腾强度 / $(mm \cdot d^{-1})$	月份	日平均蒸发与蒸腾强度 / $(mm \cdot d^{-1})$
1	2.4	7	7.5
2	2.0	8	8.7
3	2.3	9	8.5
4	2.7	10	6.8
5	4.0	11	4.6
6	4.8	12	2.6

2 数值计算结果与模型验证

2.1 数值计算结果与分析

在 1976 年的降水和蒸发蒸腾循环作用下,传统

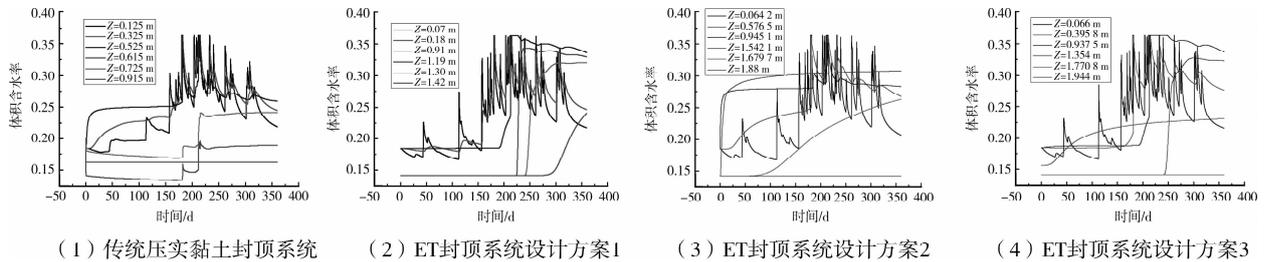


图 4 垃圾填埋场封顶系统的含水率随时间的波动

由图 4 可以看到,封顶系统的土壤离降水和蒸发边界越近,含水率对边界变化的响应越灵敏,且随着土层深度的增加,含水率的波动明显减弱,说明土壤中的含水率对气候条件的响应随土层深度的增加出现了明显的“峰值滞后”现象,造成这种现象的主要原因是由于土壤具有一定的持水能力。在传统压实黏土封顶系统中, $Z = 0.325\text{ m}$ 和 $Z = 0.525\text{ m}$ 处,含水率并没有受到最初蒸发边界条件的影响而减小,反而出现了增加的趋势,其主要原因是由于毛细作用引起细沙排水层中的水分向植物生长层土壤中扩散。压实黏土层中 $Z = 0.915\text{ m}$ 处,由于此层渗透系数极低,含水率没有受到气候条件变化的影响,保持 0.162 不变。由于垃圾填埋场内部温度较高,压实黏土层中的水分在温度剃度的作用下出现流失,引起土层开裂,致使压实黏土封顶系统失效。

从 4 中还可以看到,与传统压实黏土封顶系统相比,蒸发传输(ET)封顶系统中阻隔土层的含水率也受到降水和蒸发边界条件的影响,出现明显的上升和下降趋势。在 ET 封顶系统设计方案 1 中,在 $Z = 1.19\text{ m}$ 、 $Z = 1.30\text{ m}$ 和 $Z = 1.42\text{ m}$ 处,在夏季强降

压实黏土封顶系统与 3 种新型蒸发传输(ET)封顶系统中土壤水分随时间的变化如图 4 所示。

水到来前的很长一段时间内,含水率没有受到气候变化的影响而出现波动,在经过夏季降水补给后,含水率分别在 $T = 223\text{ d}$ 、 $T = 237.1\text{ d}$ 和 $T = 263\text{ d}$ 时出现了增加,且分别在 $T = 239.9\text{ d}$ 、 $T = 348.4\text{ d}$ 和 $T = 360\text{ d}$ 时达到 0.343 、 0.321 和 0.241 。在 ET 封顶系统设计方案 2 中, $Z = 1.542\text{ m}$ 处的含水率持续增加到 0.308 ;在 $Z = 1.6797\text{ m}$ 处,含水率在 $T = 30.3\text{ d}$ 时开始持续增加直至 $T = 360\text{ d}$ 达到 0.262 ; $Z = 1.88\text{ m}$ 处的含水率没有受到毛细作用以及气候条件的影响,在整个模拟阶段保持 0.142 不变。在 ET 封顶系统设计方案 3 中,不同深度的土壤含水率变化与 ET 封顶设计方案 1 比较相似,但值得注意的是降水与蒸发边界没有影响到深度为 $Z = 1.7708\text{ m}$ 以下的土壤层; $Z = 1.944\text{ m}$ 处的含水率由于接近底层的生物阻隔层,在毛细作用的影响下引起了此处水分的增加。

为了更明显的说明封顶系统中含水率的变化情况,在 $T = 110\text{ d}$ 、 $T = 216\text{ d}$ 、 $T = 280\text{ d}$ 和 $T = 360\text{ d}$ 的压实黏土封顶以及 3 种 ET 封顶系统的土壤剖面含水率变化如下图 5 所示。

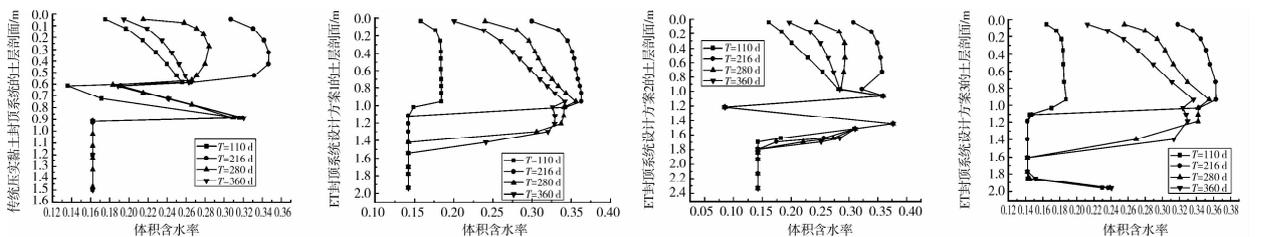


图 5 垃圾填埋场封顶系统土层剖面的含水率分布

由图 5 可以看到,在传统压实黏土封顶系统中,在 $T = 110\text{ d}$ 、 $T = 360\text{ d}$ 时,植物生长层土壤的含水

率分别由 $Z = 0.045\text{ m}$ 处的 0.175 和 0.192 增加到 $Z = 0.585\text{ m}$ 处的 0.256 和 0.263 ;在 $T = 216\text{ d}$ 、 T

= 280 d, 植物生长层土壤中的含水率随深度的增加首先表现出了增加的趋势, 随后出现了减小, 造成这种现象的原因可能是由于压实黏土层的毛细作用比较明显, 致使植物生长层下部的的水分向细沙层扩散而损失; 在细沙排水层中含水率变化趋势基本一致, 由于压实黏土的毛细作用且渗透系数低, 造成了细沙层上部的含水率下降, 临近压实黏土层的位置水分积聚; 边界条件的变化对压实黏土层的影响非常迟钝, 位于 $Z = 0.915$ m 以下的土层水分没有得到降水的补给。

由图 5 还可以观察到, 对于 ET 封顶系统设计方案 1, 在深度为 $Z = 1$ m 的植物生长土层中, 含水率随深度的延伸而逐渐增加; 在深度为 $Z = 1$ m 的阻隔土壤层中, 随着时间的延续降水对土层中水分的补给深度逐渐延伸。对于 ET 封顶系统设计方案 2, 植物生长土层中不同深度的含水率分布与压实黏土封顶系统中植物生长层的分布规律基本一致; 生物阻隔层中的水分在细沙层中出现了积聚, 而砂砾层中的水分出现了大量流失, 这种现象主要是由于毛细作用使得砂砾层中的水分分别向植物生长层和阻隔土壤层中运移; 降水对 ET 封顶设计方案 2 中阻隔土壤层的补给程度不像 ET 封顶设计方案 1 那么明显, 造成这种现象的原因可能是由于中间的生物阻隔层起到了排水作用。ET 封顶系统设计方案 3 中土层剖面的含水率分布与 ET 封顶设计方案 1 中基本类似, 但由于底层的生物阻隔层的存在, 毛细作用使得阻隔土壤层下部的土壤水分得到了来自生物阻隔层的补给。

2.2 模型的验证

通过对计算结果和文献^[19]中的试验数据进行对比, 近而对模型的可靠性进行验证。土壤的参数: $K_s = 5.56 \times 10^{-4}$ cm/s; $\alpha = 0.015$; $\beta = 1.875$; $\gamma = 0.467$; $\theta_r = 0.08$; $\theta_s = 0.43$ 。降水强度为 192 mm/d, 持续时间为 $T = 0.83$ d。初始体积含水率为 0.12, 边界条件为上边界是降水入渗边界, 下边界是自由排水边界。数值计算结果和试验数据的对比如图 6 所示。

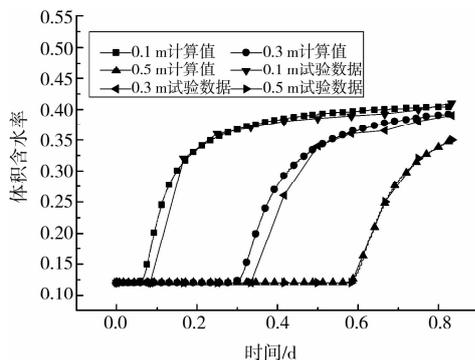


图 6 计算值和试验数据对比图

从上图可以观察到, 计算结果和试验数据基本吻合, 并且逐渐接近最大含水率值, 数值未出现振荡和弥散的现象, 从而验证了模型的可靠性。

3 结论

利用水汽在多层非饱和土壤中运移的数学模型, 以大连市 1976 全年的实际降水与蒸发蒸腾强度为边界条件, 计算了水汽在传统压实黏土封顶与 3 种新型 ET 封顶系统中运移的情况。数值计算结果表明, 土层中水分受边界条件的补给随土壤深度的增加表现出明显的“峰值滞后”现象; 传统压实黏土封顶系统中的压实黏土层不能有效的得到降水的补给, 新型的 ET 封顶系统能有效的储存降水, 并对阻隔土壤层进行水分补给; ET 封顶系统完全可以抵御大连近 48 年以来的最大强降水的冲击。值得注意的是, 对于 ET 封顶系统设计方案 2, 由于在植物生长层与阻隔土壤层之间设置了生物阻隔层, 不仅避免了动物对阻隔土壤层的破坏, 而且在强降水的过程中起到了排水作用。这种新型 ET 封顶系统的设计方案在干旱及半干旱地区将得到推广, 并逐渐取代传统的压实黏土封顶系统。此研究成果为垃圾填埋场 ET 封顶系统的建造提供了理论依据。

参考文献:

- [1] FORMAN A D, ANDERSON J E. Design and performance of four evapotranspiration caps [J]. Practice Periodical of Hazardous, Toxic and Radioactive Management, ASCE, 2005, 9(4): 263-272.
- [2] XIE HAI-JIAN, CHEN YUN-MIN, ZHAN LIANG-TONG, et al. Investigation of migration of pollutant at the base of Suzhou Qizishan landfill without a liner system[J]. J Zhejiang Univ. Sci. A, 2009, 10(3): 439-449.
- [3] 龙腾锐, 易洁, 林于廉, 等. 垃圾渗滤液处理难点及其对策研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 2, 31(1): 115-119.
LONG TENG-RUI, YI JIE, LIN YU-LIAN, et al. Treatment difficulties and strategies for landfill leachate [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 2, 31(1): 115-119.
- [4] KHIRE J A, BENSON C H, BOSSCHER P J. Water balance modeling of earthen final covers[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1997, 124(8): 744-754.
- [5] KHIRE J A, BENSON C H, BOSSCHER P J. Capillary barrier: design variables and water balance

- [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2000, 127(8):695-707.
- [6] ALBRECHT B, BENSON C. Effect of desiccation on compacted natural clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2001, 127(1):67-75.
- [7] DWYER S F. Water balance measurements and computer simulations of landfill covers [D]. Albuquerque: The University of New Mexico Albuquerque, New Mexico, 2003, 3.
- [8] WITT K J, ZEH R M. Cracks due to desiccation in cover lining system phenomena and design strategy [C]// International Workshop: Hydro-Physico-Mechanics of Landfills. LIRIGM, Grenoble 1 University, France, March 2005.
- [9] SADEK S, GHANIMED S, EL-FADEL M. Predicted performance of clay-barrier landfill covers in arid and semi-arid environments[J]. Waste Management, 2006; 1-12.
- [10] SCHNABEL W, LEE W, BARNES D L. A numerical simulation of evapotranspiration cover performance at three cold-region locations [C]// World water and environmental resources congress 2005, Anchorage, Alaska, USA. 2005, 5.
- [11] WAYLLACE A, LIKOS W J. Numerical modeling of artificial soil as an evapotranspirative cover [C]// Proceedings of the fourth international conference on unsaturated soils, Carefree, Arizona, USA. 2006, 4: 646-657.
- [12] KELSEY J A, KAY J T, ANKENY M, PLUMMER M. Darcian flux estimations in evapotranspiration landfill covers [C]//Proceedings of the fourth international conference on unsaturated soils, Carefree, Arizona, USA. 2006, 4: 730-740.
- [13] JOHN S. MC CARTNEY J S, ZORNBERY J G. Decision analysis for design of evapotranspirative landfill covers [C]//Proceedings of the fourth international conference on unsaturated soils, Carefree, Arizona, USA, 2006, 4: 694-705.
- [14] 罗继武, 刘川顺, 郑勇. 垃圾填埋场终场腾发覆盖系统的研究进展[J]. 中国给水排水, 2008, 12(24):1-5. LUO JI-WU, LIU CHUAN-SHUN, ZHENG YONG. Research progress on evapotranspiration cover system at landfill site[J]. China Water & Wastewater, 2008, 12(24):1-5.
- [15] SOMASUNDARAM S, LA FOUNTAIN L, ANANTHANATHAN J. Performance monitoring and model verification for an evapotranspirative cover[C]// Proceedings of the sessions of the geo-frontiers 2005 congress, Austin, Texas, USA. 2005, 1:1-12.
- [16] WARRICK A W. Soil water dynamics[M]. New York: Oxford University Press, 2003.
- [17] LEHMANN F, ACKERER P H. Comparison of iterative method for improved solutions of the fluid flow equation in partially saturated porous media[J]. Transport in Porous Media, 1998, 31(3): 275-292.
- [18] 王玲玲, 邹耀仁, 隋洪起. 对大连历年汛期起止日期的客观判定[J]. 气象, 2000, 26(3):12-15. WANG LING-LING, ZOU YAO-REN, SUI HONG-QI. An objective determination of the beginning and ending date of rainy season in Dalian[J]. Meteorological monthly, 2000, 26(3):12-15.
- [19] 薛强, 徐应明, 刘建军. 降雨入渗对填埋场土壤水分动力学行为的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2004, 10, 23(5): 618-620. XUE QIANG, XU YING-MING, LIU JIAN-JUN. Effect of rainfall infiltration on moisture distribution in solid waste landfill[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2004, 23(5): 618-620.

(编辑 王秀玲)