

湿润气候区固废堆场封场土质覆盖层性状研究

詹良通, 贾官伟, 邓林恒, 陈云敏

(浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058)

摘要: 固废堆场封场土质覆盖层由天然非胀缩土料组成, 其造价及后期维护费用明显低于传统覆盖层, 是填埋场封场覆盖的理想型式。采用基于非等温多孔介质中水热耦合运移控制方程的软件, 考虑外界气候条件、地表蒸发作用、植被蒸腾作用, 建立土质覆盖层-植被-大气相互作用数值模型, 针对中国湿润气候区典型城市长期实测气象条件, 系统分析了不同结构型式土质覆盖层的性状。分析结果表明, 毛细阻滞型覆盖层可把水分阻滞在根系生长层, 便于植被蒸腾作用的提取, 其性能优于单一土层型覆盖层。土质覆盖层内水分的排出主要依靠植被蒸腾和地表蒸发, 二者与植被特征相关, 植被条件越好则蒸腾总量越大; 根系生长区内的含水率变化幅度大于其它区域。在本文气候条件下, 选择厚度为 1.4 m 的毛细阻滞型覆盖层并结合一定植被条件可防止产生深层渗漏。

关键词: 固废堆场; 土质覆盖层; 湿润气候; 土质覆盖层-植被-大气相互作用

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)10-1812-07

作者简介: 詹良通(1972-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事非饱和土力学、环境岩土工程和边坡工程教学及科研工作。E-mail: zhanlt@zju.edu.cn。

Performance of earthen final covers of landfills in humid areas

ZHAN Liang-tong, JIA Guan-wei, DENG Lin-heng, CHEN Yun-min

(MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The alternative earthen final covers (AEFCs) are constructed with relatively non-plastic soils with greater durability and lower cost and require relatively lower post-closure maintenance than conventional covers, so they are good choices for the final closure of landfills. A numerical model that can describe the interactions among earthen final cover, vegetation and atmosphere is developed based on the non-isothermal flow equation considering the thermal moisture coupling. It takes the meteorological condition, the evaporation from the ground surface and the transpiration of the vegetation into account. The performance of AEFCs in humid areas in China is investigated. The numerical results show that the capillary barrier cover can limit downward movement of water and the water is stored in the root zone layer. The capillary barrier cover performs better than the monolithic cover. The transpiration and the evaporation drain most of the water out of the cover and the evapotranspiration increases as the vegetation grows well. Capillary barrier cover with 1.4 m in thickness and certain vegetation can prevent the deep percolation under the climatic condition considered in the study.

Key words: landfill; earthen final cover; humid climate; earthen final cover-vegetation-atmosphere interaction

0 引言

填埋场封场覆盖层的主要功能是减少降雨入渗, 以减小渗滤液的产量。若覆盖层弱化或失效, 则渗滤液产量会显著增加, 造成填埋场内渗滤液水位升高, 诱发填埋场失稳和加剧污染物的扩散。覆盖层就像填埋场的“皮肤”, 直接暴露在外部气候环境中, 它能够经受长期干湿、冷暖、冻融循环的考验(图1)。由于气候条件复杂多变以及当前愈演愈烈的全球气候变化, 使得这一层“人工皮肤”的设计成为难题。填埋场封场系统的发展经历了简易覆土→压实黏土覆盖层→由土工膜和压实黏土组成复合覆盖层→在防渗层

上设置砂砾排水层→土工聚合膨润土垫(GCL)替代压实黏土, 土工排水网替代砂砾排水层→基于水分储存-释放原理的土质覆盖层的发展阶段^[1]。早期人们希望低渗透性的压实黏土能起到防渗作用, 但是多年实践表明在季节性气候变化过程中压实黏土覆盖层易发生干缩或冻胀开裂, 使其防渗效果大打折扣^[2-3]。后期采用“堵排结合”的多层复合防渗设计以及在材料上改进(即使用土工膜和GCL)取得很好的效果, 但

基金项目: 国家自然科学基金项目(50878194); 973计划课题(2012CB719805)

收稿日期: 2011-11-28

这种复合型覆盖层的造价昂贵, 并且土工合成材料界面滑动失稳问题严重^[4]。20 世纪末期出现了一种基于水分储存-释放原理的替代型土质覆盖层, 英文中一般称为 Alternative Earthen Final Covers (AEFCs)或 Evapotranspirative cover (ET cover)。它主要由粉性、砂性或粗粒土组成, 其工作原理与吸水海绵类似, 在雨季时吸收并储存水分, 在干季时通过地表蒸发和植被蒸腾作用释放水分, 通过合理设计, 该土质覆盖层能够在季节性干湿循环过程中实现自身水量平衡, 减少雨水透过覆盖层进入填埋体的渗漏量。目前土质覆盖层主要有两种型式, 即单一土层型覆盖层 (Monolithic Cover) 和毛细阻滞型覆盖层 (Capillary Barrier Cover)(图 2)。前者由一层具有良好储水能力细粒土和植被组成, 后者由一层细粒土下卧粗粒土而成, 它利用了粗细层界面处的毛细阻断作用来增大上部细粒土层的储水能力^[4]。该土质覆盖层的造价一般只是复合型覆盖层的一半^[5], 更重要的是, 它由天然非胀缩土料组成, 具有良好耐久性, 比复合型覆盖层更能适应恶劣气候条件^[4]。

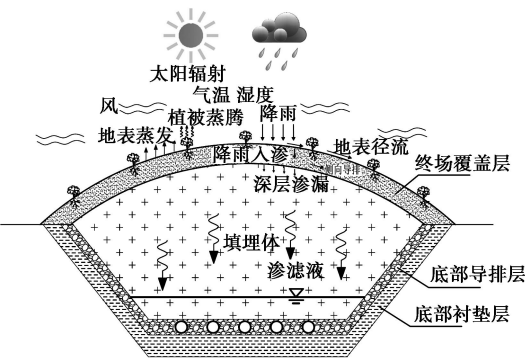


图 1 填埋场覆盖层工作环境示意图

Fig. 1 Working environment of final cover of a landfill

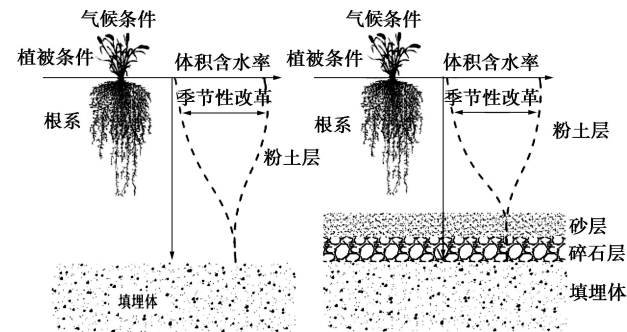


图 2 土质覆盖层结构型式示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of earthen final cover

自 20 世纪末以来, 欧美国家开始在垃圾填埋场及其它非危险固体废弃物堆场应用土质封场覆盖层, 并开展了理论、数值模拟及现场实测研究^[6-9], 大多数研究结果表明土质覆盖层在干旱-半干旱气候区具有良好服役性能^[4]。目前国外针对湿润气候条件下土质覆

盖层性状的研究还很少。国内刘川顺等^[10]以水量平衡分析得到的蒸发量和蒸腾量及实测降雨量作为地表边界研究了腾发式土质覆盖层在武汉地区的厚度取值。张文杰等^[11]以经验公式求得地表蒸发量、植被蒸腾量和地表径流量, 根据水量平衡得到地表入渗量, 将之作为一维非饱和和渗流的地表边界分析了一年內填埋场腾发式覆盖层系统中水分的运移。陆海军等^[12]建立了一维非饱和水分运移的数值模型, 以日降雨量和季度平均日蒸发量为边界条件, 研究了大连地区腾发式覆盖层系统中的水分在一年内的变化。上述国内研究均将地表边界条件作为已知条件输入数值模型, 未在模拟中将覆盖层内水分运移与覆盖层外的气候条件(降雨、辐射、温度、湿度、风速等)进行耦合。直接采用气象观测资料中的蒸发量或是采取经验公式来描述覆盖层-大气之间的相互作用, 并不能确切反映二者相互作用的物理本质, 也不能体现植被蒸腾直接从根部根系生长区中直接排出水分的作用。因此针对我国湿润气候区的复杂气候条件, 开展耦合层内水分运移和层外实测气候条件的土质覆盖层性状研究是必要的。

本文采用基于非等温条件下多孔介质中水热耦合运移控制方程的软件, 考虑气候条件、地表蒸发作用、植被蒸腾作用, 建立土质覆盖层-植被-大气相互作用数值模型, 利用该模型针对我国湿润气候区典型城市实测气候条件, 系统分析了不同结构型式土质覆盖层的性状。

1 土质覆盖层-植被-大气的相互作用

土质覆盖层-植被-大气之间的相互作用包括降雨入渗、地表蒸发、植被蒸腾和覆盖层的水热运移等多个过程。

1.1 地表蒸发

Penman 提出了基于能量守恒定律的 Penman 公式来描述地表水分蒸发。该公式假定地表是饱和的, 在蒸发时水分供应充足。Penman 公式中采用的潜在蒸发量 (Potential Evaporation, 也称作自由水面蒸发量) 定义为 $PE = f(u)(e_s - e_a)$, 其中 $f(u)$ 是风速的函数, $f(u) = 0.35(1 + 0.15u)$, e_s 为水面饱和蒸汽压, e_a 为空气蒸汽压。

Wilson 对 Penman 公式进行修正, 提出了可以考虑地表处于非饱和状态, 蒸发所需水分供应受到限制的 Penman-Wilson 公式^[13]。该公式可以考虑多个气候因素(如净辐射量、风速、空气湿度和温度)和地表湿度的变化, 计算出非饱和土体表面的蒸发量:

$$E = \frac{G R_n + h E_a}{G + h A} \quad (1)$$

式中 E 为地表蒸发量; G 为饱和蒸汽压和温度曲线的斜率; R_n 为地表净辐射量; h 为湿度常数; $E_a = f(u)P_a(B-A)$, 其中 $f(u)$ 是风速的函数 $f(u) = 0.35(1+0.15u)$, u 为风速, P_a 为蒸发面上方空气的蒸汽压, B 为空气相对湿度的倒数, A 为土体表面相对湿度的倒数。

1.2 植被蒸腾

地表有植被时, 需对 Penman-Wilson 公式修正以得到有植被覆盖地表时的地表蒸发量^[14]。地表蒸发量和植被蒸腾量均与植被的叶面积指数 (即每平方米地表面上覆盖植物的叶面积) 相关。地表实际蒸发量:

$$AE = E \times \{1 - (-0.21 + 0.7\sqrt{\text{LAI}})\} \quad (2)$$

其中, LAI 为植被的叶面积指数。

植被生长过程中通过根系吸取生长区内的水分, 并通过蒸腾作用将水分排到大气中。植被潜在的蒸腾量可以通过下式计算:

$$\text{PT} = \text{PE} \times (-0.21 + 0.7\sqrt{\text{LAI}}) \quad (3)$$

其中, PT 为根系生长区水分供应充足时的植被蒸腾量。当植被生长区土体处于非饱和状态时会影响到植被的生长, 进而植被的实际蒸腾量会减小, 此时需要通过式 (4) 来修正:

$$\text{AT} = \text{PRU} \times \text{PML} \quad (4)$$

式中 AT 为根部节点的实际蒸腾量; $\text{PRU} = \frac{2\text{PT}}{R_T}$

$(1 - \frac{R_s}{R_T})A_s$; R_T 为植物根部总长度; R_s 为当前根部节点长度; A_s 为当前根部节点贡献面积。PML 为植物根部水分吸收限制函数, 与土中吸力有关: 当吸力为 0 ~ 100 kPa 时, 根部可充分吸水, 而当基质吸力达到凋萎点后, 植物根部将不能再从土体中提取水分, 一般凋萎点的基质吸力值为 1500 kPa。在模拟中假定植物根部水分提取能力沿根系深度方向呈矩形分布。

1.3 非饱和土体中的水热运移

非饱和土体内的水分运移是指液态水和气态水在水热梯度共同作用下的运移。Philip 等^[15]以质量和能量平衡为基础, 提出了土中的液态水和气态水在水热梯度共同作用下的运移模型。Milly^[16]对模型作了改进, 采用基质势梯度代替了含水率梯度, 建立了质量和能量守恒基础上的水-汽-热耦合运移理论。在耦合运移的过程中, 温度的变化可以引起土壤内水分的相变, 如在蒸发条件下液态水会转化为气态水。

该理论中的非饱和二维水热运移控制方程如下:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (D_v \frac{\partial P_v}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial y} (D_v \frac{\partial P_v}{\partial y}) +$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x \frac{\partial (\frac{P}{rg} + y)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y \frac{\partial (\frac{P}{rg} + y)}{\partial y} \right] + Q = l \frac{\partial P}{\partial t} \quad (5)$$

式中 P 为孔隙水压力; P_v 为土中的蒸汽压; k_x, k_y 为非饱和渗透系数; l 为土水特征曲线的斜率; Q 为边界流量; y 为位置水头; D_v 为蒸汽扩散系数; r 为水的密度; g 为重力加速度; t 为时间。

$$L_v \frac{\partial}{\partial x} (D_v \frac{\partial P_v}{\partial x}) + L_v \frac{\partial}{\partial y} (D_v \frac{\partial P_v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial x} \left[k_{tx} \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_{ty} \frac{\partial T}{\partial y} \right] + Q_t = l_t \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

式中 Q_t 为边界热量; L_v 为水的蒸发潜热; T 为绝对温度; k_{tx}, k_{ty} 为土体的导热系数, l_t 为土的体积热容。

为求解式 (5) 和式 (6) 的方程, 需要建立压力 P 、温度 T 和蒸汽压 P_v 之间的关系, 此时可采用 Edlefsen 等^[17]提出的

$$P_v = P_{vs} (e^{\frac{-P-w}{RT}}) = P_{vs} h_{\text{rair}} \quad (7)$$

式中 P_{vs} 为饱和蒸汽压; w 为水蒸汽的分子量; R 为通用气体常数; h_{rair} 为空气相对湿度。

1.4 地表边界

地表边界条件包括了温度边界条件和流量边界条件。地表的流量边界需要根据降雨量与蒸发量之间的关系确定。假定降雨量为 P_c , 地表实际蒸发量为 E :

(1) 若 $P_c - E < 0$, 则地表净流量为 $P_c - E$;

(2) 若 $P_c - E > 0$, 流量 $(P_c - E)$ 在时间步内被施加后, 若地表孔压仍为负值, 则此流量 $(P_c - E)$ 全部入渗;

流量 $(P_c - E)$ 在时间步内被施加后, 若地表孔压为正值, 则对此时间步进行重新计算, 此计算中假定地表为零水头边界, 计算出实际入渗量, 此时径流量 = 降雨量 - 蒸发量 - 入渗量。

地表温度边界采用 Wilson 提出的地表温度计算公式^[13]:

$$T_s = T_a + \frac{1}{hf(u)} (R_n - E) \quad (8)$$

式中, T_s 为土表面温度, T_a 为土表面空气温度, 其它符号同式 (1)。

1.1 ~ 1.4 节中的式 (1) ~ (8) 可以通过 GeoStudio 软件中 Vadose/W 模块进行耦合求解^[16], 实现非饱和土体中的水热运移与外部气候条件相互作用的耦合分析。

2 典型城市土质覆盖层性状分析

杭州气候温暖湿润, 光照充足, 雨量充沛, 是中

国湿润气候区的典型城市。杭州市年降雨量在 1100 ~ 1600 mm 之间,水面年平均蒸发量为 1150 ~ 1400 mm。

2.1 气候条件及植被特征

本文选取降雨量为 1273.9 mm 的 2008 年的气候条件来分析土质覆盖层的性状。图 3 和图 4 分别给出了实测日降雨量和日净辐射量,限于篇幅未给出实测的气温、风速和相对湿度。

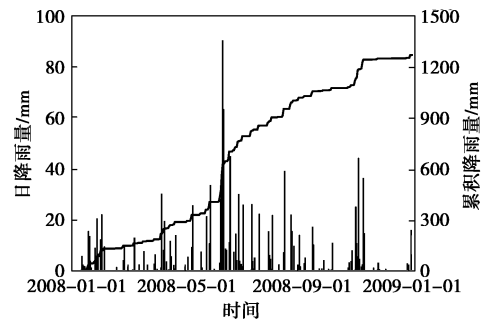


图 3 实测日降雨量

Fig. 3 Observed daily precipitation

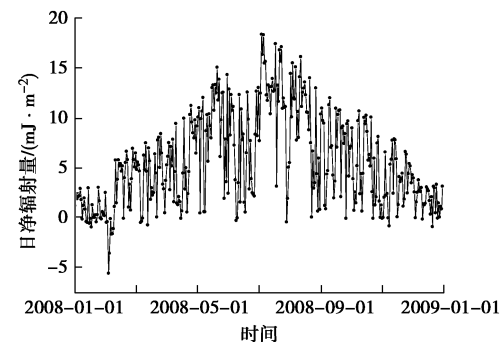


图 4 实测日净辐射量

Fig. 4 Observed daily net radiation

植被特征主要包括叶面积指数和根系深度(Root Depth, RD) (见图 5)。本文模拟中所采用的参数是参考 Zornberg^[9]和 Morries^[18]的文献确定的,共选取 LAI=1 和 LAI=2 两种叶面积指数,0.3 m 和 0.6 m 两种根系深度。

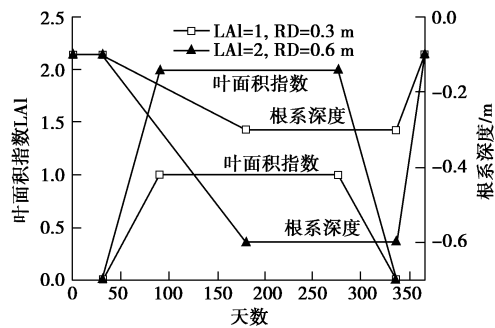


图 5 植被叶面积指数和根系深度

Fig. 5 Leaf area index and root depth

2.2 土体性质

土体的水力学参数取自美国国家环境保护局 EPA ACAP 项目的评估报告^[19]。其中 Silt with sand 为细粒土,用作表层的植被生长层。3 种土体的渗透系数曲线和土水特征曲线见图 6 和图 7。

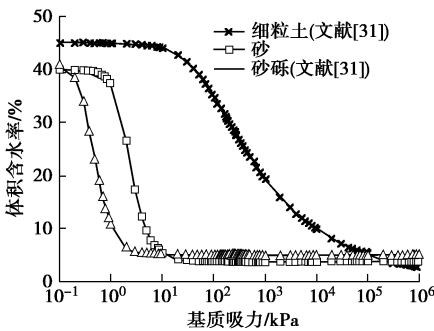


图 6 土水特征曲线

Fig. 6 Soil-water characteristic curve for soil

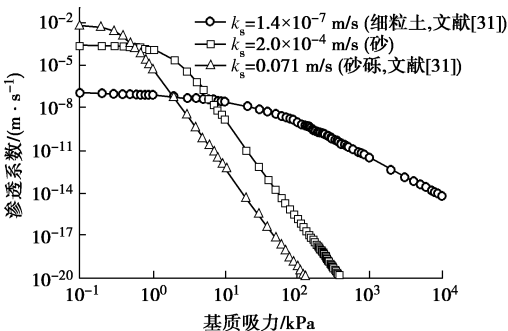


图 7 渗透系数曲线

Fig. 7 Permeability for soil

导热系数表征土体传热量能力,单位为 J/(s·m·)。体积热容表征单位体积的土体在温度增加或减小 1 时所吸收或释放的能量,单位为 J/(m³·),它取决于土体干密度及其不同组分的体积热容。图 8 给出了 3 种土体的导热系数(实心符号)和体积热容曲线(空心符号)。

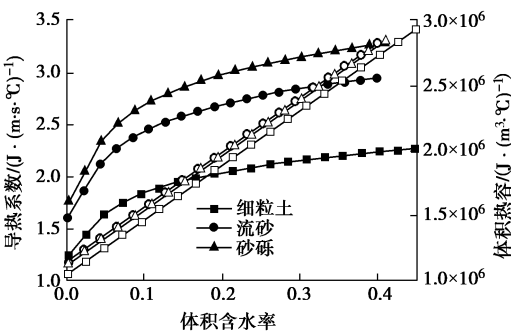


图 8 土体导热系数和体积热容曲线

Fig. 8 Thermal conductivity and volumetric specific heat

2.3 土质覆盖层性状分析

本文模拟土质覆盖层厚度为 1.4 m,分析了表 1 所示的 6 种工况,其中 HZ1 ~ HZ3 为毛细阻滞型, HZ4 ~ HZ6 为单一土层型。毛细阻滞型的 1.4 m 厚度

中自上而下为粉土植被层 1.0 m, 砂层 0.2 m, 碎石层 0.2 m; 单一土层型的 1.4 m 土体均为粉土层。数值模拟中粉土植被层初始体积含水率为 30% (对应基质吸力 200 kPa); 砂土和碎石的初始体积含水率分别为 5.0%和 5.5% (对应基质吸力 10 kPa)。覆盖层的初始温度为 5℃。土质覆盖层与固体废弃物填埋体的接触面边界定义为为潜在渗流边界 (即当覆盖层的下表面孔隙水压力小于 0 时, 不会有水分透出; 当下表面的孔隙水压力达到 0 后, 开始有水分透出, 出流面的渗透系数等于土体饱和渗透系数)。

表 1 给出了在 2008 年度不同工况条件下的蒸发量、蒸腾量、土质覆盖层存储量和对应的渗漏量。本次计算得到的杭州 2008 年潜在蒸发量为 1010.6 mm, 与《杭州市志·自然环境篇》中记录的杭州年平均水面蒸发量 1150~1400 mm 接近, 证明了本文计算结果的可靠性。

在表 1 的工况中, 只有工况 HZ-4 产生了 10 mm 的深层渗漏量, 相当于降雨量的 1%, 表明在表土植被层渗透系数为 1.4×10^{-7} m/s 情况下土质覆盖层是适用的。对于同种结构型式的覆盖层, 植被条件越好, 则地表蒸发量越小、植被蒸腾量越大、总腾发量随之增大, 覆盖层中的存储量减小。

表 1 不同工况下的水量平衡

Table 1 Water balance components under different conditions					
工况	结构型式	LAI	根系/m	地表径流/mm	
HZ-1	毛细阻滞	0	0	242	
HZ-2	毛细阻滞	1	0.3	227	
HZ-3	毛细阻滞	2	0.6	230	
HZ-4	单层	0	0	234	
HZ-5	单层	1	0.3	222	
HZ-6	单层	2	0.6	208	
蒸发量/mm	蒸腾量/mm	蒸发量/mm	存储量/mm	渗漏量/mm	
959	0	959	73	0	
584	403	987	60	0	
337	658	995	49	0	
918	0	918	111	10	
575	391	966	86	0	
337	653	989	77	0	

(1) 典型工况分析

选取工况 HZ-3 来说明湿润气候区土质覆盖层的性状。图 9 给出了各水量要素随时间的变化。可以看出在该工况下, 地表蒸发 337 mm、植被蒸腾 658 mm、地表径流量 230 mm、净存储量 49 mm。其中蒸发量占 24.6%、蒸腾量占 51.7%, 表明腾发共同作用排干了覆盖层内的绝大部分水分; 蒸腾量占到 50%以上, 说明植被的排水起到决定性作用。

土质覆盖层内的存储量始终处于动态变化之中 (图 9), 每当有降雨事件发生, 则存储量增加; 随着

天气的晴朗, 水分会通过蒸发、蒸腾作用逐步排出覆盖层, 层内存储量减小。

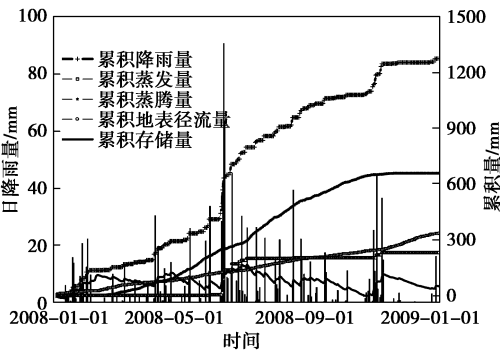


图 9 水量平衡要素发展过程

Fig. 9 Dynamic process of water balance

工况 HZ-3 地表径流量为 230 mm (降雨量的 18%), 与张文杰^[11]利用年降雨量为 1500 mm 的苏州气象资料, 以径流曲线数法预测的地表径流量 200 mm 接近。在湿润气候区, 强降雨的存在 (比如杭州 2008 年日最大降雨量达到 90.6 mm) 使地表径流量成为水量平衡分析中的重要组成部分。图 10 给出了地表径流量与日降雨量的动态对应关系。6 月 7 日到 6 月 11 日连续 5 天连续降雨, 总降雨量为 222 mm, 而总径流量达到 133.7 mm, 径流量与降雨量之比为 0.6, 证明连续降雨叠加且雨强较大情形下容易产生大量地表径流。日地表径流量还与前期降雨有密切关系。4 月 6 日降雨 30.5 mm, 未产生地表径流; 而 6 月 27 日降雨 30.3 mm 产生的地表径流达到 18.2 mm, 其原因在于前面 3 d 均有降雨发生, 地表含水率已经很高, 大大降低了地表土体的入渗能力。

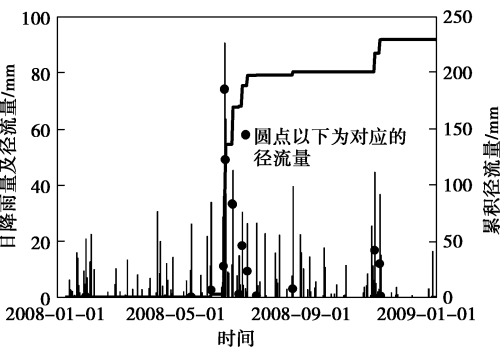


图 10 日地表径流量动态变化

Fig. 10 Dynamic process of daily runoff

图 11 给出了体积含水率剖面随时间的变化, 右侧的标注是剖面日期。由图 11 可以看出砂层和碎石层发挥了非常好的毛细阻滞作用, 在上部粉土植被层储水能力几乎达到最大的情况下, 砂层和碎石层仍然保持了较小的体积含水率, 将水分阻滞在了上部的粉土层中。由于 6 月的降雨天数达到 17 d, 降雨量达到 361

mm (平均 12 mm/d), 在 7 月 1 日粉土层几乎饱和, 受其影响砂层和碎石层中的体积含水率也出现一定程度的增长, 但是幅度很小。

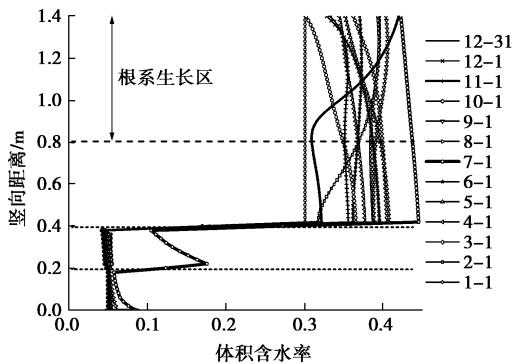


图 11 HZ-3 体积含水率剖面随时间的动态变化

Fig. 11 Volumetric water content profiles at various depths

图 12 给出了覆盖层不同深度处体积含水率随时间的动态变化。由图 12 可以看出, 距离地面 0.0 m 的含水率随气候条件变动非常剧烈; 根系生长区的体积含水率变化大于其它区域, 说明根系生长区的储水-释水作用更大。体积含水率的增长与降雨事件的发生具有非常好的对应关系 (如图 12 所示)。砂层 (1.1 m 深度) 和碎石层 (1.3 m 深度) 的体积含水率变动非常小, 而且由于深度较大, 对地表连续强降雨 (例如 6 月 7 日~6 月 11 日) 的响应有数天的滞后。当天气晴朗时, 由于地表蒸发和植被蒸腾作用, 各深度处体积含水率都会相应减小。在 11 月 8 日~11 月 24 日时间段内, 几乎没有降雨, 体积含水率均呈现单调减小趋势。

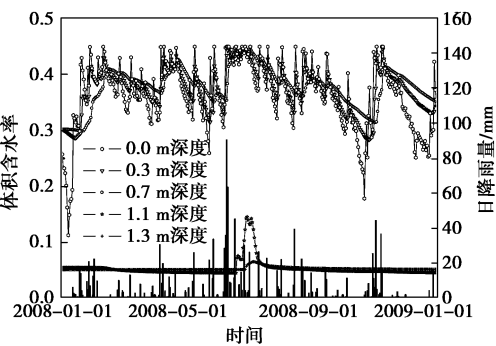


图 12 不同深度体积含水率随时间动态变化

Fig. 12 Variation of volumetric water contents with time

(2) 单一土层型与毛细阻滞型比较

图 13 给出了工况 HZ-6 单一土层型覆盖层体积含水率剖面随时间的动态变化, 与图 11 相比, 气候条件大大影响到覆盖层底部 0.4 m 的体积含水率。在 7 月 1 日时覆盖层几乎饱和; 而对毛细阻滞型覆盖层, 砂层和碎石层中的体积含水率变化很小。

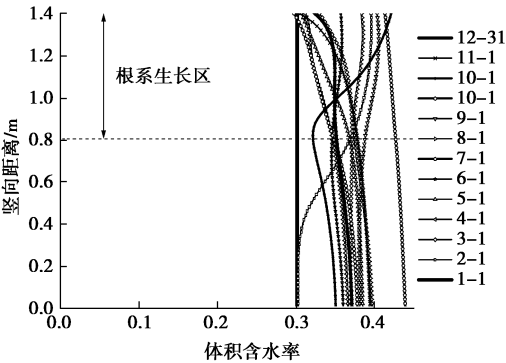


图 13 HZ-6 体积含水率剖面随时间的动态变化

Fig. 13 Volumetric water content profiles at various depths

(3) 植被对毛细阻滞覆盖层性状的影响

图 14 给出了总腾发量与叶面积指数的关系, 由图 14 可以看出在同等的植被条件下, 毛细阻滞型覆盖层的总腾发量大于单一土层型, 证明毛细阻滞作用将水分保持在离植被根系较近的区域, 加大了对根系的供水, 增大了蒸发和蒸腾的排水作用。由图 14 还可以看出, 腾发总量随着植被条件的加强是单调增加的。

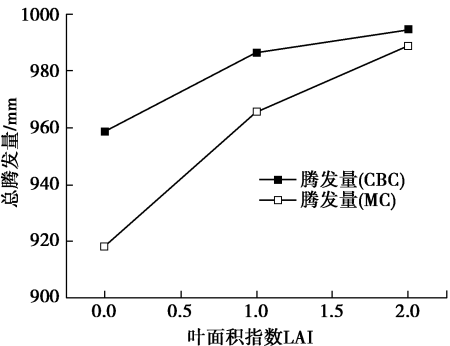


图 14 总腾发量与叶面积指数的关系

Fig. 14 Relationship between evapotranspiration and LAI

3 结 论

本文采用基于非等温多孔介质中水热耦合运移控制方程的软件, 考虑外界气候条件、地表蒸发作用、植被蒸腾作用, 建立土质覆盖层-植被-大气相互作用数值模型, 分析了中国湿润气候区不同结构型式土质覆盖层的性状。通过分析可以得到以下的结论:

(1) 毛细阻滞型覆盖层中的粗粒层可以通过毛细阻滞作用将水分保持在上部粉土层中, 有利于蒸发和植被根系生长对水分的提取, 增大了蒸发和蒸腾的排水作用, 其性能优于单一土层型。当同等厚度的单一土层型覆盖层发生渗漏时, 毛细阻滞型并不会透水, 可有效减少深层渗漏的产生。

(2) 土质覆盖层内水分的排出主要依靠植被蒸腾和地表蒸发, 二者与植被特征相关, 植被条件越好蒸腾量增大, 地表蒸发量减小, 总腾发量增大。根系生

长区内体积含水率随外界气候条件变化的幅度大于其它区域,说明根系生长区的储水-释水作用更强。

(3)在湿润气候区,降雨发生时覆盖层地表会产生大量地表径流,有利于减少进入覆盖层的入渗量,进而可减少深层渗漏。

参考文献:

- [1] BENSON C H. Final coves for waste containment systems: a north american perspective[C]// XVII CONFERENCE OF GEOTECHNICS OF TORINO "Control and Management of Subsoil Pollutants". Torino, 1999.
- [2] DWYER S F. Finding a better cover[J]. Civil Engineering, ASCE, Reston, 2001, **71**(1): 58-63.
- [3] ALBRIGHT W H, BENSON C H, GEE G W, et al. Field performance of a compacted clay landfill final cover at a humid site[J]. J Geotech Geoenviron Eng, 2006, **132**(11): 1393-1403.
- [4] SHACKELFORD C D. Environmental issues in geotechnical engineering[C]// Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka, 2005: 95-122.
- [5] HAUSER V L, WEAND B L, GILL M D. Natural covers for landfills and buried waste[J]. Journal of Environmental Engineering, 2001, **127**: 768-775.
- [6] ALBRIGHT W H, BENSON C H, GEE G W, et al. Field water balance of landfill final covers[J]. Journal of Environmental Quality, 2004, **33**: 2317-2332.
- [7] KHIRI M V, BENSON C H. Field Data from a capillary barrier and model predictions with UNSAT-H[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, **125**(6): 518-527.
- [8] KHIRI M, BENSON C H, BOSSCHER P. Water balance modeling of final covers[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1997, **123**(8): 744-754.
- [9] ZORNBERG J G, LAFOUNTAIN L, CALDWELL J A. Analysis and design of evapotranspirative cover for hazardous waste landfill[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, **129**(5): 427-438.
- [10] 刘川顺, 赵 慧, 罗继武. 垃圾填埋场覆盖系统渗沥控制试验和数值模拟[J]. 环境科学, 2009, **30**(1): 289-296.
- (LIU Chuan-shun, ZHAO Hui, LUO Ji-wu. Experiment and numerical simulation of percolation control using evapotranspirative landfill cover system[J]. Environmental Science, 2009, **30**(1): 289-296. (in Chinese))
- [11] 张文杰, 邱战洪, 朱成仁, 等. 长三角地区填埋场 ET 封顶系统的性能评价[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(3): 384-389. (ZHANG Wen-jie, QIU Zhan-hong, ZHOU Cheng-ren, et al. Evaluation of evapotranspiration covers of landfills in Yangtze River delta region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(3): 384-389. (in Chinese))
- [12] 陆海军, 栾茂田, 张金利. 垃圾填埋场 ET 封顶的系统水量平衡数值分析[J]. 大连理工大学学报, 2009, **49**(6): 913-918. (LU Hai-jun, LUAN Mao-tian, ZHANG Jin-li. Numerical simulation of moisture balance in evapotranspiration landfill cover[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2009, **49**(6): 913-918. (in Chinese))
- [13] WILSON G W. Soil evaporative fluxes for geotechnical engineering problems[D]. Saskatoon: University of Saskatchewan.
- [14] GeoSlope International Ltd. Vadose/W user's manual, Version 1.10. Geo-Slope Ltd., Calgary, Alberta, Canada, 2005.
- [15] PHILIP J R, DE VRIES D A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients[J]. Transactions-American Geophysical Union, 1957, **38**(2): 222-232.
- [16] MILLY P C D. Moisture and heat transport in hysteretic, inhomogeneous porous media: A matric head based formulation and a numerical model[J]. Water Resources Research, 1982, **18**(3): 489-498.
- [17] EDLEFSEN N E, ANDERSON A B C. Thermodynamics of soil moisture[J]. Hilgardia 15, 1943, **2**: 31-298.
- [18] MORRIS C E, STORMONT J C. Capillary barriers and subtitle D covers: estimating equivalency[J]. Journal of Environmental Engineering, 1997, **123**(1): 3-10.
- [19] ROESLER A C, BENSON C H, ALBRIGHT W H. Field hydrology and model predictions for final covers in the alternative assessment program-2002[R]. Madison, WI, University of Wisconsin, Geo-Engineering Report No. 02-08, 2002.