

DOI: 10.11779/CJGE201603008

# 垃圾填埋场毛细阻滞型腾发封顶工作机理及性能分析

张文杰, 耿潇

(上海大学土木工程系, 上海 200072)

**摘要:** 毛细阻滞型腾发封顶目前主要用于国外干旱、半干旱地区, 在湿润气候区的研究很少。在杭州市露天构筑毛细阻滞型腾发封顶模型, 量测18个月中降水、蒸发和植被蒸腾下土柱透水量、地表径流量和土体含水率, 得到该封顶在不同季节的响应, 分析了毛细阻滞作用机理及其性能, 使用水量平衡模型(HELP)和土壤-植被-大气相互作用模型(VADOSE/W)对试验过程中的水量平衡进行模拟, 探讨了数值模拟存在的问题。试验过程中, 共降水2361 mm, 产生地表径流88.4 mm, 透水67.4 mm, 其他降水均在土层吸持与腾发交替作用下最终返回大气, 由于试验地区多雨期与植被腾发旺盛期重合, 毛细阻滞型腾发封顶在该地区具有良好性能。由于毛细阻滞作用, 使得上部黏土中存储了更多水分用于后期腾发, 从而减少了透水量, 当毛细阻滞界面附近土体的体积含水率超过临界含水率时毛细阻滞界面被击穿, 击穿是连续强降雨作用的结果。HELP和VADOSE/W均高估了地表径流和透水量、低估了腾发量, 因为VADOSE/W能考虑毛细阻滞的机理, 所以大致上VADOSE/W的模拟结果比HELP更合理和准确。

**关键词:** 填埋场; 腾发封顶; 毛细阻滞; 工作机理; 工作性能

中图分类号: TU41 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)03-0454-06

作者简介: 张文杰(1978-), 男, 山东青岛人, 博士, 副教授, 从事环境土工方面的研究。E-mail: wjzhang2008@gmail.com.

## Performance and mechanism of capillary-barrier evapotranspiration cover of landfills

ZHANG Wen-jie, GENG Xiao

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

**Abstract:** Capillary barriers generally are considered for use in arid and semi-arid areas such that there have been few researches on capillary barrier covers in humid regions. A soil column was constructed in the open air to evaluate the performance of a capillary-barrier evapotranspiration cover. Percolation, surface runoff and water content variation under precipitation, evaporation and evapotranspiration were monitored for 18 months. A water balance model (HELP) and a soil-vegetation-atmosphere interaction model (VADOSE/W) were used to simulate the test. The total precipitation during the testing period is 2361 mm. There are 88.4 mm surface runoff and 67.4 mm percolation. Most precipitation is sent back to the atmosphere by the repeated water store-release process. The capillary barrier cover is effective because the hot season mostly coincides with the rainy season at the test site. A large amount of water is stored by the overlying clay layer during precipitation events due to the capillary break effect. Failure of the capillary break occurs only when the critical volumetric water content of the overlying finer textured clay layer is exceeded. The breakthrough is caused by consecutive intense rainfall events. Both HELP and VADOSE/W overestimate the surface runoff and percolation, and underestimate the evapotranspiration. The predictions given by VADOSE/W are more accurate than those given by HELP, because the behavior of unsaturated flows can be considered in VADOSE/W.

**Key words:** landfill; evapotranspiration cover; capillary barrier; mechanism; performance

## 0 引言

填埋法是目前中国城市生活垃圾处置的主要方法, 中国20世纪八九十年代开始修建的第一批垃圾填埋场大多数即将封顶, 研究经济、性能可靠的填埋场封顶系统具有重要现实意义。填埋场封顶系统的主要功能是减少降雨入渗, 压实黏土封顶受干湿循环和填

埋场不均匀沉降影响较大, 而加入土工膜后覆盖层稳定性降低<sup>[1]</sup>。毛细阻滞型腾发封顶是一种替代型封顶<sup>[2]</sup>, 主要由一层生长植被的较厚细粒土层和其下的一层粗

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178260, 51478256); 上海市教委科研创新项目(14YZ005)  
收稿日期: 2015-01-17

粒土层构成, 降雨时细粒土可存储大量水分, 而粗细土料间非饱和导水特性的差异可进一步减少水分向下入渗, 从而使上层细粒土可以存储更多的水分用于后期蒸发蒸腾, 该类型封顶具有长期性能稳定、造价低廉等优点, 但目前主要在国外降雨量少于 800 mm 的干旱-半干旱地区使用, 对其在湿润气候区的研究较少, 能否将其应用于湿润地区尚有争议。

美国环保署 (EPA), 能源局 (DOE) 和防卫局 (DOD) 都曾资助大量研究用于评价腾发封顶在美国不同地区的有效性<sup>[3]</sup>, 例如美国环保署的替代型封顶评价项目 (ACAP) 评估了美国 10 个不同地区 21 个试验封顶的性能<sup>[4]</sup>, 遗憾的是这个项目中仅有两个毛细阻滞型腾发封顶, 且均坐落于半干旱地区 (Polson 和 Omaha)。国内赵慧等<sup>[5]</sup>研究了植被和土层组合对封顶性能的影响, 邓林恒等<sup>[6]</sup>试验研究了强降雨条件下封顶土层的水量平衡, Ng 等<sup>[7]</sup>研究了植被蒸腾下土中基质吸力分布。现有研究很少对封顶土层各深度含水率的长期变化进行监测, 而含水率的变化更能准确揭示该类型封顶的工作机理。国外围绕毛细阻滞封顶进行了很多数值模拟<sup>[8-10]</sup>, 国内外学者使用水量平衡模型<sup>[11-12]</sup>、非饱和渗流模型<sup>[13]</sup>、土壤-植被-大气相互作用模型<sup>[14]</sup>等对封顶水分运移进行了数值模拟, 但目前尚无公认的水力评价模型, 且上述数值模拟一般缺乏试验验证。

本文在年均降雨量 1391 mm 的杭州市一露天场地构筑毛细阻滞型腾发封顶土柱模型, 量测 18 个月内降雨量、径流量、透水量和土体含水率变化, 研究该封顶的性能, 分析毛细阻滞作用机理, 对试验过程的水量平衡进行数值模拟, 探索毛细阻滞型腾发封顶数值模拟存在的问题。

## 1 模型试验与水量平衡测试结果

在杭州市一空旷场地构筑模型如图 1 所示。土柱直径 0.6 m, 粉质黏土 ( $I_p = 10.91$ ) 厚度 1.0 m, 干密度接近  $1.35 \text{ g/cm}^3$ , 砾砂厚度 0.2 m, 使用压力板仪测得粉质黏土的持水特性如表 1 所示。砾砂下铺设土工布和碎石作为导排层。土表和模型筒底部开口, 分别量测地表径流量和透水量, 在粉质黏土中 0.2 m (浅部)、0.5 m (中部)、0.8 m (深部) 和砾砂中 1.1 m 处 (图 1) 埋设探头测含水率, 在试验场地设小型气象站量测降雨量、气温、风速、太阳辐射等气象数据, 数据采集间隔 1 h。提前一年在土表种植生命力强的野生草本植物, 采用百根草、狗牙根和麦冬草混合植被方案。数据记录从 2012 年 3 月 9 日开始, 至 2013 年 8 月 31 日, 共 541 d。期间经过初夏的强降雨期、盛夏的高温和台风期、冬季的低温期, 得到了毛细阻滞

型腾发封顶在不同时期的响应, 较全面检验了试验封顶的性能。

表 1 粉质黏土持水特性

Table 1 Water storage capacity of silty clay

基质吸力 /kPa	1	20	50	100	200	400	600
体积含水率/%	50.1	38.5	33.9	31.3	28.9	26.7	24.1

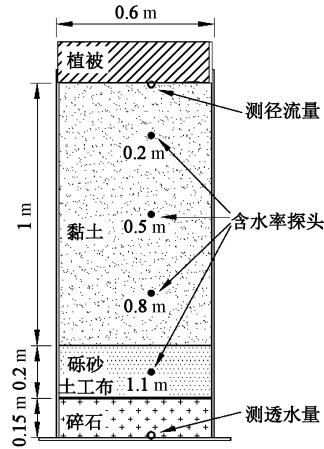


图 1 土柱模型示意图

Fig. 1 Sketch diagram of soil column

不同季节各深度处土体含水率变化如图 2 所示。每年冬季虽然降雨不多, 但土柱整体较湿, 底部透水, 0.8 m 深处含水率较高, 这说明低温和植被凋零导致腾发微弱, 且腾发作用深度较小; 春季随天气回暖, 植被复苏, 蒸发蒸腾作用开始显现, 土柱渐干; 6 月进入强降雨期, 各深度含水率均相应出现多次峰值, 0.8 m 处体积含水率最高达 49.9%, 土体接近饱和, 底部透水; 之后进入副热带高压控制的晴热少雨期, 腾发旺盛, 土柱具备了较大储水潜力, 台风带来的强降雨对应又一次含水率峰值, 0.8 m 处体积含水率最高达 47.3%, 但底部无透水; 秋季降雨少, 土柱较干, 一直到初冬植被凋零后含水率开始上升。底部砂砾体含水率一般在 2% 左右, 发生透水的冬季和夏季强降雨期含水率超过 3%。

比较不同深度含水率变化曲线上的峰值可知: 在植被生长期 0.5 m 深度处的含水率最低, 这与根系密集区相对应; 0.2 m 处含水率随每一场降雨变化明显, 而 0.5 m 和 0.8 m 处含水率仅在强降雨时有明显变化, 且深部含水率变化滞后于浅部, 这反映了水分自上至下的入渗过程。

试验期间土柱的水量平衡示于图 3。根据黏土中不同深度含水率监测数据平均值计算得到土柱储水量, 储水量计算至 2013 年 8 月 9 日 (0.2 m 深处探头损坏)。冬季植被腾发能力低, 因此储水量较高, 在 340~400 mm 之间, 夏季储水量变化较大, 最低为 171



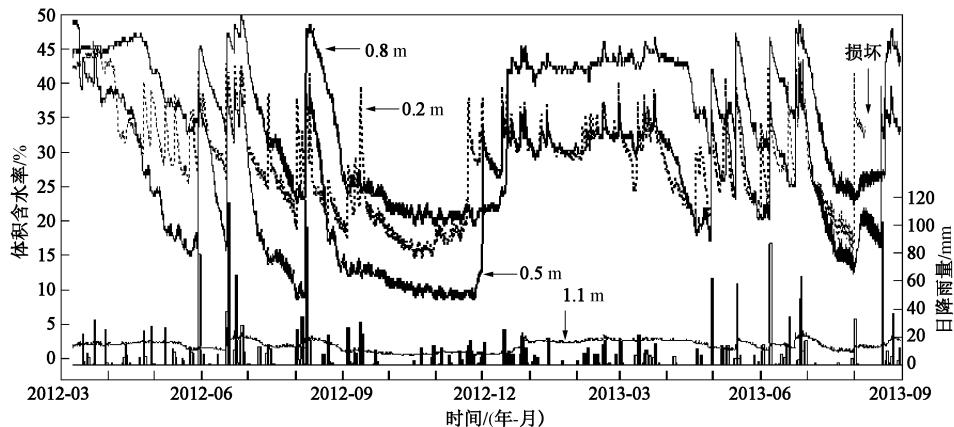


图2 实测土柱各深度土体含水率变化和日降雨量

Fig. 2 Volumetric water contents in soil column and daily precipitation

mm, 最高达 422 mm, 干燥的秋季储水量一般低于 200 mm。当夏季储水量高于 400 mm 或冬季储水量高于 380 mm 时对应土柱底部产生透水。试验期间仅强降雨时监测到地表径流, 2012 年 6 月 (强降雨期) 和 8 月 (台风期) 分别产生 53.1 mm 和 12.4 mm, 2013 年 6 月和 8 月分别产生 7.1 mm 和 15.9 mm。监测到的大部分透水发生在夏季持续强降雨期, 2012 和 2013 年 6 月各发生透水 30.4 mm 和 23.8 mm, 另外, 2012 年 12 月和 2013 年 2 月的冬季低温期产生透水 13.3 mm, 虽然台风期也有强降雨, 但并无透水产生。

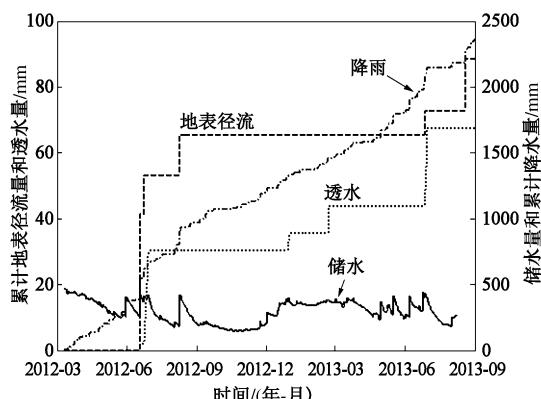


图3 土柱水量平衡图

Fig. 3 Water balance of soil column

541 d 内共降雨 2361 mm, 底部透水共 67.4 mm, 占总降雨量的 2.8%, 产生地表径流共 88.4 mm, 占总降雨量 3.7%, 绝大部分降雨 (93.5%) 在存储和腾发交替作用下最终返回大气, 说明腾发对该封顶性能起决定性作用。试验所在地区降雨高峰期与植被生长旺盛期基本重合, 夏、秋季蒸发蒸腾量巨大, 因此期间该封顶表现出良好性能, 而冬季大部分植被凋零腾发微弱, 因此虽降雨较少底部仍产生透水, 植被生长状况与封顶性能之间的这种对应关系再次表明腾发对该

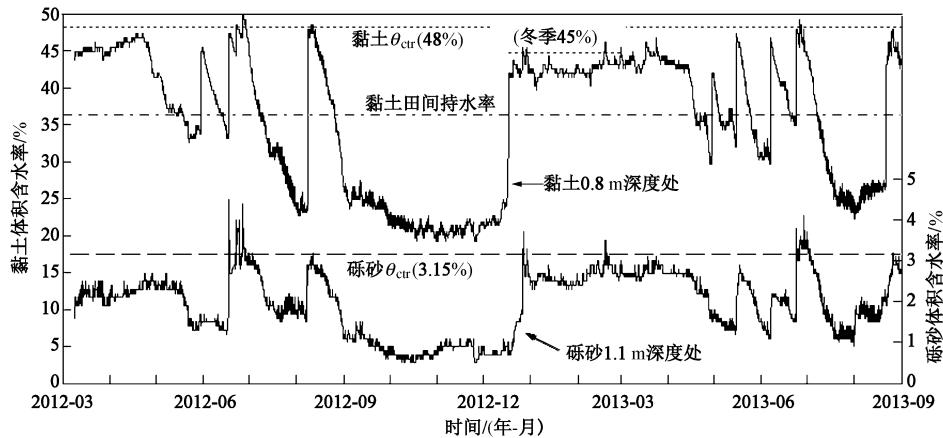
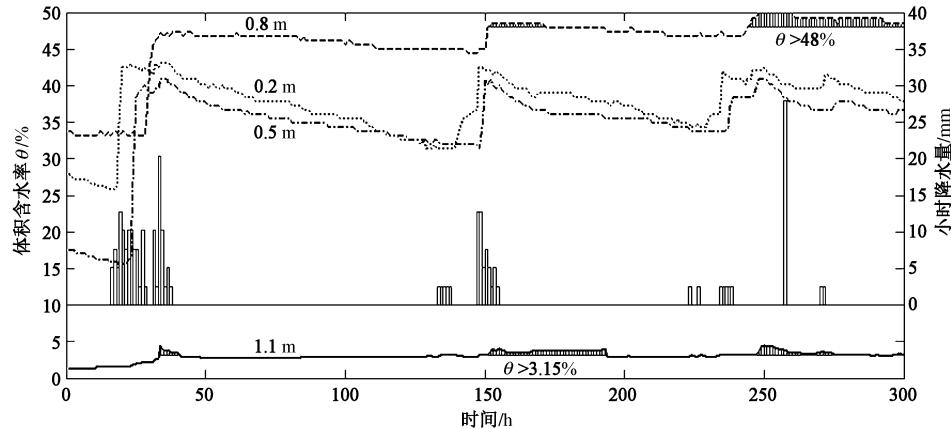
封顶性能的关键作用。

## 2 毛细阻滞作用

为进一步揭示封顶中的毛细阻滞作用, 将毛细阻滞界面以上黏土 (取 0.8 m 深度处) 和界面以下砾砂 (取 1.1 m 处) 的体积含水率示于图 4, 因为监测到的砾砂中含水率变化幅度较小, 为清楚显示, 砾砂含水率对应右侧纵坐标轴。定义砾砂的关键含水率  $\theta_{ctr}$ , 当砾砂含水率超过  $\theta_{ctr}$  时底部即透水, 根据实际监测到土柱底部透水时刻, 确定砾砂的  $\theta_{ctr}$  为 3.15%, 如图 4 中虚线所示, 可见透水仅发生在每年的 6 月及冬季低温期, 而在 8 月台风季节砾砂含水率并未超过  $\theta_{ctr}$ , 因此未发生透水。

同样, 可以确定毛细阻滞界面以上黏土的  $\theta_{ctr}$ , 依据实测的透水时刻, 确定在夏季  $\theta_{ctr}$  为 48%, 而冬季为 45%。冬季  $\theta_{ctr}$  稍低, 说明冬季长时间低温、潮湿的条件减弱了界面的毛细阻滞作用。黏土的田间持水率  $\theta_{fc}$  (土体在常重力下充分排水后所能保持的含水率, 取土 - 水特征曲线上 33 kPa 对应的体积含水率) 为 36%, 图 4 中处于  $\theta_{fc}$  与  $\theta_{ctr}$  之间的曲线即对应由于毛细阻滞作用而使上部黏土额外吸持的水分, 在 6 月强降雨期、8 月台风期和冬季低温期, 当土体含水率超过田间持水率时, 毛细阻滞界面发挥了关键作用, 多次避免了大量透水的产生。

为进一步明确毛细阻滞界面的击穿过程, 取 2012 年 6 月 17~28 日的数据进行分析, 这 12 d (288 h) 中降雨总量达 269 mm, 主要包括 3 次降雨 (图 5): 第 17~38 h 降雨 152 mm, 第 134~155 h 降雨 66 mm, 第 224~272 h 50 mm。图 5 同时给出了土体含水率及毛细界面附近土体的  $\theta_{ctr}$ , 可见第一次降雨导致含水率大幅上升, 但 0.8 m 深度处黏土并未达到  $\theta_{ctr}$  (48%),

图 4 毛细阻滞界面附近土体的体积含水率及临界体积含水率  $\theta_{ctr}$ Fig. 4 Measured volumetric water contents  $\theta$  in soils adjacent to capillary break interface and  $\theta_{ctr}$ 图 5 小时降雨量和不同深度处体积含水率  $\theta$ Fig. 5 Hourly rainfalls and volumetric water contents  $\theta$  at different depths

1.1 m 深度处砾砂含水率短时间内超过  $\theta_{ctr}$  (3.15 %), 同时仅监测到 1.5 mm 透水量, 说明该毛细阻滞封顶在单次强降雨 (22 h 内 152 mm) 作用下性能良好。第一次强降雨后, 腾发作用导致 0.2 和 0.5 m 深度处含水率稍有下降, 但 0.8 m 处含水率仍很高, 因此第二次强降雨发生时黏土和砾砂的含水率均超过  $\theta_{ctr}$ , 伴随产生透水 9.9 mm。第三次降雨之前毛细阻滞界面上部的黏土含水率非常高, 因此仅 2.5 mm/h 的前期降雨 (235~239 h) 就导致毛细阻滞界面被击穿, 后续第 258 h 的 27.9 mm 强降雨更导致黏土和砾砂含水率长时间超过  $\theta_{ctr}$ , 伴随产生透水 19 mm, 为监测期内最多的单次透水。由上述过程可知, 毛细阻滞界面被完全击穿是连续强降雨造成的, 而不是单次强降雨, 这也是 8 月台风季节无透水产生的原因; 另外, 毛细阻滞界面被击穿后产生透水是暂时的, 后随黏土和砾砂含水率下降, 毛细阻滞作用又会恢复, 这与底部透水以及土孔隙内水-汽-热耦合运移有关。

### 3 水量平衡数值模拟

基于测得的模型土料参数和气象数据, 模拟 541 d 内所试验腾发封顶模型的水量平衡, 探讨数值模拟存在的问题。模拟使用 HELP (填埋场水文评价) 模型和有限元软件 VADOSE/W, 其中 HELP 使用田间持水率和单位水力梯度描述持水及水分下渗, VADOSE/W 考虑土壤-植被-大气相互作用, 进行腾发覆盖层中非饱和水-蒸汽-热耦合分析。这两个软件的方程及算法文献中都有介绍, 此处不再赘述。按试验封顶和相关材料参数建立数值模型, 上边界为气象边界, 下边界为自由排水边界。

将监测到的气象数据、多年平均植被生长期、初始含水率及各土层的水力参数输入到 HELP 和 VADOSE/W 中, 分析时叶面积指数 LAI 取值如下: 11 月 24 日平均气温低于 10℃ 取叶面积指数 LAI=0, 3 月 5 日植被生长完成取 LAI=3, 完全凋零和完全长成时间均为 45 d, 期间的 LAI 取线性插值。开始时分析

使用试验室测得的饱和渗透系数  $k_s$ , 结果模拟的地表径流量明显偏大、透水量偏小, 这与 Roesler 等<sup>[4]</sup>的发现一致, 因为实际土柱中存在的根孔、虫洞和干缩裂缝等导致其渗透系数远大于土柱填筑完成时取样的测试值。因此, 采用与上述文献相同的方法调整渗透系数  $k_s$  值, 直至模拟出的地表径流量和透水量尽可能接近实测值。调整过程示于表 2, 随  $k_s$  增大, 地表径流减小, 透水量增加。调整后 HELP 和 VADOSE/W 的最优  $k_s$  值分别为  $8 \times 10^5 \text{ cm/s}$  和  $3.7 \times 10^5 \text{ cm/s}$ 。

表 2 调整黏土饱和渗透系数的过程

Table 2 Results of the adjustment process for the saturated hydraulic conductivity

数据来源	饱和渗透系数/(m·s <sup>-1</sup> )	地表径流/mm	地表径流次数/次	透水量/mm	透水次数/次
实测	$1.2 \times 10^{-7}$	88.4	4	67.4	4
HELP	$7 \times 10^{-7}$	148	5	155	6
HELP	$8 \times 10^{-7}$	113	5	183	8
HELP	$9 \times 10^{-7}$	76.0	5	216	8
VADOSE	$3.5 \times 10^{-7}$	101	4	91.6	3
VADOSE	$3.7 \times 10^{-7}$	90.9	4	97.6	3
VADOSE	$3.8 \times 10^{-7}$	86.3	4	100	3
VADOSE	$4.0 \times 10^{-7}$	78.8	4	106	3

模拟所得的结果与实测值一同列入图 6。HELP 和 VADOSE/W 模拟出的地表径流均多于实测, 虽然增大渗透系数可以减小模拟出的径流量, 但同时也会使模拟出的透水量增加以致明显超出实测值。HELP 高估了径流次数, 2012 年 5 月 30 日和 2013 年 6 月 7 日的两次径流实际并未发生(图 6(a)), 而 2013 年 6 月 27 日的地表径流量被低估。比较而言, VADOSE/W 模拟出的地表径流次数和径流量都更接近实际。

HELP 和 VADOSE/W 都能模拟出土柱储水量变化的大致趋势(图 6(b)), 但具体数值的差异较大。VADOSE/W 高估了夏季的储水量(如 2012 年的 6 至 9 月), 这与图 6(c) 中同期被低估的蒸发蒸腾量相对应。HELP 和 VADOSE/W 都低估了冬季的土柱储水量, 这与图 6(c) 中同期被高估的腾发量相对应。VADOSE/W 在夏季低估腾发量而在冬季高估腾发量, 源于其不准确的腾发量计算方法, 在该软件中土面蒸发和植被蒸腾是合起来考虑的, 不能准确反映出植被蒸腾作用在不同季节的巨大差异。尽管 LAI 已取 3, 但 HELP 和 VADOSE/W 计算出的累计腾发量仍分别比实际偏少 129 mm 和 159 mm。

HELP 和 VADOSE/W 模拟出的透水量分别偏高 116 mm 和 30 mm(图 6(d))。HELP 模拟到长期持续的透水, 因为该模型不能考虑土体的非饱和水力特性(如毛细阻滞作用)。VADOSE/W 没有预测出发生在冬季低温期的透水, 因为其高估了冬季的腾发量, 同时因为低估夏季的腾发量导致预测出的夏季透水量

偏高, 甚至台风季节也预测到透水(实际上无透水)。但相对来说 VADOSE/W 预测的透水量比 HELP 更加接近实测。如果 VADOSE/W 能采用更恰当的算法将蒸发、蒸腾分开考虑, 模拟结果将更加准确。

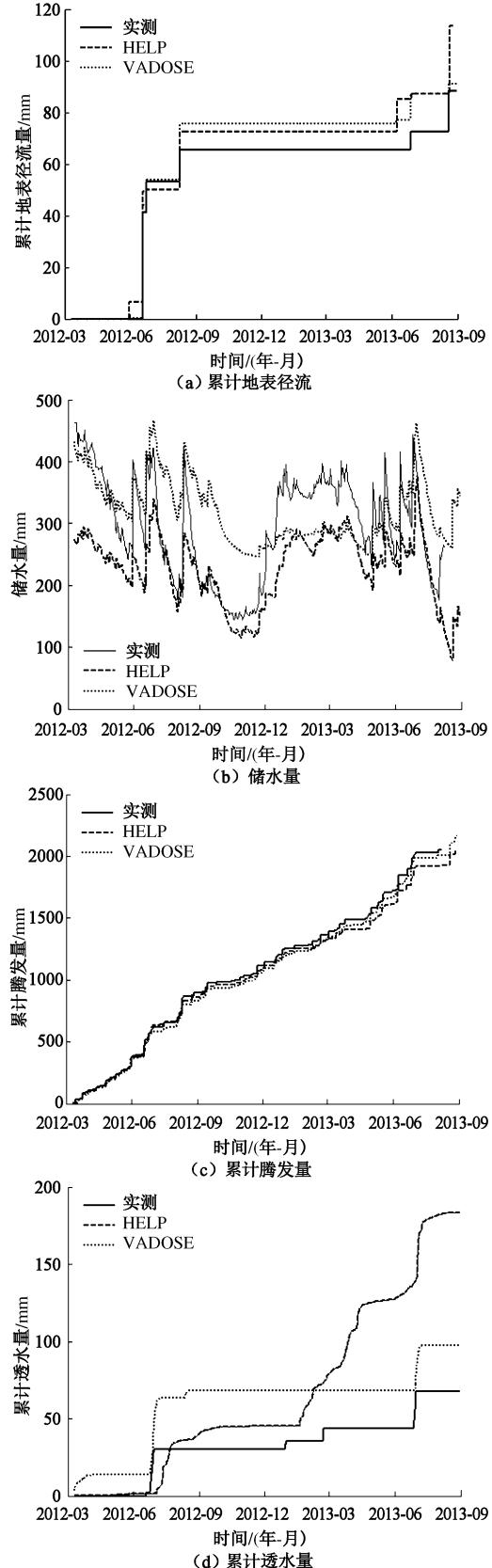


图 6 实际水量平衡数据和模拟值对比

Fig. 6 Comparison of actual water balance data with predictions

## 4 结 论

本文在杭州市露天环境下进行毛细阻滞型腾发封顶的模型试验, 研究了该封顶性能和毛细阻滞作用机理, 探讨了数值模拟中应该注意的问题, 得到主要结论如下:

(1) 蒸发蒸腾作用对腾发封顶性能起关键作用, 541 d 内共降雨 2361 mm, 底部透水占总降雨量的 2.8%, 产生地表径流占总降雨量 3.7%, 绝大部分降雨在存储和腾发交替作用下最终返回大气, 毛细阻滞型腾发封顶在该地区具有良好性能。

(2) 毛细阻滞界面在强降雨期和冬季低温期表现良好, 由于毛细阻滞作用, 使得上部黏土中存储了更多水分用于后期腾发, 从而减少了透水量, 毛细阻滞界面被击穿是连续强降雨作用的结果, 且击穿后毛细阻滞作用会逐渐恢复。

(3) 数值模拟与实测存在差异的原因来自于饱和渗透系数取值、能否考虑毛细阻滞作用, 以及能否准确计算蒸发、蒸腾量, 因为 VADOSE/W 能考虑水分的非饱和运移, 因此总体上对毛细阻滞型腾发封顶水量平衡的模拟结果比 HELP 更接近实测。

## 参考文献:

- [1] STAMATOPOULOS A C, KOTZIAS P C. Earth slide on Geomembrane[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(5): 408 - 411.
- [2] DWYER S F. Alternative landfill covers pass the test[J]. Civil Engineering, ASCE, 1998, 12(1): 50 - 52.
- [3] SCHNABEL W, LEE W, BARNES D L. A numerical simulation of evapotranspiration landfill cover performance at three cold-region locations[C]// Impacts of Global Climate Change, 2005: 1 - 8.
- [4] 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: University of Wisconsin, 2002.
- [5] 赵慧, 刘川顺, 王伟, 等. 垃圾填埋场腾发覆盖系统控制渗滤效果的研究[J]. 中国给水排水, 2008, 24(9): 86 - 89. (ZHAO Hui, LIU Chuan-shun, WANG Wei, et al. Study of leachate control effect of evapotranspiration landfill cover system[J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(9): 86 - 89. (in Chinese))
- [6] 邓林恒, 詹良通, 陈云敏, 等. 含非饱和导排层的毛细阻滞型覆盖层性能模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(1): 75 - 80. (DENG Lin-heng, ZHAN Liang-tong, CHEN Yun-min, et al. Model tests on capillary-barrier cover with unsaturated drainage layer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(1): 75 - 80. (in Chinese))
- [7] NG C W W, WOONA K X, LEUNGA A K, et al. Experimental investigation of induced suction distribution in a grasscovered soil[J]. Ecological Engineering, 2013, 52: 219 - 223.
- [8] SHACKELFORD C D, CHANG C K, CHIU T F. The capillary barrier effect in unsaturated flow through soil barriers[C]// Proc 1st Int Conf on Environmental Geotechnics. Canada, Balkema, Edmonton, 1994: 789 - 793.
- [9] DWYER S F. Water balance measurements and computer simulations of landfill covers[D]. New Mexico: University of New Mexico, 2003.
- [10] OGORZALEK A S, BOHNHOFF G L, SHACKELFORD C D, et al. Comparison of field data and water-balance predictions for a capillary barrier cover[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2008, 134(4): 470 - 486.
- [11] 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.
- [12] KAVAZANJIAN E J, BETH A G, TARIK H H. Unsaturated flow flux assessment for evapotranspiration cover compliance[C]// The 4th International Conference on Unsaturated Soils. ASCE, Arizona: 2006: 634 - 645.
- [13] 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, ZHU 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))
- [14] 邱清文, 张文杰, 程泽海. 湿润地区垃圾填埋场蒸发蒸腾覆盖层参数分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊 1): 283 - 289. (QIU Qing-wen, ZHANG Wen-jie, CHENG Ze-hai. Parametric analyses of evapotranspiration landfill covers in humid areas[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(S1): 283 - 289. (in Chinese))