

垃圾填埋腾发覆盖系统渗沥控制试验和数值模拟

刘川顺¹, 赵慧¹, 罗继武²

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 中国市政工程中南设计研究院, 武汉 430010)

摘要: 垃圾填埋场腾发覆盖系统(ET Landfill Cover)是由单一土层和植被构成的简易、低成本、无需管理的生态渗沥控制系统, 该系统利用覆盖土层储蓄降水、依靠植物的蒸腾和土壤蒸发消耗土壤水, 从而实现渗沥污染控制. 通过在武汉大学灌溉排水与水环境综合试验场开展裸土覆盖和 5 组腾发覆盖的渗沥控制对比试验, 并对这 6 个试验处理进行水量平衡分析, 结果发现其中 60 cm 厚度壤土层和灌木构成的腾发覆盖系统渗沥控制效果比较好, 但是试验过程也发现 60 cm 厚度土层储水能力不足以完全阻止雨量充沛季节形成渗沥液, 在旱季也不能向灌木提供充足水分, 而是需要灌溉来维持灌木正常生长. 因此采用 Hydrus 2D 软件对不同土层厚度腾发覆盖系统的渗沥控制效果进行数值模拟, 结果表明, 在武汉地区采用 120~140 cm 厚度壤土层和灌木构成的腾发覆盖系统是确保渗沥控制效果的经济合理方案.

关键词: 垃圾填埋; 渗沥控制; 腾发覆盖系统; 土壤水运动

中图分类号: X141 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)01-0289-08

Experiment and Numerical Simulation of Percolation Control Using Evapotranspirative Landfill Cover System

LIU Chuan-shun¹, ZHAO Hui¹, LUO Ji-wu²

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Central and Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: An Evapotranspirative Landfill Cover (ET Landfill Cover) is a simple and economical percolation control system that involves a monolithic soil layer with a vegetative cover. Percolation control in an ET cover system relies on the storage of moisture within the cover soils during precipitation events and subsequently returns it to the atmosphere by evapotranspiration. Percolation control experiments of a bare soil cover and 5 different ET covers were implemented in comprehensive experimental station of water environment of Wuhan University and the water balance calculation of each cover system was conducted, the results shown that the ET cover of 60 cm loamy soil layer with shrub was the most effective among the 6 experimental disposals. However, the experiments demonstrated 60 cm thick of soil layer was not enough to prevent percolation during rainy season and keep the shrub alive during drought season without irrigation. So the Hydrus 2D was selected to simulate the soil water movement in ET covers with different cover thicknesses, the simulations shown that the optimal ET cover in Wuhan area should be 120-140 cm loamy soil layer with shrub.

Key words: landfill; percolation control; evapotranspirative cover system; soil water movement

垃圾填埋场腾发覆盖(Evapotranspirative Landfill Cover, ET Landfill Cover)技术利用覆盖层土壤的储水能力和覆盖层植物的蒸腾耗水作用, 避免降水下渗, 实现垃圾填埋场渗沥污染控制.

最初人们在垃圾填埋场覆盖层上种草主要是为了防止雨水冲蚀覆盖层土壤和恢复生态, Nyhan 等^[1]、Sala 等^[2]、Anderson 等^[3]、Fayer 等^[4] 研究覆盖层植草条件下填埋场的水量平衡, 发现草皮的蒸腾耗水强度远大于裸土的蒸发强度. Hauser 等^[5]、Waugh 等^[6]、Warren 等^[7,8]、Ankeny 等^[9]、Anderson 等^[10] 先后加入这项研究, 探讨了影响植物蒸腾的因素和意义. 1997 年美国环保署(EPA) 主办了垃圾填埋场整治技术发展论坛, 资助大范围采用腾发覆盖的试点工作. 2001 年美国州际技术与规章协会(ITRC) 主办了腾发覆盖技术发展峰会, 会后制定了

采用腾发覆盖技术进行填埋场整治的实施导则. 在美国国家科学基金会、环保署、能源部、国防部及民间人士的支持下, 近年来腾发覆盖技术的研究与应用更加深入广泛. Waugh 等^[11]、Malusis 等^[12] 采用蒸渗仪监测腾发覆盖的耗水效果, Albright 等^[13]、Kelsey 等^[14] 研究腾发覆盖的水量平衡分析和水流通量计算, Dwyer 等^[15,16]、Hauser 等^[17] 通过试验探讨腾发覆盖的有效结构形式, Zornberg 等^[18]、McCartney 等^[19]、Wayllace 等^[20]、McGuire 等^[21] 采用一维饱和和非饱和土壤水运动理论对垃圾填埋场腾发覆盖的水运动进行数值模拟, 从而对腾发覆盖层进行结构优化.

相比传统的屏障型覆盖系统, 腾发覆盖系统是

收稿日期: 2008-01-25; 修订日期: 2008-03-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(50578127)

作者简介: 刘川顺(1963~), 男, 教授, 主要研究方向为环境岩土工程. E-mail: lcsu@163.com

一种生态的、节省的和易于实施的、无需管理的垃圾填埋场渗沥控制途径, 目前已经在美国 40 多个州得到广泛应用. 为了探索适合我国特点的腾发覆盖有效渗沥控制技术, 本研究在对比试验的基础上, 开展腾发覆盖系统水均衡分析和土壤水分运动数值模拟, 了解不同腾发覆盖结构组合的土壤水分动态变化过程并分析各自渗沥控制效果, 从而提出腾发覆盖系统的合理结构组合形式.

1 材料与方法

1.1 腾发覆盖系统水均衡试验

1.1.1 试验场地与试验处理的组合方案

试验在武汉大学灌溉排水与水环境综合实验场进行, 地理坐标为 114. 13°E, 30. 62°N, 当地年均降水量 1 269. 0 mm, 年均蒸发量 2 377. 1 mm, 年均风速 1. 8 m/s, 年均气温 16. 6 °C. 在 6 个混凝土测试坑内, 分别布置了 6 种不同覆盖层结构的试验处理, 依次为: ①60 cm 厚裸土覆盖层; ②60 cm 厚土层+ 杂草+ 灌木; ③40 cm 厚土层+ 藤蔓植物+ 灌木; ④60 cm 厚土层+ 藤蔓植物; ⑤60 cm 厚土层+ 灌木; ⑥60 cm 厚土层+ 杂草+ 灌木+ 保水剂. 每个试验处理测试坑的面积为 1. 3 m × 3. 6 m, 深度为 1. 3 m, 下层为 60 cm 厚的垃圾层, 从实际填埋场取垃圾按测定容重进行装填, 垃圾层上用当地壤土覆盖, 表土 0~ 20 cm 为松散的土层, 20~ 60 cm 深度的土层进行了分层压实.

试验始于 2006 年 3 月^[22], 本研究计算分析资料取自 2007 年的试验结果, 2007 年 3 月底开始补种上年度未成活的植物和更换部分损坏的观测仪器, 5 月 16 日~ 12 月 10 日为正式试验观测期.

1.1.2 水均衡要素的观测

在覆盖土层的不同深度(20 cm、40 cm、60 cm)埋设了 TDR 波导管, 用于测定体积含水率, 采用 θ -probe 测定表土含水率. 试验处理 1 和试验处理 2 地表以下 15、30、45、55、65 和 75 cm 处理设张力计, 测定相应剖面位置土壤水势. 在覆盖层和垃圾层的交界面设置了 3 组漏斗状渗沥水收集装置, 漏斗控制面积为 30 cm × 30 cm, 表面设置滤网和反滤层, 降雨透过覆盖层形成的渗漏水通过反滤层及滤网进入漏斗, 收集并测量渗漏水. 试验测坑中还埋设了小型蒸渗仪用来测定覆盖层的表土蒸发量.

在植物不同的生育期测定植物密度, 叶面积指数及植物冠层高度等植物生长状况要素. 试验中所用相关气象资料由试验场的自动气象站收集. 水面

蒸发由 20 cm 直径蒸发皿测定. 腾发覆盖层地表低于测坑混凝土围壁, 降雨不产生径流, 完全渗入覆盖土层.

为了研究植被下方的表土蒸发与水面蒸发的相互关系, 试验期间开展了表土蒸发和水面蒸发同步观测, 即在 3 个典型试验测坑中(试验处理 1、试验处理 3 和试验处理 4)埋设小型蒸渗仪, 小型蒸渗仪内土样的土质和容重与测坑相同, 但是无植物生长, 蒸渗仪用周围植物将其表面覆盖, 尽量做到植物覆盖情况与该测坑相同. 水面蒸发在测坑附近的开阔平地上用 2 个不同半径、同心嵌套的蒸发皿测定. 用电子天平逐日测定小型蒸渗仪和蒸发皿的重量变化, 并采用仪器 θ -probe 测定同期的表土含水率.

1.2 土壤水分特征参数的测定

1.2.1 土壤水分特征曲线 $\theta-h$ 的测定

土壤水分特征曲线利用水资源与水电工程科学国家重点实验室自行研制的土壤水分特征曲线测定装置进行测定, 即采用张力计测定土壤水吸力, 用称重法测定相应的含水率.

试验结束后, 将实测土样含水率和吸力值按照式(1)所示的 van Genuchten 模型进行拟合, 得到土壤水分特征曲线见图 1, 模型的 5 个参数 θ_s 、 θ_r 、 α 、 n 、 m 的值见表 1.

van Genuchten 模型:

$$S_e = [1 + (\alpha h)^n]^{-m} \quad (1)$$

式中, $S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ 称为饱和度; θ_s 、 θ_r 分别代表土壤的饱和含水率和剩余含水率 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); h 为土壤基质势的绝对值; α 、 n 、 m 是决定土壤水分特征曲线 $\theta-h$ 的形状参数, $m = 1 - 1/n$.

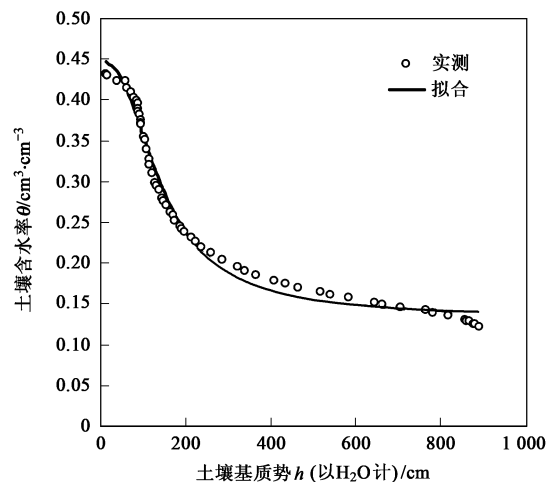


图1 土壤水分特征曲线

Fig. 1. Soil moisture characteristic curve

表 1 覆盖层土壤特征参数

Table 1 Characteristic parameters of the soil covers

参数	$\theta / \text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	$\theta / \text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	α / cm^{-1}	n	m
数值	0.07	0.44	0.0087	1.987	0.497

1.2.2 现场测定饱和水力传导度 K_s

饱和水力传导度利用双套环试验测定, 将测定的入渗强度 i 和相应的时间 t 绘制成关系曲线如图 2 所示. 其中的水平段对应的稳定入渗率即为饱和水力传导度 $K_s = 0.04833 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$.

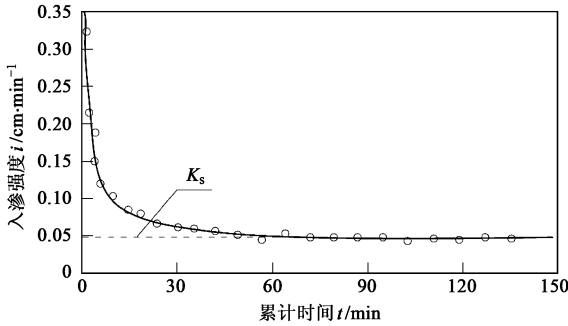


图 2 入渗强度过程线

Fig. 2 Process curve of the infiltration velocity

1.2.3 非饱和土壤水扩散度 $D(\theta)$ 的测定

非饱和土壤扩散度采用水平土柱吸渗法测定, 土柱按试验场土壤容重装填, 进水端用马利奥特瓶自动补水. 试验结束后对土壤扩散度 ($\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$) 与含水率 θ 进行回归分析, 得到扩散度的表达式 (2):

$$D(\theta) = 0.00725e^{16.274\theta} \quad (2)$$

1.2.4 土壤容水度 $C(h)$ 的计算

对土壤水分特征曲线求导, 得容水度 (m^{-1}) 的表达式如式 (3):

$$C(h) = \frac{\partial \theta}{\partial h} = \frac{(\theta_s - \theta_r) m n \alpha | \partial h |^{n-1}}{[1 + | \partial h |^n]^{m+1}} \quad (3)$$

式中各参数的物理意义同式 (1).

1.2.5 非饱和水力传导度 $K(\theta)$ 的计算

根据已经测定的土壤水分特征曲线, 非饱和水力传导度 (m^{-1}) 可利用经验公式 (4) 计算:

$$K(\theta) = K_s \left[\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right]^{1/2} \left\{ 1 - \left[1 - \left[\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right]^m \right]^m \right\}^2 \quad (4)$$

综上, 试验中覆盖层土壤物理性质和水动力参数如表 1 所示.

2 腾发覆盖系统的水均衡动态及渗沥控制效果

2.1 覆盖层水均衡要素动态规律

将腾发覆盖层作为一个系统, 该系统主要水量平衡要素包括降雨入渗量 P , 灌水量 I , 地表蒸发和植物蒸腾耗水量 ET , 下部渗漏量 L , 覆盖土层储水变化量 ΔW . 其中降雨入渗量 P (试验条件下无径流) 由雨量计观测得到, 灌水量是指高温干旱期为维持植物生长而人工浇灌的水量, 渗漏量 L 由漏斗收集量测, 覆盖土层储水变化量根据逐日土壤含水率剖面计算得到. 试验条件下, 覆盖层水量平衡关系为:

$$L = P + I - ET - \Delta W \quad (5)$$

图 3 反映了试验观测期间各试验处理的水均衡要素动态过程, 可以看出, 覆盖层土壤储水量的变化与降雨量和覆盖层蒸发、蒸腾量有关, 降雨过后, 如果覆盖层没有足够的储水能力或未能通过蒸腾发及时地消耗掉储存在土层中的降雨, 覆盖层中的水分就会下渗到垃圾层形成渗沥液.

2.2 腾发覆盖系统渗沥控制效果

2007 年夏季武汉地区降雨偏多, 无植物覆盖的试验处理 1 在降雨较密集的 5~6 月份几次大降雨期间均有水分下渗; 而有植物覆盖的试验处理中, 降雨前土壤水分蒸腾消耗较大, 降雨造成的水分下渗量明显较小. 进入 8 月份之后, 降雨量明显减少, 这时有植物覆盖各试验处理的蒸腾强度很大, 土壤覆盖层内储存的有限水分被消耗, 只能通过人工灌水来维持植被的正常生长. 另外, 在植物复苏前期, 草本植物发育较快, 试验处理 4 的土壤水分消耗速度明显大于其他试验处理, 当灌木枝叶繁茂时, 其消耗土壤水的速度又明显大于草本植物. 试验还表明, 60 cm 土壤覆盖层对水分的调蓄能力比 40 cm 土壤覆盖层要明显的大, 同样的植被结构, 40 cm 土壤覆盖层 (试验处理 3) 的渗漏量也明显的比 60 cm 土壤覆盖层 (试验处理 2 和 6) 的大, 但它们对土壤覆盖层储存水量的消减速度基本相当. 试验处理 6 与试验处理 2 的不同之处是在覆盖层土壤中使用了保水剂, 试验结果表明两者渗沥控制效果并没有明显的差别, 因此保水剂作用不大.

表 2 是试验期间各试验处理水均衡要素累计量的对比. 可以看出, 在 7 个月的观测期内, 无植物覆盖试验处理的土壤蒸发量为 470.75 mm, 下渗量 244.35 mm, 渗漏水量是降雨量的 35.09%; 5 种有植被的覆盖系统的平均腾发量为 742.35 mm, 是裸土覆盖蒸发量的 1.58 倍, 平均下渗量 76.07 mm, 为裸土覆盖的 31.13%, 平均下渗量与降水量 (含灌溉) 之比为 11.32%, 可见腾发覆盖系统能明显减小降

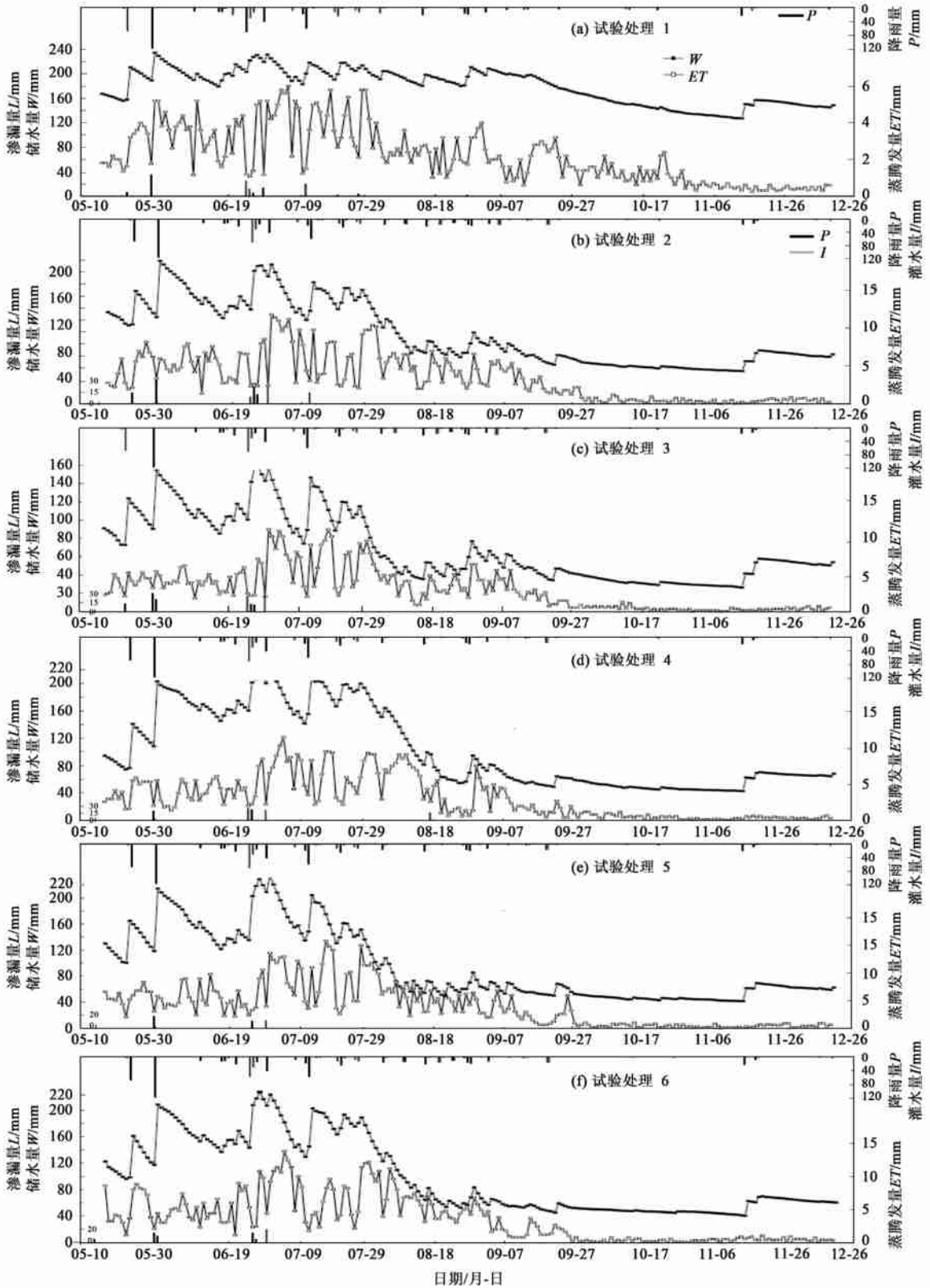


图 3 各试验处理的水均衡动态

Fig. 3 Dynamic water balance of each ET cover experimental disposal

水渗入垃圾层. 在 5 种腾发覆盖试验处理中, 试验处 理 5, 即覆盖土层厚 60 cm+ 灌木组合的渗沥控制效

果最好, 蒸腾发耗散的水分高达 854.58 mm, 是裸土覆盖蒸发量的 1.82 倍, 渗漏量 41.82 mm, 仅为裸土覆盖的 17.11%, 渗漏量与降水量(含灌溉)之比为 5.05%。

表 2 各试验处理覆盖土层水量平衡关系(2007-05-16~2007-12-10)

Table 2 Water balance performance of each experimental disposal(2007-05-16~2007-12-10)

试验处理	降雨量 /mm	灌水量 /mm	腾发量 /mm	储水变化量 /mm	深层渗漏量 /mm	渗漏量÷(降雨量+ 灌水量)/%
1	696.3	0	470.75	-18.8	244.35	35.09
2	696.3	73.7	753.76	-64.6	80.84	10.50
3	696.3	74.1	707.12	-37.2	99.48	12.91
4	696.3	16.5	644.24	-26.2	94.76	13.29
5	696.3	132.5	854.58	-67.6	41.82	5.05
6	696.3	57.2	752.06	-62.0	63.44	8.42

3 数值模拟

数值模拟一方面是为了与试验结果相互验证, 另一方面是弥补试验处理数目的不足, 通过数值模拟了解任意结构腾发覆盖系统的渗沥控制效果. 数值模拟采用美国国家盐改中心研制的 Hydrus 2D 软件, 可用于模拟植物生长条件下饱和-非饱和和多孔介质水分运动。

3.1 数学模型的建立

3.1.1 土壤水分运动方程

腾发覆盖中的植物为密植均布, 土质均匀, 故采用式(6)所示的一维饱和-非饱和土壤水分运动的控制方程近似描述其土壤水分运动:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(h)}{\partial z} - S(h, z, t) \quad (6)$$

式中, h 为土壤基质势, $C(h)$ 为容水度, $K(h)$ 为非饱和水力传导度, $S(h, z, t)$ 为根系吸水项。

3.1.2 作物根系吸水模式

本文根系吸水率采用 Feddes 模型计算, 即:

$$S(h, z, t) = \alpha(h) S_p \quad (7)$$

式中, $\alpha(h)$ 是水分胁迫对根系吸水的影响因子; S_p 是根系潜在吸水强度。

Feddes 模型原理见图 4: 其中 h_1 为土体达到饱和时的基质势, h_2 为土体达到最大毛管持水率时的基质势, h_3 为当土壤中的毛管水发生断裂时的基质势, h_4 为作物产生永久凋萎时的基质势. 这 4 个界限基质势类比相近土质和植物从 Hydrus 2D 软件中的吸水参数数据库选取。

根系潜在吸水强度利用一维的非均匀分配根系对其潜在蒸腾量进行分配:

$$S_p = \beta(z) S_t T_p \quad (8)$$

式中, S_t 为与蒸腾过程有关的根系活动区土表宽

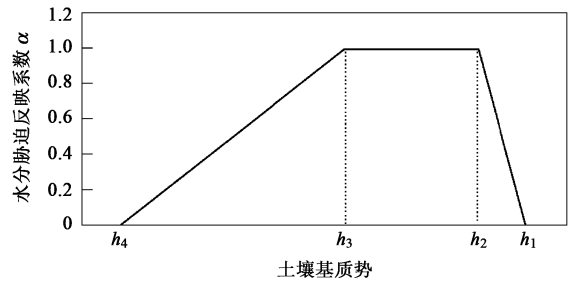


图 4 Feddes 模型水分胁迫反映系数

Fig. 4 Water stress response coefficient of Feddes model

度; T_p 为植物的潜在蒸腾强度; $\beta(z)$ 为描述根系吸水项空间分布的形函数:

$$\beta(z) = \frac{1}{\lambda} \left[1 - \frac{z}{z_{\max}} \right] e^{-\frac{p_z}{z_{\max}} |z^* - z|} \quad (9)$$

式中, z 为根区任意点至树干基点的垂直距离; z_{\max} 为根区最大深度, λp_z 为植物根系密度分布特征参数, 由根系调查资料拟合确定; z^* 为最大根系密度点的竖直坐标。

3.1.3 定解条件

计算模型取垂直方向的矩形区域, 上边界为通量边界, 根据蒸发量和降雨量确定. 覆盖土层的下边界为垃圾层, 按渗漏面边界处理; 四周按不透水边界处理, 边界模型如图 5。

初始条件由含水率 θ 的初始分布实测值给出, 即:

$$\theta(z, t) = \theta_0(z, 0) \quad (10)$$

3.1.4 蒸发、蒸腾量的确定

将覆盖层作为整体, 利用水量平衡关系式(5)计算出覆盖层的实际腾发量 ET , 利用实测的水面蒸发与各试验处理的表土蒸发的回归关系式(11)求得各试验处理的土面蒸发量 E , 由腾发量 ET 减去土面蒸发量 E 得到植物的蒸腾量 T , 然后根据根系吸水的土壤水分胁迫系数 $\alpha(\theta)$ 换算得到潜在蒸腾量 T_p :

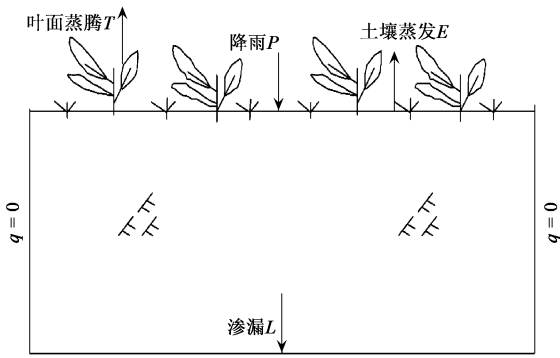


图 5 数值模拟边界条件

Fig. 5 Boundary conditions for numerical simulation

$$E = (a\theta + b)E_0 \quad (11)$$

$$T = ET - E \quad (12)$$

$$T_p = T/\alpha(\theta) \quad (13)$$

式中, E_0 水面蒸发强度(mm d^{-1}); a 、 b 为不同试验处理的拟合参数.

3.2 数值模拟结果与分析

3.2.1 数值模拟结果与试验观测结果的相互验证

利用 Hydrus 2D 对试验观测期间(208 d) 4 个典型腾发覆盖系统的土壤水分运动进行了数值模拟. 图 6 为土壤平均含水率模拟值与实测值的比较, 可以看出, 两者基本吻合.

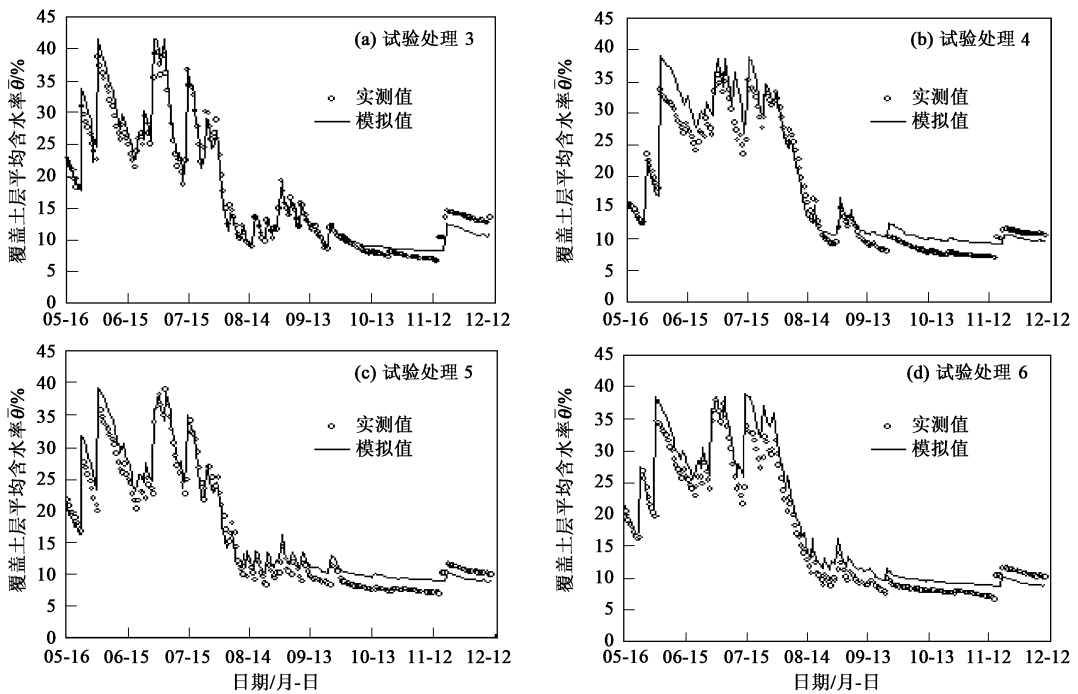


图 6 腾发覆盖模拟土层平均含水率的模拟结果与实测结果比较

Fig. 6 Comparison between simulative and experimental soil water content

3.2.2 不同厚度腾发覆盖系统渗沥水控制效果分析

腾发覆盖系统的渗沥控制效果取决于覆盖土层的储水能力和植物的蒸腾耗水能力. 持续大量降雨情况下, 如果覆盖土层没有足够的厚度储存降雨, 就会产生渗漏. 此外, 试验情况表明土层储水能力不足, 高温干旱季节植物需要灌溉, 增加管理成本, 并且灌水时机、灌水量控制不好, 还可能致人为渗沥污染. 另一方面, 覆盖土层厚度过大必然会增加腾发覆盖的建设成本. 因此有必要根据当地气候和植物来优化覆盖土层厚度.

采用 Hydrus 2D 软件和前述试验观测期的气象

资料, 模拟计算灌木生长条件下 6 种土层厚度腾发覆盖系统的渗沥水控制效果. 由数值模拟结果得到不同厚度腾发覆盖系统的储水能力和累计渗漏量(见表 3 和图 7). 可以看出, 覆盖土层的储水能力随着厚度的增大而增大, 渗漏量随着覆盖厚度的增加而减小: 覆盖土层厚 120 cm 时, 渗漏量 10.3 mm,

表 3 不同土层厚度腾发覆盖系统累计渗漏量

Table 3 Accumulative percolations of ET cover with different soil thicknesses

覆盖土层厚度/cm	60	80	100	120	140	150
渗漏量/mm	77.5	48.2	26.5	10.3	1.9	0

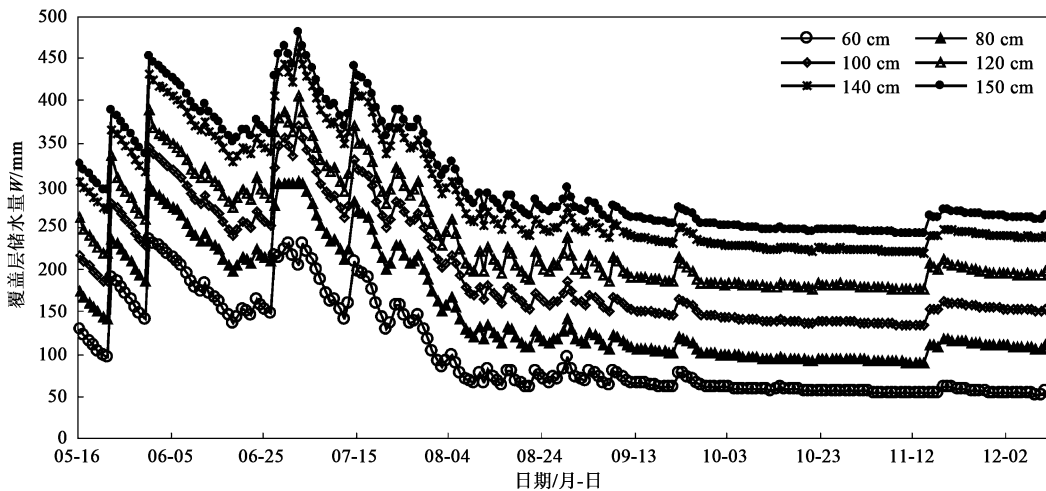


图7 不同土层厚度腾发覆盖层的动态储水量

Fig. 7 Dynamical water storages of ET covers with different soil thicknesses

占降雨量的 1.5%; 覆盖土层厚 140 cm 时, 渗漏量 1.9 mm, 仅占降雨量的 0.3%; 当覆盖土层厚 150 cm 时, 完全不产生渗漏. 综合考虑数值模拟的渗沥控制效果、可能的极端气候条件和建设成本, 在武汉地区覆盖土层取 120~140 cm 厚度比较合适.

4 结论

(1) 通过对 6 个试验处理 7 个月的试验观测和水均衡分析, 了解到 5 组腾发覆盖系统的平均腾发量为 742.35 mm, 是裸土覆盖蒸发量的 1.58 倍, 平均下渗量 76.07 mm, 为裸土覆盖的 31.13%, 平均下渗量与降水量(含灌溉)之比为 11.32%, 可见腾发覆盖系统能明显减小降水渗入垃圾层. 其中试验处理 5 即覆盖土层厚 60 cm+ 灌木组合的渗沥控制效果最好, 腾发耗散的水分高达 854.58 mm, 是裸土覆盖蒸发量的 1.82 倍, 渗漏量 41.82 mm, 仅为裸土覆盖的 17.11%, 渗漏量与降水量(含灌溉)之比为 5.05%, 这意味着 95% 的降水量由于腾发覆盖系统的蒸腾、蒸发作用被扩散到大气.

(2) 为了储蓄雨季的连续降雨、避免降雨下渗, 为了旱季维持植物生存, 都要求覆盖土层要有足够的厚度, 但是过大的覆盖土层厚度又会导致高成本. 本研究通过对不同土层厚度腾发覆盖系统的土壤水分运动数值模拟和水均衡分析, 结果表明, 在武汉地区采用厚度 120~140 cm 的壤土覆盖层、种植灌木是合理有效的腾发覆盖系统组合方案.

参考文献:

[1] Nyhan J W, Hakanson T E, Drennon B J. A water balance study of two

landfill cover designs for semiarid regions [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1990, **19**(3): 281-288.

[2] Sala O E, Lauenroth W K, Parton W J. Long-term soil water dynamics in the short grass steppe [J]. *Ecology*, 1992, **73**(4): 1175-1181.

[3] Anderson J E, Nowak R S, Ratzlaff T D, et al. Managing soil moisture on waste burial sites in arid regions [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1992, **22**(1): 62-69.

[4] Fayer M J, Rockhold M L, Campbell M D. Hydrologic Modeling of Protective Barriers: Comparison of Field Data and Simulation Results [J]. *Soil Sci Soc Amer*, 1992, **56**(3): 690-700.

[5] Hauser V L, Shaw M A. Climate effects on water movement through soil vegetative landfill covers [A]. In: *Proceedings of Seventeenth International Madison Waste Conference* [C]. Department of Engineering, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin, 1994. 119-128.

[6] Waugh W J, Thiede M E, Bates D J, et al. Plant cover and water balance in gravel admixtures at an arid waste burial site [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, **23**(4): 676-685.

[7] Warren R W, Hakanson T E, Bostik K V. Choosing the most effective hazardous waste landfill cover [J]. *Remediation*, 1996, **7**(1): 23-41.

[8] Warren R W, Hakanson T E, Bostik K V. The hydrologic evaluation of four covers designs for hazardous waste landfills [A]. In: Reynolds T D, Morris R C. *Landfill capping in the semi-arid west: Problems, perspectives, and solutions* [C]. Idaho: Environmental Science and Research Foundation, 1997. 181-197.

[9] Ankeny M D, Coons L M, Majumdar N, et al. Performance and cost considerations for landfill caps in semiarid climates [A]. In: Reynolds T D, Morris R C. *Landfill capping in the semi-arid west: Problems, perspectives, and solutions* [C]. Idaho: Environmental Science and Research Foundation, 1997. 243-261.

[10] Anderson J E. Soil-plant covers systems for final closure of solid waste landfills in arid regions [A]. In: Reynolds T D, Morris R C. *Landfill capping in the semi-arid west: Problems, perspectives, and solutions* [C]. Idaho: Environmental Science and Research Foundation, 1997.

- 27-38.
- [11] Waugh W J, Mushovic P S, Kleinrath A W. Lysimeter tests for an ET covers design at Monticello, Utah [A]. In: Miller G A. Unsaturated Soils 2006[C]. American Society of Civil Engineers, 2006. 801-812.
- [12] Malusis M A, Benson G H. Lysimeters versus water content sensor for performance monitoring of alternative earthen final covers [A]. In: Miller G A (ed). Unsaturated Soils 2006[C]. American Society of Civil Engineers, 2006. 741-752.
- [13] 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** (6): 2317-2332.
- [14] Kelsey J A, Kay J T, Ankeny, *et al.* Darcian flux estimations in evapotranspiration landfill covers [A]. In: Miller G A (ed). Unsaturated Soils 2006[C]. American Society of Civil Engineers, 2006. 730-740.
- [15] Dwyer S F. Alternative landfill covers pass the test [J]. Civil Engineering, 1998, **68**(9): 50-52.
- [16] Dwyer S F. Find a better cover [J]. Civil Engineering, 2001, **71**(1): 58-63.
- [17] Hauser V L, Weand B L, Gill M D. Natural cover for landfills and buried waste [J]. Am Society of Civil Engineers Journal of Environmental Engineering, 2001, **127**(9): 768-775.
- [18] 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**(6): 427-438.
- [19] McCartney J S, Zornberg J G. Decision analysis for design of evapotranspirative landfill covers [A]. In: Miller G A (ed). Unsaturated Soils 2006[C]. American Society of Civil Engineers, 2006. 694-705.
- [20] Wayllace A, Likos W J. Numerical modeling of artificial soil as an evapotranspirative cover [A]. In: Miller G A (ed). Unsaturated Soils 2006[C]. American Society of Civil Engineers, 2006. 656-657.
- [21] McGuire P, Guntow J, Doyle E. Evapotranspiration landfill cover design: characterization and soil environment [A]. In: Miller G A (ed). Unsaturated Soils 2006 [C]. American Society of Civil Engineers, 2006. 706-717.
- [22] 王康, 刘川顺, 王富庆, 等. 腾发覆盖垃圾填埋场覆盖层机理试验研究及结构分析[J]. 环境科学, 2007, **28**(10): 2307-2314.