

腾发覆盖系统的改进及其水文评估

刘川顺¹, 蔡俊雄², 王静斋¹, 容誉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. 湖北省环境科学研究院, 武汉 430072)

摘要: 腾发覆盖系统作为屏障型覆盖系统的替代形式自2003年以来在许多垃圾填埋场整治工程中得到应用, 它是一种经济、实用的生态型覆盖系统, 但因其壤土层持水力和草本植被蒸腾力的限制, 腾发覆盖只适用于干旱和半干旱地区. 为了提高渗沥控制效果, 对腾发覆盖的结构体系进行了改进: ①在单一壤土层底部设置黏土衬垫以提高持水力; ②采用草本-灌木混合植被取代单纯的草本植被以提高蒸腾力. 采用HELP软件对屏障型覆盖系统、腾发覆盖系统和本研究提出的改进型腾发覆盖系统进行水文评估, 结果表明改进型腾发覆盖系统的渗沥控制性能明显优于前二者.

关键词: 垃圾填埋场; 改进型腾发覆盖; 渗沥控制; 水文评估

中图分类号: X141 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)07-1695-06

Innovative ET Cover System and Its Hydrologic Evaluation

LIU Chuan-shun¹, CAI Jun-xiong², WANG Jing-zhai¹, RONG Yu²

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University; Wuhan 430072, China; 2. Hubei Environment Science Academy, Wuhan 430072, China)

Abstract: The evapotranspiration (ET) cover system, as an alternative cover system of landfill, has been used in many remediation projects since 2003. It is an inexpensive, practical, and easily maintained biological system, but is mainly favorable in arid and semiarid sites due to limited water-holding capacity of the single loam layer and limited transpiration of grass. To improve the effectiveness of percolation control, an innovative scheme of ET was suggested in this paper: ① a clay liner was added under the single loam layer to increase the water-holding capacity; ② combined vegetation consisting of shrub and grass was used to replace the grass cover. Hydrologic evaluation of conventional cover, ET cover and the innovative ET cover under the same condition was performed using the computer program HELP, which showed the performance of the innovative ET cover is obviously superior to that of ET cover and conventional cover.

Key words: landfill; innovative evapotranspiration (ET) cover; percolation control; hydrologic evaluation

我国建设部颁布的《生活垃圾卫生填埋场封场技术规程 CJJ12-2007》所规定的覆盖系统与1976年美国“资源保护和恢复法”(RCRA)子标题C规定的覆盖系统基本相同,其结构层次自上而下依次为:保护层、排水层、水力屏障层、气体收集层和基础层.这种复杂结构层次的屏障型覆盖系统不仅造价昂贵,对设计、施工要求严格,而且各层次之间相互制约,容易发生渗漏、滑坡、侵蚀等失事现象. Gross等^[1]对美国20世纪90年代建造的数十座垃圾填埋场覆盖系统的失事案例进行研究分析,认为:①反复干湿循环可使压实黏土屏障层的渗透系数在封场后3~6 a期间增大20~100倍,由土工合成黏土或土工膜做成的屏障层,也可能因垃圾降解和固结产生不均匀沉陷而断裂失效;②屏障型覆盖系统的结构层界面是抗剪强度的薄弱环节,经过几年的运行,排水滤层容易被来自上部的细小颗粒堵塞,从而在降雨期间形成渗流力,进一步消减稳定性,几乎所有研究案例的覆盖系统滑坡事故都是降雨后沿结构层界面发生的;③在旱季,屏障层阻隔土壤水分的竖向

交换,因此覆盖土壤比天然表土层更容易干枯,不利植物生长;在雨季,屏障层的存在使得覆盖土壤更容易被饱和.屏障层这两方面的影响导致表层覆盖土比天然表土层更容易遭受降雨径流的冲蚀.

20世纪末期美国开发出屏障型覆盖的替代形式——腾发覆盖(ET Cover).腾发覆盖系统无需水力屏障层,它依靠2个自然过程控制渗沥污染:利用覆盖土层滞蓄降雨入渗水分,利用植物的蒸腾和土壤的蒸发(合称腾发)消耗滞蓄在覆盖土层中的水分.腾发覆盖采用单一土层调控降雨入渗水分和支撑植物生长,从而使得结构简化,施工简易,单位工程造价仅为同等条件下屏障型覆盖的1/3~1/2^[2].美国的腾发覆盖以牧草为主要植被,其优点是有较强的耐旱能力,缺点是蒸腾耗水能力不够强.为了支撑植物生长并兼顾滞蓄水分,腾发覆盖一般采用单

收稿日期:2009-08-29;修订日期:2009-11-16

基金项目:国家自然科学基金项目(50578127);湖北省环保科技项目(2110307)

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

一壤土层,滞蓄水分能力一般,因此美国的腾发覆盖技术主要应用于干旱、半干旱地区^[3]。

本研究旨在通过改进腾发覆盖的结构体系增强渗沥控制功能,并采用数值模拟方法评估其渗沥控制效果。

1 腾发覆盖的改进方案

1.1 植被类型

为了探求合适的腾发覆盖植被,本课题组在武汉大学农田水利与水环境综合试验场开展了3种植被方案的腾发覆盖渗沥控制试验和植物生长适应性试验,这3种植被方案分别为:①杂草+灌木;②野生藤蔓植物;③杂草+灌木+藤蔓。试验情况表明,藤蔓植物和杂草复苏较早(3月上旬),在春季和初夏能很好发挥蒸腾作用,但是藤蔓植物和杂草的抗旱能力差、生长期短,在8月中旬就开始凋萎。灌木一般在3月中下旬才逐渐开始复苏,11月底叶子开始凋落。在藤本与草本或灌木混种的试验小区,由于藤蔓发育早、生长茂盛,容易抑制草本和灌木的生长。根据2007-05-16~2007-12-10的渗沥控制试验观测结果,在覆盖土层相同的条件下,杂草和灌木混合植被的渗沥控制效果最好^[4,5]。因此建议在腾发覆盖系统中采用草本和灌木混合的植被形式代替美国腾发覆盖的牧草植被,可充分利用草本复苏早、灌木凋零期晚的优势,最大限度地发挥植被的腾发作用和控制土壤侵蚀的功能。

1.2 土层结构

植物可以吸收利用的水分介于田间持水率和凋萎点之间,这部分土壤水称为土壤储水率。砂性土凋萎点低,含水率较低小时土壤水分仍能被植物吸收,不过其田间持水率也很低。黏土与砂土刚好相反,田间持水率高,但凋萎点也高。可见特性迥异的黏土和砂土的储水率都较低,倒是中等田间持水率、中等凋萎点的壤土以及粉质壤土、黏壤土有相对较高的储水率,但是壤土的储水率也仅有0.116~0.149(cm^3/cm^3)。

鉴于上述各类土的持水特性,本研究建议对美国腾发覆盖单一的壤土层作以下改造:在轻度压实壤土层底部增设25~30 cm厚的压实黏土层,这种上松下紧的二元结构可发挥2种土的优点,避开2种土的缺点,其储水率在0.193~0.267(cm^3/cm^3)之间,比单一壤土层的储水率增加70%以上。

2 水文评估模型

目前用于垃圾填埋场水文评估的软件主要有

Hydrus-2D、UNSAT-H、LEACHM 和 HELP,本研究采用垃圾填埋场专用水文评估 HELP 软件进行水文评估。

2.1 降雨入渗模型

一次降雨渗入土壤的水量由下式计算:

$$\text{INF} = P - \text{INT} - R \quad (1)$$

式中,INF为降雨入渗量(mm);P为降雨量(mm);INT为植物截留量(mm);R为径流量(mm)。

一次降雨中被植物叶面所截留的水量用式(2)计算:

$$\text{INT} = \text{INT}_{\max}(1 - e^{-P/\text{INT}_{\max}}) \quad (2)$$

式中,INT_{max}为植物潜在截留的能力(mm),取决于地面生物量。

径流量计算采用美国农业部土壤保持中心(SCS)提出的产流公式:

$$R = \begin{cases} \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} & P \geq 0.2S \\ 0 & P < 0.2S \end{cases} \quad (3)$$

式中,S为开始产流时土壤的最大潜在持水量(mm),取决于土壤前期含水量、土壤类型、土地利用状况等因素^[6]。

2.2 腾发模型

覆盖系统的腾发强度取决于大气潜在蒸腾力、土壤水分和土壤输水能力、植被覆盖条件和植物蒸腾特性。以能量守恒原理和边界层输送理论为基础的Penman-Monteith模型被认为是计算植物蒸腾和植物覆盖条件下土壤蒸发的较好方法。根据太阳净辐射量、大气温度、地表温度、大气压、风速、大气相对湿度、植被叶面积指数、植被高度、土壤含水率(或基质势),采用Penman-Monteith模型即可分别计算植物蒸腾量、土壤蒸发量^[7]。

2.3 水流运动模型

HELP软件中单元层(屏障层以及屏障层下方与屏障层相邻的土层除外)水流运动的连续性方程为:

$$\Delta S = Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}} - \text{ET} \quad (4)$$

式中,ΔS为单元层储水变化量(mm);Q_{in}为流入单元层的水量(mm);Q_{out}为流出单元层的水量(mm);ET为腾发量(mm)。

流入表土层(第1层)的水量即为降雨入渗量INF;流入第j层(j≥2,且不包括屏障层及其下方相邻土层以外的土层)的水量等于流出第j-1层的水量,即Q_{in}(j) = Q_{out}(j-1),由式(5)确定:

$$Q_{in}(j) = \begin{cases} \text{INF} & j = 1 \\ K_s(j-1) \cdot i \cdot DT \cdot \left[\frac{\theta(j-1) - \theta_r(j-1)}{\theta_s(j-1) - \theta_r(j-1)} \right]^{3+\frac{2}{\lambda}} & j = 2, 3, \dots, n \end{cases} \quad (5)$$

式中, $K_s(j-1)$ 为第 $j-1$ 层的饱和水力传导度 (cm/d); i 为水力梯度; DT 为时间 (d); $\theta(j-1)$, $\theta_s(j-1)$, $\theta_r(j-1)$ 分别为第 $j-1$ 层土壤的体积含水率 (cm^3/cm^3), 饱和含水率 (cm^3/cm^3), 残余含水率 (cm^3/cm^3); λ 为土壤的孔径分布指数, 可由式 (6) 求得:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda \quad (6)$$

式中, ψ_b 为泡点压力 (开始有溶解气逸出时的压力, kPa); ψ 为基质势 (kPa). 采用田间持水率和凋萎点及其对应的基质势代入式 (6), 得到 2 个方程, 联立解得 ψ_b 和 λ .

土壤水分渗透屏障层的运动速率由达西定律确定:

$$q_p = \begin{cases} 0 & h_w = 0 \\ K_p \frac{h_w + T_b}{T_b} & h_w > 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中, q_p 为土壤水分渗透屏障层的运动速率 (cm/d); h_w 为屏障层上的平均压力水头 (cm); K_p 为屏障层的饱和水力传导度 (cm/d); T_b 为屏障层的厚度 (cm).

侧向排水层中渗流沿屏障层顶面运动的 Boussinesq 方程为:

$$f \frac{\partial h}{\partial t} = q_R - K_D \frac{\partial}{\partial l} \left[(h - l \sin \alpha) \frac{\partial h}{\partial l} \right] \quad (8)$$

式中, f 为排水层土壤的有效孔隙率 (孔隙率减去田间持水率); h 为屏障层上饱和水面到基准面的水头 (cm); t 为时间 (s); q_R 为排水层的净越层补给量, 即单位时间的上层来水量减去渗入屏障层的水量 (cm/s); K_D 为排水层的饱和水力传导度 (cm/s); l 为饱和层内水流沿屏障层的排水距离 (cm); α 为屏障层的坡角 (图 1).

对于稳定渗流 ($\partial h / \partial t = 0$), 排水层越层净补给量 q_R 等于排水层流入单位长度集水管的流量 $\partial Q_D / \partial l$ (cm/s), 也等于单位面积填埋场排入排水装置的流量 q_D (cm/s). 将式 (8) 中对 l 的积分转化为对 x 的积分:

$$q_D = q_R = \frac{Q_D}{L} = K_D \cos^2 \alpha \frac{d}{dx} \left(y \frac{dh}{dx} \right) \quad (9)$$

式中, Q_D 为排水层的单宽排水流量 (cm^2/s); L 为排水层的水平投影长度 (cm); y 为排水层中的水深

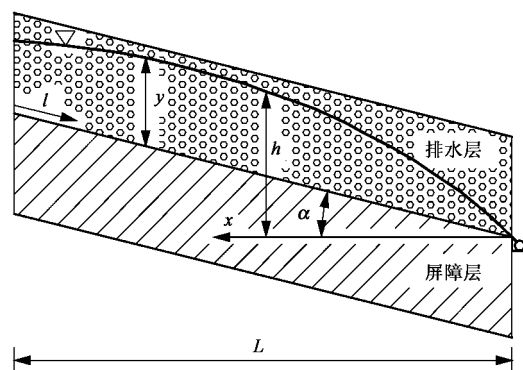


图 1 侧向排水示意

Fig. 1 Sketch of lateral drainage

(cm), 将 h 用 y 表示, 即 $h = y + l \sin \alpha$, 式 (9) 可写成:

$$y \frac{d^2 y}{dx^2} + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 + \tan \alpha \frac{dy}{dx} = \frac{q_D}{K_D \cos^2 \alpha} \quad (10)$$

式 (10) 为排水层侧向稳定渗流的运动方程, 为便于求解, 将变量定义为无量纲量, 令 $x^* = x/L$, $y^* = y/L$, $q_D^* = q_D/L$, 得:

$$y^* \frac{d^2 y^*}{dx^{*2}} + \left(\frac{dy^*}{dx^*} \right)^2 + \tan \alpha \frac{dy^*}{dx^*} = \frac{q_D^*}{\cos^2 \alpha} \quad (11)$$

对排水层侧向排水 (渗流) 的边界条件可简化定义为: 在左边界 (即 $x^* = 1$ 处) 取水力坡降 $dh/dl = 0$, 在右边界 (即 $x^* = 0$ 处) 取水力坡降 $dh/dl = 1$. 依此定义可导出边界条件的表达式为:

$$\frac{dy^*}{dx^*} = \frac{1}{\cos \alpha} - \tan \alpha \quad x^* = 0 \quad (12)$$

$$y^* \left(\frac{dy^*}{dx^*} + \tan \alpha \right) = 0 \quad x^* = 1 \quad (13)$$

对于饱和深度很浅和侧向排水流量较小 (即 $q_D^* < 0.4 \sin^2 \alpha$) 的水流, 在右边界 (即 $x^* = 0$ 处) 取水力坡降 $dh/dx = 1$, 导出该边界条件的表达式为:

$$y^* = \frac{q_D^*}{\cos^2 \alpha} \quad x^* = 1 \quad (14)$$

利用边界条件 (12)、(13) 和 (12)、(14) 分别对方程 (11) 求解得到:

$$\begin{cases} \bar{y}^* = \frac{q_D^*}{\sin^2 \alpha} & q_D^* < 0.4 \sin^2 \alpha \\ \bar{y}^* = \frac{\pi \sqrt{q_D^*}}{4 \cos \alpha} (0.403) \left(\frac{q_D^*}{4 \sin^2 \alpha} \right)^{-0.55} & q_D^* \geq 0.4 \sin^2 \alpha \end{cases} \quad (15)$$

式中, $\bar{y}^*$ 为排水层中化引水深 y^* 的平均值.

在稳定渗流条件下:

$$q_D = q_R = q_{in} - q_P \quad (16)$$

将 $h_w = \bar{y}^* \cdot L$ 代入式(7),然后再代入式(16)得到:

$$q_D^* = \begin{cases} \frac{q_{in}}{K_D} & \bar{y}^* = 0 \\ \frac{q_{in}}{K_D} - \frac{K_P}{K_D} \frac{\bar{y}^* L + T_b}{T_b} & \bar{y}^* > 0 \end{cases} \quad (17)$$

联立求解式(15)、(17)得到 $\bar{y}^*$ 和 q_D^* , 进而求得 h_w 、 q_P 和 q_D .

3 HELP 模型验证

为验证 HELP 模型对填埋场覆盖层水分运动模拟的可靠性,本课题组在武汉大学农田水利与水环境综合试验场进行了现场试验. 试验布置了 4 个不同覆盖结构的测坑,试验处理覆盖结构及水均衡要素的观测值和模拟值见表 1. 从表 1 中各水均衡要素模拟值和实测值的比较可以看出,模拟的各要素与实测值相差不大. 总体来看,HELP 模型能够比较准确而真实地模拟出填埋场覆盖系统的水分运动.

表 1 各试验处理覆盖层结构以及水均衡要素观测和模拟结果

Table 1 Structure designs and water balance monitoring and simulating results of various experimental plots

试验处理	覆盖植被	覆盖层厚度/cm	降雨/mm	腾发量/mm		储水变化量/mm		渗漏量/mm	
				实测	模拟	实测	模拟	实测	模拟
1	裸地	60	861.07	578.1	601.7	-16.93	-9.43	299.9	268.8
2	灌木+杂草	60	861.07	876.1	867.6	-65.2	-65.2	50.2	58.7
3	灌木+杂草	40	861.07	783.4	775.7	-35.13	-36.03	112.8	121.4
4	藤蔓植物	60	861.07	744.3	755.3	-15.17	-6.8	101.6	113.2

4 不同覆盖系统的水文评估及对比分析

4.1 基本资料及参数

4.1.1 覆盖系统的结构与尺寸

取屏障型覆盖系统、腾发覆盖系统和改进腾发覆盖系统作为水文评估对象,为了便于对比,3 种覆盖系统取相同的总厚度、坡比、坡长(见图 2).

4.1.2 气象资料

本次评估采用 2007 年武汉大学灌溉排水综合试验场测定的气象资料. 全年逐日降雨、平均气温、太阳辐射量过程如图 3 所示.

另外,为对比不同水文年下各覆盖系统的渗沥控制效果,选取武汉地区年降雨量分别为 1 年一遇、2 年一遇、5 年一遇、30 年一遇的 4 个年份分别对屏障型覆盖、腾发覆盖和改进的腾发覆盖系统的渗沥控制效果进行数值模拟.

4.1.3 土壤水分特征参数

覆盖土层各个土层水分特征参数均在武汉大学灌溉排水综合试验场测定. 其中,土壤的饱和含水率采用烘干称重法测定;田间持水率采用环刀法测定;凋萎点为幼苗发生永久萎蔫时土壤的含水率;饱和水力传导度采用双套环装置现场测定. 各覆盖土层

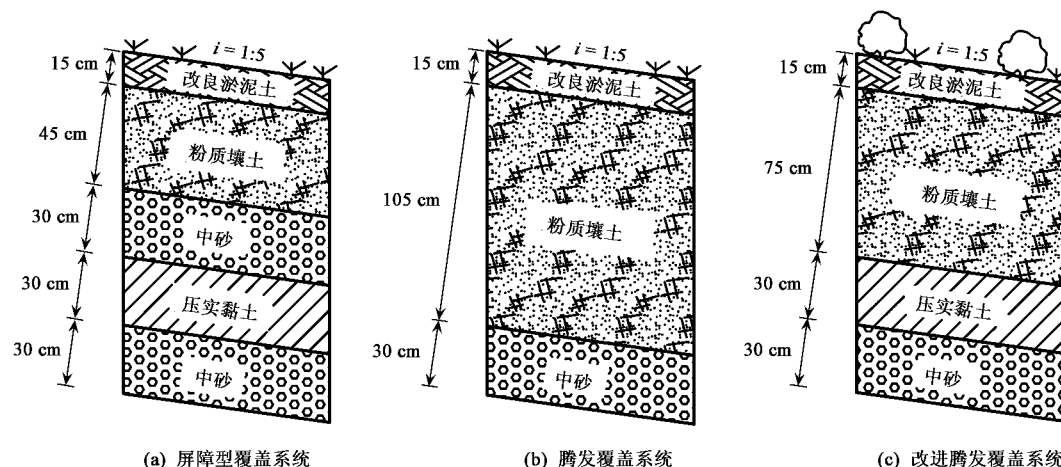


图 2 覆盖系统剖面

Fig. 2 Cross sections of cover system

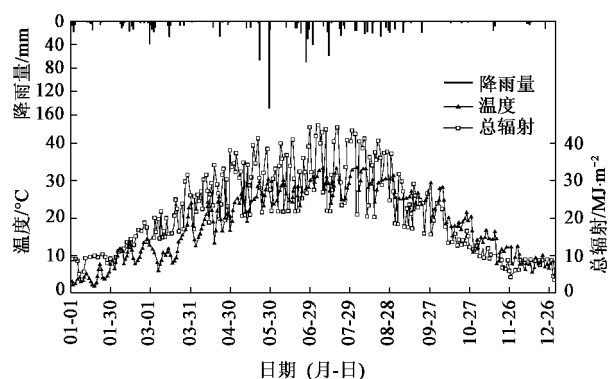


图3 2007年的逐日降雨、平均气温和太阳辐射

Fig. 3 Daily precipitation, average temperature and solar radiation of 2007

表2 覆盖系统土壤水分特征参数

Table 2 Characteristic parameters of soil water

土层类型	土质类型	凋萎点 θ_{wp} / $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	田间持水率 θ_{fc} / $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	饱和含水率 θ_s / $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	水力传导度 K_s / $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$
植被表土层	改良淤泥土	0.135	0.284	0.501	1.9×10^{-4}
保护层、水分调蓄层	粉质壤土	0.085	0.190	0.453	7.2×10^{-4}
排水层、排气层	中砂	0.024	0.062	0.437	5.8×10^{-3}
排水层淤堵	中砂	0.047	0.105	0.437	1.7×10^{-3}
屏障层	粉质黏土	0.311	0.411	0.452	1.0×10^{-6}

表3 植物特征参数

Table 3 Characteristic parameters of vegetation

覆盖系统类型	植被 型式	根系 深度 /cm	最大叶 面积指 数	生长期 开始日 序数	生长期 结束日 序数
屏障型覆盖	草	50	3.5	75	265
腾发覆盖	草	70	3.5	75	265
改进腾发覆盖	灌木+草	91.8	5.3	80	344

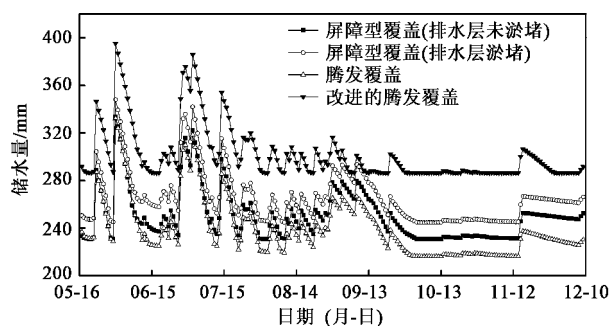


图4 不同覆盖系统的动态储水量过程

Fig. 4 Dynamic water storages of different cover systems

图4表明,在滞蓄水分方面,改进型腾发覆盖最强,屏障型覆盖次之,腾发覆盖最弱;图5表明,在腾发土壤水分方面,改进型腾发覆盖腾发最强,腾发覆盖次之,屏障型覆盖最弱;5~10月土壤水分腾发量明显大于11、12月的腾发量,说明植物在生长期中期对渗沥的控制效果要优于生长期末.由于改进型

的土壤参数见表2.

4.1.4 植物特征参数

各覆盖系统的植物特征参数均在武汉大学灌溉排水综合试验场测定,结果见表3.在模拟过程中采用SWRRB模型中计算植物生长的模型来模拟每日植被的叶面积指数以及生物量随季节的变化.

4.2 数值模拟结果及分析

根据4.1节的基本资料及参数,采用HELP软件对图2所示3种覆盖系统在2007年植物生长期的水分运动情况进行数值模拟和水量均衡计算,结果如图4~6及表4所示.不同水文年下各覆盖系统的渗沥控制效果如表5所示.

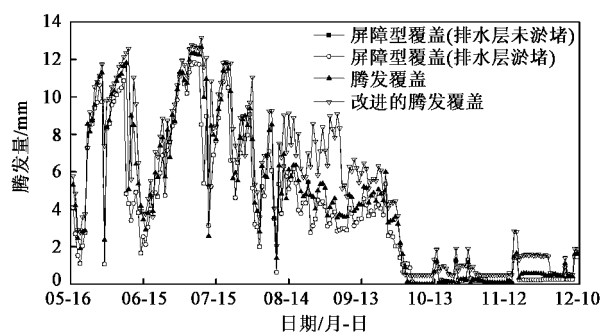


图5 不同覆盖系统的动态腾发量

Fig. 5 Dynamic evapotranspirations of different cover systems

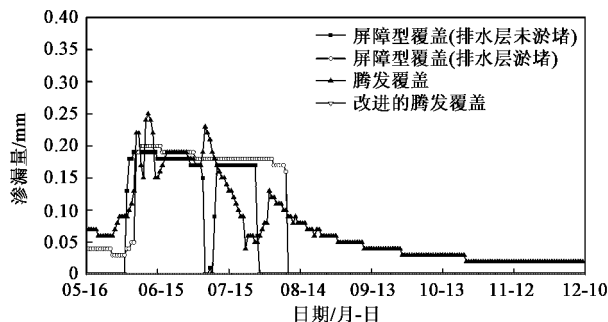


图6 不同覆盖系统的动态渗漏量

Fig. 6 Dynamic leakages of different cover systems

腾发覆盖在滞蓄水分和腾发耗水两方面的优异功能,所以在整个数值模拟期(2007-05-16~2007-12-

10) 都未发生渗漏.

表 5 表明:对于年降雨量较小的地区,采用腾发覆盖即可满足渗沥控制要求;在年降雨量 >1 000 mm 的地区,改进的腾发覆盖系统对渗沥的控制效果优于腾发覆盖和屏障型覆盖,宜采用改进的腾发

覆盖系统.

累计渗漏量是判别覆盖系统渗沥控制效果的最终依据,从表 5、表 6 可知,本研究提出的改进型腾发覆盖的渗沥控制功能不仅强于腾发覆盖,也强于屏障型覆盖.

表 4 不同覆盖系统的水量平衡
Table 4 Water balance performance of different cover systems

覆盖系统类型	降雨/mm	径流/mm	腾发/mm	侧向排水/mm	储水量变化/mm	渗漏/mm
屏障型覆盖(排水层未淤堵)	861.07	48.05	770.31	18.68	15.02	9.01
屏障型覆盖(排水层淤堵)	861.07	48.05	770.31	16.14	11.25	15.32
腾发覆盖	861.07	46.74	806.36	0	-11.49	19.46
改进腾发覆盖	861.07	38.25	827.25	0	-4.43	0

表 5 不同水文年下各覆盖系统的渗漏量
Table 5 Seepage of different cover systems in different hydrologic years

覆盖系统类型	1 年一遇		2 年一遇		5 年一遇		30 年一遇	
	降雨/mm	渗漏/mm	降雨/mm	渗漏/mm	降雨/mm	渗漏/mm	降雨/mm	渗漏/mm
屏障型覆盖(排水层未淤堵)	822.6	7.33	1 003.6	21.11	1 206.7	28.40	1 400.3	55.10
屏障型覆盖(排水层淤堵)	822.6	11.34	1 003.6	18.81	1 206.7	33.81	1 400.3	72.66
腾发覆盖	822.6	0	1 003.6	0	1 206.7	53.26	1 400.3	99.90
改进腾发覆盖	822.6	0	1 003.6	15.64	1 206.7	29.87	1 400.3	39.14

5 结论

本研究通过在腾发覆盖的底部设置黏土衬垫和改进植被形式,明显提高了腾发覆盖滞蓄水分和腾发水分的能力,水分运动数值模拟和水均衡计算结果表明,改进型腾发覆盖系统的渗沥控制效果优于腾发覆盖系统和屏障型覆盖系统.对于干旱和半干旱地区(年降雨量 <600 mm)的垃圾填埋场,可以省去黏土衬垫,但是采用灌木和草本相结合的植被形式可以增强植被腾发强度和耐旱能力.

参考文献:

[1] Gross B A, Bonaparte R, Giroud J P. Waste containment system: problems and lessons learned: Appendix F in assessment and

recommendations for optimal performance of waste containment systems [M]. U. S. Environmental Protection Agency, National Risk management Research Laboratory, Cincinnati, OH, 2002.

[2] Hauser V L, Weand B L, Gill M D. Natural cover for landfills and buried waste [J]. ASCE, Journal of Environmental Engineering, 2001, 127(9): 768-775.

[3] Hauser V L. Evapotranspiration covers for landfills and waste sites [M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008.

[4] 刘川顺, 赵慧, 罗继武. 垃圾填埋腾发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.

[5] 赵慧, 刘川顺, 王伟, 等. 垃圾填埋腾发覆盖系统渗沥控制效果的研究 [J]. 中国给水排水, 2008, 24(9): 86-89.

[6] 罗利芳, 张科利, 符素芳. 径流曲线系数法在黄土高原地表径流量计算中的应用 [J]. 水土保持通报, 2002, 22(3): 8-61.

[7] 黄洪峰. 土壤-植物-大气相互作用原理及其模拟研究 [M]. 北京: 气象出版社, 1997.