

污染物击穿防污屏障与地下水土污染防控研究进展

陈云敏, 谢海建, 张春华

(浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: 鉴于防污屏障是控制固废填埋场地下水土污染的重要结构, 为评价防污屏障的服役寿命, 分别针对重金属和有机污染物, 总结了污染物在黏土屏障和复合屏障中的一维运移解析解, 包括非线性吸附条件下污染物在黏土屏障中的一维扩散解、污染物在有缺陷膜复合屏障中的一维运移解和温度场作用下污染物在黏土屏障中的耦合运移解析解等。评价了污染物击穿防污屏障长历时过程超重离心模型试验的可靠性。对运行了 17 a 的安徽某填埋场进行现场调查, 发现氯离子运移最大深度达 9 m, 钠离子和 COD 的运移深度在 3~4 m。总结和评价了地下水土污染控制的竖向屏障技术, 认为土-膨润土系竖向隔离墙技术在我国具有广阔的应用前景, 并对今后的研究进行展望。

关键词: 渗沥液; 防污屏障; 离心模型试验; 污染物运移; 解析解; 服役寿命

中图分类号: X506 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2016)01-0001-10

Review on penetration of barriers by contaminants and technologies for groundwater and soil contamination control//CHEN Yunmin, XIE Haijian, ZHANG Chunhua (College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Barrier systems are the most important structures for landfills in terms of groundwater pollution control. Analytical solutions to one-dimensional models of transport of heavy metals and organic contaminants in clay barriers and composite barriers were summarized in order to evaluate the service life of the barrier systems. The analytical solutions include the solution to a one-dimensional model of diffusion of contaminants in clay barriers under piecewise linear adsorption conditions, the solution to a one-dimensional model of transport of contaminants in composite barriers with geomembrane defects, and the solution to a coupled model of transport of pollutants in clay barriers under thermal effects. The reliability of high-gravity centrifuge tests of long-term transport of contaminants through barriers was assessed. Field investigation was carried out in a 17-year old landfill in Anhui Province. The results showed that the maximum migration depth of chloride ion reached 9 m, and the maximum migration depth of sodium ions and COD reached 3 to 4 m. The technologies of vertical barriers for control of groundwater and soil contamination were summarized and assessed. It was found that the application of soil-bentonite cutoff walls in China generates prosperity, and further research areas were discussed.

Key words: leachate; barrier; centrifuge modeling tests; contaminant transport; analytical solution; service life

20 世纪 80 年代以来, 中国工业化和城市化的高速发展产生了大量固体废弃物, 各类固体废弃物积存量超过 2.82×10^{10} t。城市固体废弃物包括居民生活垃圾、医院垃圾、商业垃圾、建筑垃圾、污泥等, 是城市运行和发展的必然产物。目前我国城市固体废弃物年产量超过 2 亿 t, 且仍以每年 8%~15% 高速增长。填埋是我国当前和今后几十年内处理城市固体废弃物的必然选择和主要方式。我国填埋处

量占总处置量的 90.5%, 全国填埋场数量超过 2 万座, 填埋处置污染控制是亟须解决的环境问题。卫生填埋场一般由防渗系统、渗沥液导排系统、气体收集与控制系统和封顶系统等组成^[1], 其中由防渗层和渗沥液导排层组成的结构称为防污屏障, 其功能是防止渗沥液污染周围的土壤和地下水。

填埋场渗沥液污染物主要包括 4 种类型^[2]: ①水溶性有机物, 可表示为化学需氧量 (COD) 或总

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2012CB719806); 国家自然科学基金 (51478427); 浙江省公益性技术应用研究计划 (2015C31005)

作者简介: 陈云敏 (1962—), 男, 中国科学院院士, 教授, 博士, 主要从事环境岩土工程研究。E-mail: chenyunmin@zju.edu.cn
通信作者: 谢海建 (1981—), 男, 副教授, 博士, 主要从事环境土力学研究。E-mail: xiehaijian@zju.edu.cn

有机碳(TOC),包括挥发性脂肪酸以及富里酸类和腐殖酸类化合物等。②异型生物质的有机物(XOCs),主要来源于家庭和工业化学制品,一般每种物质质量浓度低于10 mg/L,包括一系列的芳香族碳氢化合物、苯类物质和氯代脂肪烃等。据统计,渗沥液中污染物的种类超过100种,其中有机污染物多达77种,包括芳香烃29种,烷烃烯烃类18种,酸类8种,脂类5种,酚类6种,醇、醛类4种,酚胺类2种^[3]。Pirbazari等^[4]在West Covina垃圾填埋场渗沥液中监测出了18种特殊有机物,且有机污染物含量很高,COD和生化需氧量(BOD)质量浓度最高值可达数千至几万mg/L;其中腐殖酸是渗沥液中最主要的长期有机污染物,腐殖酸是由小分子有机酸和氨基酸合成的大分子产物,通常不能被降解的腐殖酸质量浓度高达200~1500 mg/L。③无机宏量组分,包括Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺、NH⁴⁺、Fe²⁺、Mn²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻及HCO₃⁻等,其质量浓度往往较大,如Mg²⁺质量浓度范围为30~15000 mg/L,Cl⁻质量浓度在150~4500 mg/L之间^[2]。④重金属,包括Cd²⁺、Cr³⁺、Cu²⁺、Pb²⁺、Ni²⁺及Zn²⁺等。重金属的质量浓度一般较低,一般在10 mg/L以内,如Pb²⁺质量浓度为0.001~5 mg/L^[2]。渗沥液中还含有其他的一些微量物质,如B、As、Se、Ba、Li及Co等,但这些物质的含量一般较低。另外,随着填埋场龄期的变化,渗沥液的组分和性质也相应地变化,Kjeldsen等^[2]调查发现龄期较长填埋场的某些渗沥液组分浓度要比龄期较短的渗沥液小,但可生化降解性越来越差,且氨氮含量越来越高。新填埋场渗沥液呈弱酸性,pH值小于6.5,可生化降解性较好,氨氮浓度也较高;老填埋场渗沥液的pH值大于7.5,可生化降解性极差,而氨氮浓度依然较高。

在填埋场复杂环境下渗沥液及其携带的痕量污染物极易击穿填埋场防污屏障,尤其是通过屏障的薄弱环节产生优势流,并向地下环境渗透扩散,造成城市地下环境污染灾害。渗沥液污染物浓度为城市污水的100倍,污染持续时间长达几十年甚至几百年,污染修复难度极大。由于填埋场防污屏障没有进行严格设计,2002年国家环保局监测发现47个重点城市89%的填埋场地下水质超过国家标准。北京市北天堂填埋场超过10 km²范围内地下水已无法饮用,有机物和细菌总数严重超标,且污染程度和范围正逐年增加。我国目前城市固体废弃物渗沥液产量高达填埋量的30%,COD和BOD浓度高、氨氮含量大^[5]。欧美国家目前填埋场渗沥液产量总体仅为填埋量的5%~10%,填埋场渗沥液水头低,大幅降低了渗沥液污染地下环境的可能性和灾害程

度。美国1988年开始采用双层屏障系统,并对施工质量进行严格控制,取得了较好的效果。2006年纽约环境保护局对31个采用严格设计施工质量控制的现代填埋场的周边地下水进行了监测,结果表明所有填埋场均未对地下水产生污染^[6]。针对我国城市固体废弃物填埋场渗沥液的实际情况,研究渗沥液污染物击穿防污屏障过程及在地下环境中的扩散行为,是地下环境污染评估、防控及治理的迫切需求。笔者从防污屏障的服役寿命评价方法、超重力离心模型试验、现场试验和设计方法等方面进行阐述,并提出今后的研究展望,以期对地下水土污染屏障技术的发展提供借鉴。

1 防污屏障的类型

防渗层和渗沥液导排层共同组成了填埋场的防污屏障。防污屏障材料包括压实黏土(CCL)、土工膜(GM)、土工织物(GT)、土工复合膨润土衬垫(GCL)、土壤衬垫(AL)、土质衬垫(SL)、土工格栅(GG)和土工网(GN)等。根据我国CJJ17—2004《生活垃圾卫生填埋技术规范》^[8]、CJJ113—2007《生活垃圾填埋场防渗系统工程技术规范》^[9]和GB 16889—2008《生活垃圾填埋污染控制标准》^[10]的规定,填埋场防污屏障系统可采用以下几种形式:①压实黏土屏障;②土工膜与压实黏土层组成的复合屏障系统;③土工膜与土工复合膨润土衬垫组成的复合屏障系统;④土工膜单层屏障结构;⑤双层土工膜防污屏障系统。

美国1982年前主要使用单层黏土屏障,1982年开始使用单层土工膜,1983年改用双层土工膜,1984年又改用单层复合屏障,1987年后则广泛使用双层复合屏障^[11]。目前所有的危险废物填埋场和近1/3州的生活垃圾填埋场设计中已规定必须使用双层复合屏障。

2 防污屏障服役寿命评价准则和解析模型

目前屏障的设计方法仅对其厚度和渗透系数等参数提出要求,未能考虑填埋场水头、污染物的种类和浓度等对防污性能的影响。笔者提出了基于污染物浓度击穿时间的屏障设计方法^[12],屏障的击穿时间需要大于垃圾稳定化时间(20~30 a)和填埋场运行时间(10~20 a)之和,一般应大于50 a。

为了计算渗沥液击穿防污屏障的时间,笔者所在课题组分别针对重金属和有机污染物,获得了污染物在填埋场黏土和复合防渗层中运移的一维运移解析解,包括非线性吸附条件下污染物在黏性土中的一维扩散解^[13],有机污染物在复合防渗层中的一

维扩散-降解解^[14-15]、污染物在有缺陷膜复合防渗层中的一维运移解^[16]、污染物在土工复合膨润土衬垫和土壤衬垫中的一维运移解^[17]、有机污染物在复合防渗层中的一维渗漏扩散解析解^[18]和温度场作用下污染物在黏性土中的耦合运移解析解^[19]。

2.1 有机污染物通过 GM/GCL/AL 中的一维扩散解析解

GM、GCL 和 AL 组成的 3 层屏障系统结构已广泛应用于垃圾填埋场的防渗。笔者建立了有机污染物在 GM/GCL/AL 中的一维扩散模型^[14],如图 1 所示。考虑了有机污染物在土工膜及其周围介质之间的分配作用并考虑了 GCL 和 AL 界面污染物浓度和通量的连续性。在此基础上利用拉氏变换得到了 AL 层中污染物浓度 $C_{al}(z,t)$ 的无量纲形式的解析解:

$$C_{al}(z,t) = (\eta_1 - C_i) C_N \tag{1}$$

其中

$$C_N = \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{T}}\right) - \exp\left(\frac{T + \sigma}{\sigma^2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{\sigma + 2T}{2\sigma\sqrt{T}}\right) \tag{2}$$

$$\sigma = \frac{\eta_2}{z - (L_{gm} + L_{gcl})} \tag{3}$$

$$T = \frac{D_{al}t}{R_d[z - (L_{gm} + L_{gcl})]^2} \tag{4}$$

$$\eta_1 = \frac{C_0 S_{gf}}{S'_{gf}} \tag{5}$$

$$\eta_2 = n_{al} D_{al} \left(\frac{L_{gcl}}{n_{gcl} D_{gcl}} + \frac{L_{gm}}{S'_{gf} D_{gm}} \right) \tag{6}$$

式中: C_i 为污染物在 AL 层的初始浓度; C_0 为污染物在渗滤液中的初始浓度; L_{gm} 、 L_{gcl} 、 L_{al} 分别为 GM、GCL 和 AL 层的厚度; D_{gm} 为污染物通过 GM 的扩散系数; D_{gcl} 和 D_{al} 分别为污染物通过 GCL 和 AL 的有效扩散系数; R_d 为 AL 的阻滞因子; S_{gf} 为 GM 和污染物之间的分配系数; S'_{gf} 为污染物在 GM 和孔隙水之间的分配系数; n_{al} 和 n_{gcl} 分别为 AL 和 GCL 的孔隙率。

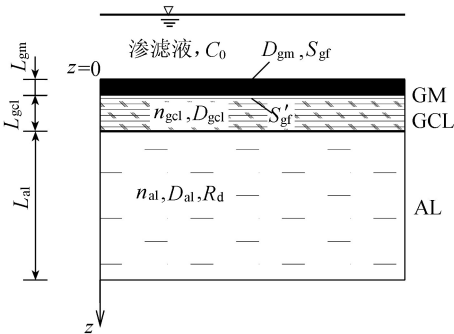


图 1 污染物通过 GM/GCL/AL 中的一维扩散模型

2.2 考虑非线性吸附时污染物在黏土屏障中的一维扩散解

笔者所在课题组首次提出了描述黏性土对污染

物吸附的分段线性吸附等温线^[13],揭示了黏性土对污染物的吸附存在一个从线性吸附到吸附完成的过程。和线性吸附模式相比,该吸附模式具有概念明确、更符合污染物在黏性土中的吸附规律以及便于工程实际应用的优势。在该等温线的基础上,建立了污染物在黏土中的一维扩散模型,并采用移动边界理论首次获得了解析解,理论分析结果和现有试验结果吻合较好^[20]。该研究揭示了非线性吸附对黏性土污染物击穿时间的影响规律,发现非线性吸附时三氯乙烯的击穿时间仅为线性吸附时的一半。

2.3 污染物通过有缺陷膜复合屏障中的一维运移解析解

为了研究高水头作用下污染物通过有缺陷膜复合衬垫的运移规律,建立了重金属和有机污染物通过复合衬垫的渗漏-扩散模型并获得了解析解,包括污染物在有缺陷膜复合衬垫的一维运移解和污染物通过 GCL/AL 的一维对流-弥散解。污染物击穿复合衬垫的无量纲时间 T_R 可采用式(7)计算。研究表明^[16-17]土工膜漏洞频率增大会显著缩短重金属离子通过复合衬垫的击穿时间;渗沥液水头和 AL 施工质量对苯在 GCL/AL 中运移的影响非常显著,当渗沥液水头从 0.3 m 增大到 10 m 时,苯击穿时间减少为原来的 33%;AL 渗透系数减少 1 个量级可使击穿时间增大 2.3 倍,100 a 底部污染物通量减少为原来的 41.7%。

$$\frac{C_r(z,t)}{C_0} = \frac{K}{2} \left\{ \operatorname{erfc}\left(\frac{1 - T_R}{2\sqrt{T_R/P_{ls}}}\right) + \exp(P_{lg} + P_{ls}) \operatorname{erfc}\left(\frac{1 + T_R}{2\sqrt{T_R/P_{ls}}}\right) - \exp\left[\frac{P_{ls}}{4}(-1 + \exp P_{ls} + T_R) \operatorname{csch}^2\left(\frac{P_{lg}}{2}\right)\right] \cdot (1 + \exp P_{lg}) \operatorname{erfc}\left[\frac{1 + T_R \coth\left(\frac{P_{lg}}{2}\right)}{2\sqrt{T_R/P_{ls}}}\right] \right\} \tag{7}$$

其中

$$P_{lg} = \frac{v_g L_g}{D_g} \tag{8}$$

$$P_{ls} = \frac{v_s z}{D_s} \tag{9}$$

$$T_R = \frac{v_s t}{R_d z} \tag{10}$$

式中: $C_r(z,t)$ 为污染物在 AL 层中的浓度; K 为无量纲参数; D_g 和 D_s 分别为 GCL 层和 AL 层的有效扩散系数; v_g 和 v_s 分别为 GCL 层和 AL 层的对流速率; L_g 为 GCL 层的厚度。

根据建立的填埋场污染物在防污屏障中的运移

模型及其解析解,获得了无量纲的复合衬垫设计曲线,提出了基于击穿时间设计填埋场复合屏障的方法,并通过实例进行了分析,探讨了其实用价值^[12]。

2.4 有机污染物在 GM/GCL/SL 中的一维渗漏扩散解析解

为了评价由 GM、GCL 和 SL 组成的 3 层复合屏障的防污性能,建立了挥发性有机化合物(VOCs)在这类屏障系统的一维运移解析模型^[18]。模型考虑了污染物通过土工膜漏洞的渗漏和通过完整膜的扩散作用。基于该模型研究了渗沥液水头、相连褶皱的长度和 GM/GCL 界面导水系数等对屏障击穿时间的影响。研究表明,当渗沥液水头为 10 m 且相连褶皱长度为 1000 m 时,屏障底部 30 a 的污染物通量可达纯扩散情形的 60 倍以上。相连褶皱的长度对屏障底部通量的影响要大于其对底部浓度的影响。当相连褶皱的长度小于 100 m 时,界面导水系数对污染物击穿曲线的影响可以忽略。同时比较了 GM/CCL 和 GM/GCL/SL 两种衬垫的防污性能,发现在短时间内 GM/CCL 的防污性能优于 GM/GCL/SL;但 GM/GCL/SL 的长期性能优于 GM/CCL,GM/GCL/SL 底部通量的稳态值约为 GM/CCL 情形下的 13%^[18]。

2.5 考虑降解时有机污染物在填埋场复合衬垫中的一维扩散解析解

首次考虑了土层或 GCL 降解作用对污染物扩散的影响,建立了填埋场有机污染物在复合屏障中的一维扩散解析模型^[15]。在此基础上分析了填埋场有机污染物在复合屏障中的长期运移规律,以及有机污染物降解作用对复合屏障防污效果的影响。对于 GM/CCL,当 CCL 中苯的降解半衰期为 10 a 时,100 a 时复合衬垫底部苯浓度比不考虑降解情形至少小 1 个量级。

2.6 温度场作用下污染物在黏土屏障中的耦合运移模型

化学浓度场和温度场耦合作用下污染物的运移方程为^[19]

$$R_d \frac{\partial C}{\partial t} = D_d \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + S_T D_d \frac{\partial}{\partial z} \left(C \frac{\partial T^*}{\partial z} \right) \quad (11)$$

式中: S_T 为 Soret 系数,表示温度场导致的污染物扩散; D_d 为污染物在黏土层中的有效扩散系数; T^* 为温度。

对于一个半无限空间,且初始条件为一定值,即 $C(z,0) = C_i$,在上边界,化学物的浓度假设为一常数,即 $C(0,t) = C_0$,下边界则假设为 $\frac{\partial C(\infty,t)}{\partial z} = 0$ 。在这一情形下得到污染物浓度的解析解为

$$\frac{C(z,t) - C_i}{C_0 - C_i} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{AD_d S_T t + R_d z}{2 \sqrt{D_d R_d t}} \right) + \exp(-AS_T z) \operatorname{erfc} \left(\frac{-AD_d S_T t + R_d z}{2 \sqrt{D_d R_d t}} \right) \right] \quad (12)$$

式中 A 为黏土层的温度梯度。

将该解析解和文献[21]中试验结果进行对比,发现两者符合较好。利用该解析解可对化学物在填埋场底部压实黏土中的长期运移进行预测。由于生化反应作用,我国某些典型的厌氧型填埋场底部温度可达 353 K,而一般情况下填埋场的底部温度约为 333 K。假设地下水中的温度为 283 K,压实黏土的厚度为 0.6 m,压实黏土顶部和底部的温度分别为 333 K 和 283 K,衬垫上方的浓度为 100 mol/m^3 ,分子扩散系数为 $2.8 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, S_T 分别取 $5 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ 、 10^{-2} K^{-1} 和 $5 \times 10^{-2} \text{ K}^{-1}$ 。基于解析解得到压实黏土底部污染物浓度随时间的变化曲线见图 2。结果表明考虑热扩散作用时,污染物的扩散速度加快。当 $S_T = 5 \times 10^{-2} \text{ K}^{-1}$,屏障底部 100 a 时污染物浓度比仅考虑分子扩散的情形增加了约 50%。这说明为了更精确地预测填埋场污染物的运移,需要考虑热扩散的作用。

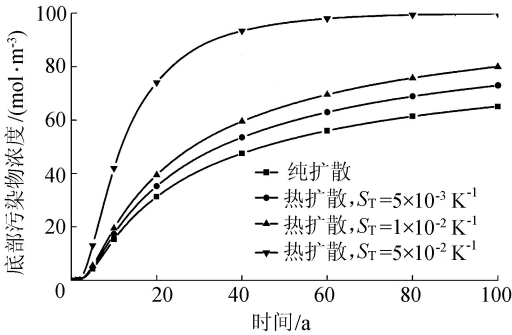


图 2 温度梯度对压实黏土中污染物运移的影响

3 污染物击穿防污屏障的超重力离心模型试验

离心模型试验是近几十年发展起来的试验手段,已成功应用于岩土工程的多个领域,如浙江大学研制了 ZJU400 超重力离心机^[22]。土工离心模拟利用离心机运行产生的较大加速度,可以在小比尺模型中模拟现场土体的应力场,准确控制水文地质条件和边界条件,缩短试验时间,再现原型特性^[23]。在离心机中进行几个小时的试验便可模拟现场几年甚至几十年的运移问题^[23]。土工离心机在污染物运移方面应用的可行性已经被国内外许多试验所证明^[24-29]。

污染物迁移过程复杂,包括物理、化学以及生物过程。从污染物迁移主要因素出发,着重考虑对流、

弥散和吸附等物理过程,其控制方程如下:

$$R_d \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_h \frac{\partial C}{\partial z} \right) + v \frac{\partial C}{\partial z} \tag{13}$$

式中: v 为渗沥液的实际孔隙流速; D_h 为水动力弥散系数。

对流作用的表征参数为流速,取决于渗沥液水头和渗透系数。弥散作用包括分子扩散和机械弥散,其表征参数 $D_h = D_d + D_m$, 其中 D_d 为分子扩散系数, D_m 为机械弥散系数。吸附作用的表征参数为 R_d , 假定吸附为线性等温吸附。通过相似理论分析, 表 1 给出了影响污染物迁移模拟的 8 个无量纲参数。

表 1 影响污染物迁移模拟的无量纲参数

无量纲数	名称及相似条件
$\pi_1 = C/\rho_f$	浓度数。原型和模型采用相同的浓度即可满足相似条件。
$\pi_2 = \rho_f v l_p / \mu$	雷诺数。只要小于 1, 保证渗流为层流, 即可满足达西定理。
$\pi_3 = vt/l$	对流数。加速度为 Ng , 模型尺寸为原型的 $1/N$, 模型时间为原来的 $1/N^2$ 。
$\pi_4 = D_d t/l^2$	分子扩散数。加速度为 Ng , 模型分子扩散的时间为原来的 $1/N^2$ 。
$\pi_5 = \rho g l d / T_f$	毛细效应数。相同材料下, 模型的毛细高度为原型的 $1/N$ 。
$\pi_6 = S/\rho_f$	吸附数。如果材料相同, 且满足线性等温吸附, 即吸附瞬时达到平衡, 满足相似条件。
$\pi_7 = g t^2 / l$	动力作用数。对于孔隙介质的层流问题, 可以忽略。
$\pi_8 = v d / D_d$	Peclet 数 (P_e), 代表机械弥散和分子扩散之比。相同材料模型的 P_e 不能与原型相等。

注: ρ_f 为流体密度; l_p 为特征长度; ρ 为土颗粒密度; g 为重力加速度; d 为颗粒平均粒径; S 为被吸附的污染物在土中的浓度; μ 为动力黏滞系数; l 为土层厚度; T_f 为流体表面张力。

结合表 1 给出的无量纲参数, 文献[23]通过理论分析认为对流和分子扩散作用均能满足相似条件;机械弥散则不相似,从模型映射到原型时,由于流速加倍,机械弥散作用偏大,能否采用 P_e 作为判别弥散相似的条件还需要进一步研究;吸附相似条件为吸附满足线性等温吸附,但满足线性等温吸附的条件仍不清楚。以下为笔者所在课题组试验研究江苏低渗透性高岭土中机械弥散与吸附作用的离心机模拟相似性和离心模型长期污染物运移结果。

3.1 机械弥散作用的离心机模拟相似性

图 3 给出了高岭土常重力土柱试验和超重力离心机土柱试验获得的水动力弥散系数 D_h 与流速 v 的关系,其中示踪离子为氯离子。可见,流速越大,对应的 D_h 也越大。定义 $P_e = v d / D_d$, 则

$$\frac{D_h}{D_d} = \tau + P_e \frac{\alpha}{d} \tag{14}$$

式中: τ 为模型的弯曲因子; α 为弥散度, $\alpha = 0.000924\text{ m}$ 。

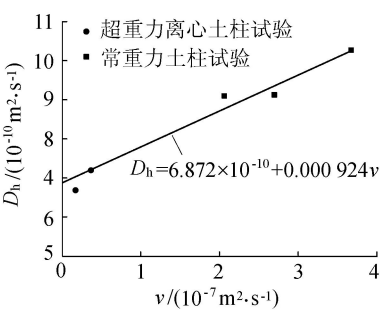


图 3 水动力弥散系数与流速的关系

图 4 给出了高岭土的 D_h/D_d 与 P_e 关系曲线,其中 $d = 0.003\text{ mm}$, $\tau = 0.339$, 同时给出了前人粉土和粉砂的土柱试验结果。可见当 P_e 小于某一临界值时, D_h/D_d 基本为常数,离心模型满足机械弥散相似要求。对于粉土和粉砂,该临界值约等于 1。对于高岭土,该临界值为 6.05×10^{-4} , 相应的模型最大容许流速 $v = 4.09 \times 10^{-7}\text{ m/s}$ 。根据最大容许流速及离心模型试验水头可确定临界离心加速度。试验时离心加速度小于该值,渗流速度对水动力弥散作用的影响可忽略。以 2 m 厚高岭土衬垫为例,当水头差为 10 m 时,对应的临界离心加速度为 50g,此时获得的击穿时间与原型相比的误差小于 10%。因此在进行屏障击穿时间离心模拟试验时,可控制离心加速度小于临界值,或利用图 4 修正试验评估击穿时间。

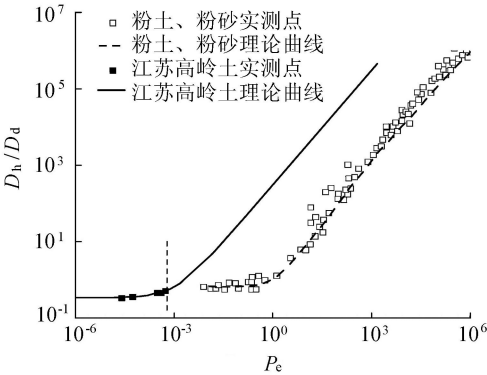


图 4 D_h/D_d 与 P_e 的关系曲线

3.2 吸附作用的离心机模拟相似性

图 5 给出了土柱试验获得的重金属离子阻滞因子随流速的变化关系,可见溶液流速增大,吸附的阻滞因子变小;对不同的土和不同的重金属离子,流速

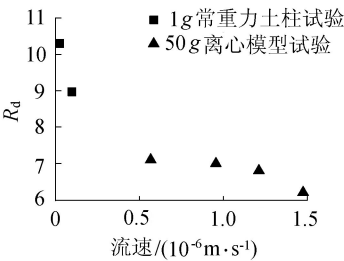


图 5 阻滞因子随流速的变化

对阻滞因子的影响程度不同;超重力离心加速度增大了溶液的流速,使得土颗粒对重金属的吸附能力变小。因此离心模型试验和原型相比,吸附阻滞作用变小,获得的衬垫击穿时间偏小。在进行屏障击穿时间离心模拟试验时,可利用低流速的土柱试验得到的阻滞因子对高流速的离心模型试验结果进行修正。

3.3 黏土屏障击穿时间的离心模型试验

詹良通等^[30]开展了高水头条件下氯离子击穿低渗透性高岭土衬垫的离心机模型试验研究。原型土质屏障厚2 m,水头差12 m,离心加速度50g。离心模型采用高含水率的高岭土泥浆固结制成,高度4 cm,模型水头差24 cm,示踪离子为氯离子,离心试验历时3.52 h。屏障模型的运移参数如下: $\alpha=0.0038\text{ m}$, $k=3.2\times10^{-9}\text{ m/s}$, $D_d=4\times10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$, $D_h=5.7\times10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$ 。试验后,经切片萃取分析获得氯离子浓度随深度的分布,结果表明离心模型试验结果与理论模型拟合得较好(图6)。当击穿浓度控制在4%的初始浓度时,黏土屏障的击穿时间为1 a;当击穿浓度控制在10%的初始浓度时,屏障的击穿时间为1.97 a。若水头差控制在0.3 m,屏障击穿时间增加到30.5 a。这也说明了水头对屏障服役寿命具有很大的影响。

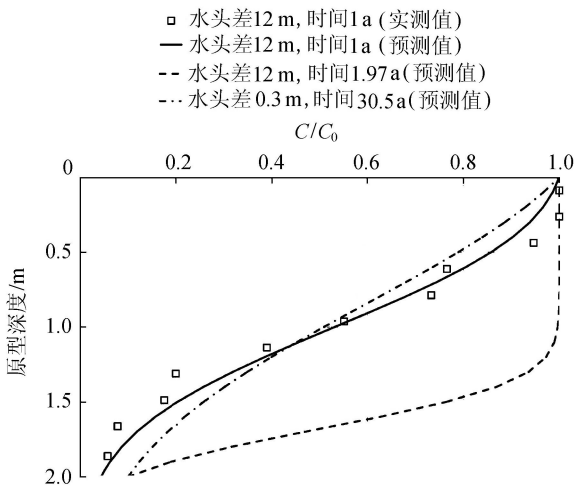


图6 氯离子浓度剖面及击穿时间模拟

综上所述,对流和分子扩散作用满足离心模拟相似要求,离心机试验可用于以对流作用或分子扩散作用为主导的污染物运移研究。流速增大会使机械弥散作用偏大,吸附作用偏小,离心试验获得的屏障击穿时间偏小,用于设计偏安全,可通过1g常重力土柱试验加以修正。

4 渗沥液污染物在填埋场底土中的长期运移现场试验

为了评价填埋场渗沥液污染物的运移程度,笔者所在课题组对运行17 a的安徽某填埋场进行现场调查,获取了填埋场底部约9 m深的黏性土试

样^[31]。通过室内孔隙水萃取等试验方法对分层土样进行物理化学分析,获得了土样孔隙水中氯离子、钠离子和COD等的浓度。研究发现氯离子运移最大深度达9 m;钠离子和COD的运移深度在3~4 m之间,这是由于黏土层对它们的吸附作用^[31]。利用成层污染物运移模型对该场地的污染物浓度剖面进行拟合,获得了3种污染物在土层中的有效扩散系数和阻滞因子的取值范围,并反演了该场地的水流速度和机械弥散系数,发现仅考虑扩散时理论模拟的氯离子运移深度为3 m。因此,在填埋场8 m水头作用下对流作用和机械弥散作用显得更为重要。同时,假设存在一个有效接触面,如该接触面处于现场发现的接触面以上1 m时,理论分析结果和现场调查结果吻合。另外,该场地的黏性土对有机污染物具有较好的阻滞效果,COD的最佳拟合阻滞因子为5。

5 地下水污染控制的竖向屏障技术

竖向屏障技术主要分为竖向隔离墙和顶部加盖技术等,竖向隔离墙技术主要用于阻滞污染场地污染物水平向运移扩散,是目前最为有效的限制污染物运移的技术。竖向隔离墙按其材料分为水泥系隔离墙、膨润土系隔离墙、活性反应墙(permeable reactive barriers, PRB)。

竖向隔离墙的设计需考虑宽度、深度、渗透系数、黏度、密度、化学相容性、破坏应变以及无侧限抗压强度等多项设计指标参数。不同国家对竖向隔离墙类型的侧重也有所差别,英国等欧洲国家主要采用水泥-膨润土系竖向隔离墙,而美国主要采用土-膨润土系竖向隔离墙,我国目前多采用水泥系(塑混凝土或水泥土)注浆帷幕作为主要隔离墙形式,以阻隔填埋场内渗沥液。我国膨润土储量占世界总量的60%,土-膨润土在我国具有良好应用前景。常用竖向隔离墙优缺点见表2^[33]。

污染物运移通过竖向屏障,主要发生对流、分子扩散、机械弥散和吸附这4个作用。当污染物运移使屏障外侧达到国家标准规定的浓度阈值时,即认为屏障被污染物击穿。如果假定土体与污染物的吸附关系为线性吸附,则有

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{v_s}{R_d} \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{D_d}{R_d} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + \frac{\alpha_1 v_s}{R_d} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \tag{15}$$

当竖向屏障打入不透水层形成全封闭防污结构时,污染物在屏障中的运移是一维问题,可求解式(15),获得污染物浓度随时间和墙厚的分布^[39]。图7是防污屏障下游边界浓度随运移时间变化曲线,其中Ogata解^[40]是半无限条件下式(15)的解析解, van Genuchten解^[41]是式(15)在有限土层厚度

表 2 常用竖向隔离墙优缺点

隔离墙类型	优点	缺点
土-膨润土系	①抗渗性能好,渗透系数可达 10^{-9} cm/s;②工程造价低;③施工简便、易操作、工期短,可满足临时性抢修项目;④可与其他保护屏障联合使用,如污染场地顶部覆盖层等;⑤施工深度大,可达60 m。	①开挖过程中废弃土难以妥善处理;②难以保证墙体底部有效嵌固;③阻滞能力可能随时间削弱,干湿循环及冻容循环导致墙体开裂;④受场地条件限制,一般用于平地。
水泥系搅拌桩连续墙	①原位搅拌、不需土层;②施工方便、技术成熟;③造价适中;④有效提高抗渗性能,渗透系数 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ cm/s;⑤可提高土体强度,强度高于膨润土系隔离墙。	①桩垂直度、连续性控制要求高;②施工深度受限制,一般小于20 m;③需明确水泥与污染物的相容性;④水泥在收缩、温差变化及干湿循环等因素下易产生开裂,影响长期稳定性。
水泥系旋喷桩墙	①适用于大多数地层类型;②高压旋喷桩强度高、厚度大;③可有效提高抗渗性能,渗透系数 10^{-7} cm/s;④深度可达到45~60 m。	①墙体垂直度控制要求高;②水泥与污染物化学相容性会影响长期稳定性;③工程造价高。

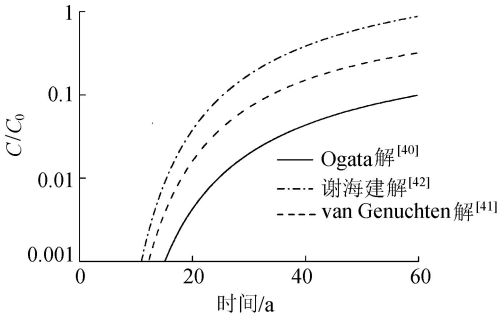
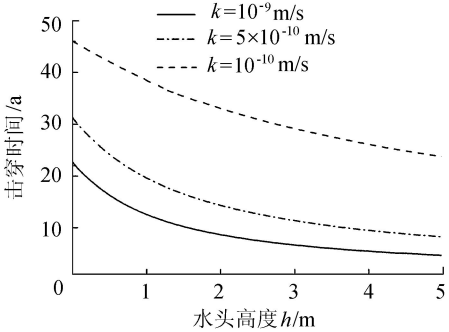


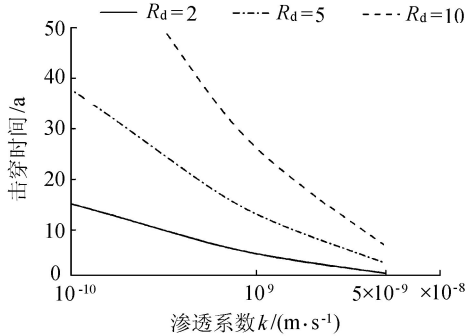
图 7 运移时间与浓度关系

下的解析解,谢海建解^[42]是式(15)在分段吸附模式下的解析解(此时 $L=0.6\text{ m}$, $h=0\text{ m}$, $D_d=3.5\times 10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$, $R_d=10$, $C_m/C_0=0.1$, $n=0.6$,其中 h 为水头高度, C_m 为临界浓度, n 为土层孔隙率)。可见边界条件及吸附模式对击穿时间影响很大,原因在于



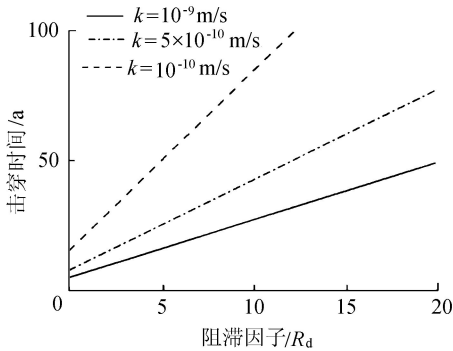
(a) 水头高度与击穿时间关系

($L=0.6\text{ m}$, $D_h=2.0\times 10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$, $R_d=5$, $n=0.6$)



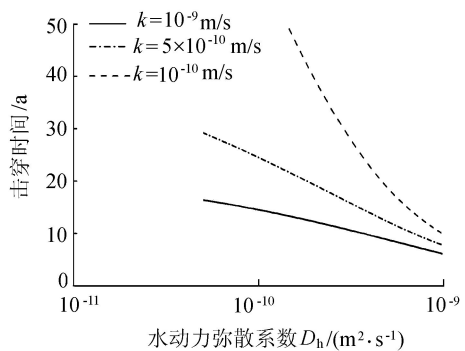
(b) 渗透系数与击穿时间关系

($h=1\text{ m}$, $L=0.6\text{ m}$, $D_h=2.0\times 10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$, $n=0.6$)



(c) 阻滞因子与击穿时间关系

($h=1\text{ m}$, $L=0.6\text{ m}$, $D_h=2.0\times 10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$, $n=0.6$)



(d) 水力弥散系数与击穿时间关系

($h=1\text{ m}$, $L=0.6\text{ m}$, $R_d=5$, $n=0.6$)

图 8 击穿时间影响因素分析^[44]

变化对击穿时间影响较大。因此要增加防污屏障的服役寿命,可以降低屏障材料渗透系数,增大屏障材料阻滞因子,同时采取降水措施降低屏障内侧水头高度。

受水利工程防渗墙设计和施工影响,目前我国大多采用塑性混凝土作为竖向屏障墙体材料。塑性混凝土具有抗渗性好、强度高、抗水力劈裂性能好的特点,但费用相对较高。也有采用水泥系搅拌桩墙、注浆帷幕作为竖向屏障,但由于成墙质量难以控制,渗透系数大,难以满足服役寿命要求^[44]。土-膨润土系隔离墙由于防渗性能、化学相容性好及造价经济等,在国外使用普遍^[43,45]。潘倩等^[46]在研究土-膨润土工程特性及防污性能时,针对粉土-膨润土隔离墙材料,选取了不同的膨润土配比(2%~6%)进行压缩机渗透特性试验。笔者研究了黄土改性土-膨润土对铅的吸附特性,并考虑黄土添加量、铅溶液初始浓度、初始 pH 值以及土-溶液作用时间对吸附的影响^[47-48]。目前,浙江大学已在江苏省靖江垃圾填埋场首次进行了土-膨润土的现场试验,该技术在我国具有广阔的应用前景。

6 结语及研究展望

a. 总结了基于击穿时间的防污屏障评价方法,该方法综合考虑了屏障材料特性(渗透、扩散、吸附和降解等)和其服役环境的污染负荷,包括污染物浓度、环境温度和污染物浓度等。

b. 综述了污染物通过黏土屏障和复合屏障等不同屏障结构运移的解析解,以期在不同环境条件下防污屏障服役寿命的评价提供可靠的方法。这些解析模型包括:考虑最大吸附量的污染物在黏土屏障扩散模型、考虑有机污染物降解的复合屏障污染物扩散模型和综合考虑对流、扩散、吸附和降解的复合屏障污染物运移模型,能够同时考虑污染物在土工膜缺陷的渗漏和污染物在完整膜的扩散。应进一步研究多组分污染物如多种重金属之间的竞争吸附、多种有机污染物之间的扩散和重金属与有机污染物之间的复合污染对屏障服役性能的影响。

c. 填埋场水头、温度、黏性土的渗透、吸附、降解特性对衬垫系统的防污性能具有重要的影响。高水头作用下屏障的服役性能受对流作用影响较大,低水头时污染物的吸附和降解作用影响更明显。因此,通过建造全寿命服役的填埋场导排层以有效控制渗沥液水头至关重要;同时,增强衬垫层的吸附性能是提高屏障服役寿命的重要途径。水头控制结合吸附阻滞能力的增强是全寿命服役屏障技术的发展趋势。

d. 超重力离心模型试验是评价屏障系统长期性能的一个开创性的工具,离心机内几小时的试验时间能模拟现场几年甚至几十年的运移过程,该方法能较为有效地模拟水头差产生的对流作用和浓度梯度产生的扩散作用;但污染物在黏土中吸附和机械弥散作用的相似性问题需要进一步研究。另外,填埋场复合屏障长期性能的超重力离心试验需要进一步开展,合理选择相似性材料是目前研究的热点和难点。

e. 总结发现通过添加黄土能有效改善屏障材料的吸附性能,其原因是黄土独特的微观结构和矿物成分能有效吸附重金属污染物,从而提高其击穿时间和服役寿命。建议下一步研究以黄土作为屏障材料研究黄土-膨润土等复合材料的长期性能,以推广到实际工程。

f. 防污屏障的服役环境十分复杂,除了水力、化学场和温度场外,还受到填埋体产生的高应力场的影响(如不均匀沉降导致的屏障开裂和斜坡土工膜拉裂等问题),下一步应综合考虑防污屏障的力学性能和防污性能,提出基于性能的防污屏障设计和施工方法。

参考文献:

[1] 钱学德,施建勇,刘晓东. 现代卫生填埋场的设计与施工[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社,2011.

[2] KJELDSEN P, BARLAZ M A, ROOKER A P, et al. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review[J]. Critical reviews in Environmental Science and Technology, 2002, 32(4): 297-336.

[3] 郑曼英,李丽桃,邢益和,等. 垃圾渗沥液的污染特性及其控制[J]. 环境卫生工程, 1997(2): 7-11. (ZHENG Manying, LI Litao, XING Yihe, et al. Pollution characteristic and controlled method of domestic waste leachate[J]. Chinese Journal of Environmental Sanitation Engineering, 1997(2): 7-11. (in Chinese))

[4] PIRBAZARI M, RAVINDRAN V, BADRIYHA B N, et al. Hybrid membrane filtration process for leachate treatment[J]. Water Research, 1996, 30(11): 2691-2706.

[5] 王翊虹,赵勇胜. 北京北天堂地区城市垃圾填埋对地下水的污染[J]. 水文地质工程地质, 2002, 29(6): 45-47. (WANG Yihong, ZHAO Yongsheng. Pollution of municipal landfill to groundwater in Beitiantang, Beijing[J]. Chinese Journal of Hydrogeology and Engineering Geology, 2002, 29(6): 45-47. (in Chinese))

[6] MITCHELL J K, ALVAREZ-COHEN L, ATEKWANA E, et al. Assessment of the performance of engineered waste containment barriers[M]. Washington D. C.: National Academies Press, 2007.

[7] DU Y J, SHEN S L, LIU S Y, et al. Contaminant mitigation

- performance of Chinese standard municipal solid waste landfill liner system[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, 27(3): 232-239.
- [8] CJJ17—2004 生活垃圾卫生填埋技术规范[S].
- [9] CJJ113—2007 生活垃圾卫生填埋场防渗系统工程技术规范[S].
- [10] GB16889—2008 生活垃圾填埋污染控制标准[S].
- [11] 钱学德,郭志平. 填埋场复合衬垫系统[J]. *水利水电科技进展*, 1997, 17(5): 64-68. (QIAN Xuède, GUO Zhiping. The composite liner systems of landfill [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 1997, 17(5): 64-68. (in Chinese))
- [12] CHEN Y M, WANG Y Z, XIE H J. Breakthrough time-based design of landfill composite liners[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2015, 43: 196-206.
- [13] XIE H J, CHEN Y M, LOU Z H, et al. An analytical solution to contaminant diffusion in semi-infinite clayey soils with piecewise linear adsorption[J]. *Chemosphere*, 2011, 85(8): 1248-1255.
- [14] CHEN Y M, XIE H J, KE H, et al. An analytical solution of contaminant diffusion through multi-layered media and its applications [J]. *Environmental Geology*, 2009, 58: 1083-1094.
- [15] XIE H J, LOU Z H, CHEN Y M, et al. An analytical solution to organic contaminant diffusion through composite liners considering the effect of degradation[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2013, 36: 10-18.
- [16] 谢海建,陈云敏,楼章华. 污染物通过有缺陷膜复合衬垫的一维运移解析解[J]. *中国科学: 科学技术*, 2010, 40(5): 486-495. (XIE Haijian, CHEN Yunmin, LOU Zhanghua. An analytical solution to contaminant transport through composite liners with geomembrane defects [J]. *Science China: Technological Science*, 2010, 40(5): 486-495. (in Chinese))
- [17] 谢海建,楼章华,陈云敏,等. 污染物通过 GCL/AL 防渗层的对流-弥散解析解[J]. *科学通报*, 2010, 55(21): 2148-2155. (XIE Haijian, LOU Zhanghua, CHEN Yunmin, et al. An analytical solution to contaminant advection and dispersion through a GCL/AL liner system [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(21): 2148-2155. (in Chinese))
- [18] XIE H J, JIANG Y S, ZHANG C H, et al. Ana analytical model for volatile organic compound transport through a composite liner consisting of a geomembrane, a GCL and a soil liner [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22: 2824-2836.
- [19] XIE H J, ZHANG C H, SEDIGHI M, et al. An analytical model for diffusion of chemicals under thermal effects in semi-infinite porous media [J]. *Computers and Geotechnics*, 2015, 69: 329-337.
- [20] ROEHL K E, CZURDA K. Diffusion and solid speciation of Cd and Pb in clay liners[J]. *Applied Clay Science*, 1998, 12: 387-402.
- [21] ROSANNE R, PASZKUTA M, TEVISSSEN E, et al. Thermotransport in compact clays [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2003, 267(1): 194-203.
- [22] 陈云敏,韩超,凌道盛,等. ZJU400 离心机研制及其振动台性能评价[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(12): 1887-1894. (CHEN Yunmin, HAN Chao, LING Daosheng, et al. Development of geotechnical centrifuge ZJU400 and performance assessment of its shaking table system [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(12): 1887-1894. (in Chinese))
- [23] TAYLOR R N. *Geotechnical centrifuge technology* [M]. London: Blackie Academic & Professional, 1995.
- [24] McKINLEY J D, PRICE B A, LYNCH R J, et al. Centrifuge modelling of the transport of a pulse of two contaminants through a clay layer [J]. *Geotechnique*, 1998, 48(3): 421-425.
- [25] KUMAR P R. An experimental methodology for modeling contaminant transport through geotechnical centrifuge models [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, 117: 215-233.
- [26] KUMAR P R. Scaling laws and experimental modeling of contaminant transport mechanism through soils in a geotechnical centrifuge [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2007, 25: 581-590.
- [27] TIMMS W A, HENDRY M J. Long-term reactive solute transport in an aquitard using a centrifuge model [J]. *Ground Water*, 2008, 46(4): 616-628.
- [28] 胡黎明,濮家骊,劳敏慈,等. LNAPLs 在非饱和土中迁移的离心试验模拟[J]. *岩土工程学报*, 2002, 24(6): 690-694. (HU Liming, PU Jialiu, LAO Minci, et al. Centrifuge modeling of LNAPLs migration in unsaturated soil [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(6): 690-694. (in Chinese))
- [29] 张建红,吕禾,王文成. 非饱和土中重金属迁移的离心模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2006, 27(11): 1885-1890. (ZHANG Jianhong, LU He, WANG Wencheng. Centrifuge modeling of heavy metal migration in unsaturated soil [J]. *Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(11): 1885-1890. (in Chinese))
- [30] 詹良通,曾兴,李育超,等. 高水头条件下氯离子击穿高岭土衬垫的离心模型试验研究[J]. *长江科学院院报*, 2012, 29(2): 83-89. (ZHAN Liangtong, ZENG Xing, LI Yuchao, et al. Centrifuge modeling for chloridion breaking through kaolin clay liner with high hydraulic head [J]. *Chinese Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2012, 29(2): 83-89. (in Chinese))
- [31] ZHAN L T, GUAN C, XIE H J, et al. Vertical migration of leachate pollutants in clayey soils beneath an uncontrolled landfill at Huainan, China: a field and theoretical investigation[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 470/471: 290-298.

- [32] 刘松玉,詹良通,胡黎明,等. 环境岩土工程研究进展 [C]//中国土木工程学会第十二届土力学及岩土工程学术大会论文集. 上海:同济大学,2015:153-179.
- [33] DU Y J, WEI M L, REDDY K R, et al. New phosphate-based binder for stabilization of soils contaminated with heavy metals: leaching, strength and microstructure characterization [J]. Journal of Environmental Management, 2014, 146: 179-188.
- [34] FILZ G M, ADAMS T, DAVIDSON R R. Stability of long trenches in sand supported by bentonite-water slurry [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(9): 915-921.
- [35] LI Y C, PAN Q, CHEN Y M. Stability of slurry trenches with an inclined ground surface [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(9): 1617-1619.
- [36] BENNETT T A, MAHER A, JAFARI F. Piezocone evaluation of a shallow soil-bentonite slurry wall [C]//GeoFrontiers 2005: Waste Containment and Remediation. Austin, Texas: [s. n.], 2005.
- [37] 陈永贵,叶为民,王琼,等. 砂-膨润土混合屏障材料渗透性影响因素研究 [J]. 工程地质学报, 2010, 18(3): 357-362. (CHEN Yonggui, YE Weimin, WANG Qiong, et al. Influence factors of sand-bentonite mixtures on hydraulic conductivity [J]. Chinese Journal of Engineering Geology, 2010, 18(3): 357-362. (in Chinese))
- [38] 徐超,黄亮,邢皓枫. 水泥-膨润土泥浆配比对防渗墙渗透性能的影响 [J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 422-426. (XU Chao, HUANG Liang, XING Haofeng. Influence of cement-bentonite slurry mixing ratio on permeability of cutoff wall [J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 422-426. (in Chinese))
- [39] 詹良通,刘伟,曾兴,等. 垃圾填埋场污染物击穿竖向防渗帷幕时间的影响因素分析及设计厚度的简化计算公式 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11): 1988-1996. (ZHAN Liangtong, LIU Wei, ZENG Xing, et al. Parametric study on breakthrough time of vertical cutoff wall for MSW landfills and simplified design formula for wall thickness [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(11): 1988-1996. (in Chinese))
- [40] OGATA A, BANKS R B. A solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media [R]. Washington D. C.: U. S. Government Printing Office, 1961.
- [41] van GENUCHTEN G M T. Analytical solutions for chemical transport with simultaneous adsorption, zero-order production, and first order decay [J]. Journal of Hydrology, 1981, 49(3/4): 213-233.
- [42] XIE H J, CHEN Y M, LOU Z H, et al. An analytical solution to contaminant diffusion in semi-infinite clayey soils with piecewise linear adsorption [J]. Chemosphere, 2011, 85(8): 1248-1255.
- [43] SHARMA H D, REDDY K R. Geoenvironmental engineering: site remediation, waste containment, and emerging waste management technologies [M]. New York: Wiley, 2004.
- [44] 陈云敏. 环境土工基本理论与工程应用 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 1-46. (CHEN Yunmin. A fundamental theory of environmental geotechnics and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 1-46. (in Chinese))
- [45] LI Y C, PAN Q, CLEALL P J, et al. Stability analysis of slurry trenches in similar layered soils [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(12): 1-6.
- [46] 潘倩,李育超,陈云敏,等. 土-膨润土工程特性及其对隔离墙防污性能影响 [C]//第二届全国岩土多场相互作用及环境土工学术研讨会. 上海:同济大学,2014.
- [47] 陈云敏,王誉泽,谢海建,等. 黄土-粉土混合土对 Pb 的静平衡和动态吸附特性 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(7): 1185-1194. (CHEN Yunmin, WANG Yuze, XIE Haijian, et al. Adsorption characteristics of loess-modified natural silt towards Pb(II): equilibrium and kinetic tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(7): 1185-1194. (in Chinese))
- [48] WANG Y Z, XIE H J, CHEN Y M, et al. Pb(II) adsorption characteristics of loess modified soil-bentonite: equilibrium and non-equilibrium test [C]//7th International congress on environmental Geotechnics. Melbourne: [s. n.], 2014: 605-612.
(收稿日期: 2015-08-31 编辑: 骆超)

· 简讯 ·

祝贺本刊编委陈云敏教授当选中国科学院院士

2015 年 12 月 7 日,中国科学院院士增选结果公布。本刊编委陈云敏教授荣登喜榜,当选为中国科学院技术科学部院士。陈云敏院士曾获国家杰出青年科学基金,入选教育部长江学者特聘教授,为 973 计划项目首席科学家。现任浙江大学岩土工程研究所所长,软弱土与环境土工教育部重点实验室主任,浙江大学工学部主任。作为土力学与岩土工程专家,长期从事软弱土静动力固结、降解固结理论和灾害防控技术的研究,发表学术论文 341 篇,其中 SCI 收录论文 99 篇、美国土木工程师协会(ASCE)会刊论文 18 篇;获授权国家发明专利 25 项;主编国家行业标准《生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范》(CJJ176—2012)。研究成果获国家科技进步二等奖 3 项、省部级科技进步一等奖 5 项。作为《水利水电科技进展》编委,在期刊稿件学术质量把关与期刊学术水平提升等方面亦作出了重要贡献。

(本刊编辑部供稿)