

DOI: 10.11779/CJGE201604005

垃圾填埋场渗沥液击穿防渗系统的指示污染物研究

朱伟¹, 舒实^{2,3}, 王升位⁴, 徐浩青⁴, 范惜辉⁴

(1. 河海大学环境学院, 江苏南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098; 3. 江苏省水利科学研究院, 江苏南京 210017; 4. 河海大学土木与交通学院, 江苏南京 210098)

摘要: 中国垃圾填埋场渗沥液中的污染物种类繁多, 成分复杂, 污染物击穿填埋场防渗系统, 造成地下水以及土壤污染已成为填埋场环境安全问题中最为关注的问题之一。目前以什么标准判断击穿, 以何种污染物作为指示污染物计算击穿时间并评价防渗系统的防污性能尚不明确。针对这一问题, 以中国 6 个典型填埋场内代表性污染物的平均浓度为初始浓度, 以中国相关环境标准中规定的各类污染物极限浓度作为污染浓度, 建立污染物在复合防渗系统中的一维对流-弥散有限元模型。通过计算各类污染物在填埋场防渗系统中的击穿规律和击穿时间发现, 相比重金属和持久性有机污染物, 有机污染物(COD)最早击穿防渗系统, 有机污染物(COD)可作为判定击穿的指示污染物, 击穿 HDPE 土工膜单层和双层复合垫层的时间分别为 84.2 a 和 122.6 a; 而击穿时间主要受污染物的初始浓度、规定的污染浓度和污染物的迁移弥散参数共同影响。这一结果可为填埋场防渗系统击穿时间的计算和防污性能的评价提供参考。

关键词: 垃圾填埋场; 渗沥液; 防渗系统; 击穿时间; 指示污染物

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)04-0619-08

作者简介: 朱伟(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事环境岩土、水环境等方面的研究与教学工作。E-mail: zhuweiteam.hhu@gmail.com。

Investigation of indicating pollutant for landfill leachate breaking through anti-seepage system

ZHU Wei¹, SHU Shi^{2,3}, WANG Sheng-wei⁴, XU Hao-qing⁴, FAN Xi-hui⁴

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Jiangsu Province Hydraulic Research Institute, Nanjing 210017, China; 4. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The leachate of the landfills in China consists of different pollutants and has complex composition. Breaking through anti-seepage system and contaminating the underground water and soil by pollutants have become the concern of environmental safety for landfills. However, the criteria of breakthrough and the indicating pollutant used to calculate the time of breakthrough and evaluate the performance of the anti-seepage system are not clear. To solve this problem, based on the concentration of average pollutants in six typical landfills in China and the limit concentrations for different pollutants in environmental standards, one-dimensional advection-dispersion finite element models are established. Compared with heavy metals and persistent organic pollutants (POPs), COD breaks through the anti-seepage system first, and it can be regarded as the indicating pollutant to determine the breakthrough time. The time of breaking through the single and double HDPE composite liners is 84.2 years and 122.6 years. The breakthrough time is influenced by the initial pollutant concentration, limit pollutant concentration and parameters of pollutant migration together. The results can be a reference for calculating the breakthrough time and evaluating the performance of the anti-seepage system.

Key words: landfill; leachate; anti-seepage system; breakthrough time; indicating pollutant

0 引言

目前中国城市生活垃圾的年产量达 2.4 亿吨, 数量巨大, 而卫生填埋仍然是中国处理生活垃圾的主要手段^[1-3]。在垃圾填埋场的环境安全问题中垃圾渗沥液击穿防渗系统, 造成地下水以及土壤污染是最为重

要的问题之一。渗沥液击穿防渗屏障, 是渗沥液中污

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2012CB719804); 国家科技重大专项(2013ZX07113001); 科技基础设施建设计划—国家工程技术研究中心培育点项目(BM2013013)
收稿日期: 2015-03-26

染物伴随渗沥液的渗透发生迁移—弥散现象穿越由土工膜与黏土垫层构成的复合防渗系统并产生环境危害的过程。但是渗沥液中的污染物成分非常复杂,参考水污染中污染物的类型划分可以将其分为重金属、有机物和持久性有机物 3 大类^[4-6]。3 大类污染物在渗沥液中的浓度差异非常之大: 重金属 (Cu、Zn、Pb、Cd 等) 的浓度范围一般在 0.01~2.00 mg/L 之间, 且不同重金属浓度差异很大^[7-8]; 有机污染物 (COD) 浓度则在 8000~20000 mg/L 之间^[9-10]; 持久性有机物 (PAHs、DDT、PCBs 等) 浓度在 0.01~0.10 mg/L 范围之内^[11]。除浓度之外, 不同污染物的迁移—弥散特性, 尤其是化学扩散特性不同, 无机离子在黏土中的有效扩散系数在 $1\sim15\times10^{-10}$ m²/s 之间, 苯、甲苯等有机污染物的有效扩散系数在 $0.1\sim9\times10^{-10}$ m²/s 之间^[10]; 而无机物在土工膜上的扩散要比有机物慢得多, 比如氯化物在土工膜中的扩散系数要比二氯甲烷低 2~3 个数量级^[12-13]。另外, 不同污染物的致毒浓度又有很大的差异^[14], 不同污染物产生环境危害的浓度不同, 尽管渗沥液中有机污染物 (COD) 浓度很高, 但其致毒的浓度也高, 而含量少的污染物又会在微量的情况下致毒^[6], 所以难以判断污染物穿过防渗系统这一“屏障”后哪一种会最先达到危害的浓度。因此, 在对垃圾填埋场防渗系统进行安全评价时以什么标准判断击穿, 使用何种污染物、依据什么样的条件进行击穿计算尚不明确。

国内外很多学者已对污染物击穿填埋场防渗系统的问题开展了研究。刘庭发等^[15]针对中国填埋场中常用的 4 种典型防渗衬垫结构, 选择镉和苯作为污染物的代表, 建立数值模型对垫层的防污性能进行对比研究。Foose^[16]使用镉和二氯甲苯进行迁移—弥散的稳态计算, 在确定击穿时以美国 MCLs 标准进行判断。谢海建等^[17]使用镉和苯进行一维迁移—弥散解析解计算, 在确定击穿时以美国饮用水规范中的污染物浓度进行判断。而詹良通等^[18]则使用氯离子离心机模拟了高水头条件下击穿污染物的迁移—弥散过程, 在确定击穿时使用了初始浓度的 10% 进行判断。已有研究往往选择一两种污染物进行击穿时间的计算, 来比较不同防渗系统的防污性能, 具有一定的工程意义。但是实际的渗沥液中是多种污染物共同存在的, 在众多污染物同时穿越防渗系统进入地下环境时, 只要有一种污染物最早达到致毒浓度, 地下环境即被污染, 可以认为防污屏障已经被击穿, 而这一率先产生危害的污染物可以作为判断屏障击穿的“指示污染物”。如能建立统一的判断击穿的标准并找到这种统一的指示污染物, 才能对防渗系统的击穿问题进行统一的评价。

针对以上问题, 本文实测了中国几个典型垃圾填埋场渗沥液中的污染物成分和初始浓度, 讨论了各种污染物击穿浓度的判断标准, 针对中国规范规定的防渗结构建立了一维对流—弥散计算模型, 通过数值模拟得出各类污染物达到危害浓度的时间, 探讨了适宜中国垃圾填埋场渗沥液的指示污染物和污染标准, 进一步探讨了两种标准防渗系统的击穿时间以及影响击穿时间的因素, 为填埋场防渗系统防污性能的评价提供参考。

1 污染物的初始浓度和环境标准

对杭州、南京、苏州、上海、西安、深圳六个城市的典型垃圾填埋场渗沥液进行了采样, 按照国家标准《生活饮用水标准检验方法》GB 5750—2006^[19]对渗沥液样品进行检测, 渗沥液污染物种类和初始浓度见表 1。从表 1 中可以看出, 各填埋场渗沥液中有机污染物 (COD) 的浓度最高, 范围在 14635.97~20792.17 mg/L 之间。而重金属污染物中, Zn 的浓度较高, 一般比其他重金属高几倍甚至几百倍, 而 Cd 的浓度最低。本次采样未能对微量有机物进行实测, 故参考文献[11]中实测的 DDT 浓度。以此得到渗沥液中各类污染物的平均浓度, 见表 2。

另外, 使用什么标准判断污染物的浓度达到危害, 要根据实际污染危害的状况进行选取。渗沥液击穿防渗屏障后首先污染地下水, 同时也产生土壤污染。从地下水的流动性和使用的广泛性出发以地下水污染作为判断标准更为合理。《地下水环境质量标准》GB/T 14848—93^[20]中制定了重金属和持久性有机物的污染标准, 其中地下水 3 类水标准是以人体健康基准值为依据, 适用于生活饮用水水源, 所以选择地下水 3 类水标准作为这两类污染物的污染浓度, 在判断击穿时使用。GB/T 14848—93 中没有 COD 的污染标准, 但从地下水污染危害的途径考虑, 地下水作为饮用水水源使用时, 一旦遭受污染最易引起环境危害, 所以可以参考生活饮用水水源地 COD 的污染标准。而生活饮用水水源地的环境质量标准一般参照《地表水环境质量标准》GB 3838—2002^[21]III 类水标准, 这个标准明确规定了 COD 的污染浓度, 可以作为地下水污染的参照。这样就可以得到主要几种污染物的污染浓度(见表 2), 也就是击穿浓度, 可以作为判断击穿的标准进行使用。由表 2 也可以看出, 以污染物在渗沥液中的平均浓度和污染浓度进行比较, 各种污染物的超标倍数差距很大, 有机污染物 (COD) 超标倍数可达 900, DDT 超标倍数为 15, 而 Cu 仅超标 2.56 倍, 不同的重金属超标倍率也出现很大差异。

表1 6个填埋场渗沥液中污染物成分及浓度

Table 1 Composition and concentration of leachate pollutants in six landfills

成分	杭州	南京	苏州	上海	西安	深圳
COD _{cr} /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	20792.17	16725.91	15442.64	19830.58	14635.97	20573.98
Ni/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.66	0.16	0.31	0.39	0.50	0.91
Cu/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	4.08	0.55	0.47	1.48	0.046	8.73
Zn/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	16.45	0.00	1.80	4.49	3.26	88.01
Pb/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.27	0.11	0.046	0.21	0.033	0.98
Cr/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.47	0.30	0.23	0.40	0.42	1.31
Cd/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.042	0.017	0.017	0.017	0.0042	0.34
As/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.54	0.28	0.092	0.37	0.092	1.54

表2 污染物平均浓度和污染浓度

Table 2 Mean concentration and pollution concentration of pollutants

参数	Cu	Zn	Cd	COD	DDT
平均浓度/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	2.56	19.00	0.073	18000.21	0.015
污染浓度/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})^{[20-21]}$	1.00	1.00	0.01	20.00	0.001
超标倍数	2.56	19	7.3	900	15

2 污染物击穿过程的数值计算

2.1 计算程序和模型建立

本文采用西垣诚将饱和-非饱和渗流与溶质迁移弥散耦合的计算程序^[22], 这一计算方法已在较多的地下水污染实际应用中得到验证。由于 HDPE 土工膜复合防渗系统已广泛应用于中国垃圾填埋场, 本文根据《生活垃圾卫生填埋场防渗系统工程技术规范》CJJ113—2007^[23]中规定的 HDPE 土工膜单层防渗衬垫系统和双层防渗衬垫系统建立一维有限元计算模型, 见图 1。初始地下水位线位于压实黏土层底部以下 1.0 m 处, 污染物出渗浓度的检测点 P 也位于这一位置。计算参数如表 3 所示。由于涉及到防渗层和地下水位之间非饱和带的计算, 考虑了非饱和的水分特征曲线和渗透系数^[24-26]。地层的弥散参数参考詹良通等文献[27]的数据, 不同污染物化学扩散系数和阻滞因子参考谢海建、席永慧等的相关研究^[10, 28-29], 在黏土中各种污染物的化学扩散系数比较接近, 但在土工膜中有机污染物的扩散系数采用了无机污染物的 2~3 倍; 在土工膜和导排层中各污染物阻滞因子为 1.0, 表示忽略土工膜和导排层对污染物的吸附。

2.2 初始条件与边界条件

如表 2 所示, 将调查的渗沥液中各污染物的平均浓度设置为初始浓度, 地层中的初始浓度为 0。由于填埋垃圾中的有机物会随着时间不断降解, 垃圾渗沥液中的有机污染物浓度随之降低, 但是在填埋场运行期, 垃圾不断进入填埋场, 即使之前填埋垃圾产生的

渗沥液中有机污染物浓度有所降低, 但是之后填埋的垃圾产生的渗沥液又会使有机污染物浓度上升, 因此, 假设有机污染物 (COD) 浓度在运行期不变。经调查, 中国填埋场设计运行期在 15 a 左右^[30-31], 有机污染物 (COD) 浓度在填埋场封场后头三年急剧下降^[32], 到 20 a 降低至 1000 mg/L, 之后保持不变, 如图 2 所示。而重金属与持久性有机污染物较为稳定, 假设浓度始终不变。

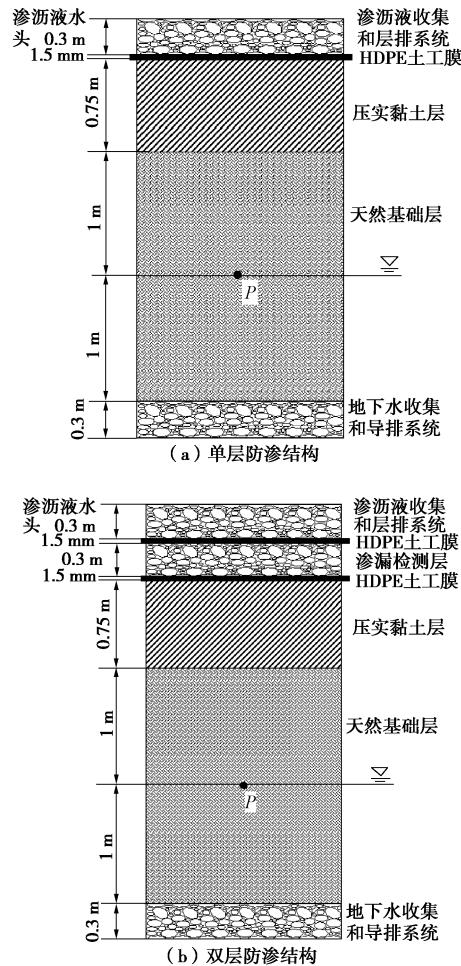


图1 两种 HDPE 土工膜复合防渗系统一维模型示意图

Fig. 1 One-dimensional model of composite anti-seepage system with two kinds of HDPE geomembranes

表3 防渗系统模型参数的取值

Table 3 Parameters of mathematical model for anti-seepage system

材料名称	HDPE 土压密黏土天然基础	导排系统及工膜层	层	渗漏检测层
厚度/m	0.0015	0.75	2.00	0.30
渗透系数/(m·s ⁻¹)	1.0×10 ⁻¹⁴	1.0×10 ⁻⁹	1.0×10 ⁻⁹	1.0×10 ⁻³
孔隙率/%	10.0	40.0	54.1	33.0
α/m^3	5.75	1.0	1.0	5.75
VG-模型	n	1.6	1.2	1.2
参数	θ_s	0.541	0.541	0.541
	θ_r	0.0	0.2	0.2
纵向弥散度/m	0.1	1.0	1.0	1.0
横向弥散度/m	0.01	0.1	0.1	0.1
Cu	7.9×10^{-5}	7.9	7.9	7.9
Zn	3.3×10^{-5}	3.3	3.3	3.3
扩散系数/ $(10^{-10} m^2 \cdot s^{-1})$	Cd 6.0×10^{-5}	8.9	8.9	8.9
COD	2.5×10^{-3}	2.5	2.5	2.5
DDT	2.5×10^{-3}	2.5	2.5	2.5
Cu	1.0	3.3	3.3	1.0
Zn	1.0	3.0	3.0	1.0
阻滞因子	Cd	1.0	2.0	2.0
	COD	1.0	3.3	3.3
	DDT	1.0	3.3	1.0

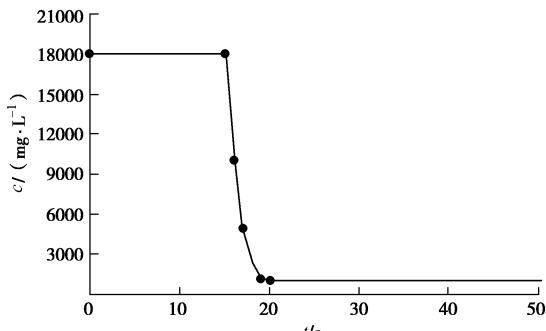


图2 渗沥液中有机污染物(COD)浓度变化趋势

Fig. 2 Trend in COD values in leachate

初始地下水位线位于压实黏土层底面下1 m处，即地下水位位于模型底部以上1.3 m位置。考虑压实黏土施工时的含水状态，取初始饱和度 S_r 为96%进行计算。

按照建设部《生活垃圾卫生填埋技术规范》CJJ 17—2004 规范^[33]的要求在填埋场运行时渗沥液水头不应大于0.3 m，因此以 HDPE 土工膜顶部具有固定水头0.3 m进行计算，底边为半无限边界，保持水头1.3 m。

3 计算结果

3.1 污染物迁移弥散过程

按照渗沥液水头维持在0.3 m位置进行长时间尺度的非稳定流计算，先对污染物迁移弥散规律进行确认。以重金属 Cd 在 HDPE 土工膜单层防渗系统一维模型中的浓度分布随时间的变化规律为例，如图3。

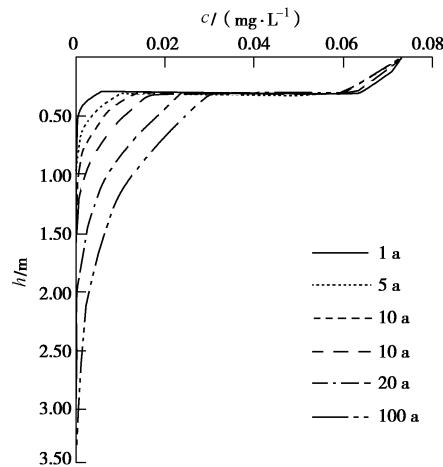


图3 Cd浓度分布随时间变化规律

Fig. 3 Variation of concentration distribution of Cd with time

由于假设 Cd 浓度在渗沥中的浓度始终保持不变，Cd 浓度在模型顶部始终保持 0.073 mg/L；0.3 m 处为 HDPE 土工膜，从图3可以看出，HDPE 土工膜以上，渗沥液收集及导排层中的 Cd 逐渐向下扩散导致浓度有所降低，而 HDPE 土工膜以下的压实黏土层和天然基础层中 Cd 浓度增加缓慢，至 100 a，压实黏土中 Cd 浓度最大才达到 0.033 mg/L，说明 HDPE 土工膜对污染物迁移起到了很好的阻隔作用。图3表明计算结果有一定的合理性。

3.2 重金属污染物的击穿过程与指示性重金属

图4为 Cu、Zn、Cd 3 种重金属污染物在 HDPE 土工膜单层防渗结构中 P 点（见图1）的出渗浓度随时间变化曲线，即击穿曲线。3 种重金属的出渗浓度都呈现出开始阶段随时间缓慢增加，一段时间之后击穿曲线出现拐点，随后出渗浓度呈线性增加的规律。

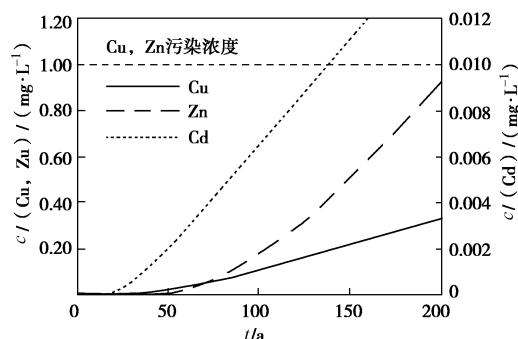


图4 重金属 Cu、Zn 和 Cd 在单层防渗结构中的击穿曲线

Fig. 4 Breakthrough curves of Cu, Zn and Cd in single composite liner

由图4中可以看出, 重金属Zn的击穿曲线出现拐点的时间最晚, 这是因为其化学扩散系数在这3种重金属中最低, 但是由于Zn初始浓度最大, 其浓度上升的速率最快。Cu、Zn、Cd3种重金属规定的污染浓度分别为1.00, 1.00和0.01 mg/L, 由击穿曲线得到重金属Cd在单层防渗结构中P点达到污染浓度的时间, 即击穿时间分别为137.0 a, 而重金属Cu和Zn均未达到污染浓度, 说明3种重金属中Cd最早击穿单层防渗结构, Cd可被认为是指示性重金属污染物。值得注意的是, 虽然Cu初始浓度较高, 但其污染浓度也很高, 只超标2.56倍, 超标倍数最小, 阻滞因子也最大, 从击穿曲线趋势来看其击穿时间最长。而虽然Zn的初始浓度超标19倍, Cd只超标7.3倍, 但是Cd在黏土中的扩散系数是Zn的2.7倍, 在土工膜中的扩散系数是Zn的1.8倍, 且Cd的阻滞因子比Zn小, 导致Cd比Zn早击穿防渗垫层。由此也可以看出, 污染物的击穿时间受到污染物的初始浓度、规定的污染浓度、化学扩散系数及阻滞因子共同影响。

再对比3种重金属污染物在HDPE土工膜双层防渗结构中的出渗浓度随时间变化曲线, 如图5。从图中可以看出, 3种重金属在P点的浓度在200 a内上升幅度均不大, 浓度上升的速率不高, 其中Zn的浓度上升最快, 这是由于Zn的初始浓度最高, 导致其浓度梯度最大。3条击穿曲线在200 a内均未达到污染浓度, 即双层防渗结构在200 a内并未被3种重金属击穿。这也证明了双层防渗结构的防污性能高于单层防渗结构。

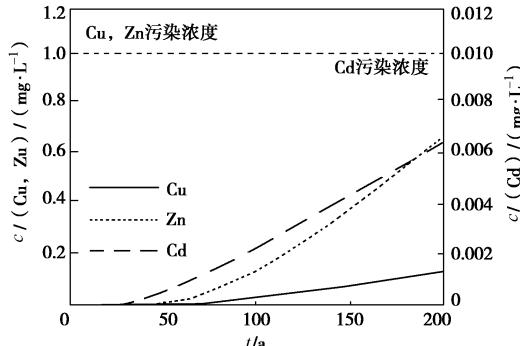


图5 重金属Cu、Zn和Cd在双层防渗结构中的击穿曲线

Fig. 5 Breakthrough curves of Cu, Zn and Cd in double composite liners

3.3 有机污染物(COD)的击穿过程

通过计算分别得到有机污染物(COD)在HDPE土工膜单层防渗结构和双层防渗结构中的击穿曲线, 如图6所示, 有机污染物(COD)在HDPE土工膜单层和双层防渗结构中的击穿曲线规律与重金属类似, 有机污染物(COD)在HDPE土工膜单层防渗结构中

的击穿曲线在50 a左右出现拐点, 而在双层防渗结构中的击穿曲线拐点并不明显, 有机污染物(COD)在HDPE土工膜单层防渗结构中P点浓度上升速率明显高于在双层防渗结构中。有机污染物(COD)在两种防渗结构中的击穿时间分别是84.2 a和122.6 a, 即使考虑渗沥液中有机污染物(COD)在封场后浓度降低, 其击穿时间也比重金属中最早击穿防渗结构的Cd短。有机污染物(COD)击穿时间短的原因主要在于初始浓度过大, 超标严重, 封场后降低至1000 mg/L也超标50倍, 导致浓度梯度大。

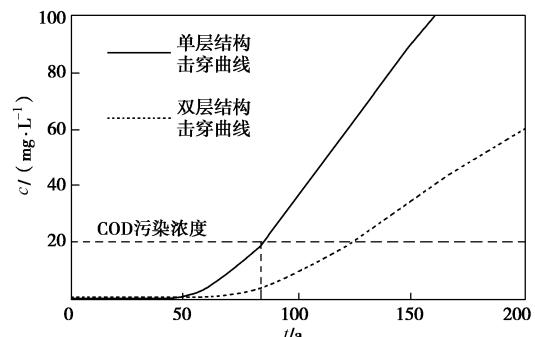


图6 有机污染物(COD)在单层防渗结构和双层防渗结构中的击穿曲线

Fig. 6 Breakthrough curves of COD in single and double composite liners

3.4 持久性有机污染物DDT的击穿过程

通过计算分别得到DDT在HDPE土工膜单层防渗结构和双层防渗结构中的击穿曲线, 如图7所示, 其击穿规律与COD相似, 但DDT在200 a内既未击穿单层防渗结构, 也未击穿双层防渗结构。DDT击穿时间长的原因主要在于初始浓度低, 且化学扩散系数也不高。

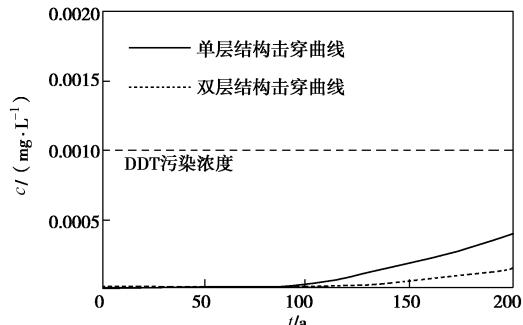


图7 DDT在单层防渗结构和双层防渗结构中的击穿曲线

Fig. 7 Breakthrough curves of DDT in single and double composite liners

4 讨论

4.1 指示性污染物的选择

垃圾填埋场渗沥液在多种污染物共同存在的情况下，各种污染物经过长时间的迁移弥散，只要其中一种污染物穿过填埋场防渗系统，达到污染浓度，就应该认为填埋场的防渗系统被击穿。对重金属污染物、有机污染物及持久性有机污染物的击穿时间，如表 4 所示，Cu、Zn、Cd 3 种重金属中只有 Cd 在 200 a 内击穿 HDPE 土工膜单层防渗衬垫系统，击穿时间为 137.0 a，Cu 和 Zn 在 200 a 内未达到污染浓度；而在 HDPE 土工膜双层防渗衬垫系统中 3 种重金属 200 a 内均未击穿，因此，3 种重金属中 Cd 最早击穿防渗系统，Cd 可被认为是指示性重金属污染物；有机污染物（COD）在两个防渗衬垫系统中的击穿时间分别为 84.2 a 和 122.6 a；DDT 在单层和双层防渗系统中 200 a 内也未击穿。可以发现无论在单层防渗结构中还是在双层防渗结构中，3 类污染物中有机污染物（COD）最早击穿防渗系统。那么根据中国垃圾填埋场的情况，有机污染物（COD）可被认为是判断填埋场防渗系统是否被击穿的指示污染物。

表 4 不同污染的击穿时间

Table 4 Breakthrough time of different pollutants (a)

防渗结构	Cu	Zn	Cd	COD	DDT
单层	—	—	137.0	84.2	—
双层	—	—	—	122.6	—

注：“—”表示计算到 200 a 未击穿防渗结构。

指示污染物的选择，首先根据渗沥液中污染物浓度的调查确定各污染物的初始浓度，再确定用于判断填埋场防渗系统是否被击穿的污染浓度，根据中国的情况，建议选择生活饮用水水源地的环境质量标准作为各污染物的污染浓度，即《地下水环境质量标准》GB/T 14848—93 和《地表水环境质量标准》GB3838—2002 三类水规定的极限浓度。又由于污染物击穿填埋场防渗系统是一个长时间尺度的过程，一般通过建立数学模型计算各污染物的击穿时间，击穿时间最短的污染物可被认为是指示性污染物，用于评价填埋场防渗系统的防污性能。

4.2 影响击穿时间的因素

不同污染物的初始浓度不同，导致污染物在化学扩散中的浓度梯度不同，所以一般初始浓度越高，浓度梯度越大，击穿时间越短。但初始浓度并不影响击穿时间的唯一因素，因为不同污染物生物毒性不同，产生环境危害的浓度有所不同，击穿标准规定的极限浓度不同，即污染浓度不同；初始浓度与污染浓度的不同也导致各污染物超标倍数不同，Cu 虽然初始浓度高，但只超标 2.56 倍，而 DDT 超标 15 倍，一般超标倍数越高的污染物，其击穿时间越短。但超标倍数高

的污染物击穿时间也不一定短，在 HDPE 土工膜与压实黏土的复合防渗系统中，渗沥液渗流流速很低，污染物迁移主要以化学扩散为主，不同污染物的化学扩散系数不同，击穿时间还受污染物化学扩散系数的影响，例如虽然 Cd 的超标倍数不如 Zn，但是 Cd 的击穿时间比 Zn 短，这是因为 Cd 的化学扩散系数是 Zn 的 1.8 到 2.7 倍。另外，吸附作用会阻碍污染物的迁移，导致击穿时间延长，不同污染物的阻滞因子不同，也影响延长击穿时间的程度。从本文的计算结果还可以看出，防渗结构对污染物的击穿时间产生重要的影响，污染物在 HDPE 土工膜双层防渗结构中的击穿时间明显比在单层防渗结构中长很多。那么，在同一填埋场防渗系统中，不同污染物的击穿时间主要受污染物的初始浓度、规定的污染浓度和污染物的迁移弥散参数共同影响。这 3 者可被看作污染物击穿填埋场防渗垫层的指示性指标。

应特别指出：本文在进行计算时，假定渗沥液中重金属污染物和持久性有机污染物在进口处的初始浓度保持不变、渗沥液水头保持 0.3 m 不变、土工膜一直保持完好、黏土吸附类型为线性吸附，而实际的填埋场在运行期间随着填埋量的增加或者降雨入渗量的增加，污染物的浓度和渗沥液水头都会有所变化，土工膜也会产生劣化，黏土对污染物的吸附会达到吸附饱和，对击穿时间都会产生影响，以上问题今后可做进一步研究，但对本文得出指示性污染物的结论影响不大。

5 结 论

以中国填埋场渗沥液中 3 类污染物的平均浓度作为初始浓度，根据中国现有规范规定的 HDPE 土工膜单层防渗衬垫系统和双层防渗衬垫系统建立了两个一维有限元计算模型，对 3 类污染物的击穿时间分别进行了数值计算，初步的结论如下：

(1) 相比重金属污染物和持久性有机污染物，有机污染物（COD）达到污染浓度的时间最短，即有机污染物（COD）最先击穿填埋场防渗系统，有机污染物（COD）可作为判别填埋场防渗系统是否被击穿的指示污染物。

(2) 以有机污染物（COD）为指示污染物，按照中国现有填埋场渗沥液中 COD 的平均浓度为初始浓度，考虑垃圾中有机物的降解导致渗沥液中 COD 浓度降低，而不考虑渗沥液水头变化、土工膜劣化的情况下，计算得出 HDPE 土工膜单层防渗衬垫系统和双层防渗衬垫系统的击穿时间分别为 84.2 a 和 122.6 a，双层防渗系统的防污性能明显优于单层防渗系统。

(3) 在同一填埋场防渗系统中, 污染物的击穿时间主要受污染物的初始浓度、规定的污染浓度和污染物的迁移弥散参数共同影响。这三者可被看作污染物击穿填埋场防渗垫层的指示性指标。

参考文献:

- [1] 陈云敏, 施建勇, 朱伟, 等. 环境岩土工程研究综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(4): 165–182. (CHEN Yun-min, SHI Jian-yong, ZHU Wei, et al. A review of geoenvironmental engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(4): 165–182. (in Chinese))
- [2] 陈云敏, 谢焰, 詹良通. 城市生活垃圾填埋场固液气耦合一维固结模型[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 184–190. (CHEN Yun-min, XIE Yan, ZHAN Liang-tong. One-dimensional consolidation model for landfills considering solid-liquid-gas interaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 184–190. (in Chinese))
- [3] 关驰. 基于污染物运移的填埋场屏障系统服役性能评价方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. (GUANG Chi. A study on contaminant migration based performance of landfill barrier systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese))
- [4] 王松林. 超声处理垃圾渗沥液及有机污染物的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006. (WANG Song-lin. Study on treatment of landfill leachate and organic pollutants by ultrasonic irradiation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2006. (in Chinese))
- [5] 戴树桂. 环境化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006. (DAI Shu-gui. Environmental chemistry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. (in Chinese))
- [6] 张自杰. 排水工程(下册)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. (ZHANG Zi-jie. Sewerage wastewater engineering (Vol. 2)[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000. (in Chinese))
- [7] 詹良通, 陈如海, 陈云敏, 等. 重金属在某简易垃圾填埋场底部及周边土层扩散勘查与分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 853–861. (ZHAN Liang-tong, CHEN Ru-hai, CHEN Yun-min, et al. Migration of heavy metals in soil strata below and around a simple dump of MSWs[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(6): 853–861. (in Chinese))
- [8] 罗泽娇, 赵俊英, 靳孟贵. 武汉市某垃圾填埋场重金属对环境污染的研究[J]. 地质科技情报, 2003, 22(3): 87–91. (LUO Ze-jiao, ZHAO Jun-ying, JIN Meng-gui. Study on heavy metal to environmental pollution from an old landfill in Wuhan, Hubei province[J]. Geological science and technology Information, 2003, 22(3): 87–91. (in Chinese))
- [9] 何厚波, 熊杨, 周敬超. 生活垃圾填埋场渗滤液的特点及处理技术[J]. 环境卫生工程, 2002, 10(4): 159–163. (HE Hou-bo, XIONG Yang, ZHOU Jing-chao. The characteristic and treatment technology of municipal solid waste landfill leachate[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2002, 10(4): 159–163. (in Chinese))
- [10] 谢海建. 成层介质污染物的运移机理及衬垫系统防污性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008. (XIE Hai-jian. A study on contaminant transport in layered media and the performance of landfill liner systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese))
- [11] 张兰英, 张德安. 垃圾渗沥液中有机污染物的污染及去除[J]. 中国环境科学, 1998, 18(2): 184–188. (ZHANG Lan-ying, ZHANG De-an. Detection and removal of organic pollutants in refuse leaching[J]. China Environmental Science, 1998, 18(2): 184–188. (in Chinese))
- [12] PARK J K, NIBRAS M. Mass flux of organic chemicals through polyethylene geomembranes[J]. Water Environment Research, 1993, 65(3): 227–237.
- [13] ROWE R K, HRAPOVIC L, KOSARIC N. Diffusion of chloride and dichloromethane through an HDPE geomembrane[J]. Geosynthetics International, 1995, 2(3): 507–536.
- [14] 孙晋伟, 黄益宗, 石孟春, 等. 土壤重金属生物毒性研究进展[J]. 生态学报, 2008, 28(6): 2861–2869. (SUN Jin-wei, HUANG Yi-zong, SHI Meng-chun, et al. The review of heavy metals biotoxicity in soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(6): 2861–2869. (in Chinese))
- [15] 刘庭发, 张鹏伟, 温庆博, 等. 填埋场防渗垫层服役性能数值模型研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊1): 275–281. (LIU Ting-fa, ZHANG Peng-wei, WEN Qing-bo, et al. Numerical study on performance of anti-seepage liner of landfills[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S1): 275–281. (in Chinese))
- [16] FOOSE G J. A steady-state approach for evaluating the impact of solute transport through composite liners on groundwater quality[J]. Waste Management, 2010, 30(8): 1577–1586.
- [17] 谢海建, 詹良通, 陈云敏, 等. 中国四类衬垫系统防污性能的比较分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(7): 133–141.

- (XIE Hai-jian, ZHAN Liang-tong, CHEN Yun-min, et al. Comparison of the performance of four types of liner systems in China[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, **44**(7): 133 - 141. (in Chinese))
- [18] 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 Liang-tong, ZENG Xing, LI Yu-Chao, et al. Centrifuge modeling for chloridion breaking through kaolin clay liner with high hydraulic head[J]. *Journal of Yangtze River Research Institute*. 2012, **29**(2): 83 - 89. (in Chinese))
- [19] GB 5749—2006 生活饮用水标准检验方法[S]. 2006. (GB5749—2006 Standard examination methods for drinking water[S]. 2006. (in Chinese))
- [20] GB/T 14848—93 地下水环境质量标准[S]. 1994. (GB/T 14848—93 Quality standard for ground water[S]. 1994. (in Chinese))
- [21] GB 3838—2002 地表水环境质量标准. 2002. (GB 3838—2002 Environmental quality standards for surface water[S]. 2002. (in Chinese))
- [22] NISHIGAKI M, HISHIYA T, HASHIMOTO N, et al. The numerical method for saturated-unsaturated fluid-density-dependent groundwater flow with mass transport[J]. *Journal of Geotechnical Engineering, JSCE*, 1995, **501**(III-30): 135 - 144. (in Japanese)
- [23] CJJ 113—2007 生活垃圾卫生填埋场防渗系统工程技术规范[S]. 2007. (CJJ 113—2007 Technical code for liner system of municipal solid waste landfill[S]. 2007. (in Chinese))
- [24] GENUCHTEN M T v. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, **44**(5): 892 - 898.
- [25] MUALEM Y. Hydraulic conductivity of unsaturated porous media: generalized macroscopic approach[J]. *Water Resources Research*, 1978, **14**(2): 325 - 334.
- [26] 朱 伟, 程南军, 陈学东, 等. 浅谈非饱和渗流的几个基本问题[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(2): 235 - 240. (ZHU Wei, CHENG Nan-jun, CHEN Xue-dong, et al. Some fundamental problems of unsaturated seepage[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, **28**(2): 235 - 240. (in Chinese))
- [27] 詹良通, 刘 伟, 陈云敏, 等. 某简易垃圾填埋场渗滤液在场底天然土层迁移模拟与长期预测[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(8): 1714 - 1723. (ZHAN Liang-tong, LIU Wei, CHEN Yun-min, et al. Numerical simulation and prediction of migration of leachate into natural soil strata under a simple MSW dump[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(8): 1714 - 1723. (in Chinese))
- [28] XIE Hai-jian, LOU Zhang-hua, CHEN Yun-min, et al. An analytical solution to contaminant advection and dispersion through a GCL/AL liner system[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, **56**(8): 811 - 818.
- [29] 席永慧, 任 杰, 胡中雄. 污染物离子在黏土介质中扩散系数的测定[J]. 同济大学学报, 2003, **31**(5): 595 - 599. (XI Yong-hui, REN Jie, HU Zhong-xiong. Determination of diffusion coefficients of contaminant ions in clay soil[J]. *Journal of Tongji University*, 2003, **31**(5): 595 - 599. (in Chinese))
- [30] 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 Liang-tong, 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))
- [31] 张振营, 吴世明, 陈云敏. 天子岭垃圾填埋场有机物降解规律的研究[J]. 岩土力学, 2002, **23**(1): 60 - 62. (ZHANG Zhen-ying, WU Shi-ming, CHEN Yun-min. Study on degradation law of organic substance of Tianziling MSW landfill[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, **23**(1): 60 - 62. (in Chinese))
- [32] ROBINSON H D, LUO M M H. Characterization and treatment of leachates from Hong Kong landfill sites[J]. *Water & Environment Journal*, 1991, **5**(3): 326 - 335.
- [33] CJJ 17—2004 生活垃圾卫生填埋技术规范[S]. 2007. (CJJ 17—2004 Technical code for municipal solid waste sanitary landfill[S]. 2007. (in Chinese))