

詹良通, 刘伟, 陈云敏, 等. 2011. 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, 31(8): 1714-1723

Zhan L T, Liu W, Chen Y M, et al. 2011. Numerical simulation and prediction of migration of leachate into natural soil strata under a simple MSW dump [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(8): 1714-1723

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

詹良通*, 刘伟, 陈云敏, 陈如海

浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 杭州 310058

收稿日期: 2010-10-28 修回日期: 2010-12-04 录用日期: 2010-12-15

摘要: 为了解我国早期建设的简易填埋堆场底部天然土层中污染物迁移状况, 作者以安徽某填埋场为例, 在前期现场勘查、取样和室内测试工作基础上建立了三维有限元分析模型, 对宏量有机污染物 COD 在土层中的迁移状况进行了模拟分析. 通过拟合求参获得 COD 在该场底土层中扩散系数、机械弥散系数和阻滞因子等运移参数的合理取值, 在此基础上开展了污染物长期迁移模拟和预测. 模拟与分析结果表明, 在该场地土层条件和高渗滤液水头条件下, 土层的渗透系数和水力梯度对 COD 迁移深度或水平距离影响最为显著, 阻滞因子的影响也不可忽略, 而机械弥散系数和分子扩散系数的影响很小. 在垃圾堆体中心部位及 8 m 高渗滤液水头作用下, 100 年后渗滤液中 COD 迁移深度达 5.4 m, 进入深部低渗透性的老粘土层 1.4 m. 由于垃圾堆体边坡区域下伏土层中水力梯度比较大, 100 年后 COD 迁移深度比堆体中心部位的大 1.6 m, 达到 7.0 m. 在水平方向上, COD 在浅层渗透系数较大的耕植土中水平迁移距离最大, 100 年后达 48.5 m, 在深部老粘土层中 100 年后水平迁移距离为 18 m. 长期预测结果表明该填埋场深部低渗透性的老粘土层对污染物具有较好的阻隔效果.

关键词: 简易垃圾填埋场; 有机污染物; 渗滤液水位; 迁移; 对流作用; 阻滞因子; 长期预测

文章编号: 0253-2468(2011)08-1714-10 中图分类号: X705 文献标识码: A

Numerical simulation and prediction of migration of leachate into natural soil strata under a simple MSW dump

ZHAN Liangtong*, LIU Wei, CHEN Yunmin, CHEN Ruhai

MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058

Received 28 October 2010; received in revised form 4 December 2010; accepted 15 December 2010

Abstract: In order to investigate soil contamination under a simple municipal solid waste dump in Anhui, China, 3D finite element models were set up to simulate the migration of COD into the natural soil strata under the waste dump. The simulation was carried out on the basis of previous field and laboratory studies. The model parameters of COD, including retard factor, diffusion and dispersion coefficients, were obtained by back analyses of field investigation results. Long-term simulation was carried out to predict the migration of COD into the soil strata. The simulation results show that advection is the predominant mechanism controlling the migration of COD into the soil strata under this dump with a high leachate head; the effect of retard factor can not be neglected; and the role of dispersion is relatively insignificant. For the central part of the dump with 8 m of leachate head, the migration depth of COD is 5.4 m after 100 years, reaching 1.4 m deep into the relatively impermeable clay layer. For the sloping part of the dump, the hydraulic gradient in the soil strata is relatively large, and the migration depth of COD after 100 years, being 7.0 m, is 1.6 m greater than that for the central part. In the horizontal direction, the migration distance of COD in the shallow relatively permeable soil layer reaches 48.5 m, being greater than that in the deep relatively impermeable clay layer (i. e., 18.1 m). The long-term simulation results indicate that the deep relatively impermeable clay layer is an effective barrier for hindering the migration of contaminants.

Keywords: simple waste dump; COD; leachate head; migration; advection; retard factor; long-term prediction

1 引言 (Introduction)

我国早期建设的填埋场大多为简易填埋场(薛红琴等, 2002), 这些填埋场底部没有铺设人工防渗

衬垫系统, 主要依靠天然粘性土层或者在填埋场下游设置垂直防渗帷幕进行防渗(张文杰等, 2008; 陈永贵, 2004). 经过多年的运行, 许多简易填埋场渗滤液都对地下水和周围土体造成了污染, 有些甚至

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 50878194, 51010008); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (No. 2010XZZX001, 2010KYJD006)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50878194, 51010008) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2010XZZX001, 2010KYJD006)

作者简介: 詹良通 (1972—), 男, 教授 (博士), E-mail: zhanlt@zju.edu.cn; * 通讯作者 (责任作者)

Biography: ZHAN Liangtong (1972—), male, professor (Ph. D.), E-mail: zhanlt@zju.edu.cn; * Corresponding author

对周边的居民饮用水安全构成威胁(陈永贵, 2004). 国内外有许多关于垃圾渗滤液污染地下水事件的报道, 如 1983 年夏季贵阳市部分区域痢疾横行, 原因是填埋场渗滤液的污染使得地下水中大肠杆菌和含菌量超标数百倍(臧文超, 1998); 北京北天堂地区 2000 年时有 1.2 km^2 地下水受到渗滤液污染, 据预测到 2010 年, 污染区域将达到 2 km^2 (王翊虹等, 2002). 在国外, 美国数千个填埋场几乎有一半对水体造成了不同程度的污染(谢海建, 2008). 由于垃圾渗滤液中污染物浓度高、渗滤持续时间长, 一旦对地下水和土体造成污染, 很难彻底治理. 因此, 应尽早对这些简易填埋场的污染状况进行现场调查、评价和预测, 为污染控制提供依据.

国内已有些学者开始关注简易填埋场及周边地下环境的污染问题. 谢海建等通过现场取样测试对苏州某填埋场底部粉质粘土及风化土层的污染状况调查发现, 运行 13 年后 Cl^- 最大迁移深度达到 10 m, COD 最大深度也达到 3.5 m(Xie *et al.*, 2009; 谢焰等, 2009). 方满等对武汉某堆场底部 12 ~ 16m 厚的粘土、亚粘土污染状况调查发现, 10 年后污染物的迁移深度仅为 30 ~ 40 cm(方满等, 2000). 另一些学者通过数值或者解析模拟, 获得污染迁移规律, 张艳等模拟分析发现, 20 年后污染物在砂层中的迁移范围达到了 280 m(张艳等, 2010); 蔡金榜等对底部有完整基岩的废矿坑用作填埋场场址进行污染风险分析发现, 地质条件较好的场地, 渗滤液对地下水的污染甚微(蔡金榜, 2004). 也有一些学者通过室内模型实验或土工离心机模型实验模拟污染物的迁移规律(狄军贞等, 2009; Kumar, 2006), 试验结果表明填埋场地的地质条件对污染物迁移有显著影响. 可见, 简易填埋场对地下环境的污染

程度与场地的地质条件密切相关, 若能选择有代表性的场地条件开展调查研究, 将会获得更有意义的成果.

本文所研究的填埋场位于我国华北陆块区, 场底有较厚的天然粘性土层, 是我国东部平原地区较为典型的简易填埋场. 笔者现场取样测试发现, 运行 17 年后污染物迁移深度为 2 ~ 3 m, 说明场底天然粘性土对污染物有较好的阻隔效果, 但还需进一步分析和预测污染物在天然土层中长期迁移情况. 本文在现场调查结果基础上建立该填埋场污染物迁移的三维有限元数值分析模型, 通过拟合求参获得有机污染物在场底土层中的迁移参数; 再利用数值模型预测污染迁移的长期发展趋势. 本文研究成果可为我国具有类似场地条件的填埋场地下环境污染评价和对策研究提供参考依据.

2 填埋场概况 (Site description at the landfill)

该填埋场位于安徽省某城市东南方, 离市区约 5 km. 填埋场南面为山地, 北面 6 km 外是河流, 地势为南高北低, 坡度约为 0.4%, 地表及地下水由南向北流入河流中. 该填埋场分东西两块区域, 本次考察的重点是运行时间较长的西侧填埋区, 面积约 3 万 m^2 , 已运行 17 年, 当前垃圾堆体平均高度为 15 m. 该场地属于洪冲积一、二级阶地, 场底土层主要为第四系冲积土层, 由上至下依次为: 1 ~ 2 m 厚为耕植土层、2 ~ 4 m 厚为粉质粘土层、5 ~ 8 m 厚为老粘土层、9 m 以下为基岩, 工程地质剖面如图 1 所示. 根据现场取样的室内测试结果, 各层土含水量及渗透系数见表 1. 地下水位埋深 1 ~ 2 m, 垃圾堆体内水位在地面以上 8.7 m. 该地区多年平均降水量为 960.1 mm.

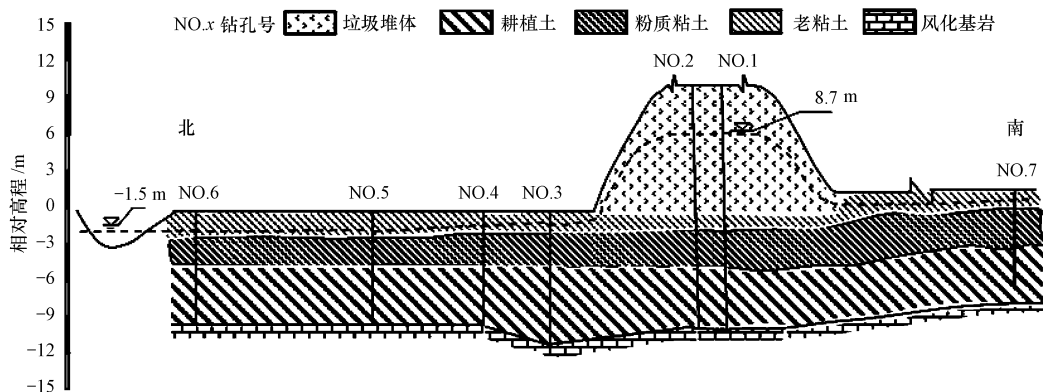


图 1 填埋场地质剖面及钻孔布置

Fig. 1 Geological profile along the boreholes at the landfill

根据笔者前期现场调查,渗滤液中宏量有机污染物 COD 为 3380 ~ 3590 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,场外上游 100 m 处的钻孔 No. 7 中孔隙水 COD 约为 140 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,该孔中孔隙水浓度可做为背景值. 其它钻孔取样测试结果表明:COD 在该场地竖向上的迁移深度为 2 ~ 3 m,水平影响范围约 60 m. 测试结果还表明,该填埋场底 2 m 深度以下的粉质粘土和老粘土层渗透性低、厚度大,对污染物具有良好的阻隔性能. 但该天然粘性土层是否能满足卫生填埋场污染控制标准有待于更深入的研究,须对该天然土层长期防污性能进行预测和监测.

3 污染物迁移参数拟合 (Fitting of migration parameters)

3.1 污染物迁移控制方程及模拟软件

本次分析采用 GMS 软件中的 FEMWATER 程序,它是一个三维有限元渗流和污染物迁移的分析模块(Lin *et al.*, 2009). 渗流分析可以模拟饱和-非饱和渗流,用伽辽金有限元法求解得到渗流场;随后将流速和水位引入迁移分析,模拟污染物扩散、吸附等机理,用有限元法分析获得污染物迁移情况.

当不考虑流体密度变化和土体固结等因素引起的渗流时,土体中非饱和-饱和渗流控制方程(Lin *et al.*, 2009)为:

$$\nabla[\mathbf{K}(\nabla h + \nabla z)] + q = F \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式中, h 表示压力水头; z 表示位置水头; q 表示源/汇项; \mathbf{K} 表示渗透系数张量,由饱和渗透系数和土水特征曲线获得; F 表示储水系数,由土水特征曲线获得. 土水特征曲线和非饱和渗透系数是根据前期现场勘察查明的各个土层的土类,利用 FEMWATER 内置数据库中各种土类参数资料,通过类比的方法,进行拟合获得. 拟合公式采用 van-Genuchten 模型,见式(2);非饱和渗透系数计算如式(3)、(4).

$$\theta_w = \theta_r + \theta_e (\theta_s - \theta_r) \quad (2)$$

$$K = K_s \theta_e^{0.5} [1 - (1 - \theta_e^{1/\gamma})^\gamma]^2 \quad (3)$$

$$\gamma = 1 - 1/\beta \quad (4)$$

式中,当 $h < 0$ 时, $\theta_e = [1 + (|\alpha h|)^\beta]^{-\gamma}$; 当 $h \geq 0$ 时, $\theta_e = 1$; K 为非饱和渗透系数; K_s 为饱和渗透系数,由现场取样室内测试获得; θ_w 表示土体含水量; θ_s 表示土体饱和含水量; θ_r 表示土体残余含水量; α 和 β 表示土水特征曲线参数. 各土层参数取值如表 2 所示.

当采用线性吸附模型且不考虑降解和衰减等

因素时,土体中污染物迁移控制方程(Lin *et al.*, 2009):

$$V \nabla C - \nabla(\theta D \cdot \nabla C) + (\theta + \rho_d K_d) \frac{\partial C}{\partial t} = (F \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{\partial \theta}{\partial t}) C - qC + m \quad (5)$$

$$\theta D = \alpha_L |V| \delta + (\alpha_L - \alpha_T) VV/|V| + D^* \theta \tau \delta \quad (6)$$

式中, $\theta = S_r n$ 表示含水量,与饱和度和孔隙率有关; qC 表示源/汇带入/出的污染物质; m 为人工注入或抽出的污染物质; ρ_d 为土体干密度; τ 为土体介质的弯曲率; δ 为 Kronecker 函数.

迁移控制方程(5)中,第一项表示流入或流出单元的污染物,体现了对流作用,它反映了污染物在多孔介质中随着流体的迁移过程,由水力梯度驱动,以达西平均流速 V 表征.

第二项表示水动力弥散作用引起污染物的变化. 水动力弥散 D 包括机械弥散和分子扩散,见式(6). 机械弥散是孔隙通道中流体微观流速分布不均而造成污染物迁移现象,与流速和孔隙介质性质有关,以纵向和横向弥散度 α_L 、 α_T 表征;分子扩散是污染物分子或离子热运动的宏观体现,由浓度梯度驱动,在土体中,分子扩散还受土体孔隙通道大小、曲折程度以及与土颗粒物理化学作用等因素的影响,以有效扩散系数 D^* 表征.

第三项表示孔隙水中滞留和土颗粒上存储或吸附的污染物质,体现土体的阻滞作用. 阻滞作用反应了污染物迁移过程中的吸附、降解、沉淀、氧化-还原以及配位络合反应(谢海建,2008),与土体性质、含水量、污染物类型有关. 常以阻滞因子 R_d 表征污染物吸附作用(本文不考虑逆过程),阻滞因子 R_d 与含水量 θ 和分配系数 K_d 有关:

$$R_d = 1 + \frac{\rho_d K_d}{\theta} \quad (7)$$

第四项表示土体储水能力引起污染物的变化,反映土体固结、含水量变化以及流体压缩等因素影响.

对污染物迁移控制方程(式(5))进行分析可知,在高水力梯度条件下,孔隙水流速较大,对流占主导作用,机械弥散和分子扩散作用相对较小;水力梯度较小时,对流不再占主导作用,水动力弥散作用将显现出来. 结合式(5)和式(7)可知,阻滞因子对对流作用的影响是线性的,而对水动力弥散作用的影响是非线性的,表现出比较复杂的特性,拟

合求参中须重点分析.

3.2 计算模型

以西侧填埋区为模型,建立三维网格模型如图 2 所示. 根据调查,堆体内水位高度为 8.7 m,而当时处于雨季,测得的堆体内水位比长期水位稍高,故在计算时设定堆体内水头为 8 m. 该填埋场目前已投入运行 17 年,计算时以 17 年考虑. 区域多年平均降雨量为 960.1 mm,考虑地表径流、蒸发等因素,计算时降雨入渗系数选为 0.41(周旻等,2002),降雨补给量约为 400 mm·年⁻¹. 笔者调查发现,渗滤液中有有机物浓度较高,本次计算选择宏量有机污染物 COD 为代表进行迁移模拟.

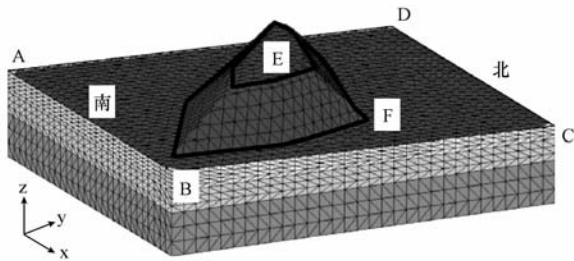


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

本文重点考察污染物在场底土层中的迁移,各土层的有限元网格如图 2. 在竖向上,表层耕植土单元尺寸最大为 0.5 m,粉质粘土最大为 1m,老粘土最大为 2 m;在水平方向上单元尺寸为 5~15 m.

考虑到模拟历时长达几十年,本文采用稳定渗流分析获得稳态渗流场. 渗流分析模型的边界条件如图 2 所示、图 3 所示. 结合现场调研情况,AB、CD、E 区域以及堆体与地层交界处的渗滤液沟 F 均为定水头边界,为考虑地下水流动因素,AB 边界水头比 CD 边界水头高 3 m,梯度约为 0.5%;AD、BC 为零流量边界;通过上表面边界输入折减后的多年平均降雨量. 污染物迁移分析模型边界如图 4 所示. AB 和 CD 为浓度梯度边界, $\frac{\partial C}{\partial z} = 0$;底边界浓度边界, $C = 0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;垃圾堆体为污染源,堆体表面设定为恒定浓度边界,COD 浓度设定为 3500 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,从保守角度,暂不考虑 COD 在迁移过程中的降解作用,以恒定浓度计算.

垃圾堆体内初始水头为 8 m,用插值法获得垃圾和土层中初始水位分布. 垃圾堆体渗滤液中 COD 初始浓度为 3500 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,土层中 COD 初始值为 140 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (背景值).

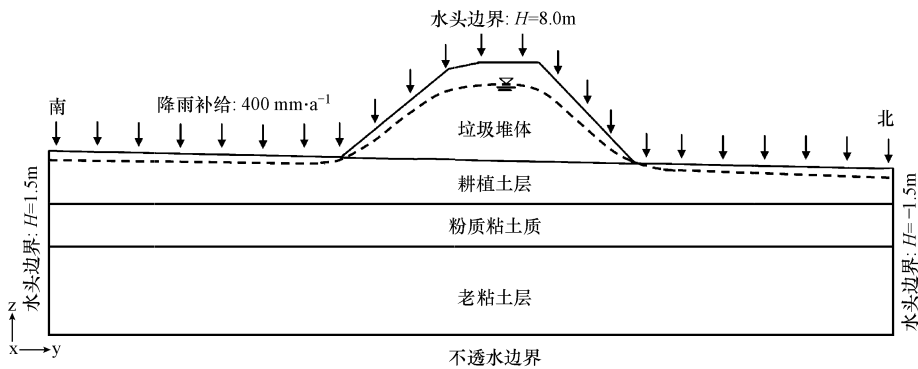


图 3 渗流分析边界条件(水平:垂直=5:1)

Fig. 3 Boundary conditions for seepage analyses (Horizon:Vertical = 5:1)

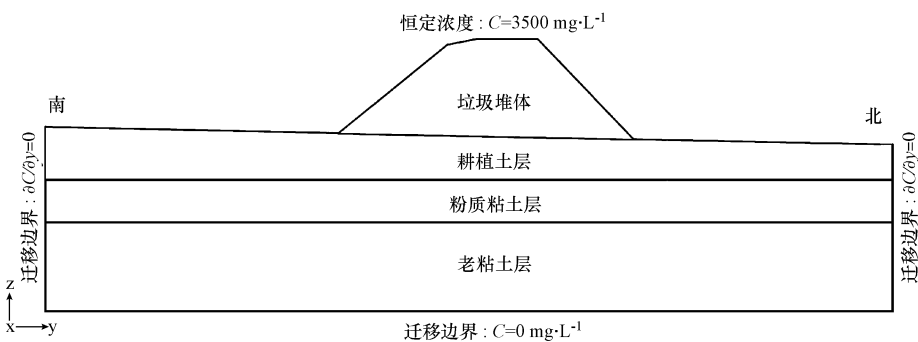


图 4 污染物迁移分析边界条件(水平:垂直=5:1)

Fig. 4 Boundary conditions for pollutant transport analyses (Horizon:Vertical = 5:1)

3.3 模型参数及拟合求参方案

本次分析所用的计算参数列于表 1, 土水特征

曲线和非饱和渗透系数的拟合参数如表 2 所示.

表 1 计算参数
Table 1 Model parameters

| 土层 | 渗透系数 $k_s / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$ | | 饱和含水量 θ_r | 弯曲率 τ | 孔隙比 e | 孔隙率 n | 干密度 $\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | 颗粒比重 d_s | 阻滞因子 R_d | 有效扩散系数 $D^* / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ | 纵向弥散度 α_L / m |
|------|--|----------------------|------------------|------------|---------|---------|--|------------|------------|---|-----------------------------|
| | 水平 k_h | 竖向 k_v | | | | | | | | | |
| 垃圾 | 1×10^{-4} | 5.0×10^{-5} | — | 0.30 | 1.50 | 0.60 | 0.80 | — | — | — | — |
| 耕植土 | 3×10^{-5} | 1.5×10^{-5} | 30% | 0.25 | 0.75 | 0.43 | 1.53 | 2.68 | 2~20 | (2.5~3.5) | 0.1~1.0 |
| 粉质粘土 | 5×10^{-6} | 2.5×10^{-6} | 25% | 0.20 | 0.69 | 0.41 | 1.60 | 2.72 | | $\times 10^{-10}$ | |
| 老粘土 | 3×10^{-7} | 1.5×10^{-7} | 20% | 0.30 | 0.61 | 0.38 | 1.71 | 2.75 | | | |

表 2 土水特征曲线和非饱和渗透系数的拟合参数

Table 2 Fitting parameters for soil-water characteristic curve and unsaturated hydraulic conductivity

| 土层 | 饱和含水量 θ_s | 残余含水量 θ_r | α / cm^{-1} | β |
|------|------------------|------------------|---------------------------|---------|
| 耕植土 | 30% | 6.8% | 0.008 | 1.09 |
| 粉质粘土 | 25% | 7.0% | 0.005 | 1.09 |
| 老粘土 | 20% | 9.5% | 0.019 | 1.31 |

垃圾堆体的参数包括渗透系数、孔隙比、干密度、弯曲率等. 渗透系数参考我国填埋垃圾渗透系数现场测试结果(柯瀚等, 2006), 考虑到垃圾的各向异性, 假定竖向渗透系数是水平的一半, 即 $k_v = 0.5k_h$; 孔隙比、干密度参考类似填埋场测试数据(Zhan *et al.*, 2008).

场底土层参数包括渗透系数、饱和含水量、孔隙比、干密度、弯曲率等. 各土层渗透系数和饱和含水量由现场勘探取样和室内试验测试而得, 由于土体的各向异性, 水平向渗透系数远大于竖向渗透系数, 保守考虑假定竖向渗透系数 $k_v = 0.5k_h$. 表观曲折因子 τ 参考谢海建博士论文统计数据(谢海建, 2008). 孔隙比、干密度由饱和含水量和比重计算获得. 其余参数如阻滞因子、弥散度、有效扩散系数由现场调查结果的拟合求参获得, 在下面详细讨论.

据 Hrapovic and Rowe 研究, COD 在粘土中的扩散系数为 $(2.5 \sim 3.5) \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 本次拟合求参选取 $2.5 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $3.5 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (Hrapovic *et al.*, 2002). 根据前人的总结, 纵向弥散度 α_L 的典型值为 $0.1 \sim 1.0 \text{ m}$, $\alpha_T = (0.1 \sim 0.3) \alpha_L$ (谢海建, 2008; 王洪涛, 2008), 本次拟合求参选取 0.1 m 、 0.5 m 、 1 m . 谢海建总结发现 COD 在土体中分配系数总体为 $0.5 \sim 5 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ (谢海建, 2008), 如以耕植土和粉质粘土考虑, 孔隙率分别为 0.43、0.41, 干密度分别为 1.53、1.60, 根据式(7)得 COD

在两土层中的阻滞因子分别为 2.78 ~ 18.76 和 2.96 ~ 20.57, 本次拟合求参选取 $R_d = 2, 5, 10, 15, 20$. 综合上述分析结果, 拟定如表 3 所示的拟合求参方案. 通过对该填埋场底部土层中污染物迁移状况的拟合求参, 获得阻滞因子、弥散度和有效扩散系数的参数取值.

表 3 拟合求参工况列表

Table 3 List of cases for fitting parameters

| 工况 | 参数 | | | |
|-------|---------------|---------------|---|------------|
| | 弥散度/m | | 有效扩散系数 $D^* / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ | 阻滞因子 R_d |
| | 纵向 α_L | 横向 α_T | | |
| Case1 | 0.1 | 0.01 | 2.5×10^{-10} | 15 |
| Case2 | 0.1 | 0.01 | 3.5×10^{-10} | 15 |
| Case3 | 0.5 | 0.05 | 2.5×10^{-10} | 15 |
| Case4 | 1.0 | 0.10 | 2.5×10^{-10} | 15 |
| Case5 | 0.1 | 0.01 | 2.5×10^{-10} | 2 |
| Case6 | 0.1 | 0.01 | 2.5×10^{-10} | 5 |
| Case7 | 0.1 | 0.01 | 2.5×10^{-10} | 10 |
| Case8 | 0.1 | 0.01 | 2.5×10^{-10} | 20 |

4 拟合求参结果及讨论 (Results and discussion of fitting parameters)

4.1 渗流场模拟

图 5 ~ 图 7 显示了该场地稳定渗流的渗流场模拟结果. 图 5 为水位等势线平面分布图, 图 6 和图 7 为流速矢量平面和剖面分布图.

从图 5 可见, 堆体区域水位明显高于周边土层中的水位, 这主要是由于该填埋场没有渗滤液导排设施且垃圾渗透性较差而导致的堆体内水位壅高. 在垃圾堆体边坡部分, 水位等势线较为密集, 说明边坡区域水力梯度较大, 渗流作用更为明显, 尤其是在坡脚附近(图 6、图 7), 现场勘查也发现有渗滤液从坡脚的边沟排出, 与上述计算结果吻合. 与堆体边坡区域相比, 堆体周围土层的渗流作用相对较小.

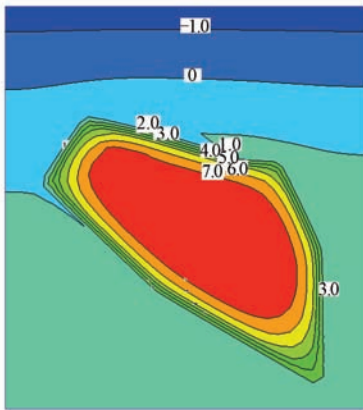


图5 该场地水位平面分布图(数据单位:m)
Fig. 5 Distribution of water level at the site



图6 流速矢量平面分布图
Fig. 6 Distribution of flow velocity in the horizontal direction

图6、7表明,堆体边坡坡脚处流速最大,而在堆

体周边的土层中,随着距离增加,渗流速度减小.堆体下游土层中渗流速度稍大于上游.浅层土体中渗流速度大于深层土体,这是由于浅层土体渗透性比深层的大.

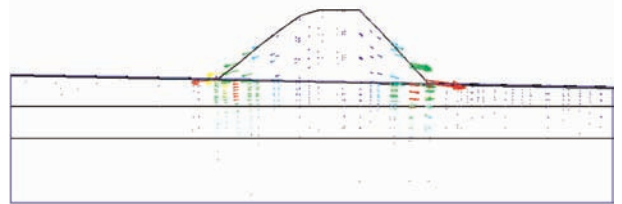


图7 流速矢量剖面图(水平:垂直=5:1)
Fig. 7 Distribution of flow velocity in the vertical direction (Horizon:Vertical = 5:1)

4.2 有效扩散系数的拟合求参

本次有效扩散系数的拟合求参采用位于填埋区域内 No. 1、No. 2 孔(图1)的 COD 测试结果为参照,将数值分析结果与之进行对比,选取两者最为符合时对应的计算参数.

图8显示了有效扩散系数对该填埋场底部土层中 COD-深度曲线的影响.可见,在本文考察的范围内,有效扩散系数的影响非常小,当 D^* 从 $2.5 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $3.5 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 时,浓度-深度曲线变化非常小,迁移深度变化量不到 1%. 故可认为对于该场地和高水位条件,分子扩散作用对 COD 在下伏土层中迁移深度的影响非常小,结合相关经验(谢焰等,2009),建议有效扩散系数 $D^* = 2.5 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

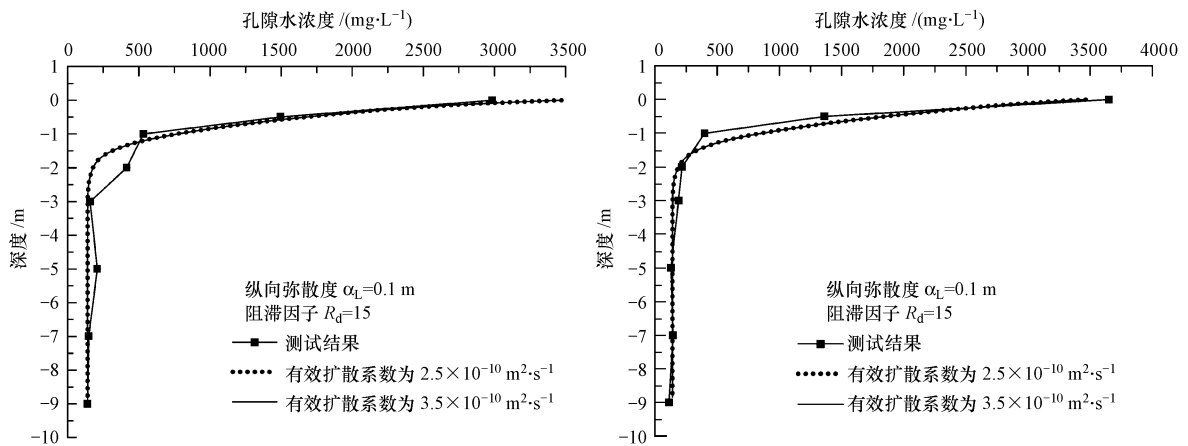


图8 有效扩散系数对钻孔拟合求参结果的影响
Fig. 8 The effect of diffusion coefficient on the simulation results of borehole

4.3 弥散度的拟合求参

图9显示了土体的弥散度对拟合求参结果的影

响.可见,随着纵向弥散度增加,COD 在垃圾堆体下伏土层中的迁移深度增加,但影响不显著,当 α_L 从

0.1 m 增加到 1 m, 污染物影响深度增加了 40 ~ 50 cm. 分析表明: 机械弥散作用对污染物迁移深度的影响相对较小. 进一步也证明了在该场地土层和高水头条件下, 水动力弥散作用相对较小, 对迁移深度影响不明显. 如图 9 所示, 当 $\alpha_L = 0.1$ m 时与测试结果最接近, 建议取 $\alpha_L = 0.1$ m.

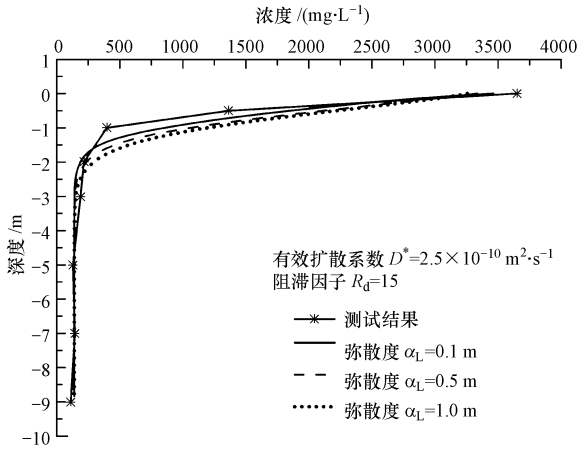


图 9 纵向弥散度对钻孔 No. 2 拟合求参结果的影响

Fig. 9 The effect of longitudinal dispersivity on simulation results of borehole No. 2

4.4 阻滞因子的拟合求参

图 10 显示了阻滞因子对拟合求参结果的影响. 可见, 阻滞因子对 COD 迁移深度有显著影响, 当阻滞因子从 2 增加到 20 时, 污染物迁移深度则从 4 m 减小到 2 m. 阻滞因子对污染物迁移深度的影响是非线性的, 随着阻滞因子 R_d 增大, 迁移深度的变化幅度减小, 如图 11 所示. 图 10 表明, 当 $R_d = 15$ 时, 数值分析结果与测试结果比较吻合, 因此建议阻滞

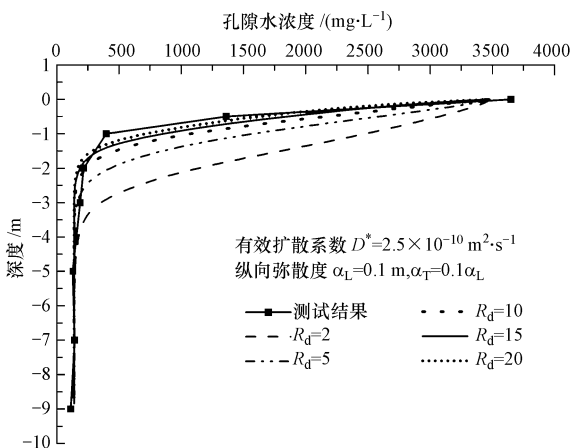


图 10 阻滞因子对钻孔 No. 2 拟合求参结果的影响

Fig. 10 The effect of retard factor on the simulation results of borehole No. 2

因子取 $R_d = 15$.

综上所述, 对于该填埋场土层条件和水位条件, 阻滞因子对 COD 迁移有显著影响, 而机械弥散和分子扩散作用的影响有限. Case7 的参数组合 ($D^* = 2.5 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $\alpha_L = 0.1 \text{ m}$, $R_d = 15$) 对应的数值分析结果与测试结果最为吻合, 因此取该组参数组合进行污染物的长期迁移分析.

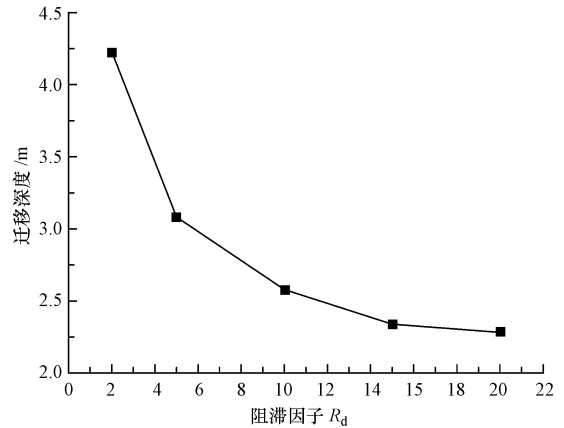


图 11 阻滞因子对迁移深度的影响

Fig. 11 The effect of retard factor on the migration depth of COD

5 污染物长期迁移分析 (Long-term prediction of pollutant migration)

为了进一步掌握污染物在填埋场底部土层中的迁移规律和发展趋势, 采用上述拟合求参获得的参数取值, 对该填埋场污染物的长期迁移范围进行数值模拟和预测, 为今后治理对策提供依据.

图 12 显示了 COD 在填埋场底部土层中浓度-深度曲线随时间的变化. 从计算结果看, 在垂直方向上, 随着时间的增加 (从 20 年到 100 年), 污染物在场底土层中的迁移深度也逐渐增加, 但增加幅度逐渐减小, 污染羽推进速度也减缓. 从图 12 中各时刻的 COD 浓度-深度曲线可以推算: 约 16 年后渗滤液中 COD 迁移到耕植土层底部 (1.9 m 深度); 60 年后到达粉质粘土层底部 (4.0 m 深度); 100 年后 COD 迁移深度达到 5.4 m, 即进入老粘土层约 1.4 m. 污染羽在不同深度土层中的推进速度与土层特性有关, 如前所述, 浅层土体渗透性较好, 渗流速度较大, 污染羽推进速度较快; 深部老粘土层渗透系数较小, 污染羽推进速度较慢, 可以阻止污染物进一步向下迁移到风化基岩. 计算还发现, 随着迁移深度增加, 表层土中 COD 显著增加, 1 m 深度处的 COD 在 20 年时约为 $760 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 100 年后增加到

2100 mg·L⁻¹,增加了约3倍。

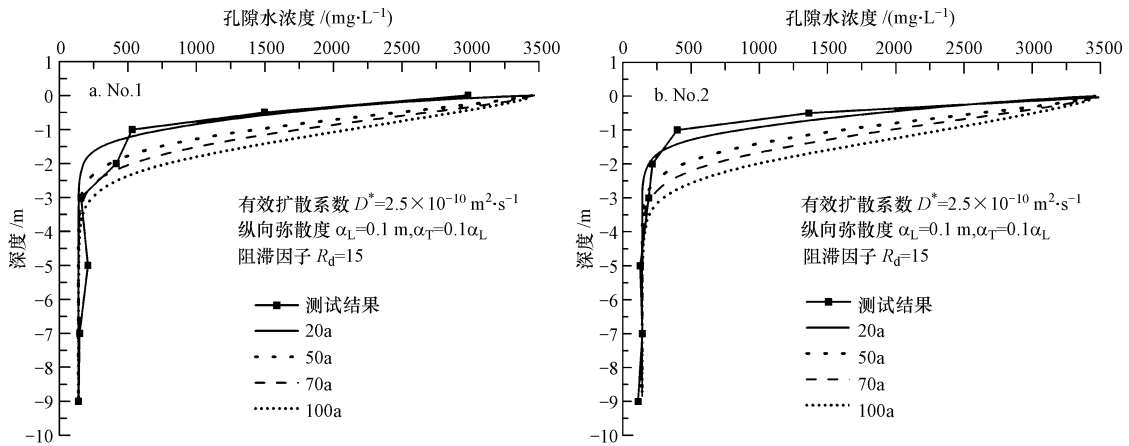


图 12 钻孔孔隙水中 COD 浓度-深度曲线随时间变化

Fig.12 COD concentration verse depth profile in borehole with time

数值模拟得到的污染羽如图 13 所示,须注意的是该图中水平向与竖向的比例尺为 5:1. 可见,COD 在不同区域处的迁移深度明显不同,堆体边坡处污染物迁移深度比中间部位深,随着时间增加也越明显,100 年后最大迁移深度可达 6.99 m,比中心区域深 1.62 m. 如前述渗流场分析结果,堆体边坡处水力梯度和流速明显大于中间区域(图 5、6、7),在堆体边坡区域的下伏土层中,对流作用在污染物迁移中占主导作用,因此污染物在该区域的迁移深度相对较大。

从图 13 看出,在水平方向上,当前表层土中污染扩散范围约为 27.5 m,堆体下游土层中污染物的

扩散距离稍大于上游,这个差异是由于上下游存在一个约 0.5% 水力梯度引起(图 6、图 7). 100 年后浅层土体中 COD 污染范围大约 48.5 m,距离下游河流仍有数公里,在深部老粘土层中,100 年后 COD 水平迁移距离为 18.1 m. 浅层土体中水平迁移距离大于深层,这是由于浅层土体渗透系数大、渗流速度较快的结果. 数值模拟得到的污染物水平迁移距离似乎小于现场调查结果(图 13a). 从填埋场下游钻孔 No.4 和 No.5(距离堆体分别为 35 m 和 65 m)获得的 COD 测试数据表明表层土体受到了一定程度的污染,这可能是由于雨季期间填埋场边沟中渗滤液发生溢流引起的后果。

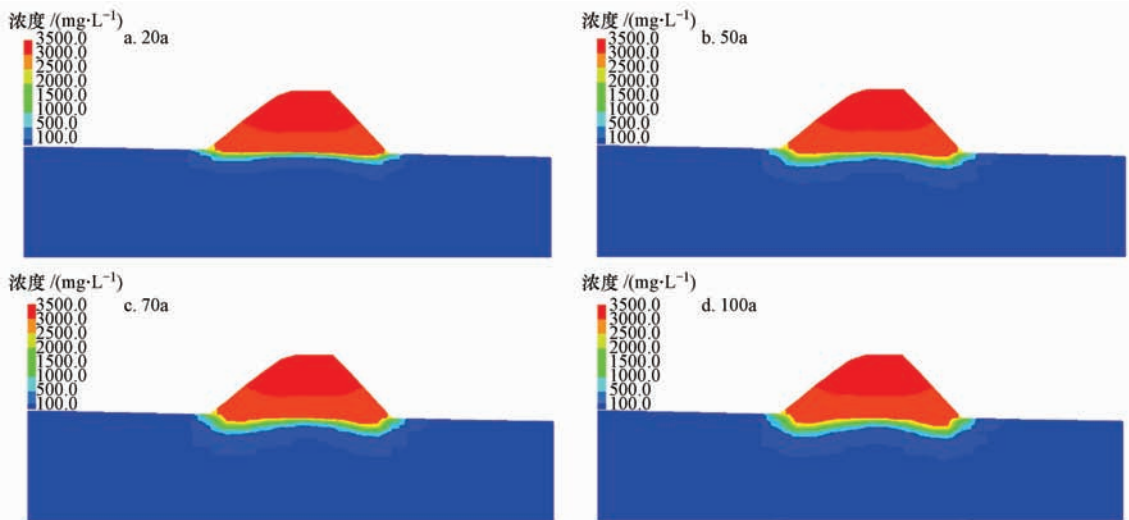


图 13 污染物迁移范围随时间变化云图(水平:垂直=5:1)

Fig. 13 Predicted changes of the migrating plume with time (Horizon:Vertical = 5:1)

上述的长期预测结果对认识类似场地条件的填埋场污染物迁移规律和治理决策具有重要意义。考虑到垃圾渗滤液中污染物多样性和复杂性、以及场地可能存在未知的不利地质条件(如地层中存在透水夹层或透镜体),今后应对该填埋场地下水水质进行跟踪监测,以验证本文的长期预测结果,并根据监测结果,采取相应的对策和治理措施。上述计算表明,如需控制污染物迁移范围,降低垃圾堆体中渗滤液水位、消除对流主导作用是最为经济、有效的治理措施之一。

6 结论及建议(Conclusions and suggestions)

1)在垃圾堆体中心部位及 8 m 高渗滤液水头作用下,约 16 年后渗滤液中 COD 迁移到耕植土层底部(1.9 m 深度);60 年后到达粉质粘土层底部(4.0 m 深度),100 年后 COD 迁移深度达到 5.4 m,即进入老粘土层约 1.4 m。模拟结果表明深部低渗透性的老粘土层对污染物具有较好的阻隔效果。

2)在垃圾堆体边坡区域下伏土层中,水力梯度较大,渗滤液渗流速度较大,对流在污染物迁移中占主导作用,该区域处 COD 迁移深度大于堆体中心部位,100 年后最大迁移深度可达 7.0 m,比堆体中心部位深 1.6 m。

3)COD 在水平方向上迁移距离随着土层埋深增加而减少,在浅层渗透系数较大的耕植土中水平迁移距离最大,100 年后达 48.5 m,距离下游河流仍有数公里,在深部老粘土层中 100 年后水平迁移距离为 18 m。

4)在该场地土层及高渗滤液水头条件下,土层的渗透系数和水力梯度对 COD 迁移深度或水平距离影响最为显著,阻滞因子的影响也不可忽略,而机械弥散系数和分子扩散系数的影响很小。降低垃圾堆体中渗滤液水头、消除对流主导作用是最为经济、有效的防扩散措施。

5)本文的数值模拟结果表明该场地土层条件对污染物有很好的阻隔效果,但考虑垃圾渗滤液中污染物多样性和复杂性、以及场地可能存在未知的不利地质条件,应对该填埋场地下水水质跟踪监测,并根据监测结果,采取相应的对策和治理措施。

责任作者简介:詹良通(1972—),男,浙江大学教授,博士生导师,从事固体废弃物填埋处置、环境岩土工程及边坡工程的研究。E-mail:zhanlt@zju.edu.cn.

参考文献(References):

- 蔡金榜,朱亮,段祥宝. 2004. 填埋场渗滤液污染地下水问题实例分析[J]. 地球科学进展,19(增刊): 185-188
- Cai J B, Zhu L, Duan X B. 2004. Case study of landfill leachate pollution in groundwater [J]. *Advance in Earth Sciences*, 19 (suppl): 185-188 (in Chinese)
- 陈永贵. 2004. 粘土固化注浆帷幕对渗滤液的阻渗机理与环境效应[D]. 长沙:中南大学. 6-10; 14-31
- Chen Y G. 2004. Retention mechanism and environmental effects of clay-solidified grouting curtain to leachate in landfill [D]. Changsha: Central South University. 6-10; 14-31 (in Chinese)
- 狄军贞,张晓莹,肖利萍,等. 2009. 垃圾渗滤液污染物在土壤中迁移规律实验及模拟[J]. 水资源与水工程学报,20(2):32-35
- Di J Z, Zhang X Y, Xiao L P, *et al.* 2009. Experiment and simulation of landfill leachate's transport rule in soil[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 20(2): 32-35 (in Chinese)
- 方满,朱俊林,刘洪海,等. 2000. 垃圾填埋场底土层污染状况调查[J]. 环境监测管理和技术, 12(1):23-25
- Fang M, Zhu J L, Liu H H, *et al.* 2000. Investigation on pollution situation of bottom Layer of landfill [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 12 (1): 23-25 (in Chinese)
- Hrapovic L, Rowe R L. 2002. Intrinsic degradation of volatile fatty acids in laboratory compacted clayey soil [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, (58): 221-242
- 柯瀚,冉龙,陈云敏,等. 2006. 垃圾体渗透性试验及填埋场水文分析研究[J]. 岩土工程学报, 28(5):631-634
- Ke H, Ran L, Chen Y M, *et al.* 2006. Study on MSW filtration experimentation and landfill hydrologic analysis[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 28(5):631-634 (in Chinese)
- Kumar P R. 2006. An experimental methodology for monitoring contaminant transport through geotechnical centrifuge models [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 117:215-233
- Lin H C J, Richards D R, Talbot C A, *et al.* 2009. A Three-Dimensional Finite Element Computer Model for Simulating Density-Dependent Flow and Transport in Variably Saturated Media, Version3.0[Z]. USA: Aquaveo. 1-105
- 王洪涛. 2008. 多孔介质污染物迁移动力学[M]. 北京:高等教育出版社. 1-62
- Wang H T. 2008. Dynamics of Fluid Flow and Contaminant Transport in Porous Media [M]. Beijing: Higher Education Press. 1-62 (in Chinese)
- 王翊虹,赵勇胜. 2002. 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. (6):45-47
- Wang Y H, Zhao Y S. 2002. Pollution of municipal landfill to groundwater in Beitiantang, Beijing [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, (6):45-47 (in Chinese)
- 谢海建. 2008. 成层介质污染物的迁移机理及衬垫系统防污性能研究[D]. 杭州:浙江大学. 21-46; 63-95; 145-162; 189-213
- Xie H J. 2008. A study on contaminant transport in layered media and

- the performance of landfill liner systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University. 21-46; 63-95; 145-162; 189-213 (in Chinese)
- Xie H J, Chen Y M, Zhan L T, *et al.* 2009. Investigation of migration of pollutant at the base of Suzhou Qizishan landfill without a liner system[J]. *Journal of Zhejiang University Science A*, 10(3): 439-449
- 谢焰,谢海建,陈云敏,等. 2009. 填埋场底土污染物浓度实测值和理论解的比较[J]. *自然灾害学报*, 18(5):62-69
- Xie Y, Xie H J, Chen Y M, *et al.* 2009. Comparisons of measurements of contaminant concentration in landfill bottom soils with theoretical solutions[J]. *Journal of Natural Disasters*, 18(5): 62-69 (in Chinese)
- 薛红琴,速宝玉,盛金昌. 2002. 垃圾填埋场渗滤液的防渗措施和地下水的污染防治[J]. *安全与环境学报*, 2(4):18-22
- Xue H Q, Su B Y, Sheng J C. 2002. Anti- seeping measures for landfill leachate and groundwater pollution control[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2(4):18-22 (in Chinese)
- 臧文超. 1998. 我国城市生活垃圾现状与管理问题[J]. *环境保护*, (8):41-43
- Zang W C. 1998. Simulation and management of urban domestic refuse in China[J]. *Environmental Protection*, (8): 41-43 (in Chinese)
- Zhan L T, Chen Y M, Ling W A. 2008. Shear strength characterization of municipal solid waste at the Suzhou landfill, China [J]. *Engineering Geology*, 97: 97-111
- 张文杰,陈云敏,詹良通. 2008. 垃圾填埋场渗滤液穿过垂直防渗帷幕的渗漏分析[J]. *环境科学学报*, 28(5):925-929
- Zhang W J, Chen Y M, Zhan L T. 2008. Transport of leachate through vertical curtain grouting in landfills [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 28(5):925-929 (in Chinese)
- 张艳,何江涛,李鹏,等. 2010. 开封市垃圾场污染物迁移模拟与控制[J]. *地下水*, 32(3):15-18
- Zhang Y, He J T, Li P, *et al.* 2010. Contaminant transport simulation and control of a landfill in Kaifeng city[J]. *Ground Water*, 32(3): 15-18 (in Chinese)
- 周旻,靳孟贵,魏秀琴,等. 2002. 利用地中渗透仪观测资料进行降雨入渗补给规律分析[J]. *地质科技情报*, 21(1):37-40
- Zhou M, Jin M G, Wei X Q, *et al.* 2002. Analysis of precipitation recharge using observed data of lysimeter[J]. *Geological Science and Technology Information*, 21(1):37-40 (in Chinese)