

Study on Groundwater Pollution Transfer in Clean Field Project

Chen Chen¹, Lixin Hu¹, Li Ye²

¹CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., Wuhan Hubei

²Wuhan Hua Jing Tian Civil Engineering Co., Ltd., Wuhan Hubei

Email: 13807146669@163.com

Received: May 2nd, 2018; accepted: May 17th, 2018; published: May 28th, 2018

Abstract

The pollution caused by the production process of industrial finished products seriously threatens the groundwater safety, and how to effectively predict the groundwater quality is a significant issue to control the risk of groundwater pollution. Based on the hydrogeological conditions of a site, the hydrogeological generalization model was established, and the migration patterns of pollutants in groundwater were simulated by FEFLOW software. The result shows that, in 30 years, due to the accident works and the artificial seepage failures, pollutants will infiltrate directly into the crack water of the weathering bedrock, and it will be controlled by the groundwater flow and gradually spread to the northern. Furthermore, the excessive pollution halo diffuses on the planar diffusion year by year; however it will be not beyond the factory boundary, and have basically no impact on the downstream village.

Keywords

Clean Field Project, Groundwater Pollution, Numerical Simulation

清洁场项目地下水污染迁移研究

陈 晨¹, 胡立新¹, 叶 力²

¹中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉

²武汉华璟天土木工程有限公司, 湖北 武汉

Email: 13807146669@163.com

收稿日期: 2018年5月2日; 录用日期: 2018年5月17日; 发布日期: 2018年5月28日

摘要

工业成品生产过程中所产生的污染严重威胁地下水安全, 如何对地下水水质进行有效预测成为了防控地下水污染风险的关键问题。本文基于某场地水文地质条件, 建立了水文地质概化模型, 采用FEFLOW软件模拟了研究区污染物在地下水中的迁移规律。研究表明, 在30年模拟期中, 在事故工况且人工防渗失效的影响下, 污染物下渗后直接进入基岩风化裂隙水中, 受地下水流向控制逐步向北部迁移扩散, 超标污染晕在平面上逐年扩散, 但污染物不会迁移出厂边界, 对下游村庄和沙河基本无影响。

关键词

清洁场项目, 地下水污染, 数值模拟

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

地下水资源的污染是地下水污染防治和保护的重点, 已引起国内外学者的广泛关注。学者们对地下水中污染物的迁移转化问题做了大量的研究。对地下水溶质运移的研究始于20世纪60年代, Rubin等[1]第一个建立了基于伽辽金有限元法的平衡反应条件下单向稳定水流迁移模拟实例。其后国内外学者们从理论和数值模拟方面开始开展了广泛研究。

国外如Bakis和Tuncan[2]通过模拟重金属浓度分布的多流计算机程序进行了垃圾填埋场渗滤液对地下水的污染模拟, 确定了污染物随时间和距离的迁移规律。Amos等[3]将反应项加入溶质运移方程中, 并运用到明尼苏达 Bemidji 地区含水层中有机污染物氧化过程的模拟。Fernández等[4]研究了城市垃圾填埋场渗滤液迁移对地下水和地表水造成的污染。Mondal等[5]利用 Visual MODFLASH Primod 4.4 软件构建了废水污染中氯离子的运移模型, 结果表明水力传导率比分散性影响作用更大。国内, 如王晓红等[6]给出了双重介质和多孔介质中垃圾渗滤液迁移模型的定解问题, 运用该模型对垃圾填埋场的污染扩散范围进行预测。刘晓丽等[7]建立了地下水环境中有机污染物迁移转化的变系数动力学模型。冯绍元等[8]在考虑弥散尺度效应的条件下建立了抽水井附近 SDM 溶质运移模型。马雷利[9]用 Voronoi 图实现钻孔数据的虚拟化, 建立了非均质多孔介质模型与地下水流和溶质运移数值模型结合的综合模型。薛强等[10]建立了环境介质中有机污染物迁移转化的非平衡动力学模型。王秉忱等[11]介绍了地下水有机化合物的迁移转化机理, 模拟研究了水环境中有机污染物的迁移转化过程。赵勇胜等[12]应用 MT3D 等建立了污染物迁移模型并进行了模型识别和检验。李丹等[13]基于 Visual Modflow 进行了广州市某垃圾填埋场地下水污染迁移规律研究。朱汝雄[14]对孔隙介质模型进行修正, 推导出适合单裂隙岩体二维溶质运移的数学方程, 并利用 GMS 模拟手段将其运用到某工程实例中。朱学愚等[15]采用等价多孔介质模型模拟了裂隙岩溶地区地下水中污染溶质的迁移, 并采用 MODFLOW 软件进行水流模拟。

本文以某清洁场项目为例, 在调查分析研究区水文地质条件的基础上建立与之对应的水文地质概念模型, 通过野外水文地质试验获取水文地质参数, 使用地下水流数学模型和溶质运移模型, 以地下水模拟软件 FEFLOW 为依托, 建立地下水流、溶质运移数值模拟模型, 研究厂区污染物在设定工况下的时空迁移规律。

2. 研究区概况

研究区位于湖南省某市丘陵地带，具体见图 1，地势总体西高东低，区内最高海拔 327.80 m，最低 115.3 m。研究区所在区域属亚热带季风气候，四季分明，冬冷夏热，年平均降水量为 1489.8 mm。

目标研究区内断裂不发育，无构造影响。研究区出露的地层是花岗岩($J_3y\eta\gamma$)，沟谷分布第四系(Q)冲洪积物。

区内含水层按埋藏条件及含水介质类型可分为第四系孔隙水和基岩风化裂隙水两大类。其中，第四系孔隙水主要分布于厂区西部沙河河谷阶地一带；基岩风化裂隙水广泛分布于除沙河河谷阶地以外的整个调查评价区内。在垂向上，局部为第四系孔隙水含水层，且分布不连续，其主要分布在厂区西部沙河河谷阶地一带，下伏是基岩风化裂隙水。在构建水文地质概念模型时考虑到第四系孔隙水含水层在整个调查区内分布范围较小且分布不连续，对模型的地下水流向、污染物运移预测及评价等影响有限，故重点关注与建设项目之间相关的风化裂隙水。

区域地下水主要接受大气降水垂直入渗补给及地表水侧向补给，区域植被发育，大部分地段表层岩石透水性较好，地下水补给条件较好。

区域地下水迳流主要受地形条件控制，地下水与地表水具有基本相同的分水岭，地下水迳流场为孔隙及裂隙，整体迳流方向与地表水迳流方向基本一致，即由北东向南西迳流，局部小流场受地形条件控制，由地形高处往低处迳流，区域地形起伏较大，整体迳流条件较好。

厂区地下水自然状态下主要以下降泉形式排泄于低洼沟谷处，部分以潜流形式排泄于地表溪沟，部分以民井井水形式排泄。



Figure 1. A schematic view of the study area

图 1. 研究区地理位置示意图

3. 地下水模型的建立

3.1. 模型概化

根据研究区水文地质条件可将研究区的水文地质概念模型概化为具有非均质、各向异性三维地下水非稳定渗流系统,概化模型边界范围见图 2。模型范围基于 ArcGIS 平台流域分析结合水文地质条件圈定。模型西部以地表河流沙河为界,全长约 5.7 km,模型北部、东部和南部均以地下水分水岭为界,全长约 28.85 km,模拟区总面积约 32.35 km²,基本构成一个较完整的水文地质单元模型顶面接受降雨补给,地表水体为排泄边界,底面与下伏地层无水量交换。

模型结构通过勘察资料及水文地质条件确定。根据评价区水文地质条件分析,确定评价区边界条件如下:

① 四周边界

北部、东部及南部均由丘陵形成的地表分水岭作为隔水边界,西部以沙河为边界,定为第一类边界(给定水头边界)。

② 上边界为降水补给、蒸发排泄边界。

③ 下边界以微风化基岩作为底部相对隔水边界。模型垂向自上往下依次分为 1 层:一层为:基岩风化裂隙水,模型空间结构见图 3。



Figure 2. Boundary of conceptual model
图 2. 概念模型边界示意图

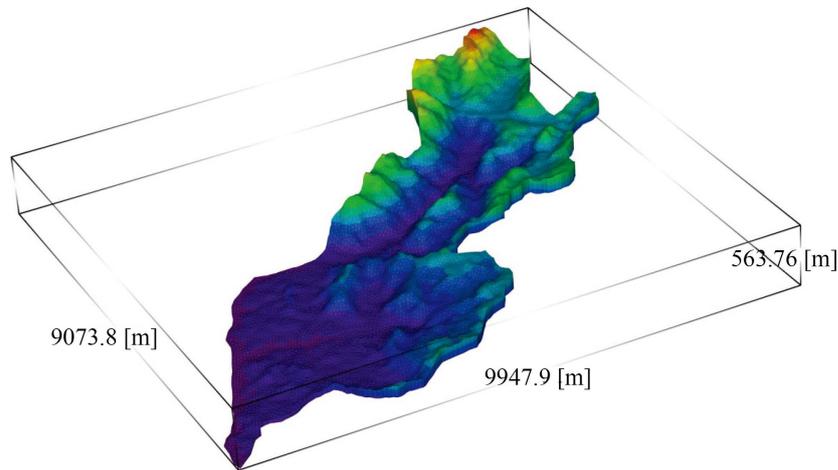


Figure 3. The spatial structure of conceptual model
图 3. 概念模型空间结构图

根据前文概化的水文地质概念模型，可用以下地下水渗流偏微分方程及其定解条件来表示：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} \right) + w = \mu_s \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

$$H(x, y, z, 0) = H_0, \quad (x, y, z) \in \Omega \quad (2)$$

$$K \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{S_2} = q(x, y, z, t), \quad (x, y, z) \in S_2 \quad (3)$$

$$H(x, y, z, t) = H_1, \quad (x, y, z) \in S_1 \quad (4)$$

式中， Ω ：地下水渗流区域，根据概化模型， Ω 为 6.65 km²； H_0 ：初始地下水位， H_0 的取值后文给出，量纲为 L； H_1 ：指定水位，量纲为 L； S_1 ：第一类边界水头边界； S_2 ：第二类边界流量边界； μ_s ：单位储水系数，量纲为 L⁻¹； K_{xx} ， K_{yy} ， K_{zz} ：分别为 x 、 y 、 z 主方向的渗透系数，量纲为 LT⁻¹； w ：源汇项，包括蒸发，降雨入渗补给，量纲为 T⁻¹； $q(x, y, z, t)$ ：表示在边界不同位置上不同时间的流量，量纲为 L³T⁻¹； $\frac{\partial H}{\partial n}$ ：表示水力梯度在边界法线上的分量。

结合本次概化的水文地质模型，式(2)中由于为零流量边界，故 q 取为 0；北部竹皮河等效定义为定水头边界，故式(4)中 H_1 取值为竹皮河水头值 65 m，南部东宝水库等效定义为定水头边界，故该处 H_1 为 87 m。

3.2. 网格剖分

将划定的模拟区离散为不规则三角剖分网格。模型平面上共剖分 8180 个节点，模型总共 15,952 个单元。根据勘探钻探资料结合评价区地层资料，利用克里金插值法得到各片高程，输入 FEFLOW 后得到评价区三维地质模型如图 3，其中结点数 18,526 个，有限单元数 18,077 个。

3.3. 参数选取及识别验证

根据抽水试验、渗水试验等水文地质试验取得本次模拟的水文地质参数，校验模型需对模型进行上百次运算，参数校验除基于勘察资料外，主要采用“试错法”调整。最终拟合结果的合理性依据：研究区流场形态、模型收敛性、水位观测孔拟合数量。根据模型识别验证，参数取值见表 1。

Table 1. The initial parameter table
表 1. 评价区水文地质初始参数取值表

参数	基岩风化层
K_{xx} (cm/s)	4.6E-04
K_{yy} (cm/s)	4.6E-04
K_{zz} (cm/s)	4.6E-05
给水度	0.3
储水系数	0.3
降雨入渗系数	0.2

本次预测评价中初始流场采取的技术方法是将模拟区参数分区及初始参数取值表输入模型，经过稳定流计算得到评价区稳定流条件下的天然流场，然后根据实际观测水位对天然流场进行参数校正，得到校正后的地下水初始流场及水文地质参数(图 4)，其中图 4 展示了校正后的地下水初始流场。通过图 4 可以看到，拟合点基本均匀分布在标准线附近，反应了模拟结果与实际测量值之间总体趋势是一致的，所有值基本都分布在置信区间(5 m)内，可以认为模拟值与实际值拟合情况较好，图 5 可以看到初始流场的模拟值与实际观测值在总体趋势上趋于一致，拟合效果较好。

通过上述拟合数据对比，可以说明本次建立的地下水稳定流模型基本符合评价区实际水文地质条件，基本反映了地下水系统的流场特征，故可以利用该模型得到的水头值作为非稳定流的初始流场并以此为基础对建设区地下水环境影响进行预测评。

3.4. 溶质模型

由于水动力弥散尺度效应的存在为模拟和预测地下水中溶质在介质中的运移规律带来了困难，本次弥散度的选取在弥散试验的基础上结合了 Geihar [11]等(1992)对世界范围内所收集的 59 个大区域弥散资料进行的整理分析成果综合确定。最终确定的溶质运移模型参数如表 2 所示。

4. 污染源强设定以及预测结果

4.1. 污染源强设定

情景类型：非正常工况(事故条件下)、人工防渗措施失效。泄漏源强类型：间断源强。垃圾渗滤液收集室位于厂区中部垃圾卸料大厅下方，其长度与垃圾卸料大厅相的长度等，总容积 1180 m³，按高度为 3 m 计算。渗滤液收集室总面积为 393 m²，事故条件人工防渗失效，则天然渗透系数取 1.015×10^{-4} cm/s，按 30 年模拟。泄漏点：厂区中部垃圾渗滤液收集室。泄漏面积：393 m²。泄漏时间：假设垃圾渗滤液收集室渗漏发生事故导致污染物渗入地下，从发生泄漏到泄漏污染物处理完毕不再发生污染的时间长为 5 天。泄漏量：渗入地下体积 172.3 m³。泄漏浓度：污水中 NH₃-N：15,000 mg/L。

为了研究污染物随时间迁移规律，本次预测年限设定为发生泄露 100 天、1000 天和 30 年，本次评价的特征污染物参照《GB/T14848-93》中相应高锰酸盐指数的相应质量等级标准浓度值(0.2 mg/L)，预测过程中浓度超过上述标准值的区域即为超标区域。

4.2. 污染区迁移结果

由图 6 可知，在 30 年模拟期中，事故工况且人工防渗失效下污染物下渗后直接进入基岩风化裂隙水中，受地下水流向控制逐步向北部迁移扩散，超标污染晕在平面上逐年扩散，但并未超出厂区边界。

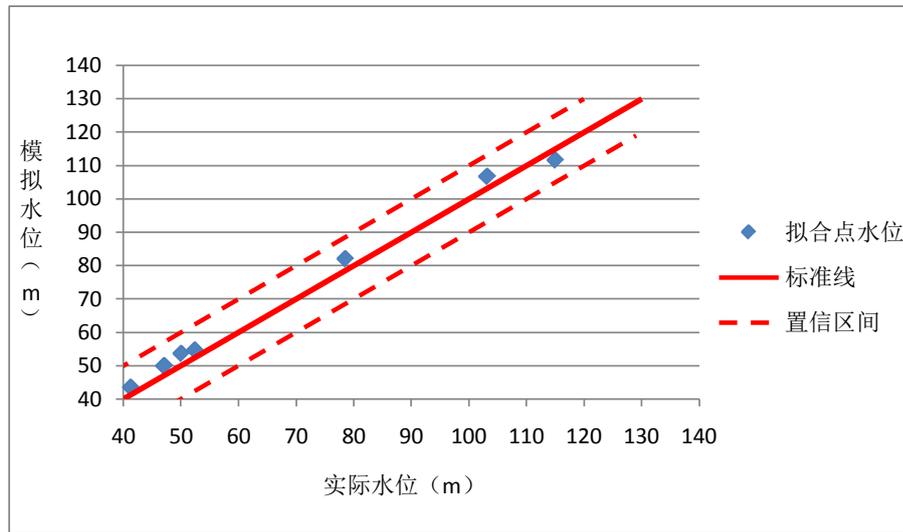


Figure 4. The initial flow point fitting figure

图 4. 初始流场水位拟合散点分布图

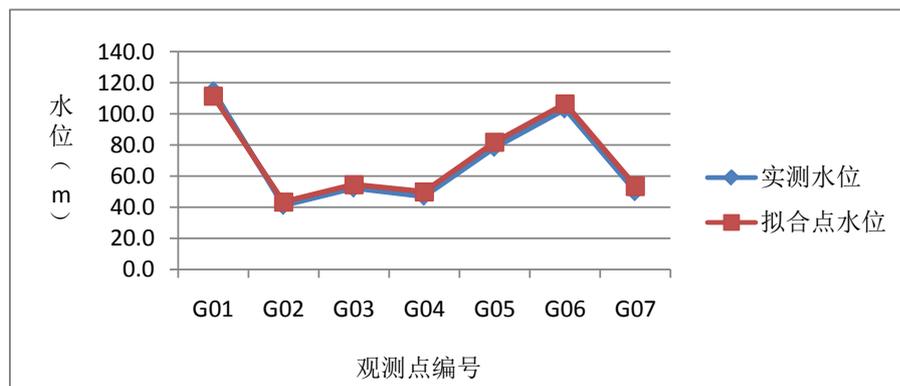


Figure 5. The initial flow field fitting figure

图 5. 初始流场水位拟合折线图

Table 2. Solute transport model parameters table

表 2. 溶质运移模型参数表

参数	第一层
纵向弥散度(m)	100
横向弥散度(m)	10
有效孔隙度	0.28

图 6 展示了模型运行 100 天、1000 天和 30 年三个时段地下水中污染物的迁移扩散情况。表 3 针对三个典型时间段，统计了污染晕的运移距离、最高浓度、污染面积和垂向迁移距离等模拟结果。

在平面上污染晕整体迁移方向在流向控制下向北部迁移，污染晕最高浓度逐步降低，面积呈先扩大后缩小的趋势。三个时间段污染晕最高浓度分别约为 915.2 mg/L、335.6 mg/L、77.6 mg/L，从污染区边界算起，其最大迁移距离分别约为 25.4 m、31.4 m、66.9 m，污染面积约为 8800.0 m²、9839.5 m²、6694.9 m²，在 30 年的模拟期内污染物未迁移出厂区边界。

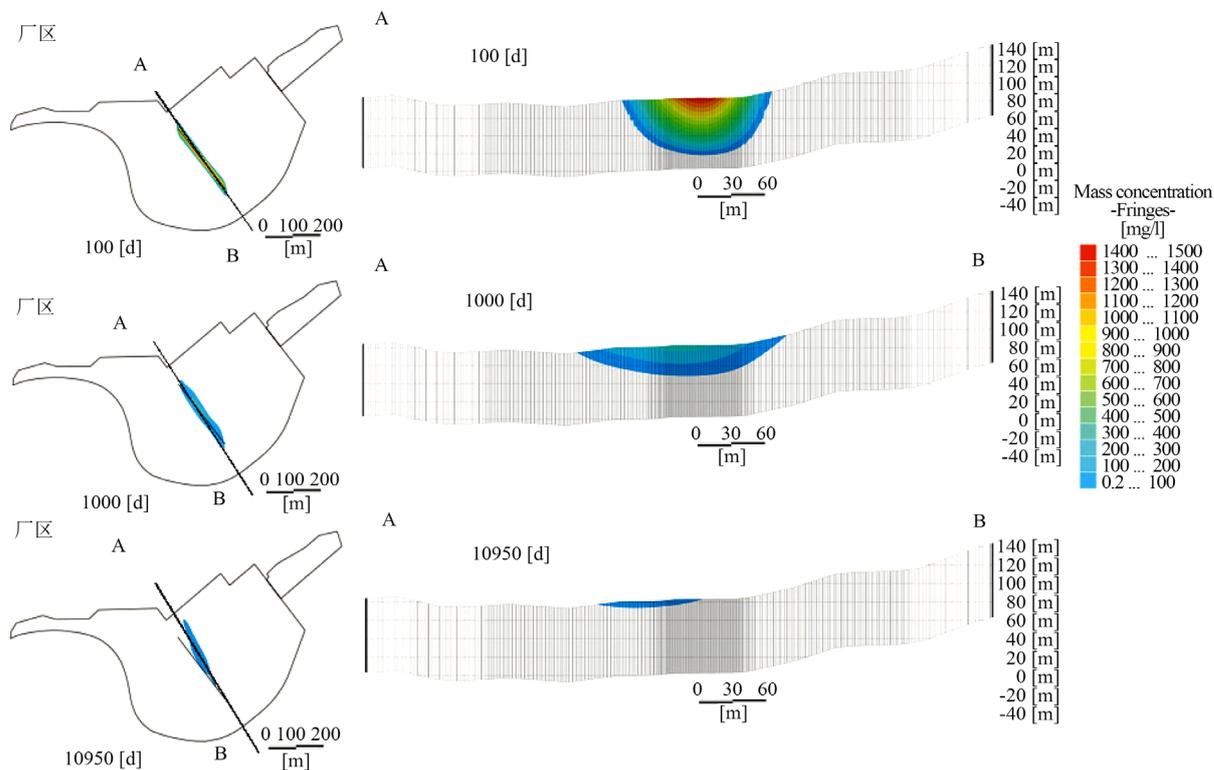


Figure 6. Pollutant migration results figure

图 6. 污染物迁移结果图

Table 3. Pollutant migration results table

表 3. 溶质运移结果表

时间	水平迁移距离(m)	污染面积(m ²)	垂向迁移距离(m)	是否出场区边界
100 天	25.4	8800.0	63.0	否
1000 天	31.4	9839.5	35.0	否
30 年	66.9	6694.9	7.0	否

在垂向上污染晕逐步向下迁移，三个时段中最大垂向迁移距离分别约为 63.0 m、35.0 m、7.0 m。

综上所述，事故工况且防渗失效下，30 年运行期间污染物对基岩风化裂隙水含水层造成了一定的污染，但污染物不会迁移出厂边界，对下游村庄和沙河基本无影响。

5. 结论

本文选取某清洁场项目为例，基于研究区水文地质条件，合理概化水文地质概念模型，采用 FEFLOW 软件进行数值建模，基于设定工况下得到研究区地下水中污染物的迁移规律，并进行地下水监测方案的定量分析。基于以上研究得出结论如下：

1) 在 30 年模拟期中，事故工况且人工防渗失效下污染物下渗后直接进入基岩风化裂隙水中，受地下水流向控制逐步向北部迁移扩散，超标污染晕在平面上逐年扩散，但并未超出厂区边界。

2) 事故工况且防渗失效下，30 年运行期间污染物对基岩风化裂隙水含水层造成了一定的污染，但污染物不会迁移出厂边界，对下游村庄和沙河基本无影响。

分析了地下水监测网规划现状及其发展趋势，提出地下水监测系统的概念并抽象出其逻辑模型。

参考文献

- [1] Rubin, J. and James, R.V. (1973) Dispersion Affected Transport of Reacting Solutes in Saturated Porous Media: Galerkin Method Applied to Equilibrium Controlled Exchange in Unidirectional Steady Water Flow. *Water Resources Research*, **9**, 1332-1356. <https://doi.org/10.1029/WR009i005p01332>
- [2] Bakis, R. and Tuncan, A. (2011) An Investigation of Heavy Metal and Migration through Groundwater from the Landfill Area of Eskisehir in Turkey. *Environmental Monitoring & Assessment*, **176**, 87-98. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1568-3>
- [3] Amos, R.T., Bekins, B.A., Delin, G.N., *et al.* (2011) Methane Oxidation in a Crude Oil Contaminated Aquifer: Delineation of Aerobic Reactions at the Plume Fringes. *Journal of Contaminant Hydrology*, **125**, 13-25. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2011.04.003>
- [4] Fernández, D.S., Puchulu, M.E. and Georgieff, S.M. (2014) Identification and Assessment of Water Pollution as a Consequence of a Leachate Plume Migration from a Municipal Landfill Site (Tucumán, Argentina). *Environmental Geochemistry & Health*, **36**, 489-503. <https://doi.org/10.1007/s10653-013-9576-1>
- [5] Mondal, N.C. and Singh, V.P. (2012) Chloride Migration in Groundwater for a Tannery Belt in Southern India. *Environmental Monitoring & Assessment*, **184**, 2857-2879. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2156-x>
- [6] 王晓红, 杨天行. 城市生活垃圾淋滤液运移模型问题[J]. 工程勘察, 1998(4): 47-50.
- [7] 刘晓丽, 梁冰, 薛强. 地下水环境中有机污染物迁移转化动力学模型的研究[J]. 工程勘察, 2003(1): 24-28.
- [8] 冯绍元, 高光耀, 霍再林, 等. 考虑弥散尺度效应的抽水井附近溶质运移模型及半解析解[J]. 水利学报, 2010, 39(9): 1024-1031.
- [9] 马雷. 非均质多孔介质多尺度模型及其在地下水模拟中的应用[D]: [博士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- [10] 薛强, 梁冰, 刘建军, 等. 环境介质中有机污染物运移的数值模型[J]. 应用与环境生物学报, 2003, 9(6): 647-650.
- [11] 王秉忱. 地下水污染地下水水质模拟方法[M]. 北京: 北京师范学院出版社, 1985.
- [12] 赵勇胜, 苏玉明, 王翊红. 城市垃圾填埋场地下水污染的模拟与控制[J]. 环境科学, 2009(S1): 83-88.
- [13] 李丹, 曾慧, 张明珠, 等. 基于 Visual Modflow 的广州市某垃圾填埋场地下水污染迁移规律研究[J]. 人民珠江, 2017, 38(6): 66-74.
- [14] 朱汝雄. 裂隙岩体溶质运移模型实验及运移规律初步研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 河海大学, 2004.
- [15] 朱学愚, 刘建立. 山东淄博市大武水源裂隙岩溶水中污染物运移的数值研究[J]. 地学前缘, 2001, 8(1): 171-178.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2324-7967, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: ije@hanspub.org