

裂隙介质水流与溶质运移数值模拟研究综述

王礼恒^{1,2}, 李国敏^{1,2}, 董艳辉^{1,2}

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 中国科学院工程地质力学重点实验室, 北京 100029)

摘要:在介绍裂隙介质中的水流运动及裂隙介质溶质运移规律的基础上,总结了多种用于概化裂隙岩体的模型及数值方法,介绍了各模型相应的模拟软件如 TOUGH2 与 FRSCMAN 的发展及应用,指出裂隙介质中地下水运动及溶质运移数值模拟研究仍处于探索阶段,方法与技术均不成熟,机理研究、数值模拟方法等方面有待进一步发展。

关键词:裂隙;地下水运动;溶质运移;数值模拟;综述

中图分类号:TV131.5

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2013)04-0084-05

Review of numerical simulation of flow and solute transport in fractured media//WANG Liheng^{1,2}, LI Guomin^{1,2}, DONG Yanhui^{1,2} (1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Beijing 100029, China)

Abstract: Based on introduction of flow and solute transport rule in fractured media, and a summary of various conceptual models and numerical methods, the development and application of the corresponding software or codes such as TOUGH2 and FRSCMAN are introduced. This paper put forwards that the researches on numerical simulation of flow and solute transport in fractured media are still in the initial stage, and the relevant methods and techniques are not mature. Finally, the existing problems in the numerical simulation methods for flow and solute transport in fractured media are discussed. Some prospects such as the mechanism research and numerical simulation technology are also proposed.

Key words: fracture; groundwater flow; solute transport; numerical simulation; review

岩体中的裂隙发育受多种因素影响,其宽度、展布方向、伸展长度等均具有不确定性,因而裂隙岩体具有强烈的非均质各向异性。裂隙岩体的非均质各向异性不仅对其中的水流运动影响很大,对溶质运移的作用也不容忽视^[1]。目前,地下水数值模拟技术已成为评估、预测水质水量问题的重要手段。对比物理模型,数值模拟技术不仅可以系统地分析和整理水文、地质、物探、钻探等多种资料,而且能够方便快捷地研究复杂多变的含水层系统。鉴于裂隙介质的高度复杂性,数值模拟技术成为深入研究裂隙介质地下水运动规律及溶质运移的重要方法。

本文总结了多种用于概化裂隙岩体的概念模型,并列举出近年来的应用实例,对比不同的数值方法及软件(代码),为跟踪了解裂隙介质地下水运动及溶质运移数值模拟提供平台。

1 裂隙介质水流与溶质运移规律

1.1 裂隙介质中的水流运动

裂隙网络的高度复杂性决定其研究基础为单裂

隙。基于光滑平行板立方定律,单裂隙中的水流问题逐渐向真实、精细的沟槽化流动问题发展。近年来,Brush等^[2]进行了粗糙裂隙壁的模拟,深入探讨了不同假设条件下单裂隙中渗流的特点。Jeong等^[3]利用地质统计方法刻画粗糙裂隙壁,研究有效正应力与裂隙隙宽之间的非线性关系,结果显示裂隙的几何形态显著影响其中的渗流与溶质运移。对于含裂隙网络的岩体,在进行水流及溶质运移数值模拟之前要根据实际情况建立概念模型。描述裂隙岩体水流及溶质运移的概念模型主要有等效连续介质模型、双重连续介质模型、离散裂隙网络模型、随机模型和耦合模型等^[4-5]。这几种概念模型以不同的侧重点对裂隙岩体进行了概化,各有优缺点,适用范围也不同:等效连续介质模型突出裂隙介质的宏观特性,可直接套用多孔介质溶质运移理论,是目前解决实际较大尺度问题的主要方法,但无法描述裂隙的非均质各向异性,适用条件有限;双重连续介质模型同时考虑裂隙域与基质域中的水流、溶质运移,较符合实际,但两系统间的交换系数等很难确定;离

散裂隙网络模型详细刻画了每条裂隙中水流与溶质的运移特征,反映了实际裂隙强烈非均质性、各向异性、非连续性等特点,但受限于裂隙特征不易获取、模拟计算量及存储量大等缺点,目前仅适用于解决较小尺度的问题;随机模型多以单裂隙为基础,对裂隙特征参数进行随机处理得到相应模型,其概化出来的裂隙特征与天然裂隙仅在统计特征上相似;耦合模型多考虑裂隙所处环境,如高温、高压等情况,使之与温度场、应力场或化学场等相互耦合以得到特殊环境下水流与溶质运移的特征。

Selroos 等^[6]对同一试验场地使用了随机模型、离散裂隙网络模型和沟槽网络模型 3 种不同的方法进行渗流和溶质运移模拟,模拟结果基本相同。McKenna 等^[7]利用随机方法对模型赋予高分辨率的渗透系数分布,对比解析解得到了满意的结果。Wu 等^[8]认为考虑主干裂隙、次级裂隙、微裂隙、基质等多重效应,根据它们自身不同特性来描述其中水流及溶质运移能够得出更为精确的结果。

1.2 裂隙介质溶质运移

无论在实验室内还是在天然条件下,单裂隙介质中溶质运移的主要过程均包括^[9]:溶质在裂隙域中的对流、机械弥散、分子扩散;溶质在基质域内的吸附、解吸附及分子扩散;溶质在裂隙域与基质域之间的交换;溶质放射性衰变等自身变化。

刻画裂隙介质中的溶质运移较为复杂,最早 Tang 等^[10]将裂隙岩体考虑为裂隙域与基质域两种形式,后来 Zhou 等^[11]认为应当在二者之间再划出一块或者多块区域,参照裂隙域和基质域的各项参数予以赋值,这样才能更好地解释野外示踪试验中穿透曲线的一些特点。此外,裂隙介质中溶质运移具有多过程效应、尺度效应,造成其参数获取比较困难,因此对于野外示踪试验的结果仍处在探索解释阶段。Sun 等^[12]在前人的基础上将溶质设置为放射性核素链并推求解析解,证明脉冲式进入裂隙中的核素,无论是母核素还是子核素在裂隙中迁移均保持相同速度,污染晕中心在基质域中而不在裂隙壁上,这对于核废料地质处置具有重要意义。

目前对于单裂隙溶质运移,多数仍建立在水流服从达西定律、溶质扩散满足费克定律的基础之上进行研究,然而对于各向异性、非均质性较为明显的裂隙介质而言,上述条件不再适用,因此对于非达西流条件^[13]、非费克定律^[14]下的单裂隙溶质运移成为下一步研究重点。

2 数值模拟

2.1 单裂隙介质溶质运移数值模拟

解析解虽然具有较高精度,但由于适用条件简

单,不能解决复杂实际问题,因此适用性强的数值模拟技术仍是解决问题的首选办法。目前看来,单裂隙介质溶质运移数学模型有沟槽化流动模型、控制体积模型、表面吸附模型、流线模型等^[9]。单裂隙介质溶质运移需要考虑的因素繁多,过程复杂,主要包括:沿裂隙方向的弥散、扩散;基质域的表面吸附与解吸附及其内部的扩散等,因此为了能够使用数学模型刻画单裂隙溶质运移,通常合理简化模型,使之各有侧重点。

Moreno 等^[15]考虑沟槽化流动时,在进行以机械弥散为主导因素的溶质运移数值模拟后指出,穿透曲线的峰值比预期到达的早并伴有多峰,此外还出现明显拖尾现象,这为野外示踪试验获取弥散系数提供了理论支持。Kennedy^[16]认为基质域中的扩散不可忽略,因此提出使用控制体积模型进行单裂隙溶质运移模拟,使用上游加权法保证数值解的稳定性。由于表面吸附作用对于活性溶质影响很大,Berkowitz 等^[17]给出了忽略裂隙纵向分子扩散情形下活性溶质控制方程,并指出表面反应迟滞了溶质运移;O'Brien 等^[18]考虑基质域中矿物溶解与沉淀对于裂隙壁及隙宽的影响,利用格子气方法与有限差分法相结合的数值方法求解活性溶质运移数值模拟,并对比不同渗透率下非活性溶质运移数值模拟结果。Wendland 等^[19]构建 3D 平行板单裂隙溶质运移数值模拟,并利用实验室物理模拟进行参数校核,结果表明平行板单裂隙数值模拟方法可行,结果可靠。由于隙宽变化在溶质运移中起到重要作用,因此应用统计手段刻画裂隙面的粗糙度进而描述隙宽仍是十分必要的。近来 Tan 等^[20]使用格子玻尔兹曼方法(LBM)与改进矩传播方法(MMP)相结合进行单裂隙溶质运移数值模拟计算,证实了 LBM 应用于裂隙介质溶质运移具有可行性。

单裂隙是裂隙网络的基本组成单元,因此对其溶质运移机理的研究有助于深入探讨裂隙网络中溶质运移规律,对采用裂隙网络模型进行溶质运移预测模拟有着重要意义。

2.2 裂隙岩体中水流与溶质运移数值模拟

2.2.1 数值方法

有限差分法与有限元方法对于求解地下水流动及溶质运移问题均适用,因此其在地下水数值模拟技术中应用非常广泛。随着数值方法的进一步发展,边界元法、体积元法、随机游走法、LBM 等方法被广泛引入地下水流动问题的求解中。

边界元法是将研究区离散成边界单元,通过加权余量等方法把微分方程转化为边界积分方程,求解获得数值解。由于离散化引起的误差仅来自于边

界,因而提高了计算精度,同时大幅度减小了计算量与数据存储量。Samardzioska 等^[21]和 Lenti 等^[22]分别将其应用于双重介质模型和离散裂隙网络模型的水流计算中,均取得了较好的结果。边界元法的一大优点是能够自身降维,如对于三维问题,有限元法需要立体剖分,而边界元法只需要对区域的边界表面进行剖分,采用二维网格降低计算域的维数。

为了克服经典水动力弥散方程的假设应用于非均质介质中存在的种种问题(如溶质不规则迁移及不服从费克定律等),Berkowitz 等^[23]将随机游走法引入到溶质运移模拟的计算中;Li^[24]应用该方法模拟了交叉裂隙水流中溶质运移的混合行为;Bodin 等^[25]利用该方法求解离散裂隙网络溶质运移问题并与解析解对比,发现该方法计算结果具有较高的精度,因此有望在复杂 2D 裂隙网络或 3D 沟槽化流动模型求解中得到更广泛的应用。尽管随机游走法在强烈非均质介质溶质运移研究中得到了一定程度的应用,但仍存在一些问题,如计算过程中的参数取值问题,该方法是否具有普适性,以及与研究问题尺度之间的关系等。

有限分析法^[26]是在有限元方法的基础上发展而来,将方程局部线性化后得到解析解,将各种解析方法应用于偏微分方程的数值求解中,能够获得较为精确的解,同时避免了数值弥散和振荡,计算稳定性好,收敛快。但由于解析解求解困难,计算量及数据存储量大,因此用得较少。

LBM^[27]是一种新兴的计算方法,已在许多领域中得到应用,也适用于计算复杂地质体中地下水的流动,如裂隙、岩溶等非均质性较强的含水介质。LBM 不像传统的数值方法那样在时间与空间上离散计算域,而是求解由玻尔兹曼方程控制的粒子方程(速度及概率密度函数),由于其计算过程不需要相邻节点数据,因此具有高度并行性。Anwar 等^[28]利用该方法进行了多重尺度非均质流动模拟和溶质运移模拟等研究,均取得了令人满意的结果。

无论是水流问题还是溶质运移问题,使用的数值方法具有很大程度的相似性,从描述质点运动的角度来看,主要分为拉格朗日法与欧拉法。由于欧拉法具有更为直观的物理意义,在此基础上发展的有限差分法和有限元方法能够经久不衰。随着对溶质运移机理的深入研究,人们迫切地需要提高数值模拟的仿真性,在模型多样化发展的同时,各种数值方法也相继出现,如基于拉格朗日法的随机游走法,或基于欧拉-拉格朗日混合法的特征性法等。尽管新方法在模拟中得到不同程度的应用,但仍应当注意到各种方法的局限性及参数取值、尺度效应等问题。

2.2.2 常用软件

目前裂隙介质水流及溶质运移模型有多种,模拟软件(代码)也较多。按照概念模型的不同,将相关模拟软件(代码)进行分类。

a. 等效连续介质模型。Gburek 等^[29-30]将裂隙介质概化为等效连续介质模型,并使用了由 McDonald 等于 1988 年开发的主要用于多孔介质渗流及溶质运移模拟的 MODFLOW 和 MT3D 软件进行水流及溶质运移模拟与预测。

b. 离散裂隙网络模型。①德国水资源规划与系统研究所(WASY)于 1970 年推出了以达西定律、立方定律为基础的 FEFLOW,该软件能够进行离散裂隙网络的水流、溶质及热运移模拟。Miotlinski 等^[31-32]利用该软件解决了裂隙介质含水层环境修复问题。②FRACMAN 由 Golder 联合公司针对离散裂隙网络模型模拟裂隙水流与溶质运移而开发,它在模型中明确定义了模拟区域中每条裂隙的几何形状,比较真实地刻画了裂隙介质水流及溶质的运移特征。目前已能模拟中等尺度下包含数千条裂隙的水流与溶质运移,但模拟大体积的高密度裂隙仍需简化裂隙网络^[33]。③FRACTRAN 由加拿大滑铁卢水文地质公司于 1998 年开发推广,该软件包含了裂隙网络生成预处理程序,能够随机给定裂隙网络集合特征等。该软件采用的数值方法为拉普拉斯变换克里金有限元法,在实际工程中得到广泛应用^[34]。

c. 耦合模型(双重介质模型)。①TOUGH2^[35]是由美国伯克利劳伦斯国家实验室(Lawrence Berkeley National Laboratory)主要为高放射性核废料深地质处置开发的一套多重尺度下涉及裂隙介质中水流、热、盐、放射性核素运移的多相多场耦合的模拟程序,它采用积分有限差分方法进行空间离散,可以通过内置几何数据适应不同裂隙介质的模拟。TOUGH2 在概念模型上以耦合模型为基础,因具备对裂隙介质中水流和热运移的较强模拟能力而被国际认可,目前已应用于包括环境修复和高放核废料地质处置在内的多相多组分等棘手问题的处理中^[36]。TOUGH2 需要用户自行做好模拟工作的前、后处理工作,相比之下由 Golden 联合公司对 TOUGH2 模拟程序进行家族图形化后开发的界面 PetraSim 更为友好,使用户能够专注于模型,降低了 TOUGH2 的复杂性和使用难度^[37]。②SWIFT 由 HSI 地质公司于 2000 年开发,主要用于模拟三维地下水流动及热、盐、放射性核素等在水流、裂隙等复杂地质介质中的运移,其开发初衷为核废料地质处置。它也采用耦合模型并能对裂隙介质中水流、溶质运移及热运移等问题进行模拟^[38]。

d. 多种概念模型的整合(等效连续介质模型、离散裂隙网络模型、耦合模型等)。①FEHM 由洛斯阿拉莫斯国家实验室(Los Alamos National Laboratory, LANL)于20世纪80年代开发,能够模拟饱和、变饱和非等温、多相流等在非均质介质中的污染物运移及热运移问题^[7,39]。②FRAC3DVS 由加拿大滑铁卢水文地质公司于1992开发,用于模拟多孔介质、离散裂隙孔隙介质中变饱和地下水水流溶质运移^[40]。2002年该软件加入地表水耦合过程,更名为Hydrosphere,其水流数值方法为控制体积有限元法,溶质运移数值方法为克里金有限元法。

综上所述,基于不同概念模型或不同数值方法的多样化软件(代码)一方面有利于从多角度刻画裂隙介质水流及溶质运移的特性,从而更逼真地建立模型;另一方面也说明人们对裂隙介质的水流与溶质运移还没有形成统一的认识。

3 存在问题与研究展望

裂隙介质水流及溶质运移数值模拟方法自诞生以来已经取得了很大进展,但仍存在较多问题,需要进一步从机理研究入手发展数值模拟技术,并结合室内与野外试验结果予以验证。

a. 机理研究有待进一步发展。已有数值模拟方法均假设水流服从达西定律、溶质扩散符合费克定律,鉴于裂隙介质的不连续性、强烈非均质性、高度各向异性,以上两个重要假设均不成立。因此,深入研究非达西流动规律、非费克定律溶质迁移机理才能为高仿真性数值模拟提供良好的基础与平台。

b. 数值模拟的仿真性有待提升。首先需提高概念模型仿真能力,可采用CT扫描技术获取岩体中每条裂隙的几何特征继而建立裂隙网络,利用并行计算技术等提高数据计算速度及存储量,以克服离散裂隙网络模型目前面临的难题;其次要提高数值模型参数的精确性,利用多种技术方法获取裂隙岩体相关参数是重要的发展趋势,综合野外实际观测资料及地球物理、水文地质手段等获取裂隙几何特征要素及水力学参数。目前大部分参数来源于实验室,其适用性较难厘定,参数本身与研究尺度之间是否存在稳定的函数关系尚未确定。

c. 数值方法尚需改善。为避免数值弥散振荡,加快计算速度,亟待研究具有高度收敛性的数值方法。鉴于随机游走法求解非均质介质溶质运移问题取得了较好的结果,有望进一步在复杂3D裂隙网络模型中使用。此外,LBM也是非常适合计算复杂介质中流动或溶质运移的计算方法,自身具有较高的并行度,有望得到进一步发展。

d. 发展不确定性模型。裂隙介质空间几何特征、渗流参数、弥散系数等均具有较强空间不确定性,因此采用统计手段将不确定性模拟引入裂隙介质水流与溶质运移数值模拟中具有较好的发展前景。

参考文献:

- [1] BEAR J, CHIN F T, MARSILY G D. Flow and contaminant transport in fractured rock [M]. London: Academic Press, 1993.
- [2] BRUSH D J, THOMSON N R. Fluid flow in synthetic rough-walled fractures: Navier-Stokes, Stokes, and local cubic law simulations [J]. Water Resour Res, 2003, 39 (4). doi:10.1029/2002WR001346.
- [3] JEONG W, SONG J. A numerical study on flow and transport in a rough fracture with self-affine fractal variable apertures [J]. Energy Sources, 2008, 30 (7): 606-619.
- [4] 王锦国, 周志芳. 裂隙岩体溶质运移模型研究 [J]. 岩土力学, 2005, 26 (2): 270-276. (WANG Jinguo, ZHOU Zhifang. Study on model of solute transport in fractured rock mass [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26 (2): 270-276. (in Chinese))
- [5] NEUMAN S P. Trends, prospects and challenges in quantifying flow and transport through fractured rocks [J]. Hydrogeology Journal, 2005, 13 (1): 124-147.
- [6] SELROOS J O, WALKER D, STRÖM A, et al. Comparison of alternative modelling approaches for groundwater flow in fractured rock [J]. Journal of Hydrology, 2002, 257 (1/2/3/4): 174-188.
- [7] McKENNA S A, WALKER D, ARNOLD B. Modeling dispersion in three-dimensional heterogeneous fractured media at Yucca Mountain [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2003, 62: 577-594.
- [8] WU Y S, LIU H H, BODVARSSON S. A triple-continuum approach for modeling flow and transport processes in fractured rock [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2004, 73 (1/2/3/4): 145-179.
- [9] 程诚, 吴吉春, 葛锐. 单裂隙介质中的溶质运移研究综述 [J]. 水科学进展, 2003, 14 (4): 402-408 (CHENG Cheng, WU Jichun, GE Rui. Review of the research on solute transport in a single fracture [J]. Advances in Water Science, 2003, 14 (4): 402-408. (in Chinese))
- [10] TANG D H, FRIND E O, SUDICKY E A. Contaminant transport in fractured porous media; analytical solution for a single fracture [J]. Water Resour Res, 1981, 17 (3): 555-564.
- [11] ZHOU Q, LIU H H, MOLZ F J, et al. Field-scale effective matrix diffusion coefficient for fractured rock: results from literature survey [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2007, 93 (1/2/3/4): 161-187.
- [12] SUNY, BUSCHECK T A. Analytical solutions for reactive transport of N-member radionuclide chains in a single fracture [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2003, 62:

- [13] CHEN Z, QIAN J Z, QIN H. Experimental study of the non-darcy flow and solute transport in a channeled single fracture [J]. *Journal of Hydrodynamics*; Ser B, 2011, 23 (6): 745-751.
- [14] BAUGET F, FOURAR M. Non-Fickian dispersion in a single fracture [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2008, 100(3/4): 137-148.
- [15] MORENO L, TSANG C F. Flow channeling in strongly heterogeneous porous media: a numerical study [J]. *Water Resour Res*, 1994, 30(5): 1421-1430.
- [16] KENNEDY C A, LENNOX W C. A control volume model of solute transport in a single fracture [J]. *Water Resour Res*, 1995, 31(2): 313-322.
- [17] BERKOWITZ B, ZHOU J. Reactive solute transport in a single fracture [J]. *Water Resour Res*, 1996, 32(4): 901-913.
- [18] O' BRIEN G S, BEAN C J, McDERMOTT F. Numerical investigations of passive and reactive flow through generic single fractures with heterogeneous permeability [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 213(3/4): 271-284.
- [19] WENDLAND E, HIMMELSBACH T. Transport simulation with stochastic aperture for a single fracture: comparison with a laboratory experiment [J]. *Advances in Water Resources*, 2002, 25(1): 19-32.
- [20] TAN Y F, ZHOU F. Simulation of solute transport in a parallel single fracture with LBM/MMP mixed method [J]. *Journal of Hydrodynamics*; Ser B, 2008, 20(3): 365-372.
- [21] SAMARDZIOSKA T, POPOV V. Numerical comparison of the equivalent continuum, non-homogeneous and dual porosity models for flow and transport in fractured porous media [J]. *Advances in Water Resources*, 2005, 28(3): 235-255.
- [22] LENTI V, FIDELIBUS C. A BEM solution of steady-state flow problems in discrete fracture networks with minimization of core storage [J]. *Computers Geosciences*, 2003, 29(9): 1183-1190.
- [23] BERKOWITZ B, SCHER H, SILLIMAN S E. Anomalous transport in laboratory-scale, heterogeneous porous media [J]. *Water Resour Res*, 2000, 36(1): 149-158.
- [24] LI Guomin. Tracer mixing at fracture intersections [J]. *Environmental Geology*, 2002, 42(2): 137-144.
- [25] BODIN J, POREL G, DELAY F. Simulation of solute transport in discrete fracture networks using the time domain random walk method [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 208(3/4): 297-304.
- [26] CHEN C J, CHEN H C. Finite analytic numerical method for unsteady two-dimensional Navier-Stokes equations [J]. *Journal of Computational Physics*, 1984, 53(2): 209-226.
- [27] EKER E, AKIN S. Lattice boltzmann simulation of fluid flow in synthetic fractures [J]. *Transport in Porous Media*, 2006, 65(3): 363-384.
- [28] ANWAR S, SUKOPM C. Regional scale transient groundwater flow modeling using Lattice Boltzmann methods [J]. *Computers and Mathematics with Applications*, 2009, 58 (5): 1015-1023.
- [29] GBUREK W J, FOLMARG J, URBAN J B. Field data and ground water modeling in a layered fractured aquifer [J]. *Ground Water*, 1999, 37(2): 175-184.
- [30] FAN Y, TORAN L, SCHLISCHE R W. Groundwater flow and groundwater-stream interaction in fractured and dipping sedimentary rocks: insights from numerical models [J]. *Water Resour Res*, 2007, 43 (1), W01409. doi: 10.1029/2006WR004864.
- [31] MIOTLINSKI K, DILLON P J, PAVELIC P, et al. Recovery of injected freshwater to differentiate fracture flow in a low-permeability brackish aquifer [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 409(1/2): 273-282.
- [32] CHERUBINI C. A modeling approach for the study of contamination in a fractured aquifer [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2008, 26(5): 519-533.
- [33] BAKUN-MAZOR D, HATZOR Y H, DERSHOWITZW S. Modeling mechanical layering effects on stability of underground openings in jointed sedimentary rocks [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(2): 262-271.
- [34] GERBER R, BOYCE J, HOWARD K. Evaluation of heterogeneity and field-scale groundwater flow regime in a leaky till aquitard [J]. *Hydrogeology Journal*, 2001, 9(1): 60-78.
- [35] PRUESS K, OLDENBURG C, MORIDIS G. TOUGH2 user's guide: version 2.0 [R]. Berkeley, C A: Lawrence Berkeley National Laboratory, 1999.
- [36] BIRKHOLZER J T, MUKHOPADHYAY S, TSANG Y W. Modeling seepage into heated waste emplacement tunnels in unsaturated fractured rock [J]. *Vadose Zone Journal*, 2004, 3(3): 819-836.
- [37] YAMAMOTO H. PetraSim: a graphical user interface for the TOUGH2 family of multiphase flow and transport codes [J]. *Ground Water*, 2008, 46(4): 525-528.
- [38] SYKES J F, NORMANI S D, JENSEN M R, et al. Regional-scale groundwater flow in a Canadian shield setting [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, 46(7): 813-827.
- [39] ZYVOLOSKI G, KWICKLIS E, EDDEBBARH A A, et al. The site-scale saturated zone flow model for Yucca Mountain: calibration of different conceptual models and their impact on flow paths [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2003, 62: 731-750.
- [40] BLESSENT D, THERRIEN R, MACQUARRIE K. Coupling geological and numerical models to simulate groundwater flow and contaminant transport in fractured media [J]. *Computers Geosciences*, 2009, 35(9): 1897-1906.

(收稿日期: 2012-07-31 编辑: 骆超)