

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202010061

高放废物深地质处置地下水流数值模拟方法研究进展

李露露¹, 周志超², 邵景力¹, 崔亚莉¹, 赵敬波²

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083;

2. 核工业北京地质研究院, 北京 100029)

摘要: 地下水流数值模型不仅是认识深部水动力场形成演化机制的有效工具, 也是建立核素迁移数值模型的基础, 因而是高放废物处置场选址和安全评价中重要的技术手段。高放废物深地质处置地下水流数值模拟方法较多, 如何选择适当的方法也是值得关注的问题。针对高放废物深地质处置地下水流数值模拟技术展开研究, 通过阅读大量国内外文献, 文章系统阐述了目前常用的 4 类地下水流数值模拟方法的研究进展、适用条件和实例应用; 综述了深地质处置中常用的模型不确定性分析方法及研究成果, 列表给出了适用于放射性废物地质处置的地下水流数值模拟软件及其在废物处置选择和安全评价中的应用。研究表明: 等效连续介质模型适用于大区域、长序列、裂隙发育程度较高或较均匀的地区, 该类模型方法成熟、所需的数据和参数易于获得, 但是不能精确刻画裂隙介质中地下水的流动特征。离散裂隙网络模型适合解决处置场地、储罐尺度等需要精细刻画的地下水流问题, 但由于需要大量裂隙及其连通性数据、相关参数等, 该方法存在着工作量大、耗时多的缺点。双重介质模型主要用于解决区域尺度裂隙水流问题, 但并不能表现出裂隙介质的各向异性、不连续性等特征, 因而适用范围存在一定的限制。等效-离散耦合模型可以通过区域分解法对裂隙密度大的区域采用等效连续介质模型, 对于裂隙密度较小的地区采用离散裂隙网络模型, 从而更符合一般地质条件下裂隙渗流的特征, 但也存在交换量难以确定、模型耦合技术问题。通过灵敏度分析, 将不同敏感因子对模型敏感指标的影响程度进行排序, 提高模型精度、减少参数不确定性分析的工作量。蒙特卡罗法是目前常用的一种模型不确定性方法, 原理简单、易于实现。文章展望了数值模型在仿真性、不确定性分析、预测和多介质耦合等方面的研究前景。

关键词: 高放废物深地质处置; 含水介质; 地下水流数值模拟; 不确定性分析; 模拟软件

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)06-0013-11

Advances in groundwater numerical simulation in deep geological disposal of high-level radioactive waste

LI Lulu¹, ZHOU Zhichao², SHAO Jingli¹, CUI Yali¹, ZHAO Jingbo²

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083,

China; 2. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

Abstract: Groundwater numerical model is not only an effective tool for understanding the formation and evolution mechanism of deep groundwater dynamic field, but also the basis for establishing numerical model of nuclide migration. Therefore, it is an important technical means in the site selection and safety assessment of high-level radioactive waste (HLW) disposal repository. There are many numerical simulation methods for groundwater flow in deep geological disposal of HLW, and how to choose the suitable method is also a problem worth paying

收稿日期: 2020-10-15; 修订日期: 2020-12-14

基金项目: 核设施退役及放射性废物治理专项项目(科工二司[2017]1405号)

第一作者: 李露露(1994-), 女, 博士研究生, 主要从事核素迁移数值模拟研究。E-mail: lululi_7992@163.com

通讯作者: 邵景力(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水文学及水资源专业的教学和科研工作。E-mail: jshao@cugb.edu.cn

attention to. This article focuses on the research of groundwater numerical simulation technology for deep geological disposal of HLW. Through reviewing a lot of relevant papers, systematically expounds the research progress, applicable conditions and practical applications of four kinds of commonly used groundwater numerical simulation methods. In addition, summarizes the model uncertainty analysis methods and research results commonly used in deep geological disposal, and lists the numerical simulation software of groundwater flow suitable for geological disposal of HLW and its application in waste disposal selection and safety assessment. The results show that the equivalent continuum model is suitable for large, long sequence and high fracture development or uniform areas, with the advantages of mature method and easy to obtain the required data and parameters, but the flow characteristics of groundwater in fractured media cannot be described accurately. The discrete fracture network model is suitable for solving the groundwater flow problems that need to be finely described, such as disposal site and repository canister. However, due to the need for a large number of fracture characteristics, connectivity and related parameters data, this method has the disadvantages of heavy workload and time-consuming. The dual medium model is mainly used to solve the problem of regional-scale fractured groundwater flow, but it cannot show the characteristics of anisotropy and discontinuity of fractured media, so the scope of application has certain limitations. The equivalent discrete coupling model can adopt the equivalent continuum model for the area with high fracture density and the discrete fracture network model for the area with low fracture density through the domain decomposition method, which is more in line with the characteristics of fracture seepage under general geological conditions, but there is also the problems that the exchange capacity is difficult to determine and the coupling technology of two models. Sensitivity analysis sorts the influence degree of different sensitive factors on the model sensitive indexes, so as to improve the model accuracy and reduce the workload of parameter uncertainty analysis. Monte Carlo method is a commonly used method for model uncertainty analysis, which is simple in principle and beneficial to implementation. Finally, the author points out that numerical model simulation ability, uncertainty analysis, prediction simulation and multi-medium coupling model research should be strengthened in the future.

Keywords: high-level radioactive waste (HLW) deep geological disposal; aqueous medium; groundwater flow numerical simulation; uncertainty analysis; simulation software

核能已成为人类社会中必不可少的能源之一。然而,核科技与核能技术的发展伴随产生了一定的放射性废物,特别是高水平放射性废物(简称高放废物),具有放射性极强、毒性极大、持续时间长等特点^[1],一旦进入人类生存环境,危害极大且难以消除,因此,如何对其安全处置仍然是世界性难题。目前国际上公认的最主要的处置方式是深地质处置,是指将固体形式的高放废物埋藏在距地表 500~1 000 m 的地质体中,使之永久与人类生存环境隔离^[2]。然而,在放射性废物最终处置过程中,有害的放射性核素迁移到人类环境中最有可能是地下水体的搬运。处置场建成运转后,填埋废物体的核素释放到地下水中,并随之迁移扩散,造成地下水甚至地表水体的污染。因此,要有效地进行高放废物的深地质处置,就要了解区域深部地下水形成演化机制,利用数值模拟技术预测未来相当长时间系统内地下水的流动特征

已逐渐成为高放废物处置库选址和场址评价中必不可少的研究内容。

放射性核素在地质体中的迁移机理及过程极为复杂,有对流、弥散、吸附、衰变和微生物等物理、化学反应过程,目前准确模拟核素在介质迁移的全过程仍然十分困难。以上过程中,核素随地下水流迁移是最主要、最直接的方式,也是分析和了解其他过程的基础。由于处置场岩石空隙类型、构造以及对地质和水文地质资料掌握程度的不同,建立的水文地质概念模型和数学模型亦不相同。此外,由于深部资料相对匮乏,加之基岩含水介质高度的非均质和各向异性,地下水流数值模拟结果会出现较大的不确定性,因而不确定性分析工作必不可少。现阶段已有很多可用于地下水流数值模拟的软件,如何选择适用的软件也是值得关注的问题。

本文就以上问题展开综述,以了解世界各国高放

废物深地质处置地下水流数值模拟方法研究进展及其应用, 可为我国高放废物处置场选址、安全评价和后续放射性核素迁移转化的预测模拟提供基础支撑。

1 深地质处置地下水流数值模拟方法

深地质处置中涉及的围岩类型大多为低渗透性基岩, 常见的有花岗岩、黏土岩、凝灰岩和岩盐等。岩体中的含水空间主要有裂隙介质或裂隙-孔隙双重介质。孔隙发育较为均匀, 而裂隙的隙宽、展布方向、延伸长度等均具强烈的非均质性和各向异性。因此, 深入了解裂隙岩体渗流理论及过程是深地质地下水流数值模拟的基础。目前用于描述裂隙岩体渗流的模型可分为等效连续介质模型、离散裂隙网络模型、双重介质模型、等效-离散耦合模型^[3]。

1.1 等效连续介质(EC)模型

EC模型是将裂隙中的水流等效平均到整个岩体中, 将裂隙岩体看作具有对称渗透张量的各向异性连续体, 利用经典的、成熟的连续介质理论进行分析。实际上就是求解地下水在多孔介质中流动的控制方程:

$$\operatorname{div}(K \operatorname{grad} H) + W = \mu_s \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

式中: H ——水头/m;

K ——渗透系数张量/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$);

μ_s ——贮水率/ m^{-1} ;

W ——源汇项/ d^{-1} 。

这类模型适用于大区域、长序列、裂隙发育程度较高或较均匀的地区, 其优点是技术方法成熟、需要数据获取较为容易、操作性好。但等效连续介质方法存在着明显的缺陷: 不能很好地刻画裂隙的特殊导水作用, 同时由于裂隙的非连续特征, 不是所有的裂隙岩体都可以等效成连续介质, 典型单元体的大小和等效水力参数较难确定。因而适用范围有限, 不适合场地和储罐区的裂隙水流的精细模拟。Long等^[4]认为应用EC模型首先要确定裂隙岩体的等效渗透张量, 指出渗透张量必须要无条件地适用于动力场相似的水流系统。Long等^[5]进一步考虑采用几何形态法确定渗透张量, 探讨了裂隙间连通程度对裂隙渗透率的大小和性质的影响。Snow^[6]通过假定裂隙面是无限延伸的, 推导了单个裂隙、一组平行裂隙的渗透张量公式, 并提出多组裂隙岩体的渗透张量可以叠加。Oda^[7]将包含大量地质不连续面的岩体视为各向异性、弹性多孔介质, 建立了求解应力和流体流动耦合

的控制方程组, 并利用现场实例验证了该模型的适用性。田开铭等^[8]建立渗透张量的改进模型, 并将统计测量与现场试验方法求得的渗透张量进行对照和校正, 提高了渗透张量计算的准确性和可靠性。

1.2 离散裂隙网络(DFN)模型

DFN模型是以裂隙网络中的单个裂隙为研究对象, 认为基质岩块本身不透水, 地下水只在裂隙中流动, 将裂隙网络视为非连续体。以单个裂隙内水流基本公式为基础, 利用流入和流出各裂隙交叉点流量相等的原则建立方程, 通过求解方程组获得各裂隙交叉点的水头值。按照Wittke线素模型^[9]的基本原理, 把裂隙交叉处作为节点, 节点之间的裂隙称为线单元, 每个线单元流向共同节点的流量等于0(稳定流)或等于储存量的变化量(非稳定流), 因此表征裂隙岩体渗流网络中 i 节点单元域内地下水均衡方程式为:

$$\sum_{j=1}^{N'} q_{ij} - \sum_{j=1}^{N'} w_{ij} + Q_i = d_i \frac{dH_{fi}}{dt}$$

$$d_i = \frac{S_i}{2} \sum_{j=1}^{N'} e_j l_j$$

$$(i = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

式中: $q_j (j = 1, 2, \dots, N')$ ——表征单元域内某一时刻流进流出各衔接线元的流量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$);

$w_j (j = 1, 2, \dots, N')$ ——表征单元域中每个线元上的垂向补给量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$);

Q_i —— i 节点上的源汇项/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$);

H_{fi} ——节点上的水头/m;

N' ——线单元个数;

S_i ——裂隙以 i 点为中心的表征单元域内弹性贮水(释水)系数;

e_j ——裂隙的隙宽/m;

l_j ——线元的长度/m。

DFN模型比较真实地描述了裂隙网络中地下水流特性, 比较适合解决中小尺度(处置场地、储罐尺度)、需要精细刻画的地下水流问题。Wilson等^[10]提出了两种模拟二维裂隙网络水流的有限元技术, 指出当裂隙交叉点处的水流干扰小到可以忽略不计时, 可以使用线性单元程序。三角形单元程序可用于确定基质-裂隙耦合流。Wittke等^[9]提出了类似电路分析回路中的网络线素法来模拟裂隙网络。王明玉等^[11]利用有限元方法建立三维多边形DFN模型, 模拟裂隙岩体非均质性和各向异性等渗流特征, 进而确定裂隙岩体典

型单元体及渗透张量的大小。Long 等^[12]提出了三维圆盘随机 DFN 模型,假定裂隙为不可渗透基质中的圆盘状不连续面,使用混合解析-数值技术计算通过该裂隙网络模型的稳定流量。Nordqvist 等^[13]提出了可变隙宽的 DFN 模型,用该模型研究了裂隙岩体中水流和溶质运移规律。但大多数情况下,尽管在处置场区、储罐区投入大量的勘探、测量、试验等相关工作,但很难准确获得每条裂隙的裂隙特征(裂隙的产状、张开度、间距、迹长等)及其连通性,同时存在工作量大、耗时多的缺点。

到目前为止,复杂的三维裂隙网络渗流,尚无成熟的算法和模拟软件,通常利用随机模拟生成裂隙网络并进行渗流模拟。该方法首先要形成 DFN,但由于裂隙系统的非均质各向异性,裂隙的分布和特性存在着很大的不确定性,因而发展出统计学方法生成 DFN。目前常用的统计学方法是 Monte-Carlo 法,通过实测地表裂隙数据的统计规律反推地下空间岩体裂隙几何参数近似解。DFN 的建立首先需要测量和收集裂隙特征空间分布数据,形成裂隙面几何参数的概率统计模型,应用 Monte-Carlo 随机方法生成 DFN,最终对模型构建结果进行验证,调整模型参数确定更接近实际情形的 DFN^[14]。Andersson 等^[15]运用三维裂隙网络模型模拟了不同水力条件下的渗流过程。Dverstorp 等^[16]建立了稀疏裂隙岩石中的 DFN 模型,并模拟了该岩石中的示踪试验结果。何杨等^[17]针对稀疏的三维主干岩体裂隙网络,以渗流区内的水量平衡原理为依据推导了三维岩体裂隙网络非稳定渗流的基本方程,并利用 Monte-Carlo 模拟了岩体中的裂隙网络。宗自华等^[18]基于已有地表裂隙统计数据,对北山 BS03 钻孔周边岩体进行了裂隙网络建模,并分析了其连通性。黄帆等^[19]基于 Monte-Carlo 法,引入裂隙迹线长度和开度的相关性函数,提出改进的随机裂隙网络生成算法,验证了算法的有效性和程序的正确性,最终借助 DFN 渗流模型对生成的裂隙网络进行渗流分析。

1.3 双重介质模型

双重介质模型认为裂隙岩石是由大裂隙系统和岩块孔隙或细小裂隙系统共同构成的连续介质的统一体,大裂隙导水性强,主要起到地下水流的通道作用,称为主干裂隙介质。岩块孔隙或细小裂隙分布均匀储水空间大,主要起到储存和释放地下水的作用,称为孔隙介质或分枝裂隙介质。根据实际问题的特点以及模拟时的要求,又分为:(1)双重孔隙度模型。该模型认为很多情况下,岩块的渗透率远小于裂隙的渗透率,在模拟计算时可认为岩块的渗透系数为 0,使

得控制方程组中有两个孔隙度,而只有一个渗透系数。(2)双重渗透性模型。该模型认为若岩块中的渗透率不能忽略,则岩块系统中不仅存在分子弥散作用,而且水流速度不为 0。该模型对裂隙和基质分别建立水流方程,主干裂隙建立离散裂隙网络模型,分枝裂隙连同基质块建立等效连续介质模型^[20],然后根据边界通量相同的条件将二者联系起来。控制方程为:

$$\mu_s^a \frac{\partial H_a}{\partial t} + \mu_s^r \int_0^t e^{-r(t-\tau)} \frac{\partial H_r}{\partial \tau} d\tau = \text{div}(K^a \text{grad} H_a) \quad (3)$$

$$r = \frac{c}{\mu_s^r}$$

式中: H_a ——主干裂隙水头/m;

H_r ——分枝裂隙水头/m;

K^a ——主干裂隙介质的渗透张量/(m·d⁻¹);

μ_s^a 、 μ_s^r ——主干裂隙介质、分枝裂隙介质的贮水率/m⁻¹;

r ——迁移系数;

c ——比例系数;

t ——时间/d。

显然,这类模型能较为全面地反映裂隙岩体的渗流特征,比等效连续介质模型更为合理,参数获取比裂隙网络模型更为容易,可用来解决区域尺度裂隙水流问题。Barenblatt 等^[21]首先提出了“水力双重介质”的概念,认为裂隙岩石是由空隙性差、导水性强的裂隙系统和空隙性好、导水性差的岩块孔隙系统共同构成连续介质的统一体,但该模型忽略了裂隙岩体渗流的各向异性特征。Warren 等^[22]对裂隙岩体渗透特性的各向异性做了新的假设和描述,但该模型只能应用于均质的正交裂隙网络。Zimmerman 等^[23]针对裂隙/多孔介质的单相流体流动,开发了一种新的双孔隙度模型,以集中参数方式处理矩阵块,与 Warren-Root 模型对比,节省了近 90% 的计算时间。杨栋等^[24]根据裂隙发育规模与工程尺度的关系,将裂隙岩体看作是由离散介质和拟连续介质组成的广义双重介质岩体,提出了广义双重介质岩体水力学模型,并对有限元解法进行了较为详细的研究。虽然该模型在一定程度上刻画出优先流的现象,但丝毫没有涉及介质中导水裂隙的具体展布位置,并不能表现出裂隙介质的各向异性、不连续性等特征,模型仍建立在多孔介质渗流理论的基础上。因此模型应用的缺点有:(1)模型中溶质交换项很难确定,物质交换系数对模型精度影响太大;(2)裂隙网络不一定能等效为连续介质,适用范围受限制;(3)求解需迭代计算,较复杂。

1.4 等效-离散耦合模型

该模型是双重连续介质模型和离散裂隙网络模型的发展, 利用区域分解方法将研究区域按裂隙发育的情况进行分区, 不同的分区使用不同的数学模型^[25], 即对于裂隙密度大的区域采用等效连续介质模型, 对于裂隙密度较小的地区采用离散裂隙网络模型。该类模型的优点是更符合一般地质条件下裂隙渗流的特征, 但也存在水交换量难以确定、两类模型耦合技术上的问题。Cacas 等^[26]运用混合模型对法国某个花岗岩铀矿不同尺度裂隙中的地下水流过程进行了模拟。黄勇等^[27]将基于区域分解法的地下水耦合模型应用于锦屏水电站坝址区三维渗流场的模拟中, 该方法有效避免了计算量过大的问题。

2 模型的不确定性分析

由于高放废物深地质处置深部资料的相对匮乏, 加之基岩含水介质高度的非均质和各向异性, 进行深地质处置地下水流数值模拟时结果会出现较大的不确定性, 因而选用合适的不确定性分析方法进行深地质处置数值模拟不确定性分析显得尤为重要。

2.1 模型的不确定性来源

地下水流数值模拟的不确定性划分为三类:

(1) 模型参数的不确定性

由于水文地质资料的局限性(包括缺乏资料或参数获取方法的局限)以及参数在时空上的变异性、尺度效应等都会导致模型参数的不确定性。参数的不确定性分析是影响地下水数值模拟结果可靠性的重要因素。

(2) 水文地质概念模型的不确定性

由于资料的缺乏或对水文地质条件认识的局限, 建立的水文地质概念模型存在不确定性, 包括对地下水流特征、含水介质的类型、模型边界及源汇项的估计等。

(3) 观测数据的不确定性

观测数据的不确定性来源非常广泛, 包括观测变量随机分布特征导致的观测误差、观测变量的抽样误差、间接测量误差以及测量仪器本身的观测误差和人为记录误差等。

以上的不确定性因素, 对地下水流模型的稳定性、可靠性和精度有很大影响, 因而有必要通过模型的不确定分析, 了解模型的不确定因素及其对模型模拟结果的影响程度。

2.2 不确定性分析方法

(1) 灵敏度分析

灵敏度分析是一种研究系统各种输入变化对输

出影响程度的方法。在地下水流数值模拟中, 通常以特定的模拟结果为敏感指标(如某个特定点的水位、水质点迁移到特定位置的时间等), 以模型的某些要素(如水文地质参数、地下水补排量、边界条件等)作为敏感因子, 改变敏感因子数值, 通过模型计算敏感指标的变化程度, 分析不同敏感因子的灵敏度。

灵敏度分析方法主要包括全局分析法以及局部分析法。局部分析法是研究某一个敏感因子的变化对敏感指标的影响, 该方法主要有: ①因子变化法, 将敏感因子数值增加或减少一个单位幅度, 如 5%; ②偏差变化法, 将敏感因子增加或减少一个标准偏差。全局分析法研究在不同敏感因子的共同作用下, 对结果产生的影响, 该方法主要有 Morris 法、多元回归法以及 Sobol 法等。全局分析法操作相对复杂, 目前主要应用于水文模型, 在地下水流数值模型灵敏度分析研究中, 仍然主要以局部分析法为主。局部灵敏度系数为:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - y_0) y_0^{-1}}{(P_i - P_0) P_0^{-1}} \quad (4)$$

式中: n ——分析组数;

y_i ——参数变化后的输出值;

y_0 ——参数变化前的输出值;

P_i ——变化后参数值;

P_0 ——初始参数值。

通过灵敏度分析法可将不同敏感因子对地下水流数值模型敏感指标的影响程度进行排序, 得到对模拟结果影响较大的敏感因子及其分布区域。此外, 通过灵敏度分析获取更为准确的灵敏度高的敏感因子, 可大大提高模型精度, 而对于灵敏度不高的敏感因子, 则可适当减少获取该参数的工作量, 或者在不确定分析中忽略该敏感因子, 达到降维的目的。Mclaren 等^[28]、Bodvarsson 等^[29]在场地尺度上充分考虑裂隙介质的特性, 分析了影响地下水运动的参数敏感性, 研究了介质对地下水运动的影响和对污染物的阻滞效应。Schwartz^[30]利用 Toughreact/EOS7R 软件模拟了裂隙花岗岩中放射性核素迁移过程, 就裂隙间距对模拟结果的影响进行了敏感性分析。Shahkarami 等^[31]提出一种可以解释任意长度的衰变链以及模拟核素通过任意通道迁移的 Sobol 分析方法, 并将其应用于模型输出的全局敏感性分析中。彭志娟^[32]分别采用等效连续和双重介质模型概化裂隙建立高放废物处置库开挖扰动区(EDZ)模型, 利用 Tough2 软件研究了不同概化模型对¹²⁹I 和¹³⁵Cs 在 EDZ 中迁移的影响, 并对

^{129}I 的扩散系数和分配系数进行了敏感性分析。

(2) 蒙特卡罗 (Monte Carlo) 法

蒙特卡罗法是一种被广泛采用的分析复杂数值模型不确定性分析的方法。该方法是 Warren 等^[33]最早应用于地下水流研究中,将介质参数作为随机场,假定已知随机变量的概率分布和协方差函数,用伪随机数的生成技术生成成千上万组输入变量,产生介质参数随机分布的大量实现,最终获得成千上万组模型计算结果(如地下水模拟中的水头或溶质浓度)的统计值。该方法回避了随机分析中的数学困难,只要模拟的次数足够多,就可得到一个比较精准的概率分布,并且具有收敛速度与问题的维数无关、程序结构简单等优点。但也存在一定的缺陷,如计算工作量大、误差难以估计或控制等^[34]。因此,目前蒙特卡罗法一般用于比较简单的模型不确定性分析或者用来验证其他方法的分析结果。

蒙特卡罗法在国内外的地下水流数值模型不确定性分析中应用十分广泛。Vaitinen 等^[35]利用蒙特卡罗法在芬兰 Romuvaara 场址生成了 30 种不同的地下水流模型,用于确定随机连续介质类型分析的非均匀渗透张量。Joyce 等^[36]应用多尺度嵌套建模技术,利用 Connectflow 软件生成了 10 个处置库尺度 DFN 模型,分别进行了地下水流和溶质运移数值模拟。Pandey 等^[37]模拟了放射性核素 ^{129}I 从废物处理设施释放并通过地质处置库迁移到生物圈的过程,利用蒙特卡罗方法进行了阻滞因子、流速以及路径长度等参数范围的不确定性分析。苏锐等^[38]以一个假想的 CRP-GEORC 高放废物地质处置系统为例,运用 Goldsim 软件对放射性核素 ^{79}Se 和 ^{129}I 在该系统远场中的迁移过程进行了灵敏度分析,同时利用蒙特卡罗法进行了概率统计模拟。林达^[39]以某铀尾矿库为例,利用 GMS 软件结合 Monte-Carlo 方法进行了核素 U(VI) 在地下水中迁移随机数值模拟,研究了渗透系数的变异性对尾矿库地域地下水流及 U(VI) 迁移的影响。

3 数值模拟软件

目前用于高放废物深地质处置地下水流数值模拟方面的软件较多(表 1),按照模拟方法的不同,可将软件分成 4 个大类。

(1) 等效连续介质模型

Modflow、GMS 以及 Porflow 等主要用于孔隙介质和裂隙介质等效连续模型。Belcher^[40]利用 Modflow-2000 对尤卡山地区进行了比较全面的地下水流预测

模拟和分析。Löfman 等^[41]通过 3D 有限元的模拟方法评估 Olkiluoto 场址地下 500 m 深部岩体的渗透性,发现施工中的深钻孔使深部基岩中大量裂隙间的连通性增大。董艳辉等^[42]利用 Modflow 建立北山地区的地下水流模型,初步划分了地下水流系统。王海龙^[43]利用 GMS 构建了北山区域地下水数值模型,对北山地区地下水流场形态进行了进一步刻画。季瑞利^[44]以北山花岗岩为参考岩性、内蒙古高庙子膨润土为参考缓冲材料,使用 Porflow 对放射性核素 ^{135}Cs 、 ^{129}I 在处置单元及其围岩中的迁移行为进行了数值模拟研究。

(2) 离散裂隙网络模型

Connectflow 主要用于离散裂隙网络的水流、溶质及热运移模拟。Werner 等^[45]采用 Connectflow 对瑞典 Laxemar 场址高放废物深地质处置库建立地下水流数值模型。Joyce 等^[36]考虑气候条件变化,利用 Connectflow 软件构建了区域一场址一处置库多尺度地下水流及溶质运移数值模型。

(3) 双重介质模型

Tough2 系列软件主要应用于双重介质的水流、溶质及热运移模拟。Liu 等^[46]、Bodvarsson 等^[29]选用 Tough2 模拟软件还原尤卡山在区域尺度上非饱和和的地下水系统流动规律。Rechard 等^[47-48]通过建立溶质运移数值模型验证尤卡山地区选址的可靠性。Schwartz^[30]建立双孔隙度模型,利用 Toughreact 软件耦合了水流和运移过程,模拟了可能从处置场地中泄露出来的核废物迁移过程。王礼恒^[49]围绕甘肃北山高放废物地质处置预选区,分别针对区域一盆地一岩体 3 级尺度开展研究,利用 Modflow、Tough2 软件进行 3 级尺度地下水流数值模拟。曹潇元等^[50]采用 Tough2-MP/EOS3 和 GRACE 重力卫星等方法,建立了北山区域地下水饱和-非饱和流模型。

(4) 整合模型

整合模型主要指等效连续介质、离散裂隙网络、双重介质以及连续-离散耦合模型的整合, Feflow、Hydrogeosphere 均可用于此类模型的水流、溶质及热运移模拟。Blessent 等^[51]采用 Hydrogeosphere 软件,对区域地下水流场进行了模拟研究,并模拟了不同情景下,裂隙对区域流场的影响以及溶质在裂隙中的运移距离。朱君等^[52]应用 Feflow 软件构建三维地下水流数值模型,模拟计算了丘陵山区地下水流特征下氡的迁移规律。包敏等^[53]应用 Feflow 建立了熔岩玻璃体 ^{239}Pu 的溶解释放和迁移模型,模拟了 10 万年内溶解态 ^{239}Pu 和胶体态 ^{239}Pu 的污染羽分布。

表 1 主要软件介绍

Table 1 Introduction of main software

名称	软件描述	适合介质	用途及优缺点	实际应用
Modflow	模块化三维有限差分模型, 用来模拟连续介质三维地下水流动的计算程序。MODFLOW2005整合了MODPATH、MT3DMS等质点追踪、溶质运移模块	等效连续介质	水资源评价、矿坑排水的设计和優化、圈定水源保护区、确定污染物去向和暴露途径等, 应用广泛。具有强大可视化功能, 操作简便	场地适宜性评价 ^[54] , ⁹⁰ Sr的二维剖面迁移 ^[55]
GMS	由图形用户界面和系列模块组成, Modflow模拟地下水运动, MT3DMS等模块可模拟核素迁移, FEMWATER耦合了3DFEMWATER、3DLEWASTE	等效连续介质	可进行水流、反应性溶质运移模拟、建立三维地层实体, 进行钻孔数据管理、二维(三维)地质统计可视化地下水模拟软件, 功能强大; 但所需数据资料较多	降雨对铀的迁移扩散影响模拟 ^[56]
Tough2/3	一维、二维、三维孔隙或裂隙介质中多相流、多组分及非等温的水流及热量运移的数值模拟程序, 模拟水流系统从微观到流域尺度的不同空间尺度变化	等效连续介质和裂隙介质	应用范围广泛, 如地热储藏工程、核废料处置、二氧化碳地质处置等	I和Cs在废物处置库黏土缓冲材料中的迁移行为 ^[57] , 处置场的 ¹³⁵ Cs核素迁移模拟 ^[58]
Hydrus	模拟非饱和和多孔介质中一维、二维、三维水流、热和溶质运移的数值模型, 上边界条件处理灵活方便	等效连续介质	模拟土壤中水分、盐分、污染物运移; 在国内得到广泛的应用	放射性核素在非饱和带迁移行为评价 ^[59] , 填埋场放射性核素迁移模拟 ^[60]
Feflow	模拟有压或无压地下水二维和三维、稳定流或非稳定流、区域和断面、流体密度耦合或者非耦合、变饱和的渗流、溶质运移以及热运移	等效连续介质和裂隙介质	应用广泛, 剖分方便, 可进行离散裂隙网络的水流、溶质及热运移模拟。源汇项菜单功能过于集中, 功能复杂	丘陵山区地下水流动特征下流的迁移规律 ^[52]
Goldsim	风险模拟和蒙特卡罗模拟软件, 定量表示所有复杂系统中固有的不确定性和风险, 同时支持决策和风险分析, 进行环境系统、工程系统和业务建模	近场库室工程屏障	模拟近场处置设施中核素在工程屏障与自然环境传输的情形, 解决与生态和自然资源管理、污染预防、危险废物管理和环境恢复相关的问题, 扩展性强, 高度图形化	内华达试验场Yucca Mountain总体系统性能评价分析 ^[61] , 核素释放及远场迁移行为 ^[62-63]
Hydrogeosphere	三维控制体积分有限元模拟器, 包括地下水和地表水模块, 可进行二维地表径流、三维变饱和流、稳定流/非稳定流以及密度流模拟等	等效连续介质、裂隙介质和双重介质	应用于水资源综合评估和流域水文特征分析以及污染物在地表和地下水中的运移等研究中。具有先进的迭代技术、强大的计算功能以及强大的三维可视化功能	锦屏水电站坝址区水流和溶质运移模拟 ^[64] , Olkiluoto场址地下水流动及溶质运移模拟 ^[51]
Connectflow	包括等效多孔介质(EPM)模块和DFN模块。可模拟饱和、非饱和地下水流动与核素运移, 裂隙网络中密度变化的流动和输运等	等效连续介质、裂隙网络介质	应用于放射性废物处置中的安全评估、盐水入侵、填埋场建模、含水层污染等研究。可以模拟各种规模的裂隙和多孔介质中的地下水流动和输运	EDZ(开挖扰动区)对处置库附近区域的扰动影响 ^[36]
Porflow	解决涉及瞬态或稳态流体流动、热、盐和质量传输的多相、多孔或裂隙介质中的动态相变等问题。适应交替的流体和介质属性关系以及复杂和任意的边界条件	等效连续介质、裂隙介质	应用于盐水侵入淡水含水层和危险废物处理场所等研究。可用并行计算, 精度和计算高效, 但输入、输出过程非常耗时; 不是一个真正的两相流代码	处置单元内放射性核素迁移行为 ^[44]

4 结论与展望

在高放废物深地质处置地下水数值模拟研究中, 选取何种合适的模型与对模拟区域的认识程度以及模型需要解决的实际问题有密切的关系。等效连续介质模型适用于大区域、长序列、裂隙发育程度较高或较均匀的地区, 方法成熟、所需的数据和参数易于获取, 但是不能精确刻画裂隙介质中地下水的流动特征。离散裂隙网络模型适合解决处置场地、储罐尺度等需要精细刻画的地下水流动问题, 但需要大量裂隙及其连通性数据、相关参数等, 工作量大、耗时多。双重介质模型主要用于解决区域尺度裂隙水流问题, 但并不能表现出裂隙介质的各向异性、不连续性等特

征, 适用范围存在一定的限制。等效一离散耦合模型可以通过区域分解法对裂隙密度大的区域采用等效连续介质模型, 对于裂隙密度较小的地区采用离散裂隙网络模型, 更符合一般地质条件下裂隙渗流的特征, 但存在交换量难以确定、模型耦合技术问题等。

由于深部构造特征等资料的匮乏、地质屏障的各向异性以及建模要考虑的时间尺度很长, 空间尺度差异很大(罐区一处置场一区域水文地质单元), 都会导致模拟结果存在较大的不确定性。通过灵敏度分析将不同敏感因子对模型敏感指标的影响程度进行排序, 从而提高模型精度、减小参数不确定性分析的工作量。蒙特卡罗法是目前常用的一种模型不确定性

分析方法,原理简单,易于实现。

高放废物深地质处置工作是一个长期艰巨的任务,目前虽已取得长足的进展,还需注重以下几方面研究:

(1)数值模型仿真性研究。进一步开展地质、水文地质、裂隙测量等相关的现场调查及监测工作,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及水力学参数,深入开展裂隙发育规律、裂隙渗透性分布特征研究,为裂隙渗流模拟提供准确的裂隙网络模型和参数,这是提高模型仿真性的基础。

(2)模型的不确定性分析研究。区域大深度地下水流数值模型存在着较大的不确定性。因而需要根据水文地质结构、参数等建模要素的统计特征和概率分布函数,开展模型的不确定分析,为核废物处置场选址和安全评价提供服从一定概率分布条件下的要素置信区间。

(3)预测分析模拟研究。预测工况模拟要结合构建场地可能发生的工况,如处置库长期演变、废物罐失效情景、极端降雨等情景,开展不同时期、不同场景下的数值模型进行模拟分析。

(4)多介质耦合模型的研究。大区域构建等效连续孔隙介质模型,而场地尺度可以建立裂隙网络模型,通过两个模型共同边界流量和水位相等将两者耦合,既可精确刻画场地裂隙流特征,又可宏观把握水文地质单元地下水流场。

参考文献 (References):

- [1] 潘自强,钱七虎.我国高放废物地质处置战略研究[J].中国核电,2013,6(2):98-100. [PAN Ziqiang, QIAN Qihu. The geological disposal of high-level radioactive waste strategy research in our country[J]. China Nuclear Power, 2013, 6(2): 98-100. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 王驹,苏锐,陈伟明,等.中国高放废物深地质处置[J].岩石力学与工程学报,2006,25(4):649-658. [WANG Ju, SU Rui, CHEN Weiming, et al. Deep geological disposal of high-level radioactive wastes in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(4): 649-658. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 周志芳,王锦国.裂隙介质水动力学[M].北京:中国水利水电出版社,2004. [ZHOU Zhifang, WANG Jinguo. Dynamics of fluids in fractured media[M]. Beijing: China Water Power Press, 2004. (in Chinese)]
- [4] LONG J C S, REMER J S, WILSON C R, et al. Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures[J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(3): 645-658.
- [5] LONG J C S, WITHERSPOON P A. The relationship of the degree of interconnection to permeability in fracture networks[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1985, 90(B4): 3087-3098.
- [6] DAVID T SNOW. Anisotropic permeability of fractured media[J]. *Water Resources Research*, 1969, 5(6): 1273-1289.
- [7] MASANOBU ODA. An equivalent continuum model for coupled stress and fluid flow analysis in jointed rock masses[J]. *Water Resources Research*, 1986, 22(13): 1845-1856.
- [8] 田开铭,万力.各向异性裂隙介质渗透性的研究与评价[M].北京:学苑出版社,1989. [TIAN Kaiming, WAN Li. Research and evaluation of the permeability of anisotropic fractured media[M]. Beijing: Xueyuan Publishing House, 1989. (in Chinese)]
- [9] WITTKKE, WALTER. Rock mechanics: theory and applications, with case histories[M]. Berlin: Springer Verlag, 1990.
- [10] WILSON C R, WITHERSPOON P A. Steady state flow in rigid networks of fractures[J]. *Water Resources Research*, 1974, 10(2): 328-335.
- [11] 王明玉,陈劲松,万力.离散裂隙渗流方法与裂隙化渗透介质建模[J].地球科学,2002,27(1):90-96. [WANG Mingyu, CHEN Jinsong, WAN Li. Groundwater (fluid) flow modeling in fractured rocks via discrete fracture fluid flow approach[J]. *Earth Science*, 2002, 27(1): 90-96. (in Chinese with English abstract)]
- [12] LONG J C S, GILMOUR P, WITHERSPOON P A. A model for steady fluid flow in random three-dimensional networks of disc-shaped fractures[J]. *Water Resources Research*, 1985, 21(8): 1105-1115.
- [13] NORDQVIST A W, TSANG Y W, TSANG C F, et al. A variable aperture fracture network model for flow and transport in fractured rocks[J]. *Water Resources Research*, 1992, 28(6): 1703-1713.
- [14] 魏亚强,董艳辉,周鹏鹏,等.基于离散裂隙网络模型的核素粒子迁移数值模拟研究[J].水文地质工程地质,2017,44(1):123-130. [WEI Yaqiang, DONG Yanhui, ZHOU Pengpeng, et al. Numerical simulation of radionuclide particle tracking based on discrete fracture network[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*,

- 2017, 44(1): 123 – 130. (in Chinese with English abstract)]
- [15] ANDERSSON J, DVERSTORP B. Conditional simulations of fluid flow in three-dimensional networks of discrete fractures[J]. *Water Resources Research*, 1987, 23(10): 1876 – 1886.
- [16] DVERSTORP B, ANDERSSON J, NORDQVIST W. Discrete fracture network interpretation of field tracer migration in sparsely fractured rock[J]. *Water Resources Research*, 1992, 28(9): 2327 – 2343.
- [17] 何杨, 柴军瑞, 唐志立, 等. 三维裂隙网络非稳定渗流数值分析[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2007, 22(3): 338 – 344. [HE Yang, CHAI Junrui, TANG Zhili, et al. Numerical analysis of 3-D unsteady seepage through fracture network in rock mass[J]. *Journal of Hydrodynamics (Series A)*, 2007, 22(3): 338 – 344. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 宗自华, 王驹, 苏锐, 等. BS03钻孔周围裂隙特征分析及3D裂隙网络模拟[C]//中国岩石力学与工程学会. 第二届废物地下处置学术研讨会论文集. 2008. [ZONG Zihua, WANG Ju, SU Rui, et al. Characteristics of fracture and modeling of 3D fracture network surrounding borehole BS03[C]//Chinese Society for Rock Mechanics & Engineering. Proceedings of the second symposium on underground waste disposal. 2008. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 黄帆, 姚池, 周创兵, 等. 考虑裂隙迹长和开度相关性的随机裂隙网络数值模拟及渗流分析[J]. 水利水运工程学报, 2018(2): 35 – 42. [HUANG Fan, YAO Chi, ZHOU Chuangbing, et al. Numerical simulation and seepage analysis of stochastic fracture network considering correlation between fracture trace length and aperture[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2018(2): 35 – 42. (in Chinese with English abstract)]
- [20] EZZEDINE S, DE MARSILY G. Study of transient flow in hard fractured rocks with a discrete fracture network model[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1993, 30(7): 1605 – 1609.
- [21] BARENBLATT G I, ZHELTOV I P, KOCHINA I N. Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks strata[J]. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 1960, 24(5): 1286 – 1303.
- [22] WARREN J E, ROOT P J. The behavior of naturally fractured reservoirs[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1963, 3(3): 245 – 255.
- [23] ZIMMERMAN R W, CHEN G, HADGU T, et al. A numerical dual-porosity model with semianalytical treatment of fracture/matrix flow[J]. *Water Resources Research*, 1993, 29(7): 2127 – 2137.
- [24] 杨栋, 赵阳升, 段康廉, 等. 广义双重介质岩体水力学模型及有限元模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 182 – 185. [YANG Dong, ZHAO Yangsheng, DUAN Kanglian, et al. The hydraulic model of rockmass with generalized double porosity media and its FEM simulation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(2): 182 – 185. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 黄勇. 多尺度裂隙介质中的水流和溶质运移随机模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2005. [HUANG Yong. Stochastic simulation study of flow and solute transport in multi-scales fractured media[D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese with English abstract)]
- [26] CACAS M C, LEDOUX E, DE MARSILY G, et al. Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: calibration and validation: 1. The flow model[J]. *Water Resources Research*, 1990, 26(3): 479 – 489.
- [27] 黄勇, 周志芳. 基于区域分解算法的地下水耦合模型及其应用[J]. 工程地质学报, 2007, 15(1): 103 – 107. [HUANG Yong, ZHOU Zhifang. Domain decomposition algorithm for calculating seepage in rock mass with fractured zones and its application in dam foundation[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2007, 15(1): 103 – 107. (in Chinese with English abstract)]
- [28] MCLAREN R G, FORSYTH P A, SUDICKY E A, et al. Flow and transport in fractured tuff at Yucca Mountain: numerical experiments on fast preferential flow mechanisms[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2000, 43(3/4): 211 – 238.
- [29] BODVARSSON G S, WU Y S, ZHANG K N. Development of discrete flow paths in unsaturated fractures at Yucca Mountain[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2003, 62/63: 23 – 42.
- [30] SCHWARTZ M O. Modelling radionuclide transport in large fractured-media systems: the example of Forsmark, Sweden[J]. *Hydrogeology Journal*, 2012, 20(4): 673 – 687.
- [31] SHAHKARAMI P, LIU L C, MORENO L, et al. Radionuclide migration through fractured rock for arbitrary-length decay chain: Analytical solution and global sensitivity analysis[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 520: 448 – 460.
- [32] 彭志娟. 高放废物处置库EDZ中核素¹²⁹I、¹³⁵Cs的迁移模拟研究[D]. 抚州: 东华理工大学, 2019. [PENG

- Zhijuan. Numerical simulation of ^{129}I & ^{135}Cs nuclide migration in EDZ of the high-level radioactive waste repository[D]. Fuzhou: East China Institute of Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [33] WARREN J E, PRICE H S. Flow in heterogeneous porous media[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1961, 1(3): 153 – 169.
- [34] 吴吉春, 陆乐. 地下水模拟不确定性分析[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2011, 47(3): 227 – 234. [WU Jichun, LU Le. Uncertainty analysis for groundwater modeling[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2011, 47(3): 227 – 234. (in Chinese with English abstract)]
- [35] VAITINEN T, NIEMI A, KUUSELA L A, et al. Estimation of block conductivities from hydrologically calibrated fracture networks-description of methodology and application to Romuvaara investigation area[R]. Finland: Posiva Oy, 1999.
- [36] JOYCE S, HARTLEY L, APPLGATE D, et al. Multi-scale groundwater flow modeling during temperate climate conditions for the safety assessment of the proposed high-level nuclear waste repository site at Forsmark, Sweden[J]. *Hydrogeology Journal*, 2014, 22(6): 1233 – 1249.
- [37] PANDEY M, DATTA D, KUMAR B, et al. Uncertainty quantification of contaminant transport through geological repository using 2D Monte Carlo simulation[J]. *BARC Newsletter*, 2013, 330: 1 – 7.
- [38] 苏锐, 王驹, 陈伟明, 等. 放射性核素在CRP-GEORC地质处置库远场中迁移的灵敏性与不确定性分析[C]//中国岩石力学与工程学会. 第二届废物地下处置学术研讨会论文集. 2008. [SU Rui, WANG Ju, CHEN Weiming, et al. Sensitivity analysis and uncertainty simulation of the migration of radionuclide in the system of geological disposal-CRP-GEORC model[C]//Chinese Society for Rock Mechanics & Engineering. Proceedings of the second conference on underground waste disposal. 2008. (in Chinese with English abstract)]
- [39] 林达. 某铀尾矿(库)地域浅层地下水中铀迁移的随机模拟研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2008. [LIN Da. Stochastic simulation research of uranium migration in shallow groundwater at uranium mill-tailing sites[D]. Hengyang: University of South China, 2008. (in Chinese with English abstract)]
- [40] BELCHER W R. Death Valley regional groundwater flow system, Nevada and California: hydrogeologic framework and transient groundwater flow model[M]. U.S: Dept. of the Interior, 2010.
- [41] LÖFMAN J, MÉSZÉROS F. Simulation of hydraulic disturbances caused by the underground rock characterization facility in olkiluoto, Finland[C]//Dynamics of fluids and transport in fractured rock. Washington: American Geophysical Union, 2013: 129–149.
- [42] 董艳辉, 李国敏, 黎明. 甘肃北山大面积地下水流动模拟[J]. *科学通报*, 2009, 54(23): 3790 – 3792. [DONG Yanhui, LI Guomin, LI Ming. Groundwater flow simulation in Beishan area of Gansu[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(23): 3790 – 3792. (in Chinese with English abstract)]
- [43] 王海龙. 高放废物处置库北山预选区区域地下水流动模拟及岩体渗透特征研究[D]. 北京: 核工业北京地质研究院, 2014. [WANG Hailong. Regional groundwater flow simulation and rock mass permeability characteristics in Beishan preselected area of high-level radioactive waste repository[D]. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology, 2014. (in Chinese with English abstract with English abstract)]
- [44] 季瑞利. 处置单元放射性核素 ^{135}Cs 、 ^{129}I 迁移模拟研究[D]. 北京: 核工业北京地质研究院, 2009. [JI Ruili. Simulation study on the migration of radionuclides ^{135}Cs and ^{129}I in the disposal unit[D]. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology, 2009. (in Chinese with English abstract)]
- [45] WERNER K, BOSSON E, BERGLUND S. Flow and radionuclide transport from rock to surface systems: characterization and modelling of potential repository sites in Sweden[C]//Proceedings of the 11th International conference on environmental remediation and radioactive waste management, september 2–6, 2007. Bruges: Belgium. 2009: 867–872.
- [46] LIU H H, DOUGHTY C, BODVARSSON G S. An active fracture model for unsaturated flow and transport in fractured rocks[J]. *Water Resources Research*, 1998, 34(10): 2633 – 2646.
- [47] RECHARD R P, COTTON T A, VOEGELE M D. Site selection and regulatory basis for the Yucca Mountain disposal system for spent nuclear fuel and high-level radioactive waste[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2014, 122: 7 – 31.
- [48] RECHARD R P. Results from past performance assessments for the Yucca Mountain disposal system for spent nuclear fuel and high-level radioactive waste[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2014, 122(13):

- 207 – 222.
- [49] 王礼恒. 甘肃北山区域-盆地-岩体多尺度地下水数值模拟研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015. [WANG Liheng. Multi-scale groundwater numerical simulation study of regional-basin-site in Gansu Beishan area[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [50] 曹潇元, 侯德义, 胡立堂. 甘肃北山区域地下水流数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(2): 9 – 16. [CAO Xiaoyuan, HOU Deyi, HU Litang. Numerical simulation of regional groundwater flow in the Beishan area of Gansu[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(2): 9 – 16. (in Chinese with English abstract)]
- [51] BLESSENT D, THERRIEN R, GABLE C W. Large-scale numerical simulation of groundwater flow and solute transport in discretely-fractured crystalline bedrock[J]. *Advances in Water Resources*, 2011, 34(12): 1539 – 1552.
- [52] 朱君, 陈超, 李婷, 等. 丘陵山区地下水流动特征及核素迁移数值模拟[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2019, 42(2): 465 – 472. [ZHU Jun, CHEN Chao, LI Ting, et al. Numerical simulation of groundwater flow characteristics and radionuclide migration in hilly area[J]. Journal of Shanxi University (Natural Science Edition), 2019, 42(2): 465 – 472. (in Chinese with English abstract)]
- [53] 包敏, 王群书. 熔岩玻璃体²³⁹Pu在地下水中的迁移模拟研究[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(10): 1757 – 1765. [BAO Min, WANG Qunshu. Migration simulation of ²³⁹Pu in groundwater from melt glass[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 48(10): 1757 – 1765. (in Chinese with English abstract)]
- [54] YI S P, MA H Y, ZHENG C M, et al. Assessment of site conditions for disposal of low- and intermediate-level radioactive wastes: a case study in Southern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 414: 624 – 631.
- [55] BUGAI D, SKALSKYY A, DZHEPO S, et al. Radionuclide migration at experimental polygon at Red Forest waste site in Chernobyl zone. Part 2: Hydrogeological characterization and groundwater transport modeling[J]. *Applied Geochemistry*, 2012, 27(7): 1359 – 1374.
- [56] 吴晓艳, 熊正为, 彭小勇, 等. 降雨对铀尾矿库地下水中核素迁移影响的模拟研究[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(1): 92 – 95. [WU Xiaoyan, XIONG Zhengwei, PENG Xiaoyong, et al. Simulation research on the effects of precipitation on the nuclide migration in groundwater of the uranium tailings impoundment[J]. Journal of Safety and Environment, 2013, 13(1): 92 – 95. (in Chinese with English abstract)]
- [57] CHO W J, LEE J O, CHOI H J. Radionuclide migration through an unsaturated clay buffer under thermal and hydraulic gradients for a nuclear waste repository[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2012, 50: 71 – 81.
- [58] 彭志娟, 李寻, 陈经明, 等. 处置单元核素¹³⁵Cs迁移数值模拟研究[J]. 地下水, 2018, 40(6): 113 – 116. [PENG Zhijuan, LI Xun, CHEN Jingming, et al. Numerical simulation study on migration of nuclide ¹³⁵Cs in disposal unit[J]. Ground Water, 2018, 40(6): 113 – 116. (in Chinese with English abstract)]
- [59] PONTEDEIRO E M, VAN GENUCHTEN M T, COTTA R M, et al. The effects of preferential flow and soil texture on risk assessments of a NORM waste disposal site[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 174(1/2/3): 648 – 655.
- [60] MERK R. Numerical modeling of the radionuclide water pathway with HYDRUS and comparison with the IAEA model of SR 44[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2012, 105: 60 – 69.
- [61] ROBINSON B A, LI C H, HO C K. Performance assessment model development and analysis of radionuclide transport in the unsaturated zone, Yucca Mountain, Nevada[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2003, 62/63: 249 – 268.
- [62] LEE Y M, HWANG Y. A GOLDSIM model for the safety assessment of an HLW repository[J]. Progress in Nuclear Energy, 2009, 51(6/7): 746 – 759.
- [63] LEE Y M, JEONG J. Evaluation of nuclide release scenarios for a hypothetical LILW repository[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2011, 53(6): 760 – 774.
- [64] 黄勇, 周志芳, 余钟波. HydroGeoSphere在锦屏水电站坝址区水流和溶质运移模拟中的应用[J]. 水动力学研究与进展, 2009, 24(2): 242 – 249. [HUANG Yong, ZHOU Zhifang, YU Zhongbo. Application of HydroGeoSphere in simulating flow and solute transport of dam site in Jinping hydropower station[J]. Chinese Journal of Hydraulics, 2009, 24(2): 242 – 249. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张若琳