

高放废物深地质处置地下水数值模拟应用综述

李露露, 张秋兰, 李星宇, 张 璜, 崔亚莉, 邵景力

Review of groundwater numerical simulation for deep geological disposal of high-level radioactive waste

LI Lulu, ZHANG Qiulan, LI Xingyu, ZHANG Huang, CUI Yali, and SHAO Jingli

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202107037>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高放废物深地质处置地下水流数值模拟方法研究进展

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

李露露, 周志超, 邵景力, 崔亚莉, 赵敬波 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 13-23

甘肃北山区域地下水流数值模拟研究

Numerical simulation of regional groundwater flow in the Beishan area of Gansu

曹潇元, 侯德义, 胡立堂 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 9-16

基于FEFLOW的三维土壤-地下水耦合铬污染数值模拟研究

Numerical simulation of three-dimensional soil-groundwater coupled chromium contamination based on FEFLOW

刘玲, 陈坚, 牛浩博, 李璐, 殷乐宜, 魏亚强 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 164-174

西北地区地下水水量-水位双控指标确定研究——以民勤盆地为例

A study of the determination of indicators of dual control of groundwater abstraction amount and water table in northwest China: a case study of the Minqin Basin

王晓玮, 邵景力, 王卓然, 崔亚莉, 张秋兰 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 17-24

“引哈济党”工程对敦煌盆地地下水位影响的数值模拟研究

Numerical simulation studies of the influences of water transferring project from the Haerteng River to the Dang River on groundwater levels in the Dunhuang Basin

何剑波, 李玉山, 胡立堂, 尹政, 胡彦斌 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 34-43

地下水污染风险预警等级及阈值确定方法研究综述

Review on the determination methods for early warning grade and threshold of groundwater pollution risk

王嘉瑜, 蒲生彦, 胡, 李博文 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 43-50



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202107037

李露露, 张秋兰, 李星宇, 等. 高放废物深地质处置地下水数值模拟应用综述 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 43-53.
LI Lulu, ZHANG Qiulan, LI Xingyu, *et al.* Review of groundwater numerical simulation for deep geological disposal of high-level radioactive waste[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(2): 43-53.

高放废物深地质处置地下水数值模拟应用综述

李露露¹, 张秋兰¹, 李星宇², 张 璜¹, 崔亚莉¹, 邵景力¹

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083;

2. 中国核电工程有限公司, 北京 100840)

摘要: 开展地下水数值模拟研究是高放废物处置场地安全评价的重要组成部分, 然而深地质处置介质类型的复杂性、基岩深部资料的相对匮乏性导致模拟结果存在不确定性, 如何刻画深部地下水动力场并评估可能引起的风险已成为高放废物处置安全评价中重点关注的问题。在大量文献调研的基础上, 综述了世界典型国家高放废物深地质处置场地的地下水数值模拟与不确定性分析应用, 并归纳总结该领域研究经验, 得到以下认识: (1) 深地质处置场深部构造、裂隙的发育与展布决定了地下水循环条件, 探究适用于基岩裂隙地区新的水文地质试验方法是提高地下水数值模型仿真性的基础; (2) 不同尺度模型融合是解决深地质处置地下水模拟的有效技术方法, 区域尺度多采用等效连续介质法, 场地尺度使用等效连续多孔介质和离散裂隙网络耦合模型, 处置库尺度使用离散裂隙网络方法, 其次需重点关注未来大时间尺度下放射性核素在地质体中的迁移转化规律, 模拟预测场址区域地下水环境长期循环演变对核素迁移的潜在影响; (3) 考虑到不同的处置层主岩岩性以及在不同介质中发生的 THMC(温度场—渗流场—应力场—化学场)过程, 目前国内外常用的地下水模拟软件有: Porflow、Modflow、GMS 及 MT3DMS 等用于模拟孔隙或等效连续介质, Connectflow、Feflow 及 FracMan 等用于模拟地下水和核素在结晶岩、花岗岩等裂隙中的迁移, TOUGH 系列软件主要应用于双重介质的水流、溶质及热运移模拟; (4) 指导开展有针对性的模型和参数的不确定性分析工作, 减少投入工作量, 提高模型精度, 并可针对处置库长期演变、废物罐失效、极端降雨等多情景预测模拟, 为处置库安全评价及设计提供基础数据支撑; (5) 针对我国深地质处置地下水数值模拟研究现状, 下一步应加强区域地质、水文地质、裂隙测量以及现场试验等相关的调查及监测工作, 多介质耦合、多场耦合模拟及不确定性分析研究将会是未来的研究重点。

关键词: 高放废物深地质处置; 地下水数值模拟; 核素迁移; 安全评价; 深部地下水动力场; 风险

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)02-0043-11

Review of groundwater numerical simulation for deep geological disposal of high-level radioactive waste

LI Lulu¹, ZHANG Qiulan¹, LI Xingyu², ZHANG Huang¹, CUI Yali¹, SHAO Jingli¹

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. China Nuclear Power Engineering Co. Ltd., Beijing 100840, China)

Abstract: Groundwater numerical simulation is an important part of the safety assessment for high-level radioactive waste (HLW) disposal sites. The complexity of deep geological disposal media and the relative lack of

收稿日期: 2021-07-13; 修订日期: 2021-09-16

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 中核集团青年英才科研项目(中核科发[2018]272号); 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: 张秋兰(1983-), 女, 副教授, 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: qlzhang919@cugb.edu.cn

deep bedrock data lead to uncertainties in the simulation results. How to characterize the deep groundwater dynamic field and evaluate the possible risks has become a key issue in the safety assessment of HLW disposal. Based on a lot of literature investigation, this paper reviews the application cases of groundwater numerical simulation and uncertainty analysis of HLW deep geological disposal sites in typical countries, and summarizes the research experience in this field. The results show that (1) the structure and fracture development and distribution of deep geologic repositories determine the groundwater circulation conditions, and exploration of the new hydrogeological test method suitable for fractured bedrock areas is the basis of improving the accuracy of groundwater numerical simulation. (2) The integration of different scale models is an effective technical method to solve the groundwater simulation for deep geological disposal. The equivalent continuum method is mostly used at a regional scale, the coupling model of equivalent continuous porous medium and discrete fracture network is used at a site scale, and the discrete fracture network method is used at a repository scale. Furthermore, it is necessary to pay more attention to the migration and transformation of radionuclides in geological formations, to simulate and predict the potential impact of the long-term groundwater environment evolution on radionuclide migration in the site area. (3) Considering different host rocks in the disposal layers and the thermal-hydrogeological-mechanical-chemical process occurring in multiple media, the commonly used software for groundwater numerical simulation in HLW deep geological disposal includes Porflow, Modflow, GMS and MT3DMS, which are used to deduct pores or fractures into equivalent continuum, and groundwater flow and nuclides migration in fractures of crystalline rock and granite can be generalized by using Connectflow, Feflow and Fracman, whereas TOUGH series is mainly used to simulate flow, solute and heat transport in dual media. (4) Targeted uncertainty analysis of the models and parameters should be carried out to reasonably reduce workload and improve the model accuracy. Moreover, the prediction simulation of repository long-term evolution, waste canister failure, extreme rainfall and other scenarios can provide basic data support for the safety assessment and design of the repository. (5) In view of the current researches on groundwater numerical simulation of HLW deep geological disposal in China, it is necessary to strengthen the investigation and monitoring of geology, hydrogeology, fissure measurement and field test in the next step, and the multi-medium coupling model, multi-field coupling simulation and uncertainty analysis will be the focus of future researches.

Keywords: high-level radioactive waste (HLW) deep geological disposal; groundwater numerical simulation; nuclide migration; safety assessment; deep groundwater dynamic field; risk

核能是一个科学技术要素很多的产业,其安全和规模化发展必将带动多方面的科学、技术和工程领域的进步^[1],核电工业的运行在为人类提供大量清洁能源的同时,也会产生大量具有高水平放射性的核废料(简称“高放废物”)。由于高放废物具有放射性强、毒性大、半衰期长的特点,因此合理处置高放废物成为当前核能安全和规模化发展必须解决的问题之一。目前国际上公认的较为可靠的方法是“深地质处置”,即把高放废物埋在距离地表深约 500~1 000 m 的地质体中,利用天然和工程屏障组成的深地质处置库系统实现高放废物与人类生存环境安全隔离。一般来说,安全处置高放废物需要使废物中的有害核素在万年以上安全期内远离人类生存环境。

然而作为可能携带核素迁移的载体,地下水是高放废物深地质处置安全与否的关键因素之一,也是场地安全评价中尤为关注的问题。高放废物深埋入地下后,会继续衰变产生热量从而破坏工程屏障(核废料容器或处置库壁)进入地下水环境。从国际先进经验来看,数值模拟技术是解决处置工程大时间尺度下核素随地下水水流迁移的有效技术方法。目前美国、瑞典、芬兰、法国等均将场区地下水水流数值模拟技术应用于其处置工程研发设计及许可申请中,成为高放废物地质处置安全评价的必要内容之一。长时间尺度安全评价结果受自然系统演变过程、知识认知水平、参数尺度效应等方面影响,不可避免地存在不确定性,是深地质处置中的安全隐患,如何通过不确定

性分析降低安全风险已经成为核废料安全全过程中的重要组成部分。

在发达国家,高放废物的深地质处置研究已有几十年的历史,但由于问题的复杂性,至今还没有一个国家真正建成高放废物的处置库,大多处于场址预选或场址性能评价阶段。目前处在研究前沿的国家主要有芬兰、瑞典和法国等,开展了大量的地下实验室研究工作,获取了大量的数据。其他国家大多正在进行场址初选、详细的场址性能评价以及地下实验室建设研究阶段。

针对高放废物处置场数值模拟和不确定问题,本文在梳理世界典型国家高放废物处置中地下水数值模拟应用基础上,归纳总结该领域研究经验,展望研究发展趋势,为我国高放废物地质处置的选址、设计等提供一定的技术参考。

1 国外地下水数值模拟应用

1.1 美国

美国高放废物地质处置的建议是由美国科学院1957年提出,地质处置计划由能源部(DOE)负责执行。美国核废料处置库选址可分为4步:可能场址、适宜特性评价场址、特性评价场址、特性评价结果4个步骤,最终推选出合适的建库场址。DOE筛选出了3个候选场址,分别是德克萨斯州的戴夫史密斯、华盛顿州的汉福特和内华达州的尤卡山(Yucca Mountain),并对其开展了适宜性评价工作。尤卡山场址被确定为高放废物地质处置的最终场址。

尤卡山位于干旱地区,降雨稀少,地表呈戈壁和荒漠景观,场址围岩为熔结凝灰岩,场址突出特点是包气带厚度极大,可达700 m,拟建处置库位于包气带中。降雨入渗是地下水的主要补给来源,由于巨厚包气带以及强烈的蒸发蒸腾作用限制了降雨补给地下水的水量,因此地下水极为贫乏。美国对尤卡山进行的数值模拟研究工作非常全面且细致,从区域尺度到局部尺度,从非饱和带到饱和带,从基岩到裂隙,从水流模拟到核素迁移,从渗流模型到多场耦合都进行了大量的研究工作。按照建模思路,将研究内容主要分为:①非饱和带地下水数值模拟,②饱和带地下水数值模拟。

由于处置库拟建在包气带内,因此美国对于非饱和带地下水流动、热传输以及核素迁移极为重视,在现已建成的地下实验坑道内进行了大量的试验研究。非饱和带地下水流动模拟主要是在进行了水文

地质试验的区域内进行的,模拟的目的是进一步了解水分的运移过程、包气带的含水状态、入渗水到达含水层所需时间等。Liu等^[2]、Bodvarsson等^[3]利用TOUGH2模拟软件还原尤卡山在区域尺度上非饱和带系统地下水水流运动规律。为了更好地研究非饱和带系统的热-水文行为,Haukwa等^[4]采用TOUGH2/EOS3模块模拟非饱和带系统对放置在处置库中放射性废物衰变产生的热量的响应,为设计处置库和工程屏障系统以及评估系统在运行期间的性能提供了参考。Zhang等^[5]开发了并行计算技术并实现到TOUGH2代码中,通过使用超过100万个网格块建立尤卡山三维非饱和带数值模型,并评估5种不同的渗透情景对渗流模式的影响。由于非饱和带系统的水文地球化学性质在多个尺度上表现出系统性和随机性的空间变化,在这种不确定条件下,预测放射性核素的迁移是困难的。因此,Ye等^[6]使用蒙特卡罗方法,利用TOUGH2/EOS9和T2R3D模块研究评估了用于模拟尤卡山非饱和带流动和放射性核素迁移的水力和地球化学参数的不确定性引起的放射性核素迁移时间的不确定性。Rechard等^[7-8]通过建立非饱和带溶质运移数值模型验证尤卡山地区选址的可靠性,并证实了地下水流场以及核素的吸附在迁移过程中起到非常重要的作用。

饱和带地下水流动模拟主要是针对区域及场址范围内水流及核素迁移模拟。Pohlmann等^[9]采用蒙特卡罗随机模拟方法获取饱和带大范围水力参数,通过室内吸附实验获得核素相关参数,运用Modflow对³H和¹⁴C进行水流及核素迁移模拟,并对凝灰岩孔隙度、冲积层渗透系数等进行了灵敏度分析。Arnold等^[10]使用已校准的三维场址规模流动和运输模型模拟饱和带中放射性核素迁移,并进行了处置库附近地下水通量和流向、核素释放源位置以及放射性核素运输3个方面的不确定性分析研究。Zyvoloski等^[11]建立与可用数据一致的合理替代场址尺度饱和带模型,利用FEHM以及PEST软件研究了尤卡山以北的大型构造对流动路径的影响。2009年,美国政府对尤卡山项目的态度发生了根本性转变,并撤销尤卡山处置库建造许可证申请书。因此,为了重新获得处置库建造许可证,Kelkar等^[12-13]基于有效连续体方法建立流动模型,利用水文地球化学资料验证了模型有效性,并通过备用模型和参数进行不确定分析,模拟了核素粒子的运移。并使用FEHM计算机代码进一步对尤卡山某预选高放废物处置库进行了风险评估,并考虑在饱

和火山岩双重孔隙介质中的平流、扩散、溶质在固体表面的吸附和胶体对溶质迁移的影响作用建立了流体迁移模型。

1.2 瑞典

瑞典高放废物处置库场址研究始于 1977 年,瑞典核燃料和废料管理公司(SKB)确定了高放射性废物主要储存在约 500 m 深的结晶基岩层的乏燃料处置库中。1995 年建成了位于花岗岩中的 Äspö 地下实验室,确定 2 个候选场址 Forsmark 和 Laxemar,并进行主要针对地质体的场址调查研究,确定拟建场址区域的地质及水文地质情况。瑞典在此阶段建立了一系列场址描述模型,最终经过详细的室内试验和数值研究,认为 Forsmark 是建立高放废物处置库的合适场址。

Forsmark 场址位于沿海海岸线地带,由于处置工程的特殊性,针对其长期安全评价开展了气候的变化、海平面上升、海水入侵地下水等地下水长期演化的数值模拟工作。Joyce 等^[14]和 Follin 等^[15-16]在针对拟建的高放废物处置库的安全评价项目中,根据处置库演化分为开挖和运行阶段(10~100 a)、关闭后初期的温带气候(1000~10000 a)、关闭后冰期旋回(10000~100000 a)3 个阶段建立模型。在处置库开挖和运行阶段对于近场的多场耦合作用考虑较多,如从应力、水力条件的变化分析 EDZ(开挖扰动区)对处置库附近区域的扰动影响。在处置库关闭后温带气候阶段建立了区域、场地及处置库 3 个不同尺度的变密度流模型,区域尺度上采用连续多孔介质方法建立模型,处置库尺度使用离散裂隙网络方法,场地尺度使用等效连续多孔介质和离散裂隙网络耦合模型概化。区域尺度模型为场地和处置库尺度模型提供初始压力(水头)和密度,在处置库尺度下,精细刻画近场区的裂隙,将其概化为离散裂隙网络,嵌入区域模型中组合形成场地尺度模型,从而进行地下水流动、质点迁移及流动路径等分析研究。关闭后的冰期旋回阶段,考虑了冰层覆盖的问题,以最后一次冰期的冰期最大值(LGM)为划分时段,分为 3 个阶段构建地下水流动数值模型,具体为考虑冰川生长未冻结和冻结(永久冻土)条件的前 LGM 阶段、冰层完全覆盖的 LGM 阶段和冰缘退缩、地下水模型边界发生变化的后 LGM 阶段。

Cvetkovic 等^[17]对瑞典 Äspö 实验室附近的 50~100 m 尺度的岩体进行了数值模拟,依据现场资料、示踪试验等数据统计裂隙特征,结合 Packer 测试结果获得水力渗透性分布,运用 FracMan 软件建立离散裂隙网络

模型,模拟了核素粒子运移情况。Werner 等^[18]采用 Connecflow、MIKE 11 和 MIKE SHE 建立 Laxemar 场址地表水和地下水耦合模型,以预测从深层处置库中泄露的放射性核素可能进入陆地、地表水和岩石上方等相关生态系统的出口点。Schwartz^[19]利用 TOUGHREACT/EOS7R 软件模拟了 Forsmark 裂隙结晶岩中可能从处置场地中泄露出来的核废物迁移过程,并就裂隙间距对模拟结果的影响进行了敏感性分析。Bosson 等^[20]利用 MIKE SHE 软件建立场址三维地下水流动和运移模型,针对不同气候和冻土条件组合进行了多种情景模拟,量化了各种情景下深层和浅层地下水流动和溶质运移的交换量和迁移路径。Joyce 等^[14]考虑气候变化条件下,应用多尺度嵌套建模技术,利用 Connectflow 软件生成了处置库尺度模型的 10 个离散裂隙网络模型实现,分别进行了地下水流动和溶质运移数值模拟。Vidstrand 等^[21]采用热-水力耦合方法,使用 Darcy Tools 代码模拟 Forsmark 场地永久冻土条件下的地下水流动,研究了冰缘和冰川气候条件对裂隙结晶岩中地下水流动的影响。

1.3 法国

1987 年起,法国国家放射性废物管理机构(ANDRA)启动了高放废物深地质处置的选址工作,共筛选出 3 个预选场址,分别为 Meuse/Haute Marne 场址(以黏土岩为主)、Vienne 场址(以花岗岩为主)和 Garol 场址(以黏土岩为主)。为了研究处置库拟建在黏土岩或花岗岩的可行性,开展了包括现象演化、处置库构建体系结构和管理及安全分析研究,最终确定预选场地为 Meuse/Haute Marne 场址。ANDRA 对该场址进行了大量地质、水文地质、地球物理及地球化学等方面的研究,并于 1999 年建立了 Bure 地下实验室,最终选择在法国东部埋深 500 m、厚达 130 m 的“Callovo-Oxfordian 黏土岩”中进行处置库概念设计,并将候选高放废物处置库命名为“Cigéo”。

ANDRA 对以黏土岩为主岩的拟建高放废物处置库开展了一系列研究,具体包括:

(1) 地质处置的设计和材料特性

核废物容器、缓冲材料、黏土岩特性、处置库总体设计与处置方案等。

(2) 现象评价

对处置场及地质环境中所有组分在时间和空间上 THMC(温度场-渗流场-应力场-化学场)过程进行基础研究。Montes-H 等^[22]为了研究工程屏障的化学变化及地质屏障中流体的存在和铁的释放所产生的

化学元素扩散的影响,首先利用 KIRMAT 程序模拟了处置库条件下考虑化学元素在工程屏障中扩散的地球化学反应与阳离子交换等过程。

(3) 初步评价

重点研究地下水流动及核素迁移过程中的 THMC 过程,对于近场开展了较多的多场耦合方面的研究。利用 Porflow 软件建立处置库区域三维单相水流模型和核素迁移模型,同时构建处置库小尺度范围二维水流模型;利用 TOUGH2-MP 软件分析放热废物包装对周围介质中液体压力的影响进行三维建模;联合 Comsol-Phreeqc 软件对处置单元的长期化学演化进行三维建模研究分析;利用 Phreeqc 软件进行通风井密封进行二维建模分析其长期化学演化过程;利用 Code-Bright 软件研究地质介质对高放废物热释放响应的 THM 耦合过程。

(4) 安全评价

关注处置环境中组分或各种物化过程对处置系统整体性能的影响。

1.4 芬兰

芬兰乏燃料处理概念设想是将其埋藏在一个约 500 m 深处挖掘的结晶岩储存库中。芬兰经过对全国范围内场址的初步和详细调查,共筛选出 4 个重点地段,分别为 Olkiluoto, Romuvaara, Hästholmen, Kivetty, 并进行了相应的场址特性评价工作。在综合考虑岩体、水文地质、水文地球化学、运输、生态系统等各种条件的基础上,确定 Olkiluoto 为最终场址,当前该场址处于最终的处置库建造阶段。芬兰是第一个基于现场调查和数值模拟,确定将乏燃料安全处置在基岩深处挖掘的最终处置设施(ONKALO)的国家。

为了刻画不同空间尺度下断裂带(裂隙)对地下水流动的影响,一些研究人员^[23-27]采用模型嵌套技术对整个区域地下水系统进行建模,其中区域尺度模型的大小通常水平方向约 10 km,并延伸至自然边界;场址尺度模型的水平尺寸约为 2~3 km,裂隙网络建模域的尺寸约为 40 m。在区域、场址和处置库尺度中,区域尺度以流域范围为研究区,考虑区域大型断裂带对地下水流场的影响;而处置库尺度模型更加集中于场址局部断裂带的刻画,利用较大尺度的模型为较小尺度的模型提供边界条件^[23]。就核素在裂隙岩体中随地下水迁移数值模拟开展了大量的工作,主要可以分为以下 3 类。

(1) 采用等效连续介质(EC)方法概化区域、场址以及处置库尺度的断裂并开展基岩深部地下水水流

数值模拟及核素迁移研究

Löfman^[24]采用 FEFTRA 有限元程序包,利用二维有限元表征断裂带,开发了地下水水流和溶质运移的现场特定数值模型。Kattilakoski 等^[25]建立了场址在自然条件下和用于乏燃料深地质处置的深层地下水流动数值模型,并进行了断裂带和上边界的不确定性分析研究。由于新的水文地质和水文地球化学现场调查工作的开展,Löfman^[26]对 Olkiluoto 场址尺度地下水水流进行了补充模拟,建立了 5 个变体模型研究流动孔隙度、溶质运移概念模型、断裂带、土地隆起和初始条件对地下水数值模拟结果的影响。2001 年确定 Olkiluoto 为最终处置库场址,随后通过增加钻孔确定竖井位置,建造 ONKALO 地下实验室。考虑到 ONKALO 的开放式隧道和竖井以及处置库可能会对场址地下水水流系统造成水力干扰,Posiva 等^[27]为了描述水力和盐度演变,并评估流动条件,包括流速、流量相关的运移特性、进出处置库的流动路径,采用 Code-Bright 和 Phreeqc 软件建立了地下水流动和溶质运移模型。

(2) 通过对裂隙网络的详细刻画建立处置库尺度离散裂隙网络(DFN)地下水水流及溶质运移数值模型

在场址初步及详细调查阶段,通过收集大量地表裂隙几何特征数据,Niemi 等^[28]统计分析并描述了裂隙位置和强度在空间上的变化,利用 FracMan 生成裂隙几何模型,运用 Feflow 建立随机离散裂隙网络地下水水流数值模型,分析裂隙介质中地下水流动模式。为了增加对废物放入处置系统后的水动力演变过程的认识,Lanyon 等^[29]利用 Connectflow 代码建立了位于 Olkiluoto 的 KBS-3H 处置库周围的离散裂隙网络模型,使用不同的导水系数概率分布定义了 4 种不同的模型变体。Olkiluoto 场址裂隙的几何特性进行了初步分析,生成了裂隙方向、尺寸、强度以及空间变化的概率分布模型,利用新的钻孔和 ONKALO 地下实验室数据对模型进行了修订与更新^[30]。Pulkkanen 等^[31]通过改变模型的几何和水力特性,建立了不同的计算案例,进而研究基岩裂隙对乏燃料垂直沉积孔附近放射性核素迁移的影响,不同于以往研究注重于核素的链式衰变、吸附和沉淀,重点对钻孔周围裂隙的 3D 几何详细建模。Posiva 等^[27,32]为了评估放射性核素释放的不同情景,同时考虑到稀疏裂隙基岩潜在流动裂隙的强度和尺寸分布尚不确定,建立了 3 种完全不同的概念模型,并模拟了 3 个时间段内 Olkiluoto 地下水水流、盐度演变以及核素迁移过程。

(3)考虑区域、场址、处置库以及储罐多级尺度建立离散裂隙网络—连续介质耦合模型

为了检查从处置库、储罐到生物圈的潜在释放路径上地下水流动和运移特性, Poteri 等^[33]采用裂隙网络生成和分析程序 FLOWPW、MeshMonster 程序和用于解决裂隙网络中流场的 MAFIC 程序对储罐尺度下地下水流动进行详细的裂隙网络分析,建立了不同场址、处置库及储罐尺度的地下水水流及溶质运移模型,并针对 2 m 差流量测量手段、裂隙网络几何、背景岩块厚度、地下水不同流向分别做了不确定性分析研究。Blessent 等^[34]利用 GOCAD 软件详细刻画了 Olikiluoto 场址的地质模型,然后采用 HydroGeoSphere 软件,利用四面体单元对场址中的裂隙进行了离散化处理,最终采用等效连续介质概念模型模拟了地下水流动及溶质运移,模型结果细化了研究区区域地下水水流场分布情况,并模拟了不同情景下,裂隙对地下水水流场的影响以及溶质在裂隙中的运移距离。

1.5 其他国家

加拿大在高放废物地质处置方面享有盛名,特别是它在花岗岩中白壳(Whiteshell)地下实验室的研发工作。核废物管理机构(NWMO)决定将安大略省 2 个可能满足选址要求的地区:南布鲁斯自治区和休伦-金洛斯乡作为乏燃料深层最终处置库的候选场址。Ophori^[35]基于 Whiteshell 研究区的低渗透性结晶岩概念模型,考虑当前概念模型的某些可能变化,例如岩石中裂隙带的厚度和水力特性以及流体特性和地下水水流系统的边界条件等,对二维区域地下水水流进行了模拟,并评估了这些变化对地下水流动模式的影响。

瑞士的处置库选址工作始于 20 世纪 80 年代初,由放射性废物处置合作总署(Nagra)负责。目前,已建成了位于花岗岩中的 Grimsel 地下实验室和位于黏土岩中的 Mont Terri 地下实验室。

为了寻找潜在的地质处置场所,从 1960 年早期开始,德国展开对盐岩的大规模研究,并决定采用废矿井处置法处理高放废物。此外考虑到核废料处置时释放的大量热量对围岩造成的影响,在 Konrad 铁矿开展了大量的研究工作。

2 我国地下水数值模拟应用

我国高放废物地质处置的研究工作由核工业北京地质研究院主要负责,研究工作正式启动于 1985 年,现已完成全国筛选、区域筛选及地区筛选工作^[8]。综合考虑地质、水文地质条件等因素,共筛选出 6 大

高放废物处置库预选区,分别为华东、华南、西北、西南、内蒙古和新疆预选区,涉及围岩类型有花岗岩、凝灰岩和黏土岩^[36]。经过全国筛选和初步比选,将工作重点集中到北山预选区,先后开展了高放废物处置库场址筛选、重点预选区场址特性的初步评价、放射性核素迁移的实验室研究以及缓冲/回填材料方面的研究等。由于北山地区具有气候干旱、降雨稀少、地质结构稳定等得天独厚的自然地理、经济地理条件,目前已初步选定甘肃北山地区作为高放废物地质处置的重点预选区,旧井、新场-向阳山、野马泉、沙枣园以及算井子为重点预选地段。

20 多年来,大量学者对我国高放废物地质处置地下水水流数值模拟研究方面开展了大量的工作。考虑到北山区域低渗透裂隙介质的非均质性,苏锐^[37]在比较研究已有水文地质试验技术方法的基础上,提出用双栓塞斯拉格试验技术作为解决低渗透裂隙介质深部环境渗透特征评价的新方法,首次建立了考虑温度效应、钻孔储存效应和水位瞬时变化特征的地下水水流三维数值模型。董艳辉等^[38]将并行计算应用于北山大区域地下水水流模拟,建立了面积近 10^5 km^2 、模型单元数达百万级的地下水模型,根据多情景模拟结果分析断层及不同补给条件对地下水水流场产生的影响。王礼恒^[39]围绕甘肃北山地下水系统分别在区域—盆地—岩体三级尺度逐级开展研究,利用 Modflow、TOUGH2 软件进行三级尺度地下水流动数值模拟,获取了区域地下水流动的时空分布规律。魏亚强等^[40]针对裂隙介质概化及核素迁移模拟等难点,依据花岗岩深钻孔裂隙统计数据,结合蒙特卡罗方法,采用离散裂隙网络模型对内蒙古阿拉善高放废物地质处置预选区展开了核素粒子迁移数值模拟研究。一些学者^[41-43]采用 TOUGH2-MP/EOS3 和 GRACE 重力卫星等方法,建立了北山地区区域尺度三维饱和-非饱和地下水水流数值模型,并采用 EOS7R 模块建立了预选区 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 、 ^{238}U 、 ^{239}Pu 典型核素迁移数值模型。

考虑到核素迁移的特点,核工业北京地质研究院与中国科学院地质与地球物理研究应用 PMWIN 软件建立北山区域三维流动数值模型,并使用 PMPATH 模块,模拟了核素在不同情景下的运移轨迹和在不同时间内达到的范围^[44]。苏锐等^[45]基于一个假想的高放废物地质处置系统——CRP-GEORC 地质处置系统概念模型,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性分析和不确定性分析。吴晓东^[46]基于双重介质理论建立了单裂

隙介质溶质运移的概念和数学模型,利用 Matlab 软件分析模拟了 ^{229}Th 、 ^{135}Cs 及 ^{79}Se 核素在低渗透花岗岩裂隙域与基质域中的相对浓度分布,分析了水力坡度和隙宽对这3种核素在单裂隙介质中迁移的影响。凌辉等^[47]以北山预选区为背景,基于处置库正常演变情景,利用 GoldSim 软件模拟分析了天然屏障对放射性核素的阻滞性能,分析了不导水围岩长度和渗透系数对处置库远场核素释放率的影响。运用 FEPs (Features, Events and Processes) 分析和情景开发技术,针对算井子候选场址的长期放射性影响进行了初步评价,并在只考虑单个废物罐的条件下,应用 GoldSim 软件评价了处置库正常演变情景条件下的长期辐射安全^[48]。彭志娟^[49]分别采用等效连续和双重介质模型概化裂隙建立 EDZ 模型,利用 TOUGH2 软件研究了裂隙概化模型的选取对 ^{129}I 和 ^{135}Cs 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。李楚^[50]采用 EQ3/6 和 Phreeqc 软件研究放射性核素 Am 在北山预选处置场研究区的花岗岩裂隙水中的迁移规律和特征。

3 结论及展望

总体而言,虽然在高放废物处置的选址方面,各个国家会根据各自不同的国情有所不同,但基本都需要经过大量的野外地质调查工作确定预选区,从而建造地下实验室,并结合数值模拟手段,最终确定合适的处置场址。按照阶段和层次开展不同规模的研究,具体可以分为6步:①选址标准的确定和场址区域筛选,主要是在全国范围内筛选可能的预选区,并开展实地踏勘工作;②预选地段筛选及初步调查,基于上一阶段的调查成果,筛选出重点研究地段,对其进行初步现场调查,开展区域性地下水数值模拟研究,了解宏观水文地质背景和大规模水文地质演化进程;③场址特性评价,开展地质、水文地质、水文地球化学、地球物理调查,结合深钻孔与浅钻孔工作,获取重点地段地质、水文地质图件、钻孔岩芯数据、钻孔电视、深部岩体渗透率等成果,查清地下水补、径、排条件,为场址评价提供依据;④确定场址及可能处置库位置,开展水文地质钻探及钻孔水文地质试验,获取小规模导水裂隙几何形态、位置以及水力性质,建立多级尺度(区域、场址、处置库)地下水数值模型,查明从处置库到区域可能的地下水水流动路径;⑤特定场址地下实验室,对处置库场址进行一系列详细的评价工作,主要通过增加钻孔确定竖井位置,最终建造

地下实验室;⑥处置库,进行处置库运行前的各类监测工作,包括岩石力学、水文学、水文地球化学、工程屏障等。

2021年6月,北山地下实验室开工建设,我国高放废物地质处置工作进入了地下实验室建设及研发阶段。以上总结的高放废物地质处置地下水数值模拟技术方法和手段对于今后我国处置过程中安全评价的地下水数值模拟方面具有一定的借鉴意义,但仍需根据我们国家的建设方案、场址条件选取适合的软件,建立相应的地下水数值模型,进行具体的参数选取和概化。针对我国高放废物深地质处置地下水数值模拟工作提出以下几点展望:

(1)探究适用于基岩裂隙地区新的水文地质试验方法是提高地下水数值模型仿真性的基础

深地质处置场深部构造、裂隙的发育与展布决定了地下水循环条件,构建反映实际地质条件的裂隙网络模型不仅要依靠场地调查,更多的是要借助于新的技术方法揭示裂隙随深度发育情况,例如瑞典采用 PFL (Posiva Flow Log) 流量测井法,判断裂隙的垂向展布情况并结合井下电视等技术辅助分析,建立了处置库尺度裂隙网络模型;芬兰利用 2, 10m 的 Packer 试验数据校正裂隙网络中的导水系数分布,从而建立 DFN 模型。

进一步开展区域地质、水文地质、裂隙测量以及现场试验等相关的调查及监测工作,获得更多、更为详细的长期监测数据,并继续完善模型。如选择典型区段开展综合水文物探和遥感技术工作,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;研究适应于北山预选区花岗岩体低渗透、非均质和各向异性特点的双栓塞钻孔水文地质试验技术,包括抽水试验、微水试验、压水实验等,分析裂隙网络特征、裂隙随深度变化以及渗透性空间分布等规律;开展地下水同位素、水化学及惰性气体研究资料,追踪地下水在包气带、浅部及深部基岩裂隙水中的流动与演化过程,查清地下水水化学演化、补给机制及水岩相互作用等,更精确地识别深部地下水补给来源和估算地下水年龄,查明其地下水系统水文地质结构和深部地下水的分布特征。

(2)不同尺度模型融合是解决高放废物深地质处置地下水模拟的有效技术方法

空间尺度上,区域尺度地下水水流和溶质运移模型多采用等效连续介质法,从不同维度(三维、剖面二维)刻画高放废物地质处置深部地下水循环演化规

律,探索核素迁移到敏感区域途径、时间;处置库尺度使用离散裂隙网络方法,精细刻画近场区的裂隙,探究从处置库、储罐到生物圈的潜在释放路径上地下水流动和运移特性;场地尺度可建立等效连续多孔介质和离散裂隙网络耦合模型,以便进一步精细分析地下水流动、质点迁移及流动路径等。在进行区域-场址-处置库多尺度地下水数值模拟时,可以建立嵌套耦合模型,通过 2 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。利用较大比例的模型为较小尺度模型提供初始及边界条件的方法,解决了小尺度模型不确定边界对预测结果的影响,提高了模型精度。时间尺度上,高放废物处置安全评价达百年、千年乃至更长时间,由于高放废物衰变热、地下实验室等特征设施的存在,在地质处置库中高温、地应力、水力、化学和辐射等作用的耦合下,地质处置库的深部地下水发生水力扰动,从高放废物处置库中释放出来的放射性核素将随地下水而迁移,从而影响处置库的性能。需重点关注放射性核素的地球化学行

为及其在缓冲材料、地质体和地下水等不同介质中的迁移转化规律,模拟预测场址区域地下水环境长期循环演变对核素迁移的潜在影响。

(3)根据处置层主岩岩性以及在多介质中发生的 THMC 过程选择对应的模拟软件

各国在高放废物处置库场址安全评价工作中会有不同的侧重,选取的软件也有所不同(表 1)。黏土岩等一般考虑模拟孔隙介质或将裂隙介质概化为等效连续介质模型的软件,如 Porflow、Modflow、GMS 及 MT3DMS 等。结晶岩、花岗岩等以裂隙为水流通道的介质一般采用可以模拟裂隙流动的软件,如 Connectflow、Feflow 及 FracMan 等,这类软件在模型中明确定义模拟区每条裂隙的几何形状,比较真实地刻画了离散裂隙网络的水流、溶质及热运移特征。TOUGH 系列软件主要应用于双重介质的水流、溶质及热运移模拟,考虑了裂隙之间、基质网格块之间以及裂隙和基质之间的交互流动,在模拟饱和带-饱和带的大区域地下水水流方面,Modflow 和 TOUGH 系列软件应用颇多。

表 1 高放废物深地质处置选址及软件使用情况

Table 1 Site selection and simulation software for HLW deep geological disposal

国家	场址	地下实验室	围岩类型	主要用到的模拟软件
中国	新场	北山	花岗岩	Modflow, PMWIN, GoldSim, Phreeqc, EQ3/6, Rockflow, TOUGH 系列软件
美国	Yucca Mountain	ESF	凝灰岩	Modflow, FEHM, PEST, TOUGH 系列软件
瑞典	Forsmark	Äspö	花岗岩	Modflow, Darcy Tools, HydroGeoSphere, Connectflow, MIKE 11, MIKE SHE, TOUGH 系列软件
法国	Meuse/Haute Marne	Bure	黏土岩	Porflow, TOUGH2-MP, Phreeqc, Code-Bright, Comsol Multiphysics
芬兰	Olkiluoto	ONKALO	花岗岩	Feflow, Phreeqc, Connectflow, GoldSim, FracMan, HydroGeoSphere

(4)多情景模拟及不确定性分析研究是预测长时间尺度下处置库能否安全处置核废料的重要内容

高放废物处置包括设施的选址、建造、运行、关闭以及关闭后阶段。由于对场地条件的认识有限,以及研究时间尺度较长,开展模型的不确定性分析以及预测工况模拟尤为重要。各国基于此都构建一系列不同的地下水模型,如瑞典考虑不同的气候条件,构建温带气候、冰原气候等不同时期的数值模型;芬兰考虑地下实验室开挖期间、处置库运营 100 a、冰川时期、海水入侵以及土地隆起等不同情景下建立 Olkiluoto 场址地下水水流以及溶质运移数值模型;美国建立万年尺度下尤卡山场址不饱和系统对放射性废物衰变产生的热响应以及百万年尺度核素迁移数值模型等。

选取合适的模型、对参数的不确定性进行分析,将会减少工作量投入,提高模型精度。如采用统计手段获取水文地质结构、参数等建模要素的统计特征和

概率分布函数,开展模型的不确定性分析,提供要素在一定概率分布条件下的模型预测结果区间。其次针对处置库长期演变、废物罐失效、极端降雨等情景下的预测模拟研究也可作为处置库安全评价及设计提供基础数据支撑。

参考文献 (References) :

[1] 杜祥琬. 对我国核能发展战略的几点思考[J]. 中国核电, 2012, 5(3): 194 - 196. [DU Xiangwan. Thought about China's nuclear power development strategy[J]. China Nuclear Power, 2012, 5(3): 194 - 196. (in Chinese)]

[2] 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.

- [3] 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.
- [4] HAUKWA C B, WU Y-S, BODVARSSON G S. Modeling thermal-hydrological response of the unsaturated zone at Yucca Mountain, Nevada, to thermal load at a potential repository[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2003, 62–63: 529 – 552.
- [5] ZHANG K, WU Y-S, BODVARSSON G S. Parallel computing simulation of fluid flow in the unsaturated zone of Yucca Mountain, Nevada[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2003, 62-63: 381 – 399.
- [6] YE M, PAN F, WU Y-S, et al. Assessment of radionuclide transport uncertainty in the unsaturated zone of Yucca Mountain[J]. *Advances in Water Resources*, 2007, 30(1): 118 – 134.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] POHLMANN K, HASSAN A, CHAPMAN J. Description of hydrogeologic heterogeneity and evaluation of radionuclide transport at an underground nuclear test[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2000, 44(3/4): 353 – 386.
- [10] ARNOLD B W, KUZIO S P, ROBINSON B A. Radionuclide transport simulation and uncertainty analyses with the saturated-zone site-scale model at Yucca Mountain, Nevada[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2003, 62/63: 401 – 419.
- [11] 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, 62/63(2): 731 – 750.
- [12] KELKAR S, DING M, CHU S, et al. Modeling solute transport through saturated zone ground water at 10 km scale: Example from the Yucca Mountain license application[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2010, 117: 7 – 25.
- [13] KELKAR S, SRINIVASAN G, ROBINSON B A, et al. Breakthrough of contaminant plumes in saturated volcanic rock: implications from the Yucca Mountain site[J]. *Geofluids*, 2013, 13(3): 273 – 282.
- [14] JOYCE S, HARTLEY L, APPEGATE 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.
- [15] SELROOS J, FOLLIN S. Overview of hydrogeological safety assessment modeling conducted for the proposed high-level nuclear waste repository site at Forsmark, Sweden[J]. *Hydrogeology Journal*, 2014, 22(6): 1229 – 1232.
- [16] FOLLIN S, HARTLEY L, RHÉN I, et al. A methodology to constrain the parameters of a hydrogeological discrete fracture network model for sparsely fractured crystalline rock, exemplified by data from the proposed high-level nuclear waste repository site at Forsmark, Sweden[J]. *Hydrogeology Journal*, 2014, 22(2): 313 – 331.
- [17] CVETKOVIC V, PAINTER S, OUTTERS N, et al. Stochastic simulation of radionuclide migration in discretely fractured rock near the Äspö Hard Rock Laboratory[J]. *Water Resources Research*, 2004, 40(2): 1 – 16.
- [18] 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.
- [19] SCHWARTZ M O. Modelling radionuclide transport in large fractured-media systems: the example of Forsmark, Sweden[J]. *Hydrogeology Journal*, 2012, 20(4): 673 – 687.
- [20] BOSSON E, SELROOS J O, M STIGSSON, et al. Exchange and pathways of deep and shallow groundwater in different climate and permafrost conditions using the Forsmark site, Sweden, as an example catchment[J]. *Hydrogeology Journal*, 2013, 21(1): 225 – 237.
- [21] VIDSTRAND P, FOLLIN S, SELROOS J O, et al. Groundwater flow modeling of periods with periglacial and glacial climate conditions for the safety assessment of

- the proposed high-level nuclear waste repository site at Forsmark, Sweden[J]. *Hydrogeology Journal*, 2014, 22(6): 1251 – 1267.
- [22] MONTES-H G, FRITZ B, CLEMENT A, et al. Modeling of transport and reaction in an engineered barrier for radioactive waste confinement[J]. *Applied Clay Science*, 2005, 29(3/4): 155 – 171.
- [23] 李露露, 周志超, 邵景力, 等. 高放废物深地质处置地下水数值模拟方法研究进展[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(6): 13 – 23. [LI Lulu, ZHOU Zhichao, SHAO Jingli, et al. Advances in groundwater numerical simulation in deep geological disposal of high-level radioactive waste[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(6): 13 – 23. (in Chinese with English abstract)]
- [24] LÖFMAN J. Site scale groundwater flow in Olkiluoto[R]. Helsinki: Posiva Oy, 1999.
- [25] KATILAKOSKI E, KOSKINEN L. Regional-to-site scale groundwater flow in Romuvaara[R]. Helsinki: Posiva Oy, 1999.
- [26] LÖFMAN J. Site scale groundwater flow in Olkiluoto-Complementary simulations[R]. Helsinki: Posiva Oy, 2000.
- [27] POSIVA O Y. Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto-performance assessment[R]. Eurajoki: Posiva Oy, 2012.
- [28] NIEMI A, KOUTIO K, VAITTINEN T, et al. Estimation of block conductivities from hydrologically calibrated fracture networks - description of methodology and application to Romuvaara investigation area[R]. Helsinki: Posiva Oy, 1999.
- [29] LANYON G W, MARSCHALL P. Discrete fracture network modelling of a KBS-3H repository at Olkiluoto[R]. Olkiluoto: Posiva Oy, 2006.
- [30] POSIVA OY. Olkiluoto site description 2011[R]. Eurajoki: Posiva Oy, 2012.
- [31] PULKKANEN V-M, NORDMAN H. Effects of bedrock fractures on radionuclide transport near a vertical deposition hole for spent nuclear fuel[R]. Eurajoki: Posiva Oy, 2011.
- [32] POSIVA O Y. Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto - assessment of radionuclide release scenarios for the repository system 2012[R]. Eurajoki: Posiva Oy, 2012.
- [33] POTERI A, LAITINEN M. Site-to-canister scale flow and transport in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara[R]. Helsinki: Posiva Oy, 1999.
- [34] 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.
- [35] OPHORI D U. A simulation of large-scale groundwater flow and travel time in a fractured rock environment for waste disposal purposes[J]. *Hydrological Processes*, 2004, 18(9): 1579 – 1593.
- [36] 王驹, 徐国庆. 中国高放废物深地质处置研究[J]. *水文地质工程地质*, 1998, 25(5): 7 – 10. [WANG Ju, XU Guoqing. Study on deep geological disposal of high-level radioactive waste in China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1998, 25(5): 7 – 10. (in Chinese)]
- [37] 苏锐. 低渗透裂隙介质渗透特征评价技术及其应用研究[D]. 北京: 核工业北京地质研究院, 2007. [SU Rui. Studies of hydraulic characterization of low-permeable fractured medium and its application[D]. Beijing: Beijing Institute of Geology for Nuclear Industry, 2007. (in Chinese with English abstract)]
- [38] 董艳辉, 李国敏. 甘肃北山区地下水随机模拟研究[C]//废物地下处置学术研讨会. 第三届废物地下处置学术研讨会论文集. 北京: 中国岩石力学与工程学会, 2010: 53-58. [DONG Yanhui, LI Guomin. Stochastic simulation of regional groundwater flow in Beishan area[C]//Proceedings of the third symposium on underground waste disposal. Beijing: Chinese Society for Rock Mechanics & Engineering, 2010: 53-58. (in Chinese with English abstract)]
- [39] 王礼恒. 甘肃北山区-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)]
- [40] 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)]
- [41] 尹文杰, 胡立堂, 王景瑞. 基于GRACE重力卫星的甘

- 肃北山地区地下水储量变化规律研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(4): 29 – 34. [YIN Wenjie, HU Litang, WANG Jingrui. Changes of groundwater storage variation based on GRACE data at the Beishan area, Gansu Province[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(4): 29 – 34. (in Chinese with English abstract)]
- [42] CAO X, HU L, WANG J, et al. Radionuclide transport model for risk evaluation of high-level radioactive waste in Northwestern China[J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2017, 23(8): 2017 – 2032.
- [43] 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)]
- [44] 肖丰, 王驹, 郭永海, 等. 中国高放废物处置库甘肃北山预选区水文地质研究进展[J]. *铀矿地质*, 2011, 27(3): 185 – 192. [XIAO Feng, WANG Ju, GUO Yonghai, et al. Progress of hydrogeological studies in Beishan preselected area of disposal repository for high level radioactive waste in China[J]. *Uranium Geology*, 2011, 27(3): 185 – 192. (in Chinese with English abstract)]
- [45] 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]//废物地下处置学术研讨会. 第二届废物地下处置学术研讨会论文集. 北京: 中国岩石力学与工程学会, 2008: 327 – 336. [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]//Symposium on underground waste disposal. proceedings of the second conference on underground waste disposal. Beijing: Chinese Society for Rock Mechanics & Engineering, 2008: 327 – 336. (in Chinese with English abstract)]
- [46] 吴晓东. 高放废物在地质处置中核素迁移数值模拟研究[D]. 抚州: 东华理工大学, 2012. [WU Xiaodong. Nuclide transport numerical simulation of high level radioactive waste geological disposal[D]. Fuzhou: East China Institute of Technology, 2012. (in Chinese with English abstract)]
- [47] 凌辉, 王驹, 陈伟明. 花岗岩天然屏障对放射性核素的阻滞性能模拟研究[J]. 中国科技论文, 2017, 12(21): 2507 – 2511. [LING Hui, WANG Ju, CHEN Weiming. Simulation study on retardation of nuclides by granite geological barriers[J]. *China Sciencepaper*, 2017, 12(21): 2507 – 2511.]
- [48] 凌辉, 王驹, 陈伟明. 高放废物地质处置算井子候选场址核素迁移模拟研究[J]. *铀矿地质*, 2018, 34(2): 118 – 123. [LING Hui, WANG Ju, CHEN Weiming. Preliminary evaluation of radioactive effect of candidate sites in Suanjingzi sub-area for geological disposal of high-level radioactive waste[J]. *Uranium Geology*, 2018, 34(2): 118 – 123.]
- [49] 彭志娟. 高放废物处置库EDZ中核素 ^{129}I 、 ^{135}Cs 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)]
- [50] 李楚. 镅在北山预选处置场研究区的赋存形态及迁移行为探究[D]. 抚州: 东华理工大学, 2019. [LI Chu. Study on the occurrence and migration behavior of Am in the research area of Beishan pre-selected disposal site[D]. Fuzhou: East China Institute of Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张若琳