

**CNIC-01676**  
**BRIUG-0060**

高放废物处置库甘肃北山预选区  
水文地质特征方法学研究

**STUDY ON THE METHODOLOGY OF  
HYDROGEOLOGICAL CHARACTER IN  
PRESELECTED SITE FOR HIGH-LEVEL WASTE  
REPOSITORY IN BEISHAN AREA, GANSU PROVINCE**  
*(In Chinese)*

中国核情报中心  
China Nuclear Information Centre

CNIC-01676  
BRIUG-0060

# 高放废物处置库甘肃北山预选区 水文地质特征方法学研究

郭永海 刘淑芬 苏锐 杨天笑  
(核工业北京地质研究院, 100029)

## 摘 要

总结了 1996 年至 2000 年开展的甘肃北山地区区域水文地质调查研究成果。研究中从北山地区水文地质、水文地球化学、地下水同位素、腐殖酸调查入手,重点评价了研究区的含水介质特征、水文地球化学及地下水同位素特征。在大量资料综合分析的基础上,综合论述了研究区分区水文地质条件、地下水循环交替特征、地下水动力学和化学特征,并通过地下水流动状态的计算机模拟,水文地球化学以及水-岩-核废物间相互作用的计算机模拟,首次综合评价了北山地区作为我国高放废物处置库场址的可行性。研究成果全面、深刻展示了北山地区弱含水、低渗透、低流速的水文地质特征及偏碱性、高矿化的地下水化学特征,为在该区预选最适宜的高放废物处置库场址提供了评价依据。

关键词: 废物处置 水文地质 计算机模拟  
分类号: P641.12; TL942.211

**Study on the Methodology of Hydrogeological Character  
in Preselected Site for High-level Waste Repository  
in Beishan Area, Gansu Province**  
*(In Chinese)*

GUO Yonghai LIU Shufen SU Rui YANG Tianxiao  
(Beijing Research Institute of Uranium Geology, CNNC)

**ABSTRACT**

The results of regional hydrogeological investigations conducted during 1996—2000 were summarized. The study was started with the surface hydrogeological, hydrogeochemical, and groundwater isotopic and humic acid investigations. The key-points are focused on the characteristics of water-bearing formation, hydrogeochemistry, groundwater isotopes as well as humic acid. On the bases of a large quantity of hydrogeological data, the hydrogeological conditions of each groundwater unit, groundwater circulation characteristics, groundwater hydrodynamics and hydrogeochemistry are described. In addition, the modeling about groundwater flow state, groundwater chemical balance, interaction among water-rock-nuclear waste is carried out, then the suitability of the Beishan site for the high-level radioactive waste disposal is evaluated. The report comprehensively and deeply shows the hydrogeological characteristics of weak water bearing, low permeability and slow moving as well as the hydrogeochemical features of mild alkalinity and high mineralization in Beishan area. The results will provide an important basis for the evaluation of the site.

**Key words:** Waste disposal, Hydrogeology, Hydrogeochemical modeling

**Category:** P641.12; TL942.211

## 引言

高放废物主要来自化工后处理厂的核废物以及核电站的乏燃料。高放废物是一种特殊的污染物，如果处置不当，将严重危及人类的生命和健康，制约核能事业的发展，所以高放废物的处置已受到有核国家的高度重视。世界各国对高放废物处置曾提出多种方案，如太空处置，海洋处置，海岛处置，冰层处置及地质处置等等。多年来，通过各种方案的分析对比，许多发达国家最终对地质处置的安全性和现实性达成共识，并在地质处置研究中做了大量的工作。

地质处置的目的是采用一整套设施将高放废物圈闭起来，以防止或减缓放射性物质向生物圈迁移。一般选择地壳稳定性好、含水性差、远离人类活动区的地区作为处置场址，由地表打竖井至深部（一般在地表 500 m 以下），而后由竖井底部开凿水平坑道，再在水平坑道中打竖井或支坑道，作为废物的存放场所，地下处置库便是由这些坑道、竖井构成的工程设施。

高放废物地质处置一般采用“多屏障系统”的设计。即设置一系列天然和人工屏障于废物本身和生物圈之间，以增强处置的可靠性和安全性。这些屏障包括：废物包装（废物、固化材料、废物罐和可能的外包装）；工程屏障（处置库工程建筑物和回填材料）；天然屏障（主要指地质介质本身）。

在这样的体系中，地质介质起着双重作用。既保护源项，也保护生物圈。具体地说，它保护人工屏障不使人类闯入，免受风化作用；在相当长的地质时期内工程屏障提供稳定的物理和化学环境；通过一系列物理化学作用，如吸附作用、生物作用、稀释作用等，限制放射性核素向生物圈迁移。

处置库选址是高放废物地质处置的前提和关键所在。许多发达国家早在 30 年前就已经着手这项研究，但到目前为止，还没有任何一个国家已经真正确定了高放废物地质处置库的场址。我国高放废物地质处置研究起步于 20 世纪 80 年代中期，但从起步到 90 年代中期，由于国家投资少，进展缓慢，处于研究的探索阶段。随着我国核电事业的迅速发展，高放废物积累的增加，政府对高放废物地质处置的重视程度和投资力度也不断增大，使近几年我国在该领域的研究不断拓宽和深化，与发达国家的差距在不断缩小。

根据国际原子能机构对高放废物地质处置库场址预选的要求（1994 安全指南 111-G-4.1），水文地质调查被列为处置库选址中一项极为重要的内容，因为核素最终是通过地下水的“载体”作用返回人类的生存环境。影响核素迁移的水文地质因素主要有两个方面，其一是地下水的流动状态，包括地下水的流向、循环深度及流速，它在核素的迁移途径、返回人类生存环境的具体位置和速率上起着决定性作用；其二是地下水的化学特征，它决定了核素与地质介质和地下水之间相互作用的方式和程度，因此也在很大程度上决定了核素的迁移速率。由此可见，在处置库选址过程中，必须彻底查清影响和控制核素迁移的地下水的动力学和化学特征，评价核素随地下水的迁移途径以及返回到人类生存环境所需时间，从而防止核素向环境发生不可接受的释放。

高放废物靠其自身衰变达到无害化至少需要上万年的时间，因此处置库的安全期也要求在万年以上。选址中的水文地质工作要解决的是低流速，弱渗透条件下的定量研究问题；

要考虑的是地下水系统长达万年以上时间跨度的行为和过程；以确保核素在万年内不含以高出人类可接受剂量的水平进入生态环境。因此研究工作的难度极大，其中的许多研究内容都是世界性难题，有待攻克。本项目正是在国内急需，同时考虑到处置库选址研究周期长，难度大的前提下提出并开展的。

## 1 研究区水文地质概况

### 1.1 自然地理概况

研究区位于甘肃省河西走廊以北，南距玉门镇 60 km，行政区划属于甘肃省肃北蒙古自治县。地理坐标为北纬  $40^{\circ} 44' \sim 41^{\circ} 53'$ ；东经  $97^{\circ} 00' \sim 97^{\circ} 42'$ ，面积约 2000  $\text{km}^2$ 。

区内海拔标高 1600~1800 m，地形相对平缓，地表呈现典型的岩漠戈壁景观，植被稀少，基岩裸露。研究区为我国典型的干旱气候区，具降雨稀少，蒸发量大、干冷多风的特点，年平均降水量 60~80 mm，降水量的 60% 以上集中在 6~8 月份；年平均蒸发量 3200 mm，年平均气温 4~7  $^{\circ}\text{C}$ ，年平均风速达 4 m/s。具有建造高放废物处置库得天独厚的自然地理条件。

### 1.2 地下水的形成与分区

地下水的形成不仅需要一定的补给条件，也必须具备相应的储水空间，两种条件的优劣，决定着富水性的强弱。北山地区地下水的主要补给来源为当地的大气降水。虽然年降雨量仅为 60~80 mm，但降水相对集中，这对于干旱地区地下水补给是十分有利的。北山地区地形相对平缓，相对高差也较小，所以降水在地表的停留时间较长，也有利于对地下水的入渗补给。此外，该区岩体和地层广泛发育节理、裂隙和断裂，且浅地表部多分布强风化裂隙带，使之成为水储存、滞留而形成地下水的空间。但由于区内地貌及地质构造条件的不同，导致各地区补给条件和储水条件的差异。因此，地下水所表现出的富水性及循环交替特征也不尽相同。在研究中，课题组按地下水分布的地形、地貌、岩性结构及地质构造条件，将区内地下水主要划分为三种类型：山地基岩裂隙水；沟谷洼地孔隙-裂隙水；盆地孔隙-裂隙水（见图 1）。

### 1.3 山地基岩裂隙水

山地基岩裂隙水是区内最主要的地下水类型，以潜水为主，地下水的埋藏深度受地形起伏的影响，地势低洼区水位埋深一般小于 5 m，地势较高处一般较大，多在 10~30 m 之间。含水层空间主要是基岩风化裂隙和构造裂隙，因此又可划分为风化裂隙水和构造裂隙水两种类型。风化裂隙水分布广泛，其主要补给来源是大气降水，降雨沿岩石节理、裂隙垂直入渗，但补给量有限，只有一次降雨量达到一定规模时（大于 10 mm）才能对地下水构成补给，因此这种类型的地下水水量一般不大，单井涌水量多小于  $10 \text{ m}^3/\text{d}$ ，但富水性明显受地貌、岩性及地质构造条件的控制，富水程度差异性很大，一般地说，沟谷洼地及断裂带附近含水层厚度大，单井涌水量有时可达  $1000 \text{ m}^3/\text{d}$  以上。在相同的地貌及构造条件下，因含水介质岩性不同，其富水性也有明显差异。据水文地质普查资料，岩浆岩单井涌水量  $0.01 \sim 1.6 \text{ L/s} \cdot \text{m}$ ，变质岩和沉积岩单井涌水量一般小于  $0.01 \text{ L/s} \cdot \text{m}$ ，也就是说，岩浆岩风化裂隙水量一般大于变质岩和沉积岩风化裂隙水量。

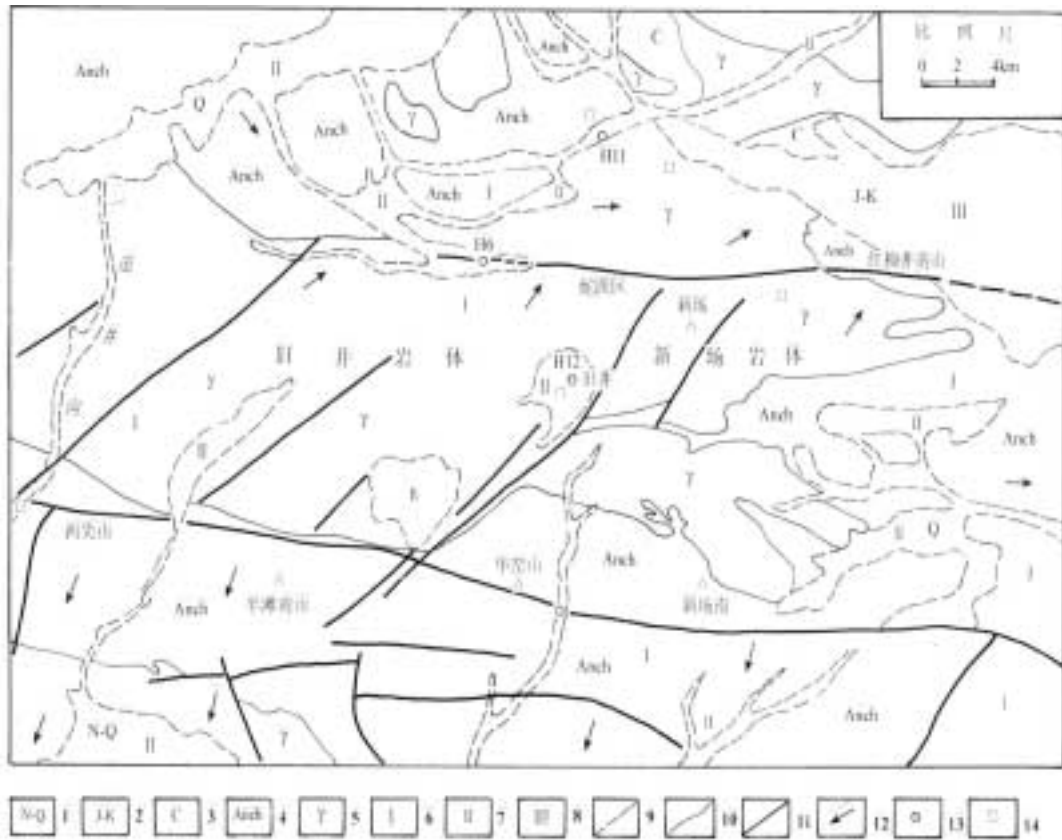


图1 甘肃北山预选区水文地质分区图

- 1——第三系和第四系；2——侏罗系；3——石炭系；4——前长城系；5——花岗岩；  
 6——山地基岩裂隙水区；7——沟谷洼地孔隙—裂隙水区；8, 9——水文地质分区线；  
 10——岩性分界线；11——断裂；12——地下水流向；13——钻孔；14——民井。

构造裂隙水主要分布于构造破碎带及其两侧的构造裂隙中，其来源主要是两侧风化裂隙潜水的侧向补给及暂时性地表径流和积水的入渗补给，富水性除受断裂性质及规模控制外，更主要的受岩性及所处的地貌位置影响，一般地说，硬脆性岩石中的断裂通过沟谷和地表积水洼地地段，往往可以形成水量十分可观的构造裂隙水，其富水性强，如研究区的H<sub>6</sub>，H<sub>11</sub>孔分别揭露了通过沟谷和洼地的北东向和东西向断裂，断裂带切割的岩性为花岗岩，其单井涌水量都在100 m<sup>3</sup>/d以上，而H<sub>13</sub>，H<sub>17</sub>孔同样揭露了东西向和北东向断裂，不同的是断裂切割的岩性为变质岩，单井涌水量仅为1~5 m<sup>3</sup>/d。在对地下水露头进行调查中，发现区内地下水属于山地基岩裂隙水的浅井很少，因为区内浅井多为牧民所挖，而在基岩裂隙带开挖浅井是非常困难的。能够代表这种类型地下水的露头在研究区只有两处，其一是位于北部的金矿井，它实际上是一个1998年废弃的金矿矿坑，深13 m，地下水埋深12 m，位于花岗岩与变质岩接触带上；其二是金庙沟金矿井，它是一处正在开采的金矿，矿坑深度约60 m，开矿时水位埋深约10 m，矿坑位于变质岩中。

山地基岩裂隙水的径流条件,受地形、岩性及地质构造条件的制约,地形切割强烈,沟谷深切的岩浆岩地区,地下水多以水平方向的径流为主,且径流的强度较大,易形成以低矿化为主要特征的地下水。在地形起伏不大的变质岩区,地下水径流不畅,易形成高矿化地下水。甘肃北山预选区北部,岩浆岩广泛分布,构造裂隙发育,地形起伏相对较大,因此,地下水径流较畅通。但研究区南部,变质岩分布广泛,其适水性较差,使得向南流动的地下水受阻,形成高矿化地下水。此外,研究区东北沟、蛇跃区、红柳井一带地形切割微弱,地下多汇集于封闭的沟谷或洼地,地下水流运动极其缓慢,以垂直交替为主,因此,地下水矿度较高,可达6~9 g/L。

山地基岩裂隙水的主要排泄方式以就地蒸发为主,其次是以径流的方式向规模较大的构造裂隙含水带、山间洼地和沟谷地下水排泄,最终补给深层地下水并以区域径流的方式流向区域排泄点。

#### 1.4 沟谷洼地孔隙-裂隙水

预选区沟谷洼地十分发育,沟谷洼地的主要特点是上部分布有厚度不等(一般小于10 m)的第四系砂砾石冲积层,其中含有水量较为丰富的孔隙潜水,涌水量在100 m<sup>3</sup>/d内。第四系砂砾石冲积层下部是基岩风化壳或构造破碎带,含有丰富的基岩裂隙水,例如, h<sub>11</sub>孔位于花岗闪长岩构造破碎带上,而该破碎带恰好通过一条可汇集洪水的沟谷,由于能得到沟谷洪水的入渗补给,其富水性很强,根据甘肃省第三水文地质队资料, h<sub>11</sub>孔当水位降深7.43 m时,涌水量达1054 m<sup>3</sup>/d。又如 H<sub>6</sub>孔所处的断裂带隐伏于一积水洼地之下,水量也极为丰富,水位降深6.86 m时,涌水量达985 m<sup>3</sup>/d。一般情况下,沟谷洼地孔隙水与其下部的基岩裂隙水具有直接的水力联系,或构成一个统一的含水体,因此也具有相同的潜水位,水位埋深一般小于10 m。这种类型的地下水,其富水程度主要受沟谷洼地规模、第四系砂砾层厚度的影响,一般说来,汇水面积越大,含水层厚度越大,则地下水就越丰富。沟谷洼地孔隙-裂隙潜水的主要来源是暂时性地表积水或洪水的入渗。沟谷潜水主要通过蒸发进行排泄,其次是沿沟谷方向以潜流的方式向下游排泄,在基底岩石隆起处地下水受阻而常以泉水形式出露地表;洼地潜水则主要以蒸发的方式进行排泄,其次是补给深部基岩裂隙水。

在研究区内,地下水属于沟谷洼地孔隙-裂隙水的浅井较多,能够代表这种类型地下水的露头除浅井外,还有一定数量的泉。有代表性的浅井包括梧桐井、旧井、二道井、枯水井、月亮湾井、咸水井、蒙古井等,它们的共同特点是位于沟谷洼地的第四系沉积物中,井深一般小于7 m,水位埋深较小,一般为2~4 m,出水量多小于10 m<sup>3</sup>/d;有代表性的泉是二道井泉、前红泉,它们均为下降泉,出露在沟谷出口地形低洼处,由于地下水流受阻而溢出地表,在泉的周围,地表盐渍化明显,表现出地下水溢出带的明显特征。

#### 1.5 盆地孔隙-裂隙水

这种类型的地下水主要分布于预选区北部、东北部的山间盆地以及南部河西走廊北侧的断陷盆地中。这些盆地均为中、新生界盆地,广泛分布侏罗系、第三系和第四系地层,地下水多呈层状分布,上部多为潜水,水位埋深一般在10 m左右,主要来源是当地降水及暂时性地表水的入渗补给;下部多为基岩裂隙承压水,水位可高出地表,其主要来源是上

游地下水的侧向补给。盆地类型地下水水量变化较大,单井最大涌水量可小于 $10\text{ m}^3/\text{d}$ ,也可大于 $1000\text{ m}^3/\text{d}$ 。水量大小取决于盆地规模、含水体岩性及构造发育情况等。

### 1.6 断裂构造的水文地质意义

在基岩地区,构造带的水文地质意义是非常显著的,它本身既可构成较大的含水空间,又可构成不同含水体水力联系的通道,从而形成基岩地区特有的地下水网络系统。因此对断裂构造的水文地质特征进行深入研究是基岩地区水文地质工作必不可少的内容。但由于水文地质钻探工作还没有正式启动,对断裂构造的水文地质特征还了解甚少,只是根据前人的研究成果及几年来我们所开展的地质工作,对此略作阐述。区内东西向构造带是在南北方向挤压应力作用下形成的,结构面力学性质属压性及扭性,断裂本身不具导水性能和储水性,但断裂两侧的破碎带既含水又导水,控制着区域地下水的补给、迳流和排泄;北东向断裂其空间展布特点及构造变形特征显示,它们应该是东西向断裂在印支期重新活动而形成的次级断裂。断裂规模小,对山间洼地和沟谷地下水的迳流、补给和排泄有一定的控制作用,但断裂本身含水量可能较小。十月井是挖在北东向断裂上的浅井,该断裂含有断层泥,井水位埋深近 $2\text{ m}$ ,水深约 $0.5\text{ m}$ ,一次将水抽干后,水位在 $10$ 天后尚未恢复到原来高度,足见其含水量十分有限。

### 1.7 区域地下水的循环交替

研究区地下水主要来自区内的大气降水入渗补给,但由于区内年平均降雨量仅在 $60\sim 80\text{ mm}$ 之间,因此,地下水所能获得的降水入渗补给量是很小的,所以从总体上看,北山地区是地下水极其贫乏的地区。北山地区地下水的另一个特点是水量分布极不均匀,这实际上是基岩地区地下水的共性,因为含水介质-裂隙本身是不均匀的。该区沟谷、洼地是相对封闭的,如旧井、板滩洼地,其地下水的主要排泄方式是地面蒸发,但蒸发排泄量也是不均匀的,这主要取决于地下水的埋深。在浅埋区,地下水蒸发排泄量较大,深埋区,蒸发强度较小,因此,地下水的矿化度值较高。地下水的另一个排泄途径是以地下水平径流的方式流向周围构造破碎带及沟谷洼地潜水,并对其构成侧向补给,使水量相对富集。以这种方式排泄的地下水水量极为有限,但这种排泄方式和途径都是我们最为关注的,因为它可能构成高放废物处置库运行条件下核素迁移的主要媒介。

综上所述,研究区地下水主要接受大气降水的垂直入渗补给,富集于沟谷洼地及断裂破碎带中的地下水,部分消耗于蒸发,部分通过沟谷或构造破碎带向下游径流排泄,最终流向盆地或区域排泄点,构成完整的地下水循环交替系统。

### 1.8 区域地下水动力特征

总观全区,地势西高、北低、南低,但相对高差不大,在 $200\text{ m}$ 以内,区内东部有新场山隆起,南部有西尖山—半滩南山—华窑山—一线变质岩构成的东西向山脊,因此地下水流场的变化应该还是比较复杂的。区域流场:北部地下水向北东方向流动,最终汇集于红柳泉盆地;南部地下水虽受东西向变质岩体的阻隔,但地下仍将沿大的构造破碎带由北向南流动;在研究区西部地下水主要是自西北向东南流动;东部新场山以东,地下水主要为自西向东流动。但在局部地区如旧井洼地,板滩洼地,地下水自周边向洼地中心流动。以上便是区内地下水流场的总体格局。由于区内,特别是中部及南部地下水露头点很小,还很难勾画出真实的地下水流场形态。



## 2 地下水流动状态的计算机模拟

### 2.1 水文地质模型

在水流模拟研究中,根据目前所掌握的资料情况,选择剖面二维有限差分模型为模拟模型,以旧井岩体地下水为主要研究对象。根据区域地形、地貌及部分地下水位资料分析,岩体北部地下水总体向北东方向的红柳泉盆地流动。岩体南部地下水总体为自北向南流动,最终汇集于河西走廊地下水盆地;走廊地区是经济较为发展、人口也比较集中的地区,处置库场地的确定,应该说在很大程度上取决于对该区构成的潜在威胁,因此,本次工作对流向走廊地区的地下水进行了重点研究。沿水流方向,取旧井岩体中部至疏勒河的整个区间为研究剖面,建立剖面地下水二维流数学模型。

剖面的北部处于地下水分水岭位置,可视为隔水边界;南端处于地下水补给地表水的水流上升区;亦可视为阻水边界;在研究的深度内,裂隙的发育程度随深度降低,据前人资料,500 m处岩石多较完整,因此下边界亦为隔水边界;研究区上部裂隙发育,接受大气降水补给,故视上边界为开启边界。区内地下水尚未开采,水位多年呈均衡状态,地下水流动可视为稳定流,并符合达西定律。

### 2.2 数学模型及其求解

对以上剖面二维流数学模型,采用矩形剖分的结点中心差分方法求解。根据未来高放废物处置库的可能深度,取剖面模拟深度为500 m,剖面总长度为42 km,按矩形网格剖分成 $40 \times 40$ 个网格单元,模型内部参数,包括渗透系数 $K$ 值和孔隙度 $n$ ,分别按网格输入。需要说明的是,地下水在运动过程中将优先选择宽大的裂隙通道流动,因此,未来核素的迁移也无疑主要在宽大裂隙通道中进行,所以我们在输入参数时,主要考虑裂隙情况,而忽略基岩的情况。这样所获得的结果,实际上将代表地下水的最大流速特征,而这一特征正是处置库安全评价最直接、最有用的信息。根据甘肃省第三水文地质队资料,并参照瑞典等国家处置库场址研究中深部花岗岩裂隙的水文地质参数,取水平渗透系数为 $4 \sim 0.0002$  m/d,垂向渗透系数为 $8 \sim 0.0003$  m/d,有效孔隙度为 $0.12 \sim 0.008$ 。对每个网格都赋予一定的参数值,上边界输入水头值,采用 Engelen 等人编制的水文地质模拟软件 FLOWNENT 求解模型。

### 2.3 模拟结果分析

模拟结果表明,从旧井岩体至疏勒河,地下水在剖面上可以划分为两种明显不同的径流系统,即上部的局部水流系统和深部的区域水流系统。局部水流系统地下水的循环深度一般小于50 m,地下水流动距离较短,主要受局部地形的控制,在局部水流系统中,地下水的实际流速较大,可以达到50 m/a以上。局部水流系统地下水基本属于降水入渗补给—短距离快速流动—蒸发排泄的循环交替类型。一般地说,处置库应建在地下几百米的深度上,因此,局部水流系统中的地下水对未来的处置库不可能构成很大威胁。而区域水流系统地下水的循环深度较大,实际上不可能仅限于400 m范围内,在区域地形引起的水位差作用下,在补给区,即旧井岩体中部地区,地下水主要作垂向的下移运动,补给深部地下水,在排泄区呈上升运动,补给浅部地下水,最终消耗于蒸发或排向地表水体。在中部较大的范围内,地下水几乎呈水平式的流动,但与局部水流系统相比,剖面上的流线明显变

得稀疏,说明地下水径流强度显著变弱,流动速度大幅度减小。据计算结果,在400 m深度上,地下水的实际流速一般小于2 m/a。按照这样的流速,一旦废物组分进入地下水后,起码要经过约2万年的时间才能到达走廊地区。这就是说,旧井岩体作为高放废物处置库的场址,从地下水流动角度看是很有利的。

但是,以上的模拟计算,从宏观等效的角度假定含水介质在一定范围内是均质的,而实际情况并非如此,地下水是在极不均匀的裂隙介质中运动,它必然优先选择宽大的裂隙空间作为流动的主要通道,因此,地下水的实际流动速度是极不均匀的,而模拟结果只能反映一种平均的情况。另外,模拟中所采用的水文地质参数也还缺乏试验的基础,是很粗略的,很可能与实际情况相差甚远。因此,这一模拟结果还远远不能作为结论的依据,但不管怎样,这一模拟结果却可以从宏观上告诉我们,在今后的研究中,应该把重点放在区域水流系统上,只有抓住这一关键,才能获得科学的依据。此外,通过以上模拟计算,也可以看出,对于预选区弱渗透和低流速的水文地质问题,地下水流动系统的理论和方法,确是研究水流状态的一种有效途径。随着工作的深入,资料的不断充实和完善,就可以用这种模拟方法获得地下水流动更可靠的信息。

### 3 地下水化学特征及其水文地球化学模拟研究

#### 3.1 地下水化学研究的意义

地下水是核素在地下迁移的主要载体,但核素怎样随地下水迁移,不仅取决于地下水的流动状态,也受地下水的化学特征的影响和控制。因为核素在迁移的过程中,与地下水、岩石间将不断地发生化学作用,如吸附、溶解、沉淀等。发生在核素、地下水、岩石间物理、化学反应,一般说来能够起到阻滞或减缓核素迁移速率的作用。而化学反应类型以及对核素迁移影响程度,则取决于地下水的化学性质。因此,在高放废物场址预选和安全性评价中,地下水化学研究是一个重要的方面。

#### 3.2 地下水化学特征及时空变化

据前人资料及野外取样分析,甘肃北山预选区,地下水pH值为7.1~8.8,平均值7.8;水温8~14℃;地下水总溶解固体(TDS)变化范围较大,在0.3~12.3 g/L之间,平均值2.4 g/L,属微咸水,在垂直方向上有明显的分带性。一般规律是:深层承压水比浅部潜水矿化度低;潜水层下部比上部矿化度低。水化学类型较复杂。

区内地下水阳离子以 $\text{Na}^+$ 为主,占水中阳离子毫克当量总数的60%~80%,其次为 $\text{Ca}^{2+}$ ;阴离子以 $\text{Cl}^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 为主, $\text{Cl}^-$ 占水中阴离子毫克当量总数的30%~60%,最高可达90%, $\text{SO}_4^{2-}$ 一般占20%~50%,因此,地下水的主要化学相为 $\text{Cl}^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Na}^+$ 和 $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Cl}^- \cdot \text{Na}^+$ ,其次为 $\text{Cl}^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+}$ 。

对地下水中主要成分含量之间相互关系研究表明,地下水 $\text{Cl}^-$ 与 $\text{Na}^+$ 之间, $\text{SO}_4^{2-}$ 与 $\text{Ca}^{2+}$ 之间具有明显的线性关系,即随着 $\text{Cl}^-$ , $\text{SO}_4^{2-}$ 的增加, $\text{Na}^+$ , $\text{Ca}^{2+}$ 也明显增加;而 $\text{Na}^+$ 与 $\text{Ca}^{2+}$ 之间, $\text{Na}^+$ 与 $\text{Mg}^{2+}$ 之间, $\text{SO}_4^{2-}$ 与 $\text{Mg}^{2+}$ 之间, $\text{HCO}_3^-$ 与 $\text{Ca}^{2+}$ 之间, $\text{HCO}_3^-$ 与 $\text{Mg}^{2+}$ 之间的关系却不十分明显;地下水TDS与 $\text{Na}^+$ , $\text{Cl}^-$ , $\text{SO}_4^{2-}$ 之间的线性关系十分明显,而地下水TDS与 $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{HCO}_3^-$ 离子之间的关系又不明显,这种特征说明,地下水对钙、镁碳酸盐矿物已达到过饱和状态,随着矿化度的升高,地下水中的 $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ 与 $\text{HCO}_3^-$ 形成沉淀,

从水中析出，因此，矿化度的升高，并不能导致这几种组分含量的升高；相反，地下水对与  $\text{Na}^+$ ， $\text{Cl}^-$ ， $\text{SO}_4^{2-}$  有关的矿物尚未达到饱和，因此，随着矿化度的升高，这几种组分含量也升高。

此外，根据北山地区 300 余个地下水样分析资料统计，TDS 大于 1 g/L 的样品占 93%。沿水流方向，地下水 TDS 有逐渐升高的变化趋势，其时空变化特点是在上游地区，TDS 一般小于 3 g/L；在下游地区，TDS 一般大于 8 g/L，最大可达 80 g/L。这充分说明，溶滤-蒸发浓缩作用是区内地下水化学形成的基本模式。溶滤作用主要发生在地形较高的地下水补给区，蒸发浓缩作用主要发生在地形较低的地下水排泄区。据统计资料，潜水蒸发浓缩带可深达 50 m 左右。

### 3.3 地下水与固相间反应趋势的水文地球化学模拟

#### 3.3.1 地下水化学平衡反应模型

地下水是一种复杂的溶液，其组分以多种形式存在。但由于测试技术、手段的限制，目前一般只是测定水中元素的总量。其实，元素在水中既有离子态形式，也有分子态形式；既有简单离子存在，也有复杂络合离子存在。地下水溶解组分存在形式的确定，在地下水与矿物溶解平衡的研究中具有非常重要的意义。地球化学模拟技术为计算水中元素的存在形式提供了有力的手段。

但到目前为止，地下水中究竟有多少种络合物尚无定论，在研究中到底应考虑那些络合组分，一般应在结合具体研究目的的前提下，根据地下水化学特征而定。在本课题的研究中，根据水化学分析结果，K，Na，Ca，Mg，Fe，Al，Si，Cl，S，C，F 11 种元素为主要分析项目，这 11 种元素的主要阴离子配位体为  $\text{OH}^-$ ， $\text{Cl}^-$ ， $\text{SO}_4^{2-}$ ， $\text{HCO}_3^-$ ， $\text{F}^-$ ， $\text{SiO}_4^{4-}$ ，可以存在的络合物形式共 39 种。

在考虑上述 39 种络合物的前提下，研究区地下水系统水化学可以建立如下方程：

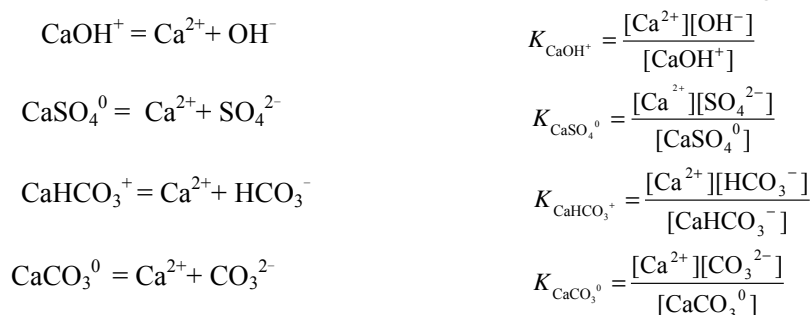
(1) 根据质量守恒原理，以 Ca，Mg 为例，可得质量守恒方程：

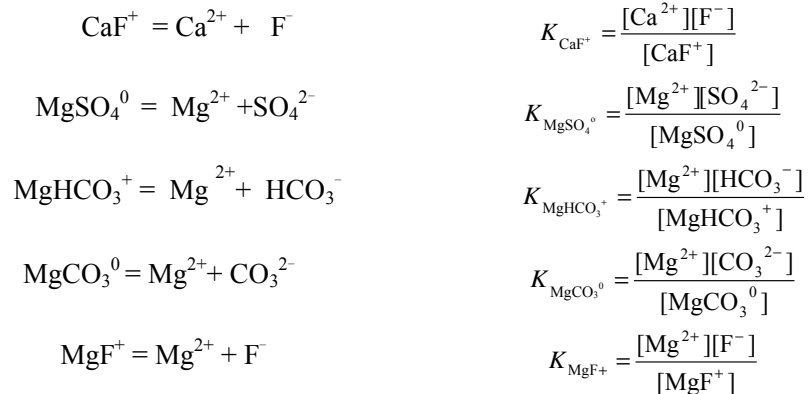
$$[\text{Ca}] (\text{总}) = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{CaOH}^+] + [\text{CaSO}_4^0] + [\text{CaHCO}_3^+] + [\text{CaCO}_3^0] + [\text{CaF}^+]$$

$$[\text{Mg}] (\text{总}) = [\text{Mg}^{2+}] + [\text{MgOH}^+] + [\text{MgSO}_4^0] + [\text{MgHCO}_3^0] + [\text{MgCO}_3^0] + [\text{MgF}^+]$$

同样地，可以列出其它 9 种元素的质量守恒方程，共 11 个方程，其中  $[\text{Ca}] (\text{总})$ ， $[\text{Mg}] (\text{总}) \dots$  的浓度由实验室分析结果得出。

(2) 根据质量作用定律，可以列出 39 种络合物的离解方程，以 Ca，Mg 络合物为例：





式中  $K$  是热力学平衡常数，有时也称离解常数，可以根据热力学数据求得，一般可通过查有关数据表得到。同样，可以列出其它 9 种元素络合物的离解方程，共计 39 个方程。

联立守恒方程和离解方程，共计 50 个方程和 50 个未知数（游离离子 + 络合物的个数），通过适当的数学处理和转换，可采用迭代法求解。本课题这一计算工作是采用美国地调所提供的 DB 软件完成的。

通过地下水组分存在形式计算结果的分析，可以看出， $\text{SO}_4^{2-}$ ， $\text{HCO}_3^-$  是两个重要的配合剂，它们与  $\text{Ca}^{2+}$ ， $\text{Mg}^{2+}$ ， $\text{Na}^+$  所形成的络合物在所有络合物中占绝对优势，并且随着水流路径的加长，水相络合作用的强度增大。

### 3.3.2 地下水与固相间反应趋势的研究

地下水与岩石、矿物所处的反应状态，在目前水文地球化学研究中仍以饱和指数（SI）作为衡量标准。饱和指数的计算公式是：

$$\text{SI} = \log \text{IAP}/K \quad (1)$$

式中：SI——饱和指数；

IAP——离子活度积；

$K$ ——特定温度下矿物的平衡常数（或活度积常数）。

根据地下水组分存在形式的计算结果，采用式（1），计算了地下水对区内主要矿物的饱和指数。结果说明，从补给区到排泄区，石膏、钙长石、盐岩和菱铁矿的饱和指数 SI 均小于 0，呈不饱和状态，以溶解趋势为主，而伊利石、高岭石、石英和针铁矿则基本呈饱和状态。对方解石和白云石，补给区地下水主要呈不饱和状态，排泄区地下水则主要呈过饱和状态。

### 3.4 水化学形成与演化的水-岩作用模拟

目前，在地质科学领域，水-岩作用的研究正在向模型化、量化的方向迅速发展。在水文地球化学研究中，质量平衡（mass balance）反应模型为定量、半定量研究水与矿物（包括有机物和气体）之间的地球化学作用，探讨地下水化学形成与演化提供了强有力的工具。在研究中，通过研究区地下水系统质量平衡反应模型的建立和求解，确定水-岩作用类型及质量交换，以期达到揭示研究区水化学形成机制，为处置库选址提供依据的目的。

### 3.4.1 水平地下水运动方向上的水-岩作用模拟

矿物相的确定：

根据前人研究成果及野外取样分析，石英、方解石、白云石、石膏、钠长石、高岭石、钠蒙脱石、黑云母是最常见的矿物，钙长石、菱铁矿、萤石、黄铁矿也存在于许多样品中，因此均作为模型的矿物相。

此外，地下水流经富含粘土矿物的地层时，易发生阳离子交替吸附作用，因此模型考虑 Ca-Na 及 Mg-Na 阳离子交换问题。考虑氯离子平衡问题，选取石盐作为模型的矿物相。

取补给区的二道井水样为初始地下水，取排泄区的花三井地下水为终点地下水进行模拟，以便揭示从补给区到排泄区地下水化学的形成和演化规律。水-岩作用模型的求解，是采用美国地调局（USGS）提供的 NETPATH 软件来完成的。经各种检验后确定的模型表示如下：

补给区水化学组分 +	-2.1264 方解石	+0.4121 钙长石	= 排泄区水化学组分
	-0.5671 白云石	-0.4736 伊利石	
	+0.8025 石膏	0.8630 菱铁矿	
	+0.2662 钠长石	-1.0574 Ca/Na 交换	
	+0.0485 萤石	-0.8600 黄铁矿	
	+0.8583 石盐		

注：正号表示溶解，负号表示沉淀。对Ca/Na交换而言，正号表示Na进入液相，Ca被固相吸附，反之则相反。

以上模拟结果表明，北山地区地下水化学从补给区到排泄区的形成和演化，主要受方解石、白云石、伊利石和黄铁矿沉淀，石膏、钠长石、石盐、钙长石、菱铁矿、萤石溶解，钙钠阳离子交换的控制。其中矿物的累积沉淀量为 4.0271 mmol/kg；累积溶解量为 3.2506 mmol/kg，前者明显大于后者。在地下水化学形成和演化过程中所发生的水-岩作用类型，与水与固相间反应趋势研究中所揭示的情况基本一致。

### 3.4.2 垂向地下水运动方向的水-岩作用模拟

到目前为止，我们已经采集到了北山地区许多地下水化学样品，但由于地下水露头多为浅井或泉，因此深部地下水化学样品寥寥无几，仅限于周边的排泄区。为了得到深部地下水化学的初步信息，以水-岩作用的方式对场地局部地区的深部地下水化学进行了模拟的尝试。所采用的模型软件是由美国劳伦斯伯克利国家实验室最新研制的 TOUGHREACT (Tianfu XU, 1999)。

TOUGHREACT 模型是在 TOUGH2 模型基础上开发的用于模拟地下水流体及热量传输以及化学反应的软件。它的功能强大，可以解决水相络合，氧化还原，气体溶解和逸出，阳离子交换、表面反应。热量交换等多种水文地质及水化学问题。也可以解决一般的矿物溶解-沉淀问题，它的依据是化学动力学及化学热力学。

依据 TOUGHREACT 以及研究区的具体条件，我们可以建立如下的概念模型：

根据我们在北山地区的工作，预选场址地区浅部地下水化学特征是很清楚的。同时我们也知道预选场址地区是地下水的补给区，因此地下水的运动主要是垂向的。在前边所阐

述的剖面水流模拟中，也说明在预选场址区地下水是垂向运动的。其循环深度可达 500 m 以下。由此，可以建立垂向一维饱和地下水化学模型。在模拟中，所选择的垂向柱体的高度为 525 m，将该柱体自上而下以 15 m 距划分成 35 个模拟单元，在该柱体的上部和底部分别输入流入量和流出量（根据降雨入渗系数确定） $7.234e^{-8} m^3/s$ 。依据地下水的化学成分及花岗岩的岩石类型，所选择的矿物相为石英、方英石、钾长石、钠长石、钙长石、高岭石、白云母、白云石、方解石、钠云母等，考虑到地下水中含有较高的氯离子，也选择了盐岩以平衡地下水化学成分、浅部地下水化学数据以二道井水样为例。入渗水化学成分参照该区降雨成分，其它参数连同以上资料一起输入模型。

模拟的过程直至平衡状态达到为止。从浅部至 525 m 深度上地下水化学成分的模拟结果可以看出，在阳离子中， $Ca^{2+}$ 和  $Na^+$ 随深度增加而迅速减少，同时  $Mg^{2+}$ 和  $K^+$ 几乎保持不变；在阴离子中， $HCO_3^-$ 随深度增加明显减少，而  $SO_4^{2-}$ 随深度增加而明显增高。此外， $SiO_2$ 和 pH 值也随深度趋于增加，总矿化度也略有增加。

模拟的矿物随深度变化显示，在浅部（40 m 以上）方解石溶解，但随深度增加而趋于沉淀。相反，白云石在浅部沉淀而随深度增加而溶解。石膏、盐岩、钠长石、钾长石、钙长石、方英石在整个剖面呈溶解状态，而粘土矿物，如高岭等石均呈沉淀状态。

上述模拟结果表明，随深度的增加，地下水化学相应碱性和还原性增强，同时总溶解固体增加，这意味着地下水的溶解能力降低，这点对核废物的处置是有利的。此处，沿垂直剖面，有次生粘土矿物的形成，粘土矿物可以有效地吸附核素，这对于高放废物处置更十分有利。

### 3.5 地下水与核废物间反应的模拟

模拟中仍取五一井地下水为计算水样，核废物以乏燃料代替，作为“特殊反应物”。利用引进的 EQ6 程序，进行了模拟计算。

表 1 五一井水样与乏燃料反应结束时水中某些元素计算含量

元素	mol/L	元素	mol/L
C	5.989E-04	Pb	9.999E-13
Ni	7.019E-10	Th	6.774E-15
Se	1.808E-12	U	1.353E-08
Tc	2.694E-11	Np	2.101E-11
Sn	1.072E-10	Pu	2.197E-13
I	6.021E-12	Am	5.693E-12
Cs	3.916E-11	Ra	1.000E-12

模拟时，从反应进度  $\zeta$  为 0 开始，将 100 g 乏燃料加入到 1000 ml 水样中，至乏燃料完全耗尽，反应进度  $\zeta$  为 1 结束，反应体系选定为封闭体系。

乏燃料与地下水反应过程中地下水中核素浓度变化模拟表明，反应进行到一定程度后地下水中 Si 和 Am 的浓度将会逐渐降低，其它元素的浓度则呈增高的趋势。表 1 是乏燃料与地下水反应后地下水中元素的最终含量，其结果可以作为将来研究地下水与回填材料或

与岩石反应的地下水所含核素的初始参考数据，也可作为核素向外扩散、迁移是近场核素的初始浓度。

表 2 给出了反应过程中次生矿物生成顺序。反应过程中，既有次生矿物的生成，同时也伴随某些次生矿物的溶解。

表 2 乏燃料与五一井水相互作用过程中固相矿物生成次序 (25 °C)

生成次序	矿物	生成次序	矿物
1	Hematite (赤铁矿)	10	Cassiterite (锡石)
2	Dolomite-ord (白云石)	11	Ni <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>
3	Quartz (石英)	12	Soddyite (硅铀矿)
4	Pyrolusite (软锰矿)	13	AmPO <sub>4</sub> (am)
5	Fluorapatite (氟磷灰石)	14	Diaspore (硬水铝石)
6	Thorianite (方钍石)	15	Trevorite (镍磁铁矿)
7	Nontronite-Ca (钙-绿脱石)	16	CaUO <sub>4</sub>
8	PuO <sub>2</sub>	17	UO <sub>3</sub> · 2H <sub>2</sub> O
9	Haiweeite (多硅钙铀矿)		

地下水中累积出现的次生矿物摩尔数与反应进度函数的关系表明，反应过程中核素次生矿物的生成情况，如铀的次生矿物在反应早期，主要以多硅钙铀矿形式沉淀，随着反应的进行，逐渐转为以硅铀矿形式沉淀，反应后期则主要以 CaUO<sub>4</sub> 形式沉淀，最后以 UO<sub>3</sub> · 2H<sub>2</sub>O 形式存在。

反应过程中次生矿物的生成和沉淀对阻止核素迁移具有重要意义。一方面含核素次生矿物的沉淀无疑可以降低地下水中核素的浓度，从而降低核素迁移的能力；另一方面次生矿物的沉淀可充填孔隙，降低地下水流速，同样可以限制核素的迁移。

通过预选区上述水文地球化学及其模拟研究，获得的总体认识是，区内地下水由于补给量小、蒸发作用强烈，使其含盐量普遍较高，因此其溶解能力变弱。地下水对大部分常见矿物，特别是某些粘土矿物均达到过饱和状态，导致地下水从补给区向排泄区水平运移以及由浅部向深部垂向运移过程中，均有粘土矿物的沉淀析出，这对充填裂隙、降低地下水流速以及增大核素的吸附是非常重要的。

本项研究采用的模拟方法，包括地下水与固相间反应趋势的水文地球化学模拟、水平地下水流中的水-岩作用模拟、垂向地下水运动中的水-岩作用模拟以及地下水与核废物间的反应模拟，均为水文地球化研究的前缘领域。所采用软件如 TOUGHREACT 和 EQ3/6，是美国国家实验室近年来才开发成功的用于高放废物处置库研究中水文地球化学模拟的程序，是当今众多水文地球化学模拟软件中的佼佼者。从模拟结果可以看出，它们的功能是强大的，理论基础是坚实的，所获得的模拟成果能够反应研究区地下水化学形成及演化的全貌及水与固相（岩石、废物）间相互作用的详细过程，提供处置库场地评价的重要依据。实践证明，这种研究方法在预选区的应用卓有成效，随着区内地下水化学资料的充实和完善，以上方法的应用必将发挥更大的作用，取得更具实际意义的科研成果。

## 4 研究区地下水同位素特征

### 4.1 同位素方法的原理和意义

高放废物处置库场址预选一般在渗透率非常低的岩石地区进行。面对这种低渗透岩石中的地下水流,传统的水文地质方法在某种程度上便受到了限制,而同位素水文学技术却可以有效地解决问题,特别是当其与传统水文地质学和地球化学方法相结合时,便显得更有价值。因为就稳定同位素而言,它们可以用来揭示地下水的成因和地球化学史以及地下水的溶解作用;放射性同位素可以确定地下水的滞留时间。这就为研究低渗透、低流速地下水的运动提供了有效的途径。

为了深化研究区水文地质条件的认识,在过去的五年里,我们十分重视这一方法的应用,获取了一批地下水同位素数据,弥补了传统水文地质研究的不足,相互印证,取得了较好的效果。

### 4.2 地下水氢、氧同位素研究

氢是水圈中最重要的一种元素,它有3种同位素,氕( $^1\text{H}$ )的丰度为99.98%;氘( $^2\text{H}$ )为重水中的重要组分;氚( $^3\text{H}$ )为放射性同位素,其半衰期为12.43 a,丰度为从 $10^{-14}\%$ 到低于 $10^{-16}\%$ 。它们都是水分子的构成同位素,是理想的示踪剂。氧有3个同位素,所有氧的0.2%为 $^{18}\text{O}$ ,0.035%为 $^{17}\text{O}$ ,而99%为最普遍的 $^{16}\text{O}$ ,它们均为稳定同位素。可作为大地中氧池的永久部分保持下来。 $^{18}\text{O}$ 可以用于研究水体的成因和历史。

### 4.3 浅部地下水氢、氧同位素特征

五年来,在预选区采集了数十个地下水及地表水样品进行氢氧同位素分析(部分样品为重复取样)。在地下水样品中,取自花三井、花二井、赤金乡、后红泉、小泉的地下水为深部地下水,其余均为浅部地下水。可以看出,浅部地下水的 $\delta\text{D}$ 值分布在 $-58\%\sim-70\%$ 之间, $\delta^{18}\text{O}$ 大部分在 $-6.9\%\sim-9.6\%$ 之间,氘含量一般大于10 TU,只有几个样品的氘值小于10 TU,与当地地表水的氘含量较接近,反映了浅部地下水系统的开启性,也说明浅部地下水循环交替较强的特征。

### 4.4 深部地下水氢、氧同位素特征

由于区内地下水露头多为浅井或下降泉,深部地下水仅限于排泄区的部分深井或上升泉,因此获得数据只有5组(W16-97-7号,W18-00-9号,W23-00-9号,S02-98-8号,S05-00-9号)。深部地下水的 $\delta\text{D}$ 值含量表现出略低于浅部地下水的特征,在 $-66\%\sim-74\%$ 之间,而 $\delta^{18}\text{O}$ 值较浅部地下水明显偏低,介于 $-9.0\%\sim-10.5\%$ 之间。就地下水的氘含量而言,深部地下水与浅部地下水没有明显差别。

### 4.5 地下水 $\delta\text{D}\sim\delta^{18}\text{O}$ 的相互关系及地下水成因

把 $\delta\text{D}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 数据点绘在图上,并与全球雨水线对比,分析结果表明,深部地下水点基本分布于全球雨水线附近,说明其起源于大气降水的入渗补给。此外,深部地下水的同位素组成主要位于全球雨水线下方。说明其重同位素含量偏低。一般认为重同位素含量降低与更新世气候变冷有关。因此一旦地下水重同位素偏低,常常被解释为其起源于更新世降水的补给。如加拿大地盾及芬兰斯堪的纳维亚地盾深部地下水贫重同位素,便被解释为成因于更新世寒冷气候条件下降水入渗补给。在瑞典 Stripa 花岗岩的深部也曾发现了与当



地地表水相比贫重同位素的地下水，并被解释为是深部地下水有较冷地下水补给所致。根据这种观点，可以认为北山深部地下水重同位素含量较低，也很可能是由于其起源于更新世降水入渗补给所致。这说明北山地区深部地下水补给的时间较早，循环周期较长。问题是，到目前为止，我们所采集到的深部地下水样品还很有限，并且从深部地下水氡含量可以看出，无论其取自深井还是上升泉，都或多或少地混入了浅部地下水，因此要真正揭示其补给的年代和循环周期，还需要做更多的工作。

区内浅部地下水同位素组成主要分布在全球雨水线的附近和右下侧，说明浅部地下水起源于当地的大气降水入渗补给。位于全球雨水线的附近的水点，多位于地下水循环交替较快的沟谷内，受蒸发浓缩作用较弱。而位于全球雨水线右下侧的水点，其重同位素含量相对较高，这种地下水重同位素相对富集的现象可以解释为受浅层蒸发作用所致，因为研究区属于典型的干旱地区，受蒸发作用的影响，无论是浅部地下水还是大气降水，都要受到强烈的蒸发作用而导致地下水重同位素含量明显高于地表水同位素组成的情况，表明浅部地下水的循环交替能力是较强的，这点从浅部地下水的氡含量较高也可以得到佐证。

#### 4.6 地下水碳同位素特征及其 $^{14}\text{C}$ 年龄

碳有 3 种重要同位素：普通  $^{12}\text{C}$  在大陆上的丰度为 98.89%，稳定同位素  $^{13}\text{C}$  占有碳的 1.1%，放射性  $^{14}\text{C}$  约占大陆上碳总量的  $1.2 \times 10^{-10}\%$ ， $^{14}\text{C}$  的半衰期为 5730 a。在自然界中，所有参加碳交换循环的物质都含有  $^{14}\text{C}$ 。但如果某一种含碳物质一旦停止与外界发生交换，例如生物死亡或  $^{14}\text{C}$  以碳酸钙形式沉淀后，与大气及水中的  $\text{CO}_2$  不再发生交换，那么有机体和碳酸盐中的  $^{14}\text{C}$  将得不到新的补充，原始的放射性  $^{14}\text{C}$  就开始按照衰变规律而逐渐减少。这就是  $^{14}\text{C}$  可以用来测定含碳矿物年龄以及地下水年龄的理论依据。

如上所述，北山地区尚无取得深部地下水的深井，因此关于碳同位素的研究，主要侧重于区域地下水排泄区，即走廊地区及东部花海盆地。 $^{14}\text{C}$  测试样品采用沉淀法获取，首先根据地下水中  $\text{HCO}_3^-$  含量确定取样量，在本区，取样量一般为 150 L。水样的处理过程如下：

6 个地下水样品的  $^{14}\text{C}$  以及根据 85% 现代碳法所计算的地下水  $^{14}\text{C}$  年龄是：C1, C2 和 C3 水样取自潜水含水系统，计算年龄表明它们均为较年轻的地下水；C4, C5 和 C6 水样分别取自花海及玉门镇以北的走廊地区，计算的  $^{14}\text{C}$  年龄分别为 12029 年, 16002 年和 14620 年，表明它们均为早期补给的地下水，其中的 C5 样品年龄最老，它取自花海盆地的近 3000 m 深石油勘探井，出水段在 200 m 以下，该水样的氢、氧稳定同位素偏低，氡含量 3.8TU，表明该水样可能混有更新世气候寒冷时期的补给水，因其处于地下水的排泄区、说明地下水由补给区到排泄区的平均滞留时间达 1.6 万余年。这一结果与水流模拟计算结果在时间尺度上是接近的，但由于该水样的出水段间距很大，属新老水的混合水，根据其  $^{14}\text{C}$  年龄数据，还很难确定某一深度上地下水的真实年龄。

$^{14}\text{C}$  研究的确是测定深部地下水形成年代十分有效的研究方法，问题是北山地区深井很少，目前所能获得的数据十分有限，课题组还无法根据这些有限的数据来了解深部地下水的全貌。随着研究的深入，特别是深部钻探工程的开展， $^{14}\text{C}$  研究将提供更为宝贵的深部地下水信息。

## 5 研究区地下水腐殖酸特征

### 5.1 研究意义

根据前人的研究成果，腐殖酸，尤其是其中的富里酸，对矿物，特别是硅酸盐矿物具有强烈的破坏作用，对混凝土材料、金属材料也具有强烈的腐蚀破坏能力。此外，腐殖酸易于对地下水中的金属离子发生络合作用和还原作用，从而影响元素在地质环境中的迁移和转化。同样，腐殖酸可以与多种核素，如锶系元素、超铀元素等相互作用，形成稳定的络合物，从而对放射性核素在地质介质中的迁移产生较大影响。因此，在高放废物处置库场址预选、并对处置库性能进行评价时，必须对腐殖酸及其影响核素迁移的行为进行研究。

### 5.2 研究区地下水腐殖酸特征

表 3 给出了研究区部分地下水腐殖酸含量的测试结果。可以看出，大部分样品的含量均在 0.5 mg/L 以下。二道井水样情况较特殊，含量高达 2.18 mg/L，经分析表明，如此高含量的腐殖酸很可能与污染有关。该井为当地牧民所挖，在放牧季节，羊群每天在这里聚集饮水，导致了地下水污染，使腐殖酸含量明显高于其它水样。除该井外，其它水样腐殖酸含量最高为 0.49 mg/L，最低为 0.03 mg/L，平均含量 0.24 mg/L。

表 3 地下水腐殖酸含量表 (mg/L)

水 样	取样时间	腐殖酸含量
咸水井	1998-09-10	0.00
梧桐井	1998-09-11	0.38
新场井	1998-09-11	0.16
蒙古井	1998-09-10	0.49
后红泉	1998-09-10	0.43
小 泉	1998-09-21	0.16
花三井	1998-09-21	0.38
枯水井	1998-09-13	0.16
二道井	1998-09-07	2.18
旧 井	1998-09-11	0.04

注：样品由中国科学院生态环境研究中心测试。

北山地区属典型的碱性、弱碱性氧化水文地球化学环境，与国内外的研究对比，这个平均含量明显高于碱性、弱碱性氧化水文地球化学环境条件下腐殖酸的平均含量，其原因是一个尚待深入研究的问题。

根据国内外的研究，在地下水环境中腐殖酸的存在，极大地影响了放射性核素的迁移行为。而这种影响核素迁移行为的研究，是一个涉及土壤化学、高分子化学、胶体化学等学科的十分复杂的课题。就其研究现状而言，无论在理论上还是在实践上，都还很成熟。因此，也是今后一个十分重要的研究方向。

## 6 结论

甘肃北山地区作为我国高放废物处置库预选场地是由多种因素决定的，其中水文地质条件是一个十分重要的方面，通过几年的野外工作及多种方法的综合研究，获得如下结论和认识：

(1) 研究区气候干旱，人烟稀少，植被不发育，具备高放废物处置库场地得天独厚的地理、气象、人文条件。

(2) 北山地区基岩含水介质的连通性、渗透性差，因此，地下水含水量小，循环交替缓慢，为典型的低渗透、弱含水、低流速水文地质区。

(3) 根据岩性、地貌及地质构造，研究区地下水可以划分为三种主要类型，既山地基岩裂隙水、沟谷洼地孔隙-裂隙水和盆地孔隙-裂隙水，在三种类型的地下水中，山地基岩裂隙水是分布最广，与处置库场地研究关系最为密切。基岩裂隙水的富水性明显受地形、地貌、岩性及裂隙发育程度的控制，一般地说，岩浆岩含水性强于变质岩，断裂破碎带含水性好于风化裂隙带；区内松散沉积物含水性受岩性、厚度及沟谷洼地规模影响，涌水量一般小于  $10 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

(4) 三种类型的地下水的补给来源主要是当地大气降水的入渗，但由于年降水量仅为  $60\sim 80 \text{ mm}$ ，地下水能够获得的补给量极为有限，三种地下水之间也存在相互补给和转化的关系；地下水的排泄以就地蒸发为主，此外也通过地下径流的方式向区外排泄。

(5) 地下水流向在局部受控于裂隙和构造的展布方向，而区域地下水流向主要受控于地形、地貌。根据地形及地表沟谷的发育情况分析，研究区南部地下水由北东流向南西，北部地下水由南西流向北东。

(6) 受蒸发浓缩作用影响，区内地下水主要为矿化度大于  $2 \text{ g/L}$  的咸水，水化学类型以  $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4\text{-Na}$  和  $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Na}$  型为主，pH 大多在  $7\sim 8$  之间，但在局部地下水循环条件较好的沟谷区，也可形成矿化度小于  $1 \text{ g/L}$  的淡水。

(7) 首次在北山地区开展的地下水流模拟计算表明，区内地下水可以划分为局部水流系统和区域水流系统。局部水流系统地下水循环深度小于  $150 \text{ m}$ ，水流速度快，更新周期较短；区域水流系统地下水循环深度大于  $150 \text{ m}$ ，水流速度缓慢，更新周期长，在  $400 \text{ m}$  深度上，地下水流速小于  $2 \text{ m/a}$ 。从补给区到排泄区，地下水运移时间长达  $1\sim 2$  万年。这是北山作为高效废物处置库预选区的最大的水文地质条件优越性的集中体现。

(8) 首次进行的地下水与固相间反应趋势研究表明，研究区地下水对大部分矿物，特别是粘土矿物均达到过饱和状态，即趋向于从地下水中沉淀析出，结果不仅可以有效充填裂隙，并且可以产生大量的粘土矿物，成为核素强有力的吸附剂；水-岩作用模拟结果表明，北山地区地下水化学从补给区到排泄区的形成和演化，主要受方解石、白云石、伊利石和黄铁矿沉淀，石膏、钠长石、石盐、钙长石、菱铁矿、萤石溶解，钙钠阳离子交换的控制。计算结果显示，北山地下水的化学成分，对阻止核素迁移极为有利。

(9) 采用最新技术首次开展的地下水与核废物相互作用模拟表明，在封闭条件下，次生矿物的生成和溶解伴随整个反应过程。反应的最终结果表明，乏燃料中的某些核素几乎呈全等溶解方式全部溶入水中，如 Cs, Tc, Ra 等；而另一些核素在反应的进程中虽然大量

溶进水中，但最终大部分仍以次生矿物的形式回归固相（如 Th, Pu）等，这是北山作为高效废物处置库的地下水化学的又一优势。

(10) 地下水氢氧同位素和碳同位素研究进一步说明，研究区浅部地下水源自大气降水，为近期入渗补给的地下水，水流速度快，更新周期短；而深部地下水源自地质历史时期大气降水补给的地下水，流速缓慢，更新周期达万年以上。这一结论与地下水流模拟所获得的结果也是不谋而合。

(11) 地下水天然腐殖酸含量最高为 0.49 mg/L，最低为 0.03 mg/L，平均含量 0.24 mg/L。这一含量范围对核素迁移的影响乃至地下水天然腐殖酸含量本身，都是今后有待深入研究的课题。

(12) 研究实践说明，所采用的地下流动状态计算机模拟、水文地球化学模拟，水-岩石-核废物相互作用模拟、同位素技术等综合研究方法，可以有效地揭示预选区的地下水动力、化学过程，解决低渗透、弱含水、低流速条件下地下水运动这一世界性难题。

(13) 综上所述，研究区水文地质条件复杂，但岩石的低渗透，弱含水，低流速在国内是十分典型的，这对于处置高放废物极其有利；研究中所采用的多种先进技术和方法对北山地区实施的选址工作行之有效。

## 7 结束语

由于高放废物的毒性及其持久性，要求高放废物处置库的安全期起码要在万年以上，这可以说是自古迄今人类工程之最。因此，从处置库选址到建造，一般需要几十年时间，且耗资巨大。从这种意义上讲，我们的工作的确只能说刚刚起步，还很肤浅。

根据发达国家的经验，水文地质研究是处置库选址及场址性能评价中非常重要的一个方面，到目前为止，我们在北山地区所开展的水文地质工作，可以说是我国高放废物地质处置研究承上启下、走向深入关键的第一步。

伴随工作的深入，如水文地质钻探工作的开展，北山水文地质工作将实现从地表向地下、由平面向立体、由方法学到实际应用的重要转折和飞跃。相应工作，如水样采集可以做到在垂向上分层进行；水位观测可以作到在钻孔中连续自动进行；深部地下水流速、流向可以通过实际测量进行；水文地质参数的获取可以通过现场试验进行，水流状态模拟可以在三维空间上进行等等。届时将为我国高放废物处置库场址确定提供更切实可靠的水文地质依据。

## 参 考 文 献

- 1 Alfred H. Truesdell, Blair F. Jones. WATEQ, a computer program for calculating chemical equilibria of natural waters. U.S. geol. Survey Jour. Research, 1974, 2: 233~248
- 2 Roger W Lee. Geochemistry of Groundwater in Tertiary and Cretaceous Sediments of The Southeastern Coastal Plain in Eastern Georgia, South Carolina, and Southeastern North Carolina, Water Resources Research, 1988, 24(2): 291~303

- 3 Parkhurst D L, Plummer L N, Thorstenson D C. BALANCE—a computer program for calculation mass transfer for geochemical reactions in groundwater. U.S Geol. Surv. Water Resour. Invest. Rept., ca 82-14, 1982
- 4 Plummer L N, Prestemon E C, Parkhurst D L. An interactive code (NETPATH) for modeling net geochemical reaction along a flow path. U.S Geol. Surv. Water Resour. Invest. Rept. 91-4078, 1991
- 5 Liu H H, Doughty C, Bodvarsson G S. An active fracture model for unsaturated flow and transport in fractured rocks, Water Resour. Res. 1998, 34: 2633~2646
- 6 Pruess K. TOUGH2-A General Purpose Numerical Simulator for Multiphase Fluid and Heat Flow. LBL-29400, Berkeley, California: Lawrence Berkeley National Laboratory, 1991
- 7 Pruess K. TOUGH User's Guide. LBL-20700, Berkeley, California: Lawrence Berkeley National Laboratory, 1987
- 8 Spycher N, Sonnenthal E L, Ahlers R, Xu T. TOUGHREACT V2.2 Software Qualification. Lawrence Berkeley National Laboratory, 1999
- 9 Xu T, Pruess K. Coupled Modeling of Non-Isothermal Multi-Phase Flow, Solute Transport and Reactive Chemistry in Porous and Fractured Media: I. Model Development and Validation. LBNL-42050. Berkeley, California: Lawrence Berkeley National Laboratory. TIC: 243735, 1998
- 10 沈照理主编. 水文地球化学基础. 北京: 地质出版社, 1986  
(SHEN Zhaoli (main editor). Basic hydrogeochemistry. Beijing: Geological Press, 1986)
- 11 张人权等编译. 同位素方法在水文地质中的应用. 北京: 地质出版社, 1983  
(ZHANG Renquan (translated and edited). Application of isotopic method in hydrogeology. Beijing: Geological Press, 1983)
- 12 王驹等(译), 世界放射性废物地质处置. 北京: 原子能出版社, 1999  
(WANG Ju et al. (translate). Geological disposal of radioactive waste in the world. Beijing: Atomic Press, 1999)
- 13 王恒纯主编. 同位素地质学概论. 北京: 地质出版社, 1991  
(WANG Hengchun (main editor). An introduction to isotope geology. Beijing: Geological Press, 1991)
- 14 沈照理主编. 水文地质学. 北京: 科学出版社, 1985  
(SHEN Zhaoli (main editor). Hydrogeology. Beijing: Scientific Press, 1985)
- 15 郭永海等. 河北平原地下水环境演化的地球化学模拟. 中国科学, 1997, 4  
(GUO Yonghai et al. Hydrogeochemical modeling of groundwater chemical environmental evolution in Hebei Plain. Science in China, 1997, 4)