

# 高放废物地质处置野马泉预选场地 地下水同位素分析

刘淑芬, 郭永海, 王 驹, 王志明, 苏 锐, 吕川河, 宗自华

(核工业北京地质研究院, 北京 100029)

**摘要:** 野马泉地区是我国高放废物处置库的重要预选区之一, 大面积分布的花岗岩是良好的处置库围岩。为认识研究区的水文地质条件, 从水文地质角度评价其作为高放废物处置库场地的适宜性, 开展同位素水文地质调查工作。野外调查和氢、氧稳定同位素分析结果表明, 研究区浅部和深部地下水均源自大气降水补给, 浅部地下水主要由现代和区内降水补给形成, 而深部地下水则可能由区域降水补给形成。此外, 地下水的氡含量数据表明, 浅部地下水系统相对开启, 水循环交替能力较强。

**关键词:** 水文地质; 同位素; 高放废物处置库

**中图分类号:** P 64; TL 925

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2007)增2 - 3995 - 05

## ISOTOPE ANALYSIS OF GROUNDWATER IN YEMAQUAN CANDIDATE SITE OF CHINA'S HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTE REPOSITORY

LIU Shufen, GUO Yonghai, WANG Ju, WANG Zhiming, SU Rui, LU Chuanhe, ZONG Zihua

(Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Yemaquan district, one of the important candidate sites for China's high-level radioactive waste repository, is located in the Beishan area, Gansu Province, Northwest China. The granite is widely distributed in this district and it will be a good host rock for a high-level radioactive waste disposal repository. In order to understand the hydrogeological conditions and to evaluate if the district is a suitable/unsuitable site for a repository, the isotopic hydrogeological investigation and research were carried out during last decade. According to the field investigation and the analysis of the stable isotopes of hydrogen and oxygen, it is concluded that both shallow groundwater and deep groundwater are of meteoric origin. The shallow groundwater is recharged mainly by modern and local precipitation, and the deep groundwater may be originated from regional precipitation at higher elevation. In addition, from the tritium data of groundwater in the district, it is also found that the shallow groundwater system is relatively open; and the ability of water circulation is more capable than that of deep groundwater system.

**Key words:** hydrogeology; isotope; high-level radioactive waste repository

## 1 引 言

在高放废物地质处置库系统中, 放射性核素释

放并进入生物圈的主要媒介和载体是地下水。首先, 地下水与工程屏障(工程屏障包括缓冲回填材料、废物罐和废物体本身)相互作用。导致废物罐或包装破坏, 使核废物直接裸露于地下水中, 进而地下水与

**收稿日期:** 2007 - 03 - 07; **修回日期:** 2007 - 05 - 16

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(40672155); 国防预研项目(55.6.22 - 3)

**作者简介:** 刘淑芬(1957 -), 女, 1980年毕业于长春地质学院地质系, 现任高级工程师, 主要从事核废物地质处置和水文地质等方面的研究工作。E-mail: liushufenhose@yahoo.com.cn

废物体本身发生溶解和溶滤作用，使有害的核素进入地下水中，并在浓度梯度，特别是水力梯度作用下向周围地质介质中迁移和扩散。迁移速率的大小主要取决于地质屏障的水文地质特征，或者简单地说，主要取决于地下水的流速和化学特征<sup>[1, 2]</sup>。

由此可见，处置库所处的水文地质条件对安全处置高放废物非常重要。一般来说，高放废物处置库场地必须具备低流速和弱渗透的水文地质条件。同位素水文学对于研究低流速和弱渗透水文地质问题具有许多其他方法无可比拟的优越性，是查清地下水的来源、滞留时间、地下水循环交替特征的一种有效手段<sup>[3~10]</sup>。

## 2 自然地理概况

研究区是我国高放废物处置库的第 2 个重要的预选场地，位于甘肃省河西走廊以北，行政区划属于内蒙古额济纳旗和甘肃省肃北县。南距嘉峪关市约 130 km，地理坐标为北纬 40° 40'~41° 04'；东经 97° 00'~97° 12'。

该区海拔为 1 400~1 600 m，地形相对平缓，相对高差小于 100 m，地表呈现出典型的岩漠戈壁

景观，植被稀少，基岩裸露。地貌形态特征主要为微切割的中低山、丘陵与浅平洼地、沟谷相间排列。研究区为我国典型的干旱气候区，具降雨稀少、蒸发量大、干冷多风等特点，年平均降水量为 60~80 mm，降水量的 60% 以上集中在 6~8 月份；年平均蒸发量为 3 200 mm，年平均气温为 4 ℃~7 ℃。区内没有常年性河流，仅有洪水作用形成的干河床、沟谷比较发育。

## 3 区域水文地质概况

该区岩体和地层广泛发育节理、裂隙和断裂，且浅部多分布有强风化裂隙带，成为储存、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，导致各地域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。按地下水分布的地形、地貌、岩性结构及地质构造条件，区内地下水可划分为 3 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)。

地下水场特征从区域上看，研究区外的西北部(马鬃山一带)是整个北山地区地势最高处，马宗

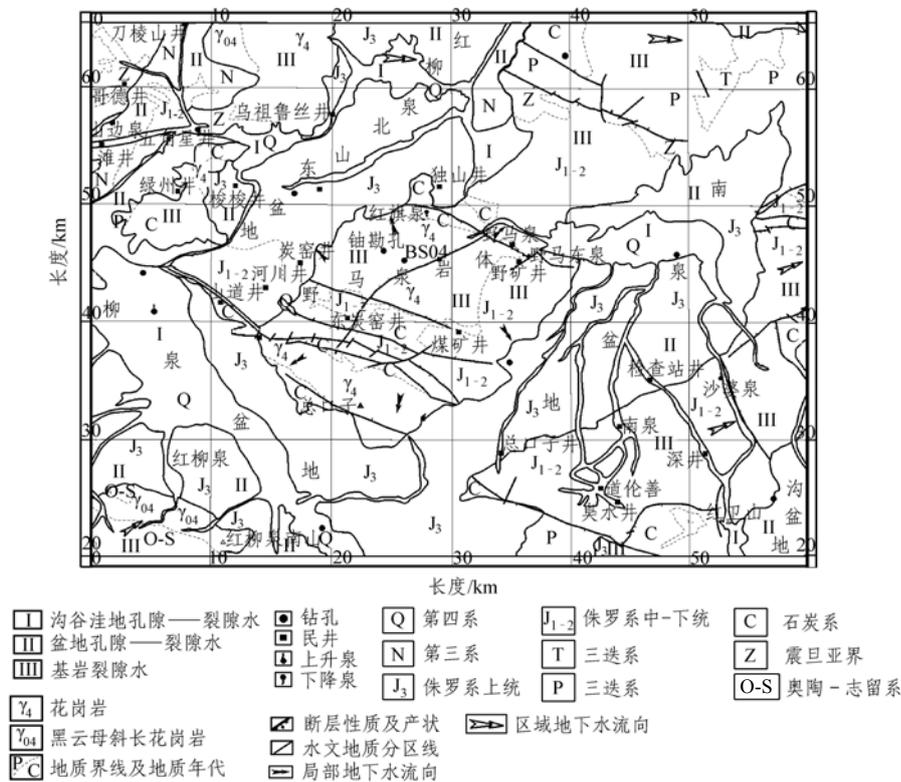


图 1 野马泉预选场地水文地质分区和井、泉分布图

Fig.1 Sketch map showing hydrogeology features and contents of wells and spring in Yemaquan preselected site

山主峰海拔 2 583 m, 地下水位标高较研究区高出至少 900 m, 是区域地下水的补给区, 研究区外的西南部(旧井、新场岩体一带)是地形的相对隆起区, 地下水位标高较研究区高出至少 100 m, 因此, 区域地下水的总体流向为自西向东, 野马泉地段及周边地区属于区域地下水的径流区。就野马泉岩体及附近局部地区而言, 岩体及其南部沉积岩构成地形上的隆起区, 地面标高较周边盆地高出 100~150 m, 因此属于地下水的局部补给区, 而周边的沉积盆地则构成地下水的局部排泄区, 即岩体地下水通过地下径流排向盆地, 地下水的流向总体呈放射状向周围盆地流动。盆地地下水则主要通过蒸发作用进行排泄<sup>[11]</sup>。

总之, 野马泉地区地下水极其贫乏。富集于基岩风化裂隙、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。

#### 4 野马泉预选场地地下水氢、氧同位素特征

同位素水文地质学是 20 世纪 60 年代诞生的边缘学科。同位素技术的应用, 使水文地质工作者对天然水的认识从水的分子结构层次(物理学方法)和

原子结构层次(化学方法)深入到原子核层次(同位素方法)<sup>[12, 13]</sup>。

目前, 在地下水研究中所用到的同位素种类有 30 种左右, 但在我国, 应用最为广泛的仍然是氢、氧同位素和碳同位素。根据研究目标和区域水文地质条件, 在开展野马泉地区水文地质研究工作中, 选择的同位素主要是氢、氧同位素。

##### 4.1 浅部地下水氢、氧同位素特征

在预选区共采集 32 个地下水样品进行氢氧同位素分析。表 1 给出了测试结果。从表 1 中可以看出, 浅部地下水的  $\delta D$  含量的取值范围为  $-51.9\text{‰} \sim -69.6\text{‰}$ ,  $\delta^{18}O$  含量的取值范围大部分为  $-6.8\text{‰} \sim -9.9\text{‰}$ ,  $^3H$  含量为 0.50~45.82 TU。

##### 4.2 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, 本次研究只在专门为高放废物地质处置研究项目施工的 BS04 钻孔中采集到了 3 组深部地下水的样品, 取样深度分别为 174.44, 200.00 和 400.00 m。BS04 钻孔地下水同位素组成见表 2。

从表 2 中可以看出, 深部地下水与浅部地下水的差别是很明显的, 其  $\delta^{18}O$  含量偏高; 而  $\delta D$  含量偏低; 含量略为偏低。虽然只有 1 个孔的数据, 不可能代表研究区深部地下水氢、氧同位素特征的全貌, 但它为我国高放废物地质处置研究提供了深部地下水形成的重要信息, 是极其宝贵的数据资料。

表 1 野马泉地区地下水同位素组成

Table 1 Isotope composition of groundwater in Yemaquan Region site

| 样品号       | 地点   | $\delta D$ 含量/ $\text{‰}$ | $\delta^{18}O$ 含量/ $\text{‰}$ | $^3H$ 含量/TU | 样品号       | 地点    | $\delta D$ 含量/ $\text{‰}$ | $\delta^{18}O$ 含量/ $\text{‰}$ | $^3H$ 含量/TU |
|-----------|------|---------------------------|-------------------------------|-------------|-----------|-------|---------------------------|-------------------------------|-------------|
| W40-02-07 | 七井矿  | -57.3                     | -6.0                          | 7.02        | W56-02-08 | 南泉    | -62.1                     | -9.2                          | 28.12       |
| W41-02-08 | 野马东泉 | -60.9                     | -7.9                          | 6.99        | W57-02-08 | 苇滩井   | -67.5                     | -8.9                          | 13.30       |
| W42-02-08 | 深井   | -59.7                     | -8.5                          | 9.16        | W58-02-08 | 五角星井  | -67.6                     | -8.9                          | 13.68       |
| W43-02-08 | 山道井  | -61.1                     | -7.5                          | <0.50       | W59-02-08 | 刀棱山   | -68.3                     | -9.2                          | 10.96       |
| W44-02-08 | 臭水井  | -54.9                     | -8.6                          | 16.69       | W60-02-08 | 梭梭井   | -67.7                     | -10.9                         | 19.89       |
| W45-02-09 | 检查站井 | -63.3                     | -9.0                          | 38.14       | W61-02-08 | 野马泉   | -67.3                     | -9.9                          | 0.83        |
| W46-02-09 | 野矿井  | -67.1                     | -7.8                          | <0.50       | W62-02-08 | 沙婆泉   | -53.5                     | -7.4                          | 4.52        |
| W47-02-08 | 巴图井  | -61.0                     | -7.6                          | 12.84       | W63-02-08 | 东炭窑井  | -56.1                     | -9.8                          | 30.94       |
| W48-02-08 | 板滩井  | -61.5                     | -8.4                          | 17.36       | W64-02-08 | 四个井   | -65.7                     | -9.6                          | 1.88        |
| W49-02-09 | 野西矿  | -59.2                     | -8.6                          | 2.50        | W65-02-08 | 老井    | -63.0                     | -8.1                          | 0.39        |
| W50-02-09 | 煤矿井  | -58.4                     | -8.5                          | <0.50       | W66-02-09 | 红柳小泉  | -60.0                     | -7.6                          | 45.12       |
| W51-02-08 | 桥儿井  | -66.7                     | -6.8                          | 17.73       | W67-02-08 | 炭窑井   | -56.4                     | -9.8                          | 5.40        |
| W52-02-08 | 哥德泉  | -62.2                     | -8.7                          | 13.06       | W68-02-08 | 乌祖鲁丝井 | -69.6                     | -8.9                          | 14.26       |
| W53-02-08 | 绿洲井  | -61.8                     | -8.4                          | 13.61       | W69-02-08 | 总口子井  | -59.1                     | -7.9                          | 23.67       |
| W54-02-08 | 山边泉  | -60.3                     | -8.0                          | <0.50       | W70-02-08 | 四方山   | -65.9                     | -8.3                          | 19.32       |
| W55-02-09 | 红柳井  | -60.3                     | -8.1                          | 8.80        | W71-02-08 | 道伦善   | -51.9                     | -8.5                          | 45.82       |

表2 BS04 钻孔地下水同位素组成

Table 2 Isotope composition of groundwater in borehole BS04

| 取样深度/m | $\delta D$ 含量/‰ | $\delta^{18}O$ 含量/‰ | $^3H$ 含量/TU |
|--------|-----------------|---------------------|-------------|
| 174.44 | -75.90          | -5.80               | 7.74        |
| 300.00 | -73.48          | -5.82               |             |
| 400.00 | -73.26          | -5.78               |             |

4.3 依据同位素的地下水成因分析

图2给出了野马泉地下水 $\delta^{18}O$ 与 $\delta D$ 含量关系,从图中可以看出,区内地下水稳定氢、氧同位素组成主要分布在全球雨水线的附近和右下侧,说明地下水起源于当地大气降水入渗补给。位于全球雨水线附近及上方的水点,多取自地下水循环交替较快的沟谷内,受蒸发浓缩作用影响极其弱。而位于全球雨水线右下侧的水点,其重同位素含量相对略高,这种地下水重同位素相对富集的现象可以解释为受潜水蒸发浓缩作用影响所致,因为研究区属于典型的干旱地区,地下水必然受到蒸发作用的影响,结果使浅部地下水重同位素含量偏。从图2中还可以看出,地下水同位素组成偏离雨水线的程度都较小,说明地下水受蒸发对同位素组成的影响并不是十分强烈,这也表明浅部地下水的循环交替能力是较强的,地下水的氡含量也进一步的说明了这一点。

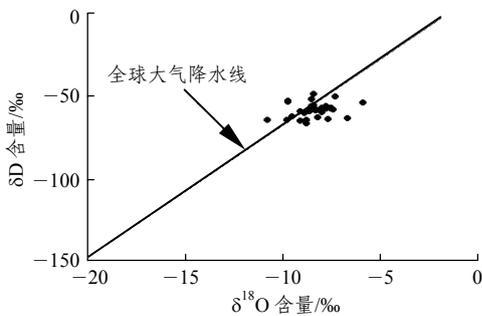


图2 野马泉预选场地下水 $\delta^{18}O$ 与 $\delta D$ 含量关系图  
Fig.2  $\delta D$ - $\delta^{18}O$  plot of groundwater in Yemaquan Region

根据已有研究成果可知,在世界许多国家和地区,由于氡的自然衰变,地下水中氡含量受核爆影响已经很小,其含量已经不适于地下水年龄的计算。但是在我国西部地区,地表水和地下水的氡含量仍然较高。在野马泉预选场地,地下水氡含量一般大于5.00 TU,最高值为45.82 TU。无论其含量还是变化幅度,均可以继续作为地下水年龄估算的依据<sup>[14]</sup>。

地下水氡含量的高低可直接反映地下水在地下滞留时间的长短。由表1可知,野马泉预选场地70%以上的地下水氡含量大于5.00 TU,反映了浅部地下水系统的开启性,也进一步说明浅部地下水来自当地大气降水补给,浅部地下水具有循环交替能力较强的特征。

图3,4分别给出了地下水TDS与 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 含量关系。从图3,4中可以看出,地下水TDS与 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 含量的数量关系不是很明显,地下水同位素并没有随TDS的增高出现明显升高的规律性变化,这从另一个角度说明,就浅层地下水而言,蒸发对其同位素组成的影响不大,其原因有待今后开展进一步探讨。

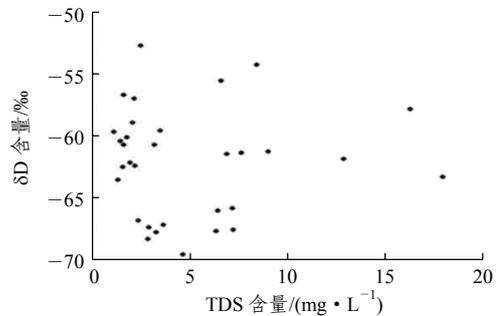


图3 地下水TDS与 $\delta D$ 含量关系图  
Fig.3 Contents relationship between TDS and  $\delta D$

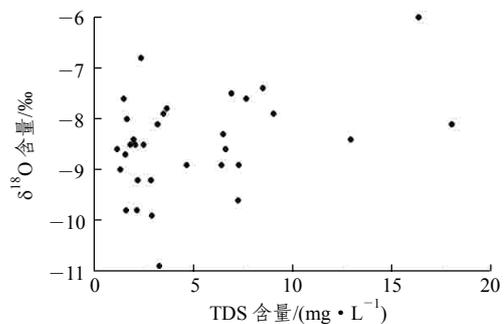


图4 地下水TDS与 $\delta^{18}O$ 含量关系图  
Fig.4 Contents relationship between TDS and  $\delta^{18}O$

根据深部地下水 $\delta^{18}O$ 含量偏高;而 $\delta D$ 含量偏低;氡含量略为偏低的特征,可以判断其与浅部地下水的成因和循环交替条件是明显不同的,它是区内早期降雨入渗补给形成,属于时代较老的“古水”,且循环交替缓慢,处于相对封闭的地下水系统。但因为只有1个钻孔地下水的同位素数据,对此还很难定论,尚需获得更多的深部地下水同位素数据<sup>[15~18]</sup>。

## 5 结 论

在世界范围内, 高放废物处置库选址大都在基岩地区进行, 因此涉及的主要是低渗透基岩裂隙地下水系统。由于这种系统具有含水介质的不均一性、各向异性、低渗透性等特点, 使得水文地质研究工作异常困难。通过野马泉地区地下水同位素水文学方法研究, 初步认识了研究区地下水的来源、滞留时间、地下水循环交替特征等水文地质基础问题。研究成果表明, 野马泉地区浅部地下水的 $\delta D$ 含量为 $-51.9\text{‰} \sim -69.6\text{‰}$ ,  $\delta^{18}O$ 含量大部分为 $-6.8\text{‰} \sim -9.9\text{‰}$ ,  $^3H$ 含量为 $0.50 \sim 45.82$  TU, 说明预选场地浅部地下水为大气降水入渗补给形成, 为近期入渗补给的地下水, 反映浅部含水系统水流速度快, 更新周期短的特征; 而深部地下水的 $\delta^2H$ 和 $\delta^{18}O$ 值与浅部地下水具有明显的差别,  $\delta^{18}O$ 含量偏高;  $\delta D$ 含量偏低。结合当地水文地质条件, 估计其形成时 $\delta D$ 含量偏低, 是形成时期较早的“古水”, 反映了区域循环地下水的特征, 其循环交替缓慢, 处于相对封闭的地下水系统。

### 参考文献(References):

- [1] WANG J, SU R, CHEN W M, 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.
- [2] 杨春和, 王贵宾, 王 驹, 等. 甘肃北山预选区岩石力学与渗流特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(4): 825 - 832.(YANG Chunhe, WANG Guibin, WANG Ju, et al. Study on rock mass mechanics and seepage characteristics of candidate site—Beishan, Gansu Province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(4): 825 - 832.(in Chinese))
- [3] ZHANG C L, WANG J, SU K. Concepts and tests for disposal of radioactive waste in deep geological disposal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(4): 750 - 766.
- [4] 王 驹, 陈伟明, 苏 锐, 等. 高放废物地质处置及其若干关键科学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(4): 801 - 812.(WANG Ju, CHEN Weiming, SU Rui, et al. Geological disposal of high-level radioactive waste and its key scientific issues[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(4): 801 - 812.(in Chinese))
- [5] MAZUREK M, JAKOB A, BOSSART P. Solute transport in crystalline rocks at Aspö—1: geological basis and model calibration[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2003, 61(1 - 4): 157 - 174.
- [6] VILKS P, CRAMER J J. In-situ diffusion experiment in granite: phase I[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2003, 61(1 - 4): 191 - 202.
- [7] ALONSO U, MISSANA T. Study on the contaminant transport into granite microfractures using nucleation beam techniques[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2003, 61(1 - 4): 265 - 279.
- [8] REIMUS P, POHLL G. Testing and parameterizing a conceptual model for solute transport in a fractured granite using multiple tracers in a forced gradient test[J]. Water Resources Research, 2003, 39(12): 1356 - 1359.
- [9] CHEN Z Y, QI J X. Paleoclimatic interpretation of the past 30 ka from isotopic studies of deep confined aquifer of North China Plain[J]. Applied Geochemistry, 2003, 18(7): 997 - 1010.
- [10] SALAS J, AYORA C. Groundwater chemistry of the Oke' Lobondo Uraninite deposit area(Oklo, Gabon) two-dimensional reactive transport modeling[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2004, 69(1 - 2): 73 - 99.
- [11] 郭永海, 王 驹, 刘淑芬, 等. 高放废物处置库预选区野马泉岩体地下水化学特征[J]. 原子能科学技术, 2004, 38(增 1): 143 - 147.(GUO Yonghai, WANG Ju, LIU Shufen, et al. Groundwater chemical characteristics of the Yemaquan Section—the preselected area for China's high-level radioactive waste repository[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2004, 38(Supp. 1): 143 - 147.(in Chinese))
- [12] GAUTHIER-LAFAYE F. 2 billion year old natural analogs for nuclear waste disposal: the natural nuclear fission reactors in Gabon (Africa)[J]. Applied Physics, 2002, (3): 164 - 169.
- [13] POMIES C, HAMELIN B, LANCELOT J, et al. 207Pb/206Pb and 238U/230Th dating of uranium migration in carbonate fractures from the Palmottu uranium ore(southern Finland)[J]. Applied Geochemistry, 2004, 19(3): 461 - 467.
- [14] NEGREL P, CASANOVA J, BLOMQUIST R. Nd isotopes and water mixing phenomena in groundwater from Palmottu(Finland)[J]. Wat. Res., 2001, 35(3): 835 - 843.
- [15] Villar L P, BRUNO J. The uranium ore from Mina Fe(Salamanca, Spain) as a natural analogue of processes in a spent fuel repository[J]. Chemical Geology, 2002, 21: 395 - 415.
- [16] HENGDRY M J, SCHWARTZ F W. The chemical evolution of groundwater in the Ivilk River aquifer, Canada[J]. Groundwater, 1990, 28: 253 - 261.
- [17] International Atomic Energy Agency(IAEA). Hydrogeological investigation of sites for the geological disposal of radioactive waste[R]. ISSN0074 - 1914, 1998.
- [18] WITHERSPOON P A, BODVARSSON G S. Geological challenges in radioactive waste isolation-third worldwide review[R]. [S. l.]: [s. n.], 2001.