

李杰彪,周志超,赵敬波,等. 高放废物处置库新场预选地段及南部下游地区地下水循环特征研究[J]. 世界核地质科学, 2025, 42(3): 471-484. doi: 10.3969/j.issn.1672-0636.2025.03.001

LI Jiebiao, ZHOU Zhichao, ZHAO Jingbo, et al. Groundwater circulation characteristics of Xinchang preselected site and the southern periphery in Beishan area for high-level radioactive waste disposal repository[J]. World Nuclear Geoscience, 2025, 42(3): 471-484 (in Chinese).

高放废物处置库新场预选地段及南部下游地区地下水循环特征研究

李杰彪,周志超,赵敬波,张明,季瑞利,吉子健,直越昊,田震

1 核工业北京地质研究院, 北京 100029

2 中国国家原子能机构高放废物地质处置创新中心, 北京 100029

摘要 水文地质条件是高放废物处置库选址和长期性能安全评价的重要依据, 开展地下水循环特征研究尤为重要。以我国高放废物地质处置库北山新场预选地段及南部下游地区为研究区, 综合采用多种环境同位素、地下水动力学以及数值模拟等方法, 对区内地下水循环交替特征进行了深入研究。结果表明: 浅部松散岩类地下水主要补给来源为现代大气降水, 年龄一般小于 30 a; 深部基岩裂隙水交替、运移十分缓慢, 地下实验室场址内深部地下水 ^{14}C 表观年龄大于 10 ka; 且区内地下水均未发现来自深部壳源和幔源水的补给; 新场地段内地下水水位的垂向分层特征明显, 均呈现浅部水头高而深部低的现象; 远离沟谷的钻孔地下水与降水的关系不密切, 地下水位多呈现周期性波动; 地下水流系统可分为区域、中间和局部 3 个级次。局部水流系统循环交替作用最为活跃, 水循环量接近总量的 80%。区内的水文地质条件有利于高放废物地质处置, 该结果为高放废物处置库选址提供依据。

关键词 地下水循环; 环境同位素; 地下水动态; 数值模拟; 高放废物处置

中图分类号 P641.3 文献标志码 A 文章编号 1672-0636 (2025) 03-0471-14

Groundwater circulation characteristics of Xinchang preselected site and the southern periphery in Beishan area for high-level radioactive waste disposal repository

LI Jiebiao, ZHOU Zhichao, ZHAO Jingbo, ZHANG Ming, JI Ruili, JI Zijian, ZHI Yuehao, TIAN Zhen

1 Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China

2 CAEA Innovation Center for Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste, Beijing 100029, China

Abstract: Hydrogeological conditions are crucial for the site selection and long-term safety assessment of high-level radioactive waste (HLW) disposal repositories. This study focuses on the groundwater circulation characteristics of Xinchang preselected site and its southern periphery of the Beishan area for HLW disposal.

基金项目: 中核集团研发平台稳定支持科研项目 (编号: 中核科发[2024]468号) 资助

收稿日期: 2025-05-15 改回日期: 2025-05-26

第一作者: 李杰彪, 男, 1987年生, 高级工程师, 博士, 主要从事水文地质、核废物地质处置方面的研究。E-mail: hgylijiebiao@126.com

Supported by Stable Support Program for Scientific Research Projects of the China National Nuclear Corporation R & D Platform (No. CNNC-STD [2024]468)

Received date: 2025-05-15 revised date: 2025-05-26

First author: LI Jiebiao, male, born in 1987, senior engineer, PhD, focusing on hydrogeology and geological disposal of nuclear waste. E-mail: hgylijiebiao@126.com

A comprehensive approach employing multiple environmental isotopes, hydrodynamics, and numerical modelling was used to investigate groundwater circulation within the study area. Results indicated that groundwater in shallow loose sediments exhibited relatively rapid renewal rates, with an average age generally less than 30 years. The apparent ^{14}C age of deep bedrock groundwater generally exceeding 10 ka within the underground research laboratory (URL) site. There was no evidence of contributions from deep crustal or mantle sources to groundwater within the region. Within the Xinchang site, the groundwater head shows pronounced vertical stratification, with a higher hydraulic head in shallow zones than in deeper ones. Groundwater in boreholes distant from the gully shows weak hydraulic connectivity with precipitation, and the groundwater level often exhibits periodic fluctuations. The groundwater flow systems can be categorized into three types: regional, intermediate, and local. The local flow system was the most active, accounting for over 80 % of the total flux. These characteristics showed that the hydrogeological conditions in the study area were favorable for the geological disposal of HLW.

Keywords: groundwater circulation; environmental isotope; groundwater dynamics; numerical simulation; high level radioactive waste disposal

放射性废物是核工业发展的必然产物,其中高放废物具有毒性大、半衰期长和释热率高等特点,能否对其进行安全处置已成为关系到我国核工业可持续发展和环境保护的战略课题^[1]。目前,深地质处置是安全处置高放废物的唯一可行方式,安全隔离时间要求 1 万年甚至更长^[2]。高放废物地质处置库场址筛选过程中水文地质问题是必须解决的关键问题之一。在高放废物地质处置库中,地下水是放射性核素迁移的主要载体^[3]。地下水循环涵盖地下水补给、径流和排泄 3 个方面的内容,是水文地质条件评价的核心内容。

地下水循环具有系统性,即在一定的时空范围内保持某种整体上的相对独立性,又具有内部结构而且各个组成部分之间存在密切相互作用^[4]。基岩裂隙介质具有明显的非均质性和各向异性,其地下水循环交替规律十分复杂,传统方法在应用时受到诸多限制,而同位素技术利用地下水组分在原子核层面的活动特性来识别地下水的运移过程,为研究低渗透基岩裂隙水的运动提供了有效手段^[5]。D、 ^{18}O 稳定同位素是识别地下水来源的有效工具,大气降水线因同位素交换发生的演化和分异在 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 关系图中可以用 13 条过程线很好地解释^[6]。稀有气体具有化学惰性,且同时不同端元之间差异明显,使它们成为地下水相关研究中理想的示踪剂^[7]。稀有气体作为示踪剂可进一步加深对地下水径流路径、地下水的排泄位

置和排泄量、含水层之间的连通性和地下水滞留时间的认识^[8-12]。地下测年被广泛用于基岩地区地下水循环特征研究中,常用于古地下水测年的同位素主要包括 ^{14}C 、 ^{81}Kr 、 ^{36}Cl 、 ^4He 和 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 等^[13]。不同同位素测定的地下水年龄范围不同,一般为其半衰期的 0.1~10 倍。 ^{14}C 是最为常用的测定古地下水年龄的方法之一,特别适合晚更新世以来的古地下水测年研究,其最佳测年时段介于 1~40 ka 之间。由于各种同位素获得的信息类型不同,且单一环境示踪剂获得信息有限。因此,需要综合分析场址的水化学场、同位素场和水动力场才能进行深入的定量研究^[14]。国际上诸如瑞典 Äspö、芬兰 ONKALO 等在开展处置库场址地下水循环特征研究时均采用了多种方法相互验证的方式^[15-16]。

我国处置库选址工作主要聚焦在甘肃北山地区,并于 2011 年确定该区域为我国高放废物地质处置库首选预选区。北山地区相继开展了旧井、新场、野马泉、算井子和沙枣园等 5 个预选地段的选址和场址评价工作^[17]。经过近 40 a 的工作,现已完成处置库场址区域筛选和地下实验室场址筛选等工作^[18]。目前,正在北山新场预选地段建设我国首座高放废物地质处置地下实验室^[19],开展地下实验室场址安全评价及其未来作为处置库的潜力迫在眉睫^[20]。从区域地下水循环角度考虑,南部下游地区更靠近人类环境,新场地段深部地下水存

在向下游侧向补给河西走廊地下水系统的可能。因此,开展北山新场预选地段及南部下游地区地下水循环特征研究具有十分重要的现实意义。

本研究综合采用多种环境同位素、地下水动力学以及数值模拟等方法,对新场预选地段及南部下游地区地下水循环交替特征进行了深入研究,这些工作一方面可为后期开展的处置库选址和性能评价提供数据支撑;另一方面,对丰富低渗透基岩裂隙地区的水文地质研究也具有积极意义。

1 研究区概况

1.1 自然地理条件

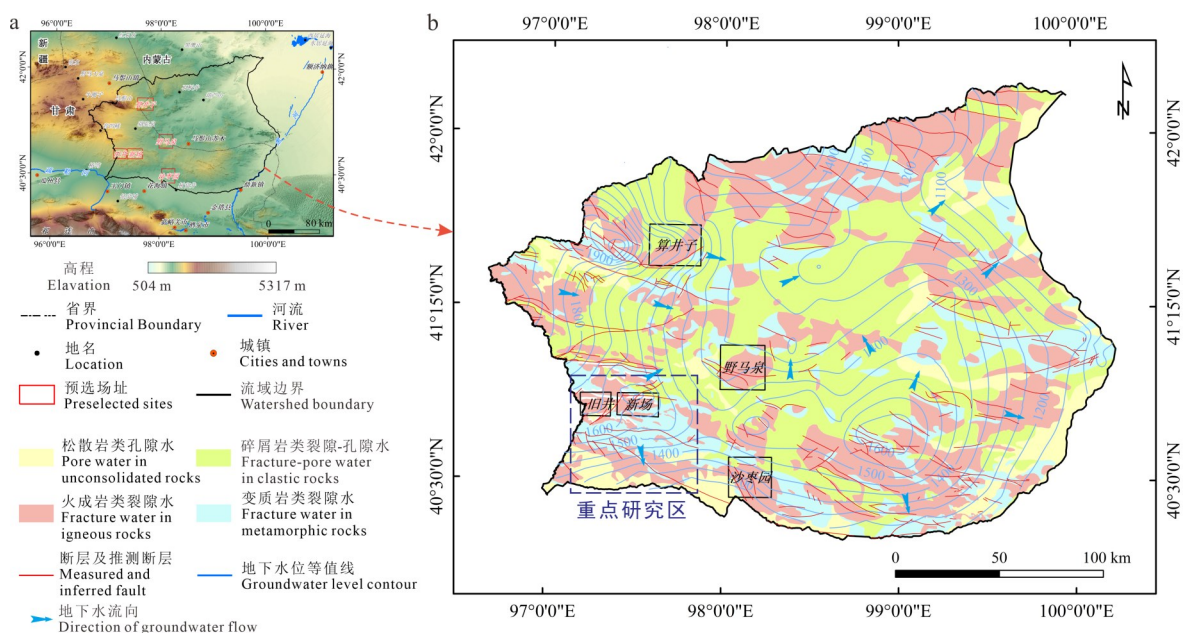
研究区为我国典型的干旱地区,位于甘肃省河西走廊以北,黑河流域以西(图1a)。区内总体地势相对平缓,植被稀少,基岩裸露。区内降水量小,蒸发量大,干燥多风,冬冷夏热。区内多年平均降水量约70 mm,且区降水具有明显的季节性特点,降水主要集中在6~8月,且雨季多以暴雨形式出现。区内年平均蒸发量约为3 200 mm;年平均气温介于4~7℃之间,日温差很大;风向多为西北风、西南风。研究区无常年性河流,所有地表水均来源于间歇

性洪水形成的季节性沟谷流^[5]。该区地表沟谷十分发育,主要呈EW向分布。区内基本上无长住居民,只有少数牧民分散居住。

1.2 地质、水文地质条件

研究区位于塔里木板块东北缘,具有长期的地质演化历史和复杂构造样式。区内地层分布复杂,出露由元古界至第四系较齐全的地层。从区域大地构造演化历史来看,北山地区位于中亚造山带的最南缘。在古生代经历了增生造山运动,在中生代经历了陆内变形,并在新生代变得稳定。没有历史性的>4.7级地震记录。区内断裂的活动时期集中在前第四纪,晚更新世以来,大部分断裂已停止活动。区内EW向或近EW向展布的构造形迹居于主导地位,其次为NE向和NE向断裂,它们共同构成本区的主要构造格架。区内地层分布复杂,出露由元古界至第四系较齐全的地层。

北山地区区域地下水的主流向是自西向东流动,排泄区为黑河下游流域,南部靠近河西走廊一侧地下水主流向为自北向南,排泄区为河西走廊地区。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4种类型:松散岩类孔隙水、碎屑岩类裂隙-孔隙水、变质岩类裂隙水和火成岩类裂隙水(图1b)。



a—DEM影像图; b—水文地质简图。

a—DEM based image; b—Hydrogeological sketch map.

图1 北山地区DEM影像图和水文地质简图

Fig. 1 DEM based image and hydrogeological sketch map of the Beishan area

2 材料与方法

2.1 样品采集与分析

本次研究共采集地下水样品 58 组,多数水井在采样前已经连续进行抽水,少部分水井在采样前抽水半个小时以上。钻孔中地下水样品利用 Packer 水文地质试验系统采集,采样标准为抽水水样中荧光素钠浓度降为初始浓度的 1% 以下(钻孔施工过程中钻井液中添加了 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度的荧光素钠作为示踪剂)。现场采样结束后,室内尽快用 $0.45 \mu\text{m}$ 的过滤膜过滤,将滤液装入干燥洁净的聚乙烯塑料瓶中,用封口膜密封后置于 4°C 保温箱中冷藏保存。地下水中溶解气体样品采用现场脱气方式进

行采集。

同位素 ^{18}O 、D 和 ^3H 在核工业北京地质研究院测试,稳定同位素 ^{18}O 、D 采用 MAT-253 型稳定同位素质谱仪测定,并以维也纳标准平均海洋水(V-SMOW)作为参照标准,分析精度分别为 $\pm 0.1\%$ 和 $\pm 1.0\%$ 。 ^3H 样品检测仪器为 Quantulus 1220-003 低本底液闪仪,检测下限为 1.2 TU,不确定度小于 ± 1 TU。稀有气体的同位素比值($^3\text{He}/^4\text{He}$ 、 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 等)在中国科学院地质与地球物理研究所兰州油气资源研究中心测定,测试设备为 Noblesse 质谱仪,设备灵敏度 $>1.3 \times 10^{-5} \text{ A/Pa}$ 。 ^{14}C 样品测试由美国的 BETA 实验室采用加速质谱仪(AMS)完成,测试误差小于 1%。

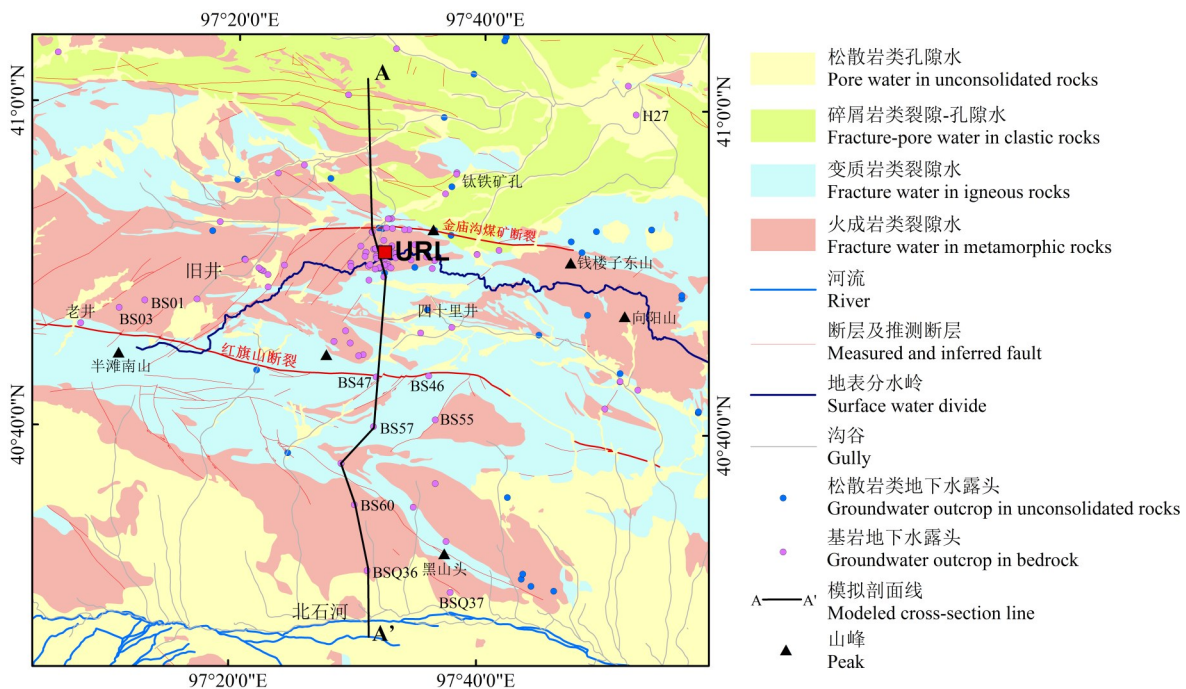


图2 新场地段及南部下游地区水文地质调查点示意图

Fig. 2 Map showing the hydrogeological investigation sites in Xinchang site and its southern periphery

2.2 地下水测年原理

地下水年龄是指水在地下存留的时间,即水进入地下这一“事件”至今的时间,通常是地下水的平均滞留时间即地下水的平均年龄,其有助于定量评价地下水的循环交替速度^[21]。

2.2.1 氡同位素测年

环境同位素氡(^3H)半衰期为 12.43 a,可区分 1953 年以前形成“老水”与 1953 年后形成“新水”^[22]。前人研究表明,本区浅部松散岩类

地下水多为现代水,但前期采样点数量极其有限且仅为定性分析^[5]。为深入认识区内浅部地下水年龄的空间分布特征,本研究采用氡同位素进行分析。现场水文地质调查发现,区内民井的深度大都小于 10 m,且垂直入渗补给量极其有限。因此,地下水发生弥散程度小,符合活塞流(PFM)模型假设。因此,本次采用 PFM 模型计算区内浅部地下水年龄。

PFM 模型假设地下水在含水层中流动类

似于活塞运动, 相邻输入水体间不发生混合, 输出水体年龄是其在系统中的平均运移时间, 其表达式为:

$$C_i = C_0 e^{-\lambda(t_i - t_0)} \quad (1)$$

式(1)中: C_0 —原始氡输入浓度; C_i —氡输出浓度; λ —放射性核素衰变系数($\lambda_{\text{氡}}=0.05626 \cdot a^{-1}$); t_0 和 t_i 分别为氡同位素输出时间和输入时间。

2.2.2 ^{14}C 同位素测年

放射性碳测年原理是给定样品中的母放射性核(^{14}C)的衰减。表观地下水年龄假设地下水中溶解无机碳(DIC)全部来自交换库(如土壤 CO_2), 其表达式为:

$$\tau = \frac{5730}{\ln 2} \ln\left(\frac{^{14}\text{C}_0}{^{14}\text{C}_{\text{DIC}}}\right) \quad (2)$$

式(2)中: τ —地下水的表观年龄, a; 5730—放射性元素 ^{14}C 的半衰期; $^{14}\text{C}_0$ —补给时初始 DIC 的 ^{14}C 浓度(pMC), 一般设定为核试验前大气中 CO_2 的水平, 约为 100 pMC; $^{14}\text{C}_{\text{DIC}}$ —地下水样品中的 DIC 含量。

2.3 地下水动力学特征

通过分析研究区地下水流场和水位垂向

分层特征, 能够直观判断地下水的潜在流动方向、水力梯度等信息, 这为分析地下水循环交替规律提供了最直接有利的证据^[23]。基于此, 本节首先基于三口(BS36、BS37 和 BS39)已安装的钻孔分层监测设备所获取的数据, 对场址内水位的垂向分层特征进行了分析, 钻孔分层监测设备为加拿大斯伦贝谢公司生产的 Westbay 分层监测系统。其次, 利用调查的近 80 个基岩裂隙水露头数据绘制了新场地段及南部下游地区等水位线图。自 2012 年起, 北山地区逐步开展了系统的地下水监测工作。目前, 场址内绝大部分已施工的钻孔均在进行了全孔动态监测。监测设备选用加拿大 Solinst 公司生产的 Level Logger 传感器, 水位监测精度 $\pm 0.05\%$ FS, 水温监测精度 $\pm 0.05\text{ }^\circ\text{C}$ 。为进一步查明关于地下水形成以及循环更新能力等方面的信息, 选取未受人为活动影响的(主要为北山地下实验室施工)、监测周期长的四口钻孔(BSQ06、BS12、BS06 和 BS33, 具体位置见图 3)进行分析。为排除人为因素干扰, 本研究仅选用地下实验室施工前的钻孔监测数据。

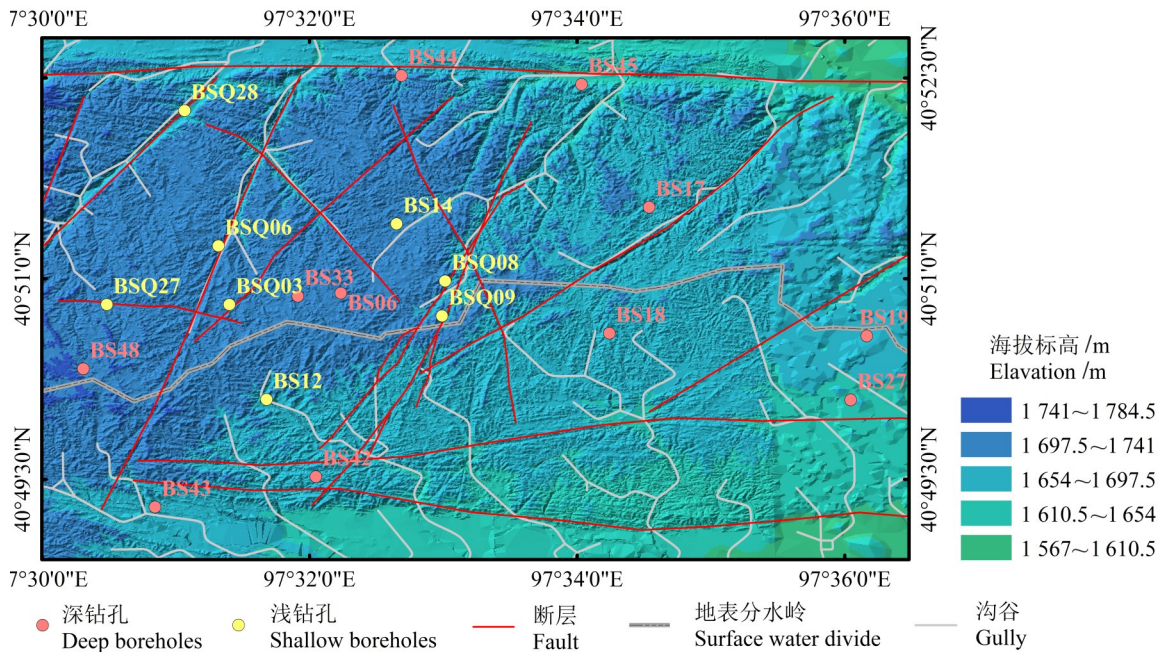


图 3 新场地段监测钻孔位置分布图

Fig. 3 Location distribution of monitoring boreholes in Xinchang sector

2.4 剖面二维流数值模拟

为进一步揭示区内地下水的循环规律, 预测地下水从新场重点地段到排泄区地下水的

运移时间, 确定不同位置和深度地下水循环更新能力, 采用 PetraSim 软件建立了研究区 SN 向垂向剖面二维变饱和和稳定流数值模型^[24]。模

拟剖面 A-A' 全长约 56 km(图 2),模型北部边界为地下实验室场址附近地表分水岭以北 15 km 处,南部边界为北石河附近。考虑了穿过剖面的两条主要断层,由北向南依次为金庙沟煤矿断裂和红旗山断裂。模拟剖面南北边界概化为定水头边界;剖面上边界概化为大气边界;剖面下边界与外界水量交换极小,概化为隔水边界。

根据地质调查以及野外补充调查结果,研究区主要岩性由渗透率较低的变质岩、花岗岩以及沉积岩组成,部分区域上覆第四系沉积物,孔隙和裂隙为区内主要含水介质。本次模拟剖面垂向上共划分 140 个单元,水平方向不规则剖分为 323 个单元,共划分为 45 220 个网格块^[24]。考虑模型底界水平,最低模拟深度为 650 m。本次模拟主要考虑穿过剖面的两条主要断层选择等效连续介质法对断层进行加密处理。本研究采用质点追踪方法获取地下水流动路径,进而识别不同级次地下水流系统结构。

3 结果与讨论

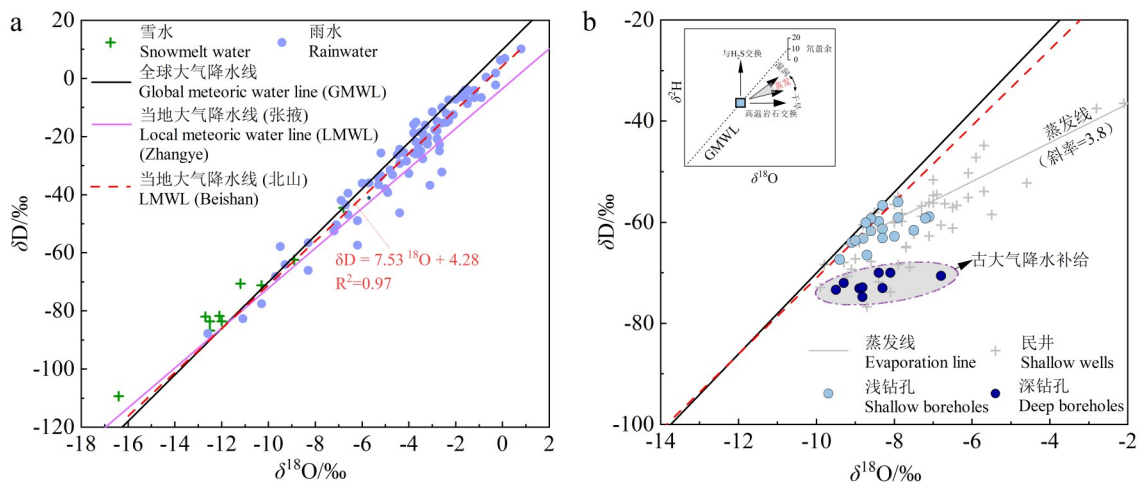
3.1 地下水补给来源

3.1.1 稳定同位素

基于 2012—2020 年采集的 100 件大气降水样品(88 件雨水样品,12 件雪水样品),采用

最小二乘法求得了北山地区的当地大气降水线(LMWL),计算结果为 $\delta D = 7.53 \delta^{18}O + 4.28$ (图 4a)。整体而言,北山地区地下水中氢氧稳定同位素分布较为分散,特别是在民井中采集的地下水样品。不同来源的地下水距离 LMWL 的位置不同,通过比较这些差异,能够有效识别地下水的补给来源,并确定补给区的海拔、纬度和温度等参数^[22]。由图 4b 可知,样品主要位于 LMWL 的附近和右下侧,说明区内地下水主要补给来源于当地降水的入渗。靠近 LMWL 附近的水点,多取自地下水循环较快的沟谷内,受蒸发浓缩作用影响较弱。而位于 LMWL 右下侧的水点,主要取自地下水排泄区,地下水重同位素相对富集可能受蒸发作用影响所致。选取氡浓度大于 10 TU 的浅层松散岩类地下水绘制的蒸发线斜率约为 3.8。

相关研究表明,我国西北地区降水中 $\delta^{18}O$ 和月平均气温之间具有较强的相关性: $\delta^{18}O = 0.31T(^{\circ}C) - 12.69 \text{‰}$ ($R^2 = 0.45$)^[25]。据此估算,对于浅部松散岩类地下水而言,大气降水补给的平均月气温约为 17.4 $^{\circ}C$,这与北山地区夏季的平均气温一致。此外,区内降水主要集中在 6—8 月,占全年总降水量的 60% 以上。相比之下,冬季降雪量不足全年降水量的 10%。由此可知,北山地区浅层地下水主要源自夏季降雨的入渗补给。



a—北山地区大气降水线; b—地下水氢氧稳定同位素与大气降水线的关系。

a—MWL in Beishan area; b— δD and $\delta^{18}O$ levels in the groundwater samples.

图 4 稳定同位素分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of the stable isotope δD and $\delta^{18}O$

与浅部地下水样品不同, 取自钻孔深部的地下水样品均位于 LMWL 线右下方, 且地下水中同位素更加贫化, 这可能与寒冷气候条件下的古大气降水入渗补给有关^[26]。研究表明, 区内深部地下水 ^{14}C 的表观年龄一般大于 $8\text{ ka}^{[5]}$, 该时间段所对应的地质年代为早全新世和晚更新世。受冰川运动影响, 在这一时期, 全球大气温度明显低于现今, 并且在 8.2 ka 左右发生了一次显著的降温事件^[27]。因此, 该区深部地下水主要来自寒冷气候条件的下古大气降水入渗补给。

3.1.2 气体同位素

稀有气体基本不参与化学反应, 其同位素是识别幔源气体最佳的地球化学示踪剂^[28]。利用 He 同位素 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值可以研究地壳与地幔的物质来源比例, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值通常用 R 表示; 利用 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比值判别大气对于样品的影

响。为研究 He 同位素的组成特征及来源, 通常将 R/R_A 比值与 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比值结合使用^[29]。由图 5 可知, 取自浅部松散沉积物中的全部地下水均落在大气端元附近, 说明地下水中氦的主要来源为大气成因。这些水点多紧邻沟谷, 地下水径流条件好, 循环更新速率快, 与大气关系密切。取自浅钻孔中的地下水样品也靠近大气端元。这些水点水位埋深一般较浅, 含水系统与大气交换畅通。而取自深钻孔中的地下水样品均远离大气端元, 落在大气与地壳连线附近。地下水中氦主要来源为大气和原位放射性衰变, 进一步说明本区深部地下水起源于当地大气降水入渗补给。尤其是取自地下实验室场址内 BS28 号钻孔 355~484 m 深度段的溶解气体中 R/R_A 比值仅为 0.03, 反映出地下水在含水层系统中经历了很长时间的“水-岩”作用。

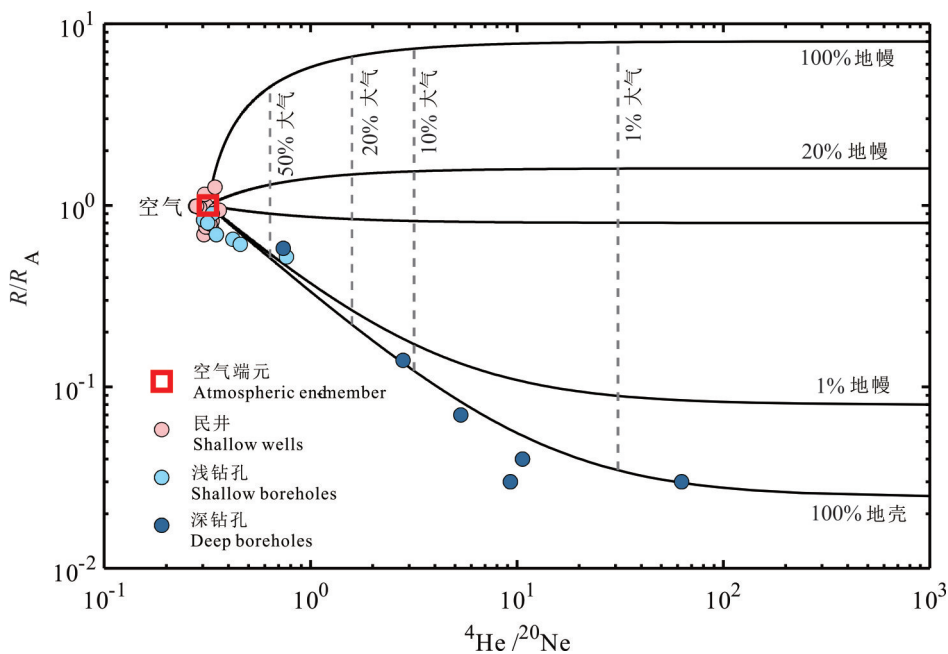


图 5 地下水中 R/R_A 与 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 关系图

Fig. 5 Correlation between R/R_A and $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ ratios in the groundwater

3.2 地下水测年研究

3.2.1 浅部地下水年龄

地下水氡含量的高低可定性揭示地下水在地下平均径流时间的长短^[30]。区内浅部地下水氡含量分布在 $<1.2\text{ TU} \sim 38.12\text{ TU}$, 多大于 3 TU , 这反映了浅部地下水系统的开启性较好, 径流速度较快。氡含量小于 3 TU 的水点多

位于山间盆地或山间洼地中, 地下水径流条件差, 矿化度较大, 且受蒸发作用明显。大部分位于基岩裂隙中的浅部地下水氡含量也较低, 多低于检测下限, 说明浅部基岩裂隙水径流条件差, 循环交替较差, 地下水年龄较老。地下实验室场址附近浅钻孔中获取的地下水氡含量也小于检测下限。进一步分析研究区浅部

地下水年龄空间分布特征(图 6),可知新场地段内沟谷内民井地下水年龄普遍在 20 a 以内,

而位于排泄区附近民井地下水年龄普遍大于 60 a。

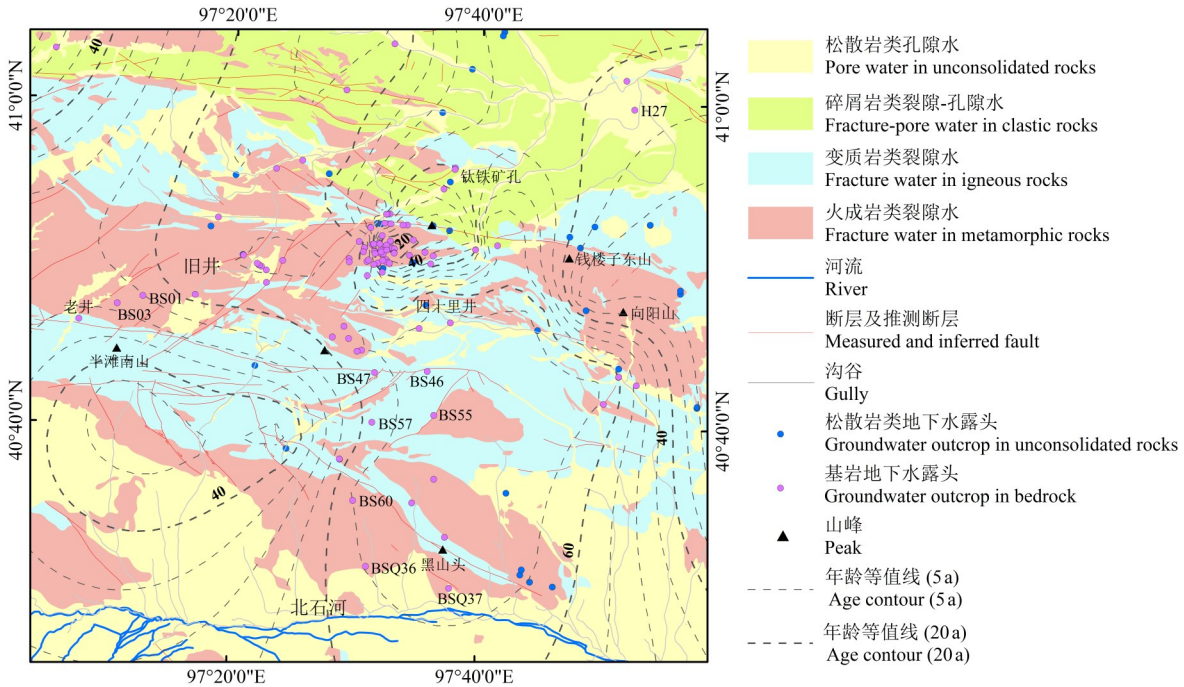


图 6 新场地段及南部下游地区浅部地下水年龄分布图

Fig.6 Spatial distribution of shallow groundwater age in Xinchang site and its southern periphery

3.2.2 深部地下水年龄

深部地下水样品的取样深度以及 ^{14}C 测试结果等信息列于表 1。由表 1 可知,新场地段内浅部基岩裂隙水的表现年龄介于 3.60~5.40 ka 之间,地下实验室场址内 BS28 号钻孔 355~484 m 深度段采集的深部地下水 ^{14}C 表现年龄高达 13.2 ka,这说明深部地下水的循环交替能力极其微弱,即

地下水的渗透能力很差,这对高放废物处置极为有利。BS46 钻孔位于新场南部韧性剪切带中,地下水表现年龄高达 28.99 ka,地下水在径流途径内循环速率极其缓慢。理论上,千年以上古地下水中的 ^3H 取值应为 0 TU,但在 BS49 和 BSQ36 两口钻孔中均监测到少量 ^3H ,说明其地下水同时接受少量现代水的补给,但新水所占比例很小。

表 1 新场地段及南部下游地区深部地下水 ^{14}C 表现年龄

Table 1 ^{14}C apparent age of deep groundwater in the Xinchang area and its southern periphery

钻孔	取样深度/m	pMC	$^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$\delta\text{D}/\text{‰}$	表现年龄/ka	$^3\text{H}/\text{TU}$
BSQ11	33~89	63.60±0.20	-11.40	-8.30	-56.70	3.70	<1.3
BSQ12	31~87	52.20±0.20	-10.30	-8.40	-59.80	5.40	<1.3
BS34	88~109	64.70±0.20	-10.60	-8.60	-59.30	3.60	<1.3
BS28	355~484	20.30±0.20	-11.10	-9.30	-72.00	13.20	<1.3
BS46	56~103	3.00±0.00	-2.90	-9.50	-73.33	28.99	<1.3
BS49	94~107	66.70±0.20	-9.00	-9.10	-64.03	3.35	2.6±0.3
BS60	59~300	68.00±0.20	-8.70	-8.73	-60.12	3.19	/
BSQ36	37~101	27.74±0.10	-7.20	-8.82	-74.77	10.60	2.0±0.6

3.3 地下水动力学特征

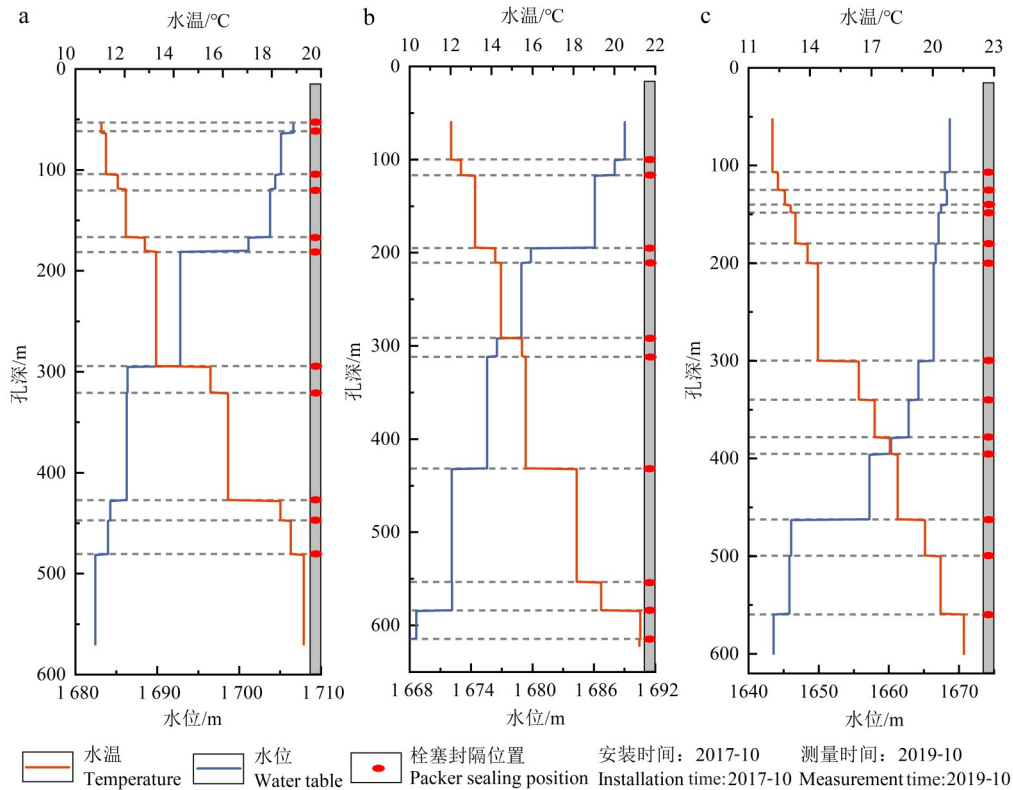
3.3.1 地下水垂向分层特征

由图 7 可知,BS36、BS37 和 BS39 三口钻孔

地下水位垂向分层特征明显,均呈现水头浅部高深部低的现象,地下水具有向下渗流的趋势,三口钻孔浅部和深部水头差分别约 24 m、

22 m 和 25 m, 水头差较大, 呈现典型的补给区特点^[31]。此外, 监测孔内地下水水温随深度增加而升高, 地温梯度平均值分别约为 1.93 °C/100 m、1.71 °C/100 m 和 1.84 °C/100 m, 水温梯

度较为接近, 未见温度异常。前人调查发现, 南部花海盆地地温梯度平均值约为 2.35 °C/100 m^[32], 明显大于新场地段地温梯度, 也从侧面反映出新场地段为补给区的特点。



a—BS36 钻孔; b—BS37 钻孔; c—BS39 钻孔。

a—BS36; b—BS37; c—BS39.

图 7 新场地段地下水水位水温垂向分层特征

Fig. 7 Vertical zonation characteristics of water heads and temperatures in Xinchang site

3.3.2 地下水水流场特征

利用已施工的钻孔和本次研究调查的基岩裂隙含水层的水井水位资料, 绘制了区内浅部裂隙水等水位线图(图 8)。总体而言, 新场地段及南部基岩裂隙水位总体呈现北西部较高, 北东、南东低的特点, 与地形起伏基本一致。新场-山前地带地形总体上呈现北高南低的特征, 但红旗山断裂为局部小分水岭, 断层以南地表径流近似于南北方向流动, 而北部地表径流受则向东流动。新场地段及南部水力梯度分布不均: 红旗山断层至向阳山以南水力梯度较高, 介于 12%~22% 之间, 地下水总体流向为南东方向; 四十里井至向阳山一线至北部 H27 钻孔一带水力梯度较低, 介于 4%~6% 之间, 地下

水总体流向为近 EW 向。

新场地段内基岩裂隙水南东方向的径流途径为: 基岩裂隙水流出新场地段后, 沿四十里井洼地向南东方向流动, 主要径流途径在韧性剪切带北部, 与地表径流路径基本一致, 基本无法跨越韧性剪切带向南部直接流动。尤其在 BS46 钻孔附近, 地下水流向与断层走向基本一致, 这也从侧面进一步证明了红旗山断裂对南北两侧地下水具有一定的阻滞作用。此外, 董艳辉等^[33-34]开展了新场—花海盆地地下水流动模式研究, 结果也表明红旗山断裂带北侧的地下水受阻于此处构造及基岩的低渗透性, 不能向正南方向径流; 南侧的深部地下水受地形控制向南径流(图 8)。

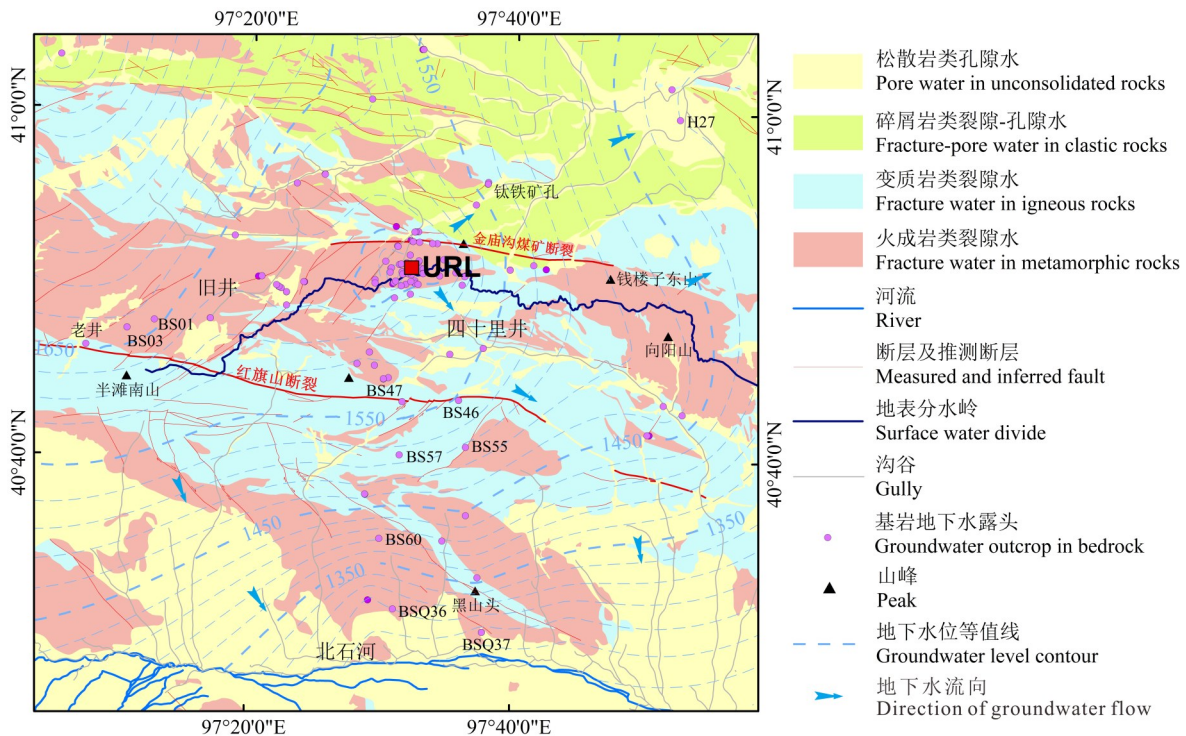


图8 新场地段及南部下游地区浅部裂隙水等水位线图

Fig. 8 Contour lines of shallow bedrock groundwater in Xinchang site and its southern periphery

3.3.3 地下水动态特征

前期研究结果表明:区内绝大部分钻孔地下水动态类型属于弱入渗-弱径流型。为进一步分析地下水位对大气降水的响应,本节选择新场地段内靠近沟谷和位于相对完整基岩内的四口钻孔进行分析。结果表明:紧邻沟谷的BSQ06、BS12两口钻孔明显受降雨的影响,且水位滞后时间短(图9a)。特别是对于BS12钻孔,水位埋深浅,雨季水位波动频繁,历次大规模降雨后水位曲线均存在局部小波峰,说明该钻孔与降雨关系极为密切。此外,两口钻孔地下水水温呈现周期性波动,波峰均出现在12月份左右,波谷出现在6月份左右。然而,这两口钻孔水温变化与气温的变化基本相反,且水位埋深均较浅。结合现场水文地质条件分析认为,这主要与大气降水入渗补给有关,由于雨水温度相对地下水而言偏低,从而导致地下水温度在雨季较低。

BS33、BS06两口钻孔位于新场地段相对完整基岩内,远离沟谷和断层。两口钻孔水位曲线形态相似。两口钻孔受降水荷载影响小,历次降水后均无明显的水位波动(图9b)。且波谷均出现在9月份前后,而波峰出现在第2年1

月份左右。水位形态也呈现上升段较陡而下降段较缓的形态,这反映出钻孔井所在区域地下水径流非常缓慢^[35]。

3.4 剖面二维流数值模拟

选择穿过剖面的十二口钻孔多年平均水位作为观测点,对模拟计算水位与观测水位进行比对。结果表明:大多数钻孔模拟水位与实测水位误差在10 m以内,拟合程度较高,误差纳什效率系数为0.989,模拟结果较为理想^[24]。依据地下水系统理论,该典型剖面发育有三级地下水系统,即局部、中间和区域地下水流动系统(图10a)。不同级次流动系统在循环深度、循环通量和地下水年龄等方面差异显著。

局部水流系统多发生在100 m以浅,最大循环深度约350 m,地下水循环通量很大,约占总循环水量的79.25%,地下水年龄大多小于1 ka(图10b),地下水循环交替能力较好,这与前述求得的结果相一致。中间地下水流动系统循环深度普遍在400 m以上,最高接近500 m,水循环量占总量的13.24%,地下水年龄多超过10 ka,地下水循环、交替能力差^[24]。区域地下水流动系统循环深度超过500 m,水循环量仅占总量的7.51%,地下水年龄普遍超过20 ka,循环更新能力极差。

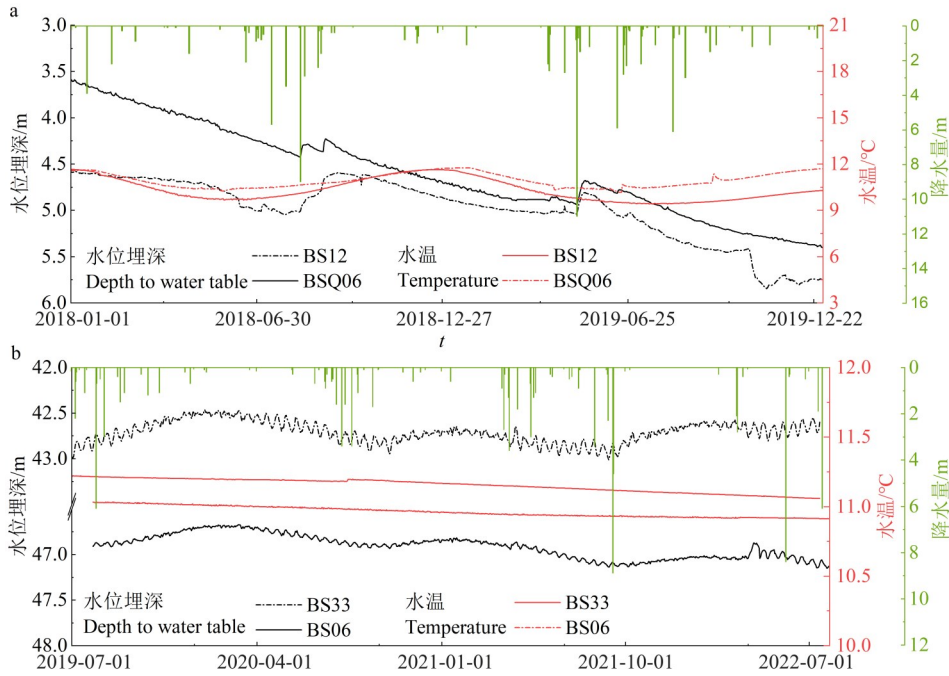
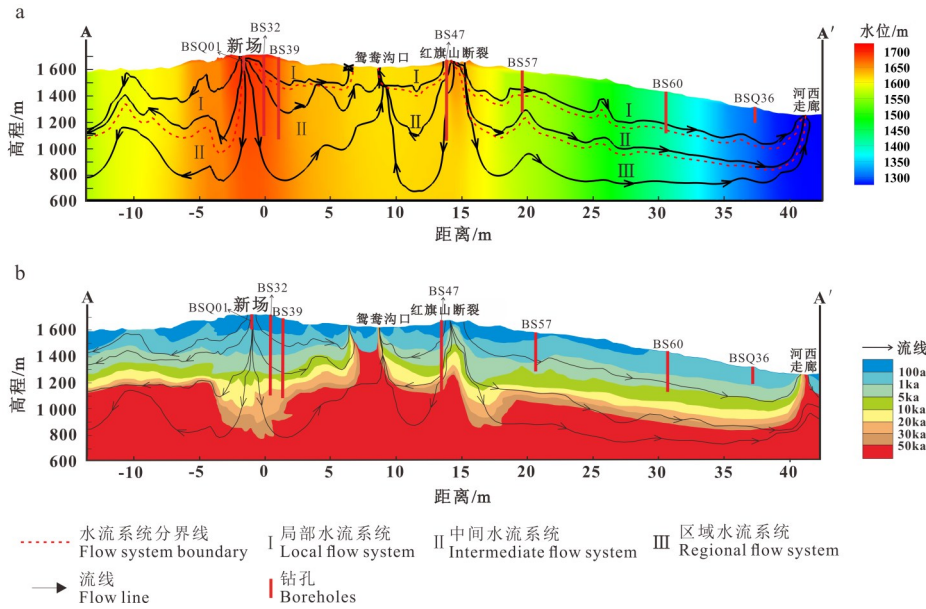


图9 部分钻孔地下水长期动态监测结果

Fig. 9 Long-term monitoring results of groundwater dynamics in selected boreholes



a—剖面水流系统划分; b—剖面地下水年龄分区。

a—Flow system divisions; b—Groundwater age zoning.

图 10 剖面水流系统划分及地下水年龄分区(据参考文献[24]修改)

Fig. 10 Groundwater flow system and age zoning along the cross-section(modified after reference[24])

3.5 新场重点地段地下水流动模式

基于上述分析,新场重点地段内地下水的主要循环流动模式可以概化为:区内降水的直接入渗和沟谷洪流的渗漏首先形成了沟谷孔隙-裂隙水,但就接受的补给量而言,沟谷洪流的渗漏是区内浅部地下水形成的主要补给途

径。据现场实测数据,沟谷地下水水位通常高于两侧丘陵区水位,水头差一般在数米左右。在水头差的驱动下,沟谷地下水向两侧地形较高的广大的低山丘陵区侧向径流,使低山丘陵区含水介质得到侧向补给,形成了大范围

而言,其直接接受的降雨入渗补给量极其微弱。在垂向水头差的驱动下,浅部基岩裂隙水继续向下缓慢入渗形成深部基岩裂隙水。并且,在场址深度范围内,来自马鬃山地区和其他来源(包括深部原生水、生物地球化学反应产生的水等)的地下水水量极其有限。同时,

沟谷孔隙-裂隙水和基岩裂隙水又在区域水动力场的驱动下,不断地向下游流动,一部分沿途以蒸发的形式排泄;另一部分汇集于南部河西走廊地区和东北部黑河下游地区,从而完成了地下水的循环过程,周而复始,永不停歇(图12)。

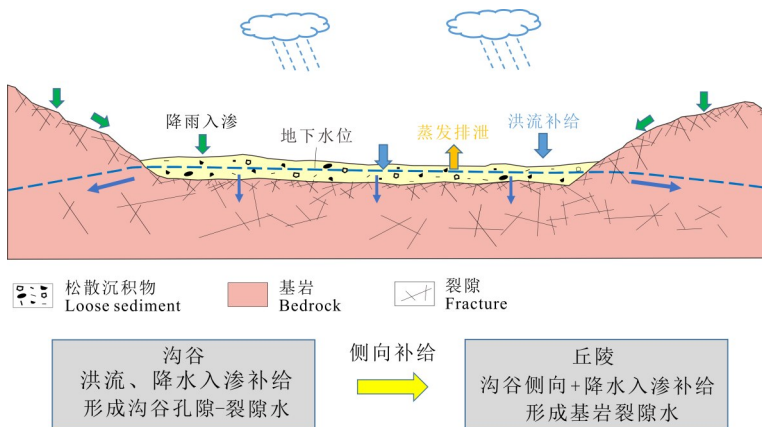


图 11 新场重点地段沟谷洪流入渗补给模式

Fig. 11 Infiltration recharge pattern of gully flood in the key sector of Xinchang site

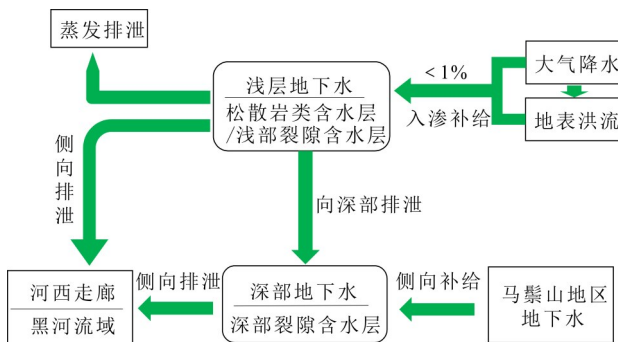


图 12 新场重点地段地下水主要循环流动模式

Fig. 12 Primarily circulating pattern of groundwater in the the key sector of Xinchang site

4 结 论

本研究综合运用环境同位素、地下水动力学以及数值模拟等多种研究方法,研究了我国高放废物地质处置库北山新场预选地段及南部下游地区地下水循环交替特征,揭示了地下水的来源、年龄和水动力特征等情况,建立了研究区SN向垂向剖面二维变饱和稳定流数值模型,并进行了质点示踪模拟,获得以下认识:

1) 同位素分析表明,区内地下水主要来源于当地大气降水入渗补给,且主要受雨季降水影响;深部地下水的主要补给来源为寒冷气候条件下古大气降水入渗补给,且未经历深循环

过程。新场地段内沟谷内民井地下水年龄普遍在 20 a 以内,地下水径流较快,而位于排泄区附近民井地下水年龄普遍大于 60 a;地下实验室场址深部地下水 ^{14}C 表观年龄多大于 10 ka,说明深部地下水交替、运移十分缓慢。

2) 地下水长期动态监测结果表明,靠近沟谷的钻孔对降水响应明显,地下水位变化对降水的滞后时间较短,而位于基岩内的钻孔不直接受大气降水的影响,钻孔多层地下水监测结果表明,地下实验室场址内浅部地下水水头显著大于深部,体现出明显的补给区特点。

3) 北山新场预选地段及下游地区地下水流系统可分为区域、中间和局部 3 个级次。局

部水流系统循环交替作用最为活跃,水循环量接近总量的80%;中间系统水循环作用次之;区域系统水循环作用最差。

4)新场地段内地下水主要循环流动模式为:降水的直接入渗是地下水主要补给来源。但就接受的补给量而言,沟谷洪流的渗漏是浅部地下水形成的主要补给途径。对于大范围的浅部基岩裂隙水而言,其在接受微弱的降雨入渗补给量的同时,主要接受来自洪流渗漏形成的沟谷孔隙-裂隙水的侧向补给。在垂向水头差的驱动下,浅部基岩裂隙水继续向下入渗形成深部基岩裂隙水。

参考文献

- 1 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).
- 2 BIRKHOLZER J, HOUSEWORTH J, TSANG C F. Geologic disposal of high-level radioactive waste: Status, key issues, and trends. Annual Review of Environment and Resources, 2012, (37): 79-106.
- 3 TSANG C F, NERETNIEKS I, TSANG Y. Hydrologic issues associated with nuclear waste repositories[J]. Water Resources Research, 2015, 51(9): 6923-6972.
- 4 TóTH J, ROBERTS W H, CORDELL R J. Cross-formational gravity-flow of groundwater: A mechanism of the transport and accumulation of petroleum (The generalized hydraulic theory of petroleum Migration) [C]//Problems of petroleum migration. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists. 1980.
- 5 郭永海,王海龙,董建楠,等.高放废物处置库芟芟槽预选场址深部地下水同位素研究[J].地质学报, 2013, 87(9): 1477-1485.
GUO Yonghai, WANG Hailong, DONG Jiannan, et al. Isotopic study of deep groundwater in Jijicao preselected site for China's high level radioactive waste disposal reposition[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(9): 1477-1485 (in Chinese).
- 6 PANG Z, KONG Y, LI J, et al. An isotopic geoinicator in the hydrological cycle [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2017, 17: 534-537.
- 7 NIU Y, CASTRO M C, HALL C M, et al. Noble gas signatures in the island of Maui, Hawaii: Characterizing groundwater sources in fractured systems[J]. Water Resources Research, 2017, 53(5): 3599-3614.
- 8 GUMM L P, BENSE V F, DENNIS P F, et al. Dissolved noble gases and stable isotopes as tracers of preferential fluid flow along faults in the Lower Rhine Embayment, Germany [J]. Hydrogeology Journal, 2015, 24(1): 99-108.
- 9 WARR O, SHERWOOD LOLLAR B, FELLOWES J, et al. Tracing ancient hydrogeological fracture network age and compartmentalisation using noble gases [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2018, 222: 340-362.
- 10 COOK P G, DOGRAMACI S. Estimating recharge from recirculated groundwater with dissolved gases: An end-member mixing analysis [J]. Water Resources Research, 2019, 55(7): 5468-5486.
- 11 CASTRO M C, JAMBON A, DE MARSILY G, et al. Noble gases as natural tracers of water circulation in the Paris basin: 1. measurements and discussion of their origin and mechanisms of vertical transport in the basin [J]. Water Resources Research, 1998, 34(10): 2443-2466.
- 12 GARDNER W P, HARRINGTON G A, SOLOMON D K, et al. Using terrigenic ⁴He to identify and quantify regional groundwater discharge to streams [J]. Water Resources Research, 2011, 47(6): W06523.
- 13 LI J B, ZHANG Y-K, ZHOU Z C, et al. Using multiple isotopes to determine groundwater source, age, and renewal rate in the Beishan preselected area for geological disposal of high-level radioactive waste in China [J]. Journal of Hydrology, 2024, 629: 130592.
- 14 SHARP J M. Fractured rock hydrogeology [M]. London: CRC Press, 2014.
- 15 AUQUÉ L, GIMENO M J, GÓMEZ J, et al. Potentiometrically measured Eh in groundwaters from the Scandinavian Shield [J]. Applied Geochemistry, 2008, 23(7): 1820-1833.
- 16 SKB. Bedrock hydrogeology Forsmark-Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark [R]. Stockholm: Svensk Kärnbränslehantering AB, 2008.
- 17 WANG Ju, CHEN Liang, SU Rui, et al. The Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China: Planning, site selection, site characterization and in situ tests [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 10(3): 411-435.
- 18 王驹,苏锐,陈亮,等.中国高放废物地质处置地下实

- 验室场址筛选[J]. 世界核地质科学, 2022, 39(1): 1-13.
- WANG Ju, SU Rui, CHEN Liang, et al. Site selection of underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China [J]. World Nuclear Geoscience, 2022, 39(1): 1-13 (in Chinese).
- 19 王驹, 陈亮, 苏锐, 等. 中国高放废物地质处置北山地下实验室重大进展[J]. 世界核地质科学, 2023, 40(增刊 1): 473-490.
- WANG Ju, CHEN Liang, SU Rui, et al. Beishan underground research laboratory for geological disposal of high level radioactive waste in China: Update 2023. World Nuclear Geoscience, 2023, 40(Sup1): 473-490 (in Chinese).
- 20 周志超, 赵敬波, 季瑞利, 等. 高放废物地质处置新场候选场址水文地质特征研究[J]. 世界核地质科学, 2023, 40(4): 879-888.
- ZHOU Zhichao, ZHAO Jingbo, JI Ruili, et al. Hydrogeological characteristics of Xinchang candidate site for geological disposal of high-level radioactive waste[J]. World Nuclear Geoscience, 2023, 40(4): 879-888 (in Chinese).
- 21 CARTWRIGHT I, CENDON D, CURRELL M, et al. A review of radioactive isotopes and other residence time tracers in understanding groundwater recharge: Possibilities, challenges, and limitations[J]. Journal of Hydrology, 2017, 555: 797-811.
- 22 JASECHKO S. Global isotope hydrogeology—review [J]. Reviews of Geophysics, 2019, 57(3): 835-965.
- 23 GUIHÉNEUF N, BOISSON A, BOUR O, et al. Groundwater flows in weathered crystalline rocks: Impact of piezometric variations and depth-dependent fracture connectivity[J]. Journal of Hydrology, 2014, 511: 320-334.
- 24 邵景力, 崔亚莉, 王黎栋, 等. 新场地段及邻区地下水流模拟与预测[R]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- SHAO Jingli, CUI Yali, WANG Lidong, et al. Simulation and prediction of groundwater flow in Xinchang section and adjacent areas[R]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2020 (in Chinese).
- 25 GUO X, FENG Q, WEI Y, et al. An overview of precipitation isotopes over the Extensive Hexi Region in NW China [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(7): 4365-4378.
- 26 CHEN Z, WEI W, LIU J, et al. Identifying the recharge sources and age of groundwater in the Songnen Plain (Northeast China) using environmental isotopes[J]. Hydrogeology Journal, 2010, 19(1): 163-176.
- 27 WURSTER C M, PATTERSON W P, MCFARLANE D A, et al. Stable carbon and hydrogen isotopes from Bat Guano in the Grand Canyon, USA, reveal Younger Dryas and 8.2 ka events[J]. Geology, 2008, 36(9): 683-686.
- 28 TIAN J, PANG Z, LIAO D, et al. Fluid geochemistry and its implications on the role of deep faults in the genesis of high temperature systems in the eastern edge of the Qinghai Tibet Plateau[J]. Applied Geochemistry, 2021, 131: 105036.
- 29 SANO Y, WAKITA H. Geographical distribution of $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in Japan: Implications for arc tectonics and incipient magmatism [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1985, 90(B10): 8729-8741.
- 30 顾慰祖主编. 同位素水文学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- GU Weizu. (Ed.). Isotope hydrology [M]. Beijing: Science Press, 2011 (in Chinese).
- 31 TóTH J. Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations [J]. Hydrogeology Journal, 1999, 7(1): 1-14.
- 32 谢娜, 喻生波, 丁宏伟, 等. 甘肃省地热能赋存特征及潜力评价[J]. 中国地质, 2020, 47(6): 1804-1812.
- XIE Na, YU Shengbo, DING Hongwei, et al. Occurrence features of geothermal resources and geothermal potential assessment in Gansu province [J]. Geology in China, 2020, 47(6): 1804-1812 (in Chinese).
- 33 董艳辉, 符韵梅, 王礼恒, 等. 甘肃北山-河西走廊-祁连山区域地下水循环模式[J]. 地质科技通报, 2022, 41(1): 79-89.
- DONG Yanhui, FU Yunmei, WANG Liheng, et al. Regional groundwater flow patterns in the Beishan, Hexi Corridor and Qilian Mountains [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(1): 79-89 (in Chinese).
- 34 FU Y, DONG Y, WANG L, et al. Characteristics of hydraulic conductivity in mountain block systems and its effects on mountain block recharge: Insights from field investigation and numerical modeling [J]. Journal of Hydrology, 2022, 612: 128184.
- 35 郭永海, 王驹, 王志明, 等. 高放废物处置库甘肃北山预选区地下水位动态特征[J]. 铀矿地质, 2010, 26(1): 46-50+59.
- GUO Yonghai, WANG Ju, WANG Zhiming, et al. Dynamic characteristic of underground water table in Beishan preselection area of the high-level radioactive waste disposal repository [J]. Uranium Geology, 2010, 26(1): 46-50+59 (in Chinese).