doi: 10.11720/wtyht.2023.0455

罗辉,陈伟明,周志超,等.高放废物地质处置预选地段调查与适宜性研究[J].物探与化探,2023,47(6):1479-1489.http://doi.org/10.11720/ wtyht.2023.0455

Luo H, Cheng W M, Zhou Z C, et al. Investigation and suitability study of pre-selected sites for geological disposal of high level radioactive waste [J]. Geo-physical and Geochemical Exploration, 2023, 47(6): 1479-1489. http://doi.org/10.11720/wtyht. 2023.0455

高放废物地质处置预选地段调查与适宜性研究

罗辉^{1,2},陈伟明^{1,2},周志超^{1,2},刘健^{1,2},李亚伟^{1,2},田霄^{1,2},云龙^{1,2} (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:本项研究从高放废物安全处置的需求出发,针对我国高放废物处置库首选预选区(北山预选区)内算井子预 选地段,综合运用地质—地球物理—水文地质—地球化学等研究方法获得了地质、水文地质、未来自然变化、地球 化学、建造与工程、环境保护和社会经济等方面的数据和资料,评价了预选地段岩体的安全性;从工程建造和工程 安全等角度论证了预选岩体的可建造性;确认了预选岩体在运输条件、土地利用、社会经济与人文等方面的可接受 性。在此基础上,建立了较为完善的处置库预选地段调查与适宜性综合分析方法,并通过地段适宜性综合分析和 地段内场址圈定及其安全性综合对比,在算井子地段中筛选出1个花岗岩处置库候选场址。研究成果将直接服务 于我国高放废物地质处置库场址筛选和场址特性评价,对保障我国核废物安全管理和核能可持续发展具有重要的 现实意义。

关键词:高放废物地质处置;预选地段;候选场址;调查;评价

中图分类号: P587; P597.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2023)06-1479-11

0 引言

高水平放射性核废物(以下简称高放废物)地 质处置作为一项特殊的工程项目,在各核工业国家 受到普遍重视^[1]。目前,深地质处置(将废物处置 在地表以下 500~1 000 m 深度)是国际社会普遍接 受的、可行的高放废物最终安全处置方式^[2-4]。 1985 年我国启动了高放废物地质处置库场址筛选 开发工作,提出我国可以作为高放废物处置库围岩 的类型有花岗岩、黏土岩、岩盐和凝灰岩,在综合考 虑到各类岩石的分布和社会经济等条件的基础上, 优先对花岗岩场址进行了研究。经过 30 多年的发 展,先后开展了全国区域筛选、处置库围岩确定、重 点地段筛选和适宜性评价等工作^[5-8],最终,甘肃北 山预选区被确定为我国高放废物地质处置库首选预 选区。从1999年开始,国家国防科技工业局先后批 复了6个有关北山预选区处置库场址调查与评价的 项目(简称"北山一~六期"),以这6个项目为依 托,依次对北山预选区中旧井、野马泉、新场—向阳 山、沙枣园和算井子等5个预选地段开展了场址调 查等工作^[9-12],并从中筛选出高放废物处置库候选 场址。北山预选区花岗岩型处置库候选场址调查 与筛选过程也是我国高放废物地质处置库候选场 址调查与评价方法的研究过程。本研究以《核安 全导则 高水平放射性废物地质处置设施选址》^[13] (以下简称"选址导则")为指导,基于选址准则的 10个方面,综合运用地质一地球物理一水文地质一 地球化学等研究方法,建立了系统的处置库候选场 址调查与适宜性综合分析方法,并在甘肃北山预选 区算井子预选地段初步筛选出处置库候选场址。

收稿日期: 2023-08-20; 修回日期: 2023-10-15

基金项目:中国国家原子能机构高放废物地质处置创新中心基金项目(CXJJ2110-1)

第一作者:罗辉(1982-),男,湖北天门人,高级工程师,博士,主要从事环境工程、三维地质建模方面的研究工作。Email:luo1029hui@163.com 通讯作者:陈伟明(1968-),男,浙江新昌人,高级工程师(研究员级),博士,长期从事高放废物地质处置研究工作。Email:chenweiming@briug.cn

1 研究区概况

甘肃北山预选区是我国高放废物地质处置库场 址 6 大预选区之一^[6],位于甘肃西北部和内蒙古西 部,其行政区划隶属于甘肃酒泉市及内蒙古阿拉善 盟额济纳旗。区域上,北山造山带处于西伯利亚板 块、哈萨克斯坦板块和塔里木—华北板块的结合部 位,在大地构造位置上属于中亚造山带南缘(图 la)。预选区的地层分属天山—兴安地层区北山地 层分区,区内出露的地层较齐全,由老到新有元古 宇、寒武系、奥陶系、志留系、石炭系、二叠系、三叠 系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系^[7-8]。 区内花岗岩广泛出露(图 1b),据统计,北山预选区 内共有 21 个花岗岩体,单个岩体的面积从 20 km²~800 km² 不等,总面积达 6 400 km²。花岗岩类的形成时间可从前寒武纪一直延续到中生代燕山期,而出露面积最广的花岗岩类属于华力西期,并主要集中在华力西晚期。北山地区广泛分布的微陆块、岛弧、洋壳块体、沉积变质块体和增生杂岩块体等众多地体,在 3 大板块的相互作用下经历了多次增生拼合,在复杂的地质过程中,北山境内自北向南以此形成了 4 条蛇绿岩带。

算井子地段地处北山东北部,属中低山区,主要 出露有青白口系圆藻山群大豁落山组、志留系中统 公婆泉群、石炭系下统白山组、白垩系下统赤金堡组 和第四系全新统地层。侵入岩为华力西中期岩浆活 动的产物,以酸性岩类为主,呈岩基状产出。



1—中生代花岗岩;2—晚古生代花岗岩;3—早古生代花岗岩;4—前寒武纪花岗岩;5—克拉通;6—高压变质带;7—缝合带;8—蛇绿岩带(①红 石山蛇绿岩带;②石板井—小黄山蛇绿岩带;③红柳河—牛圈子—洗肠井蛇绿岩带;④辉铜山—帐房山蛇绿岩带);9—断层或推测断层;10—第 四系与露头界线;11—研究区位置

1—Mesozoic granite; 2—late Paleozoic granite; 3—early Paleozoic granite; 4—Precambrian granite; 5—craton; 6—high pressure metamorphic zone; 7—suture tape; 8—ophiolite belt (① Hongshishan ophiolite belt; ② Shibanjing-Xiaohuangshan ophiolite belt; ③ Hongliuhe-Niuquanzi-Xichangjing ophiolite belt; ④ Huitongshan-Zhangfangshan ophiolite belt); 9—fault or inferred fault; 10—Quaternary and outcrop boundary; 11—location of the research area

图 1 北山地区区域大地构造示意(a)及侵入岩分布(b)(据参考文献[14]修改)

Fig. 1 Regional tectonics (a) and intrusive rock distribution (b) in Beishan area (modified according to reference [14])

2 处置库预选地段调查研究

选址导则把处置库选址过程划分为规划选址、 区域调查、场址特性评价和场址确认4个阶段。区 域调查阶段的目标是在一个或若干个预选区内筛选 出2个或2个以上适宜建造处置设施的候选场址, 即对预选区中的具有有利条件的地段开展调查,筛 选出若干个适宜建造处置设施的候选场址,供进一 步的比选和场址特性评价。

选址准则分为地质条件、未来自然变化、水文地 质、地球化学、人类活动、建造和工程条件、废物运 输、环境保护、土地利用、社会经济和人文条件10个 方面。通过对选址导则的研读,将这10个方面的内 容归纳为场址的安全性、可建造性和可接受性3项 属性。地段的适宜性主要体现在地段所在(或所 含)岩体的适宜性上,本文以北山预选区算井子地 段(岩体)为例,开展了以上10个方面的调查,重点 阐述了调查方法及调查结果。

2.1 安全性调查

安全性调查涉及地质条件、水文地质、地球化 学、未来自然变化和人类活动5个方面。

2.1.1 地质条件

地质条件调查研究是岩体安全性调查的重点, 在预选地段开展地质条件研究,排除颠覆性因素。 本研究通过地表地质调查、深部地质勘查和三维地 质建模研究,查明场址中岩性和构造的空间分布特 征,以满足处置库场址安全评价基本要求。首先以 ArcGIS 和 MapGIS 操作软件为平台,利用1:2.5万 QuickBird 遥感数据对研究区内重要构造、成岩物 源、特殊蚀变等开展遥感地质解译,获得算井子地段 面积约 375 km² 遥感解译图,并结合野外地质调查, 获得了研究区1:5万地表地质资料;然后在近南北 方向施工3条 AMT 探测剖面对构造和岩体深部展 布形态进行探测,并施工了2口深度约600m的钻 孔对深部地质环境条件进行揭露;最后通过三维地 质建模研究,对获取的地质资料进行综合解译,利用 场址特征数据建立三维可视化地质模型,直观、清晰 地展现场址的地质结构和特征。

算井子地段花岗岩体地表呈 NE 向长条状出 露^[15],长约 22 km,宽约 8 km,出露面积 176 km²(图 2)。地球物理探测结果显示,算井子地段花岗岩体 的深度可达地下 2 000 m。经 BS22 和 BS23(孔深均 为 600 m)钻孔勘察,均未揭露到岩体的底板,说明 花岗岩体厚度大于 600 m。算井子花岗岩体由三道 明水北、三道明水和三道明水东 3 个单元组成(图 2),其中三道明水单元是算井子花岗岩体的主体, 呈 NE 向长条状展布,出露面积约 151 km²,岩性为 块状花岗闪长岩;三道明水北单元分布于三道明水 单元西北侧,并早于三道明水单元形成,出露面积约 19 km²,岩性为片麻状花岗闪长岩;三道明水东单元 侵入于三道明水单元的东北部,出露面积仅 6 km², 岩性为中细粒花岗闪长岩。算井子地段花岗岩岩体 以酸性侵入岩为主,岩浆侵入活动为晚古生代,岩浆



1—全新统冲积;2—白垩系下统赤金堡组;3—三道明水东中细粒花岗闪长岩单元;4—三道明水花岗闪长岩单元;5—三道明水北片麻状花岗闪 长岩单元;6—石炭系下统白山组;7—志留系中统公婆泉群;8—青口白系圆藻山群大豁落山组;9—实测断层;10—推测断层;11—整合地质界 线;12—角度不整合地质界线;13—钻孔及其编号;14—地球物理测线

1—Holocene alluvial deposits; 2—lower Cretaceous Chijinbao formation; 3—Sandaomingshui east fine-grained granodiorite unit; 4—Sandaomingshui granodiorite unit; 5—Sandaomingshui north gneissic granodiorite unit; 6—lower Carboniferous Baishan formation; 7—middle Silurian Gongpoquan group; 8—Qingbaikou system Yuanzaoshan group Dahuoluoshan formation; 9—measured fault; 10—inferred fault; 11—integrate geological boundaries; 12—angle unconformity geological boundary; 13—boreholes and their numbering; 14—geophysical survey line

图 2 算井子地段花岗岩体地质简图

Fig. 2 Geological schematic map of granite mass in Suanjingzi section

在侵入过程中受断裂构造的控制,以岩墙扩张的方 式就位。该地段共发育9条断裂构造,主要分成 NE 向(F_0 、 F_3 、 F_4)、NW 向(F_1 、 F_2 、 F_7 、 F_8)及南部山前大 断裂(F_5 、 F_6)3组断裂。断裂活动具多期次的特点, 无任何新构造活动的迹象,岩体比较稳定。

2.1.2 水文地质条件

在研究区开展水文地质调查,通过区域水文地 质调查、沟谷洪流监测、2口钻孔抽水试验和压水等 水文地质试验、浅部地下水取样分析、井中瞬变电磁 法测量等手段,获得了地下水循环交替特征、地下水 化学特征、地下水同位素及溶解气体特征等资料,掌 握地下水的赋存和运移条件,为核素运移和岩体适 宜性评价提供依据。

算井子地段地处北山预选区北部腹地,区内降水量小,年平均降水量不足 90 mm,年平均蒸发量大于 3 000 mm。地下水资源匮乏,以接受大气降水补给为主,补给能力弱,地下水主要以潜水的形式赋存于 50 m 以上的风化裂隙中,据算井子地段深钻孔揭

露的平均水位埋深为 3.12 m(图 3)。算井子地段 裂隙相对填充和闭合,地下水赋存空间极为有限,富 水性主要受控于地形地貌和岩性构造,单井涌水量 小于 100 m³/d,岩体含水量小。

在算井子地段采用 Guelph 渗透仪和双环入渗 仪,开展浅部包气带渗透试验,获得了浅部渗透性特 征数据,并利用双栓塞水文地质试验,获得了算井子 地段不同深度的渗透性参数。该地段岩体完整段渗 透系数分布在1.00×10⁻¹¹~1.00×10⁻¹⁰ m/s,裂隙带 为1.00×10⁻⁸~1.00×10⁻⁶ m/s,岩体内平均水力梯 度在 10%o左右。据此估算,岩体内地下水平均流速 为1.00×10⁻¹⁰ m/s,岩体内地下水运移到最终排泄 区的时间约为 57.1 万年,循环更新速率较慢,地下 水总体流向为 NE 向。区内地下水主要为微咸水, 水化学成分以高矿化为主要特征,总溶解固体 (TDS)平均为2.51 g/L,pH 值大多为7~8,化学成 分含量变化很大,水化学类型以 Cl·SO₄-Na 和 SO₄ ·Cl-Na 型为主。





2.1.3 地球化学条件

结合北山预选区前期选址工作内容及成果,通 过同位素测年和元素化学分析等手段,查明岩石类 型、矿物组成及化学成分,从而探讨岩体的成因和演 化特征;运用同位素、微量元素及包裹体分析等方 法,揭示裂隙充填物及其母源流体的来源、成因及演 化特征,以及深部岩体的水一岩反应特征、氧化一还 原条件等;对露头点地下水均进行现场物理、化学参 数测量,并采集了地下水化学和同位素样品进行分 析,查明了算井子花岗岩体及周围地质单元的地球 化学特征,并获得了岩石、裂隙充填物和地下水的地 球化学数据和资料。

算井子花岗岩体成岩年龄为346~359 Ma,为同 一期岩浆活动作用的结果。各单元岩石的地球化学 类型也一致,均属于钙碱性岩石系列,为过铝质岩 石,I型花岗岩成因,是火成岩熔融形成的岩浆产 物。

算井子花岗岩体内裂隙充填物的类型主要为方 解石、黏土矿物、铁氧化物及绿帘石、石英等,而裂隙 中的黏土矿物多为蒙脱石和伊利石,二者均具有较 强的离子吸附能力。根据填隙物随深度变化的发育 特征(图4),在算井子花岗岩体不同位置和不同深 度范围内,填隙物的分布特征主要受控于断层或节 理的形成、开启或闭合状态,以及构造裂隙的导水 性。填隙方解石呈现 Eu 的正异常和 Ce 的无异常 或弱负异常:岩体深部²³⁴U/²³⁸U放射性活度达到平 衡或近似平衡状态(岩体浅部比值较大),算井子花 岗岩体整体处于还原环境。



算井子地段花岗岩体主要填隙物分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of main interstitial materials of granite mass in Suanjingzi section

2.1.4 未来自然变化

开展未来自然变化研究,在充分收集和整理相 关历史地震记录和现代地震观测资料上,通过野外 地震地质调查,结合年代样品测试及地震构造法、最 大历史地震法和综合概率法的地震危险性分析,初 步评价了算井子地段近区域(岩体外围 25 km)发震 构造、最大潜在地震、能动断层等关键问题对算井子 花岗岩体的地震安全性影响。

图 4

研究区大部分地区为沙漠无人或少人区,没有 历史地震记载。区域台网监测能力也较弱,近年来 只记载了8次3.0~3.9级地震,最大地震只有3.9 级,都分布在岩体之外,地震没有形成带状或团状密 集分布,地震活动没有形成短时集中发生的现象。 历史地震中,算井子地段的最大影响烈度为Ⅵ度。 综合判断,该区地震活动微弱,地壳结构稳定。

算井子花岗岩体近区域断层主要分布于岩体的 西侧、东北侧和东南侧,其中多条断层集中于岩体西 侧,主要分布 NW 向断层,如 F₁₁ 和 F₁₄,这两条断层 被若干条 NNW 和 NNE 向次级断层截为几段。岩体 东北侧分布两条断层,分别为 NW 向的 F。和近 SN 向的 F₁₀。岩体东南侧分布 NWW 向的 F₁₂ 和近 EW 向的 F₁₃。岩体内分布 NNE 向的 F₃、F₄ 和 F₅ 以及 NNW 向的 F₂。岩体南侧分布一条近 EW 向,至算 并子岩体附近转为 NEE 向的 F_6 (图 5)。通过野外 调查,近区域范围内的断裂破碎带均胶结坚硬,沿断

裂没有第四纪盆地发育,断裂破碎带上均有第四系 冲洪积、残坡积物发育,未见断裂对第四系产生错 断、变形等现象,结合测年结果,认为上述断裂在第 四纪均不活动。结合近区域地震活动特征,认为近 区域内已有的断裂均不是发震构造。

算井子花岗岩体内及其周围地区地下水化学成

分含量变化很大,地下水总溶解固体(TDS)随地域 的不同而有明显的差别。地下水化学类型以 Cl·

SO4-Na 和 SO4 · Cl-Na 型为主,其次是 SO4 · Cl-Na ·Ca、Cl·SO₄-Na·Ca等类型。钻孔中测得的地下

水 E, 值组成范围较大,介于-232~60 mV,表明其

地下水环境为还原性。总体来讲,算井子花岗岩体

2.1.5 人类活动

高放废物地质处置库选址必须考虑场址及其附 近现有和未来的人类活动,调查分析研究区能源矿 产、矿物资源和地热资源的分布、储量以及开发和利 用状况,现有的和计划中的地表水体分布和利用情 况,地下水利用情况等。笔者主要通过资料调研整 理和现场调查,获得了以岩体中心为圆心的半径25 km 的人类活动状况,结果显示:算井子预选地段内 没有常年性地表水系,只有季节性洪水形成的冲沟, 该区干旱少雨,无河流,井泉分布较多,但不均匀,多 不宜饮用,其人类活动主要是矿产资源的勘探和开 采活动:以算井子岩体中心为圆心的半径 25 km 范 围内东部约22 km 处有一个小型铁矿小红山铁矿, 目前停产,无人看守:距岩体中心向南部约16 km 处 有一个小型煤矿,目前停产,无人看守:算井子花岗 岩体内尚未发现矿产资源。北山地区有2条主要河 流,为其东侧的黑河和西南侧的疏勒河。算井子花 岗岩体与黑河的最近距离大于 150 km, 与疏勒河的 最近距离大于 200 km,均相距较远。



图 5 算井子地段近区域地震构造 Fig. 5 Seismic structure map of the Suanjingzi nearby area

新近系

逆断裂

侏罗系

场区

AnJ

前侏罗系

10 km

2.2 可建造性调查

可建造性调查的主要内容是处置库建造与工程 条件调查研究。通过对算井子 BS22、BS23 钻孔岩 心完整性调查、岩石力学性能测试和钻孔深部地应 力测量,进行岩体工程质量综合评价,考察岩体是否 满足地下工程施工的要求。

Qh

全新统

华力西期

岩浆岩

Qp³

上更新统

前第四纪断裂

算井子地段岩石抗拉强度较高,在 8~12 MPa 范围内,单轴抗压强度在 120~180 MPa 范围内,属 于坚硬岩石,总体上岩石抗拉强度和单轴抗压强度 随深度变化不明显。方解石充填—开启天然裂隙的 内摩擦角主要集中在 30°左右;粘聚力较为离散,整 体上小于 5 MPa。算井子地段地应力场以水平应力 为主导,最大水平主应力小于 25 MPa,其方向主要 集中在 NW 向。如图 6 所示,地应力值总体上随着 深度的增加而增加,岩体最大($S_{h,max}$)、最小($S_{h,min}$) 水平主应力随深度增加梯度系数分别为 0.023 8 和 0.016 7;470 m 深度以下,实测最大、最小水平主应 力和垂向应力之间的关系可以描述为 $S_{h,max} > S_v >$ $S_{h,min}$ 。该地段属中应力水平区,在埋深 500 m 左右 的范围内,地下洞室的开挖发生岩爆的可能性不大。

算井子 BS22 钻孔 RQD(每次进尺中等于或大于 10 cm 的柱状岩心的累计长度与每个钻进回次进尺之比)评价为好或极好的回次所占比例超过

95%,BS23 钻孔 RQD 评价为好或极好的回次所占比例超过 87%,说明岩体具有很好的完整性。BS22 号钻孔 400 m 以下破碎带厚度为 1.74 m,占比 0.87%;BS23 号钻孔 400~600 m 段破碎带有 4 段,破碎带厚度为 7.62 m,占比为 3.8%,BS22 号钻孔 完整性好于 BS23。





2.3 可接受性调查

可接受性调查涉及废物运输、环境保护、土地利 用、社会经济和人文条件4方面内容,主要是对算井 子地段所在区域的环境保护条件进行初步调查,获 取人口、生态、保护区、经济、资源、气候、水文和交通 等方面环境保护所需的数据和资料;对算井子花岗 岩体及其周边的土壤、空气、围岩、地表水、地下水、 代表性植物进行取样,进行放射性本底调查。

2.3.1 废物运输条件

算井子花岗岩体及周边区域具有较便利的交通 运输条件,兰新铁路、312 国道和连霍高速公路 (G30)从其南部约 200 km 处通过。算井子花岗岩 体东侧约 40 km 处有嘉峪关至黑鹰山的嘉黑公路, 向南有兰新铁路、312 国道和连霍高速公路(G30), 向东有一条简易公路连接火车站,此火车站位于岩 体以东 90 km 处,最终可与嘉策酒钢专用铁路连接。 算井子花岗岩体以北 60 km 处有即将通车的额哈铁 路,岩体以北 45 km 处正在修建京新高速白临段,白 临段高速在马鬃山镇处与马鬃山—桥湾二级公路互 通,并通过桥湾互通立交连接连霍高速。另外,算井 子花岗岩体西北方向 60 km 处有马鬃山镇,有简易 土路连接。此外,算井子花岗岩体内有干沟、戈壁滩 均可通行越野车。因此,废物运输方面的条件有利。 2.3.2 环境保护条件

对研究区历史遗址、野生动植物保护区、地表水 和地下水资源、野生动植物等开展了资料收集和野 外实地调研,并对研究区域环境的放射线剂量进行 了测量。算井子花岗岩体及邻近地区未发现历史遗 迹,距离其最近的历史遗迹为嘉峪关,相距约为200 km。岩体及周边没有水土流失重点防治区、森林公 园、地质公园、世界遗产地、历史文化保护地、国家重 点文物所在地、热带雨林区和重要湿地等环境敏感 点。算井子花岗岩体内无地表水,地下水埋深较浅。 以岩体中心为圆心的半径 90km 外围区域范围内没 有河流水系,距离岩体最近的湖泊为干海子.相距 120 km。测量了研究区域陆地 γ 辐射剂量率,空气 中氡气,土壤样、岩石样、植物样和水样中总α、总 β、¹³⁷Cs、⁹⁰Sr 及天然放射性核素²³⁸U、²²⁶Ra、²³²Th、⁴⁰K 的含量,本底辐射通过外照射和内照射所致算井子 岩体及其外围区域公众的总有效剂量为 2.191 mSv/a,低于我国公众所受天然辐射有效剂量 2.3 mSv/a,该区属于正常天然放射性本底地区。

2.3.3 土地利用条件

根据 2008 年第二次全国土地调查数据进行规 划基数转换,对算井子花岗岩体中心为圆心的半径 25 km 范围内的土地类型进行统计,并调研了《阿拉 善盟土地利用总体规划(2006~2020年)》。算井子 花岗岩体内土地类型以中低山、丘陵、地表裸露基岩 为主,土层较薄,岩石裸露,植被稀疏。有少数牧民的 居住地。该区域内没有耕地、养殖场,除放牧外,算井 子花岗岩体及其周围无土地开发利用计划和价值。 2.3.4 社会经济和人文条件

参照放射性废物处置场、辐射环境监测的标准 规范(HJ/T 5.2—1993^[16]和 GB/T 15950—1995^[17] 等),研究了以算井子花岗岩体中心为圆心的半径 90 km 范围内的社会经济概况和人口分布概况。距 岩体中心 90 km 区域内经济发展不平衡,人口稀少, 人口多集中在马鬃山镇,其他居民均为牧民,零星分 布在大戈壁上,无万人以上的人口分布中心。距岩 体中心 25 km 范围内有 6 户牧民,均养殖少量的羊、 骆驼以及家禽,没有耕地;仅有小红山铁矿和一个小 型煤矿,目前都停产,无人看守。算井子地段社会经 济与人文方面的条件十分有利。

3 候选场址适宜性综合分析

3.1 适宜性评价的依据

选址导则是目前唯一的高放废物处置库选址的 法规性文件,是本次综合分析和评价的主要依据,以 此为基础,提出了"3个角度和2个尺度"的地段综 合对比评价的基本思路,即从场址的安全性、可建造 性和可接受性3个角度来评价预选地段适宜性,从 地段和场址2个尺度来评价场址的适宜性。以场址 适宜性分析与场址安全性分析的结果为基础,构建 了本次预选地段综合评价的指标系统,该指标系统 由适宜性的属性、影响因素、指标3个层次组成,共 有3项属性、10大影响因素、40多个指标(表1)。

2011年颁布的《放射性废物安全管理条例》第 二十三条规定:"高水平放射性固体废物和α放射 性固体废物深地质处置设施关闭后应满足1万年以 上的安全隔离要求"。在关闭后的1万年的时间 内,未来自然变化和人类活动可能直接或间接地影 响场址的安全性。所谓直接影响是指直接导致处置 库内核素的浸出或迁移。所谓间接影响是指通过改 变场址原来的地质、水文地质和地球化学条件来影 响场址的安全性。因此,地质、未来自然变化、水文 地质、地球化学、人类活动是影响场址安全性的5个 主要因素,其中地质、水文地质和地球化学这3个因 素是一种确定性影响因素,未来自然变化和人类活 动是一种概率性影响因素。

表1 算井子地段适宜性综合分析

Table 1 Comprehensive analysis of the suitability in the Suanjingzi area

属性	影响因素	指标	算井子地段
	地质	岩体出露的面积	176 km ²
		地球物理探测的岩体深度	2000 m
		钻孔验证的最深岩体深度(钻孔数量)	600 m(2 口)
		岩体内出露最大的岩块面积	50 km ²
		地球物理探测的岩体深部完整性	好
		钻孔验证的岩体深部完整性	好(2口深度大于 500 m 的钻孔)
		岩体内出露的岩性种类	1种(花岗闪长岩)
	水文地质	岩体内地下水位埋深	8. 20~61. 24 m
		岩体与最近排泄区的距离(名称,方位)	180 km(额济纳旗盆地,西)
		岩体内地下水水力梯度	10%
安全性		岩体内完整岩石渗透率	$1 \times 10^{-11} \sim 1 \times 10^{-10} \text{ m/s}$
		岩体内裂隙带渗透率	$1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$
		岩体内地下水 pH 值	7.0~8.0
		岩体内地下水 E _h 值	-232~60 mV
	地球化学	岩体内地下水温度	9∼19 °C
		岩体内地下水 TDS	0.7~12.0 g/L
		岩体内地下水类型	Cl・SO ₄ –Na 和 SO ₄ ・Cl–Na 型
		岩体内岩石类型	花岗闪长岩
		岩体内裂隙充填物类型	方解石、黏土矿物、褐铁矿、绿帘石、石英等
	未来自然变化	岩体与最近活动断裂的距离(断裂名称)	155 km(三危山断裂)
		岩体所在地震构造区中最大弥散地震震级(地震构造区名称)	5.5级(北山地震构造区)
	人类活动	岩体与最近地表水体的距离(名称)	140 km(疏勒河)
		岩体内矿(点)数量(矿种)	0个
		岩体外围 5km 内矿(点)数量	0个
可建造性	工程和建造	岩体地表地质灾害	无
	废物运输	岩体与最近铁路的距离(名称)	75 km(京新铁路)
		岩体与最近公路的距离(名称)	45 km(京新高速)
		岩体与大厂距离	145 km
		岩体与大厂、铁路和公路之间沿途人口	极其稀少
可接受性		岩体与大厂、铁路和公路之间沿途地势	平坦
	环境保护	岩体与最近地表水体的距离(名称)	120 km(干海子)
		岩体对国家级保护区的影响	无
	土地利用	岩体土地类型	低产草地
		岩体土地用途	放牧
		岩体土地利用价值	极小
		岩体土地所在辖区	内蒙古额济纳旗
	社会经济和人文条	供 岩体内常住人口数量	2 人
		片 岩体与最近城市的距离	145 km(玉门)

基于"3个角度和2个尺度"的基本思路,以评价指标系统为工具,把候选场址评价过程划分为地段适宜性综合分析、地段内场址圈定及其安全性综合对比2个步骤。

3.2 算井子地段适宜性综合分析

综上分析,算井子地段均有很好的安全性,主要 体现在:①有利的地质条件:地质条件简单,岩性单 一(为花岗闪长岩),花岗岩体足够大(地表面积约 176 km²,厚度大于2000 m),且深部完整性好;构造 不发育,无任何新构造活动的迹象,岩体比较稳定, 具备筛选出处置库场址的条件(岩体内出露最大的 岩块面积约50 km²)。②有利的水文地质条件:岩 体地下水含水量小(地下水赋存空间极为有限,单 井涌水量小于100 m³/d),从处置设施到地下水出 露点的径流途径长(离最近排泄区的距离约180 km),水力梯度低(地下水水力梯度小于10%),完 整岩石的渗透率小于1.00×10⁻¹¹ m/s,节理带中渗 透率小于1.00×10⁻⁶ m/s。③有利的地球化学条件: 算井子花岗岩体裂隙充填物在形成时大多处于还原 环境,其中的黏土矿物具有很强的阳离子交换能力 和吸附性,且地下水环境为还原性,这在一定程度上 有利于阻滞放射性核素向外迁移。④有利的未来自 然变化:与最近区域活动断层的距离约155 km,所 在地震构造区中最大弥散地震震级不大于5.5,避 开了由于新构造运动、地震活动等地质作用所产生的不利影响。⑤有利的人类活动:与最近地表水体的距离至少有 120 km,岩体内部没有矿(点),人类活动几乎不会对研究区产生影响。

算井子地段具有很好的可建造性,主要体现在: 无不良地质地貌现象;较为平缓的地形条件适宜于 布置高放废物地质处置库的地表设施,地下岩体特 征满足进行地面设施建造和地下工程施工的要求 (岩石坚硬、完整性好、开挖不会发生岩爆)。

有很好的可接受性,主要体现在:①废物运输: 具有便利的交通运输条件(距铁路小于 75 km、公路 小于 45 km),铁路和公路间沿途人口稀少、地势平 坦。②环境保护:与最近地表水体的距离远,且对国 家保护区没有影响。③土地利用:土地利用价值极 小,为只适用于放牧的低产草地。④社会经济和人 文:社会经济与人文方面的条件十分有利(常住人 口均小于2人,远离人口稠密区)。

从以上3个方面综合分析认为,算井子地段具 有很好的安全性、可建造性和可接受性,暂无发现颠 覆性因素,为高放废物地质处置库建造适宜地段。

3.3 地段内场址圈定及其安全性综合对比

3.3.1 算井子地段内场址圈定

算井子地段内花岗岩体地表出露面积约 176 km²。地球物理探测结果显示,该岩体深部具有足够的规模,且完整性好。该岩体被一组 NW 向断层和一组 NE 向断层分割成若干块体。其中钻孔 BS22 和 BS23 所在的 2 个岩块(I号和 II号岩块)的面积相对较大,因而把这 2 个岩块圈定为场址(图 7)。这 2 个场址相距 10 km,它们之间的岩块(III号岩块)面积也较大(约 23 km²),地表也一样完整,可以作为上述 2 个场址的扩展区。



图 7 算井子地段花岗岩三维空间展布



3.3.2 地段内场址安全性综合对比

地段内场址安全性综合对比主要从地质、水文 地质、地球化学、未来自然变化和人类活动5个方面 进行(表2)。从表中可以看出,这2个场址各项指 标极其相似,且均具有很好的地质、水文地质、地球 化学、未来自然变化和人类活动条件。进一步分析, 将I号场址与II号场址相比较,I号场址在"场址 地表面积"上具有一定优势,而II号场址在"场址 最近矿(点)的距离"具有一定优势。由于小红山铁 矿与这2个场址的距离均超过了20km,它的开采 已经不会影响这2个场址的安全性。综合考虑,I 号场址的优势具有一定的实际意义。因此,暂且把 I号场址选定为算井子地段的候选场址。I号场址 与II号场址之间的岩块作为该候选场址的扩展区。

4 结论及讨论

1)本研究以算井子预选地段为研究对象,开展 了岩体的地质、水文地质、未来自然变化、地球化学、 建造和工程条件、人类活动、废物运输、环境保护、土 地利用、经济和人文条件等方面的调查,获取了地段 适宜性评价的关键参数。并基于以上研究,建立了 我国高放废物处置预选地段调查与场址适宜性综合 分析系统。

2)以构建的指标系统为工具,通过地段适宜性综合分析、地段内场址圈定及其安全性综合对比,认为算井子地段具有很好的安全性、可建造性和可接受性,暂无发现颠覆性因素;并在算井子地段中筛选

表 2 算井子地段内场址安全性综合对比

Table 2 Comprehensive comparison of site safety in the Suanjingzi area

对比因素	对比指标	算井子I号场址	算井子Ⅱ号场址
	场址地表面积	45 km ²	25 km ²
地质	场址地表可扩展面积	23 km ²	23 km ²
	场址内地球物理探测的岩体深度	2000 m	2000 m
	场址内经钻孔验证的最深岩体深度(钻孔编号)	600 m(BS22)	600 m(BS23)
	场址内已知断层数量(不包括边界断层)	0条	0条
	汤址内经钻孔验证的岩体深部完整性(孔深大于 500m 的钻孔数量)) 好(1口)	好(1口)
	场址内岩性种类	1 种	1 种
水文地质	岩体地下水位埋深	61.24 m	8.20 m
	场址离最近排泄区的距离(排泄区名称)	>180 km(额济纳旗盆地)	>180 km(额济纳旗盆地)
	场址所在岩体的地下水水力梯度	10%0	10%0
	场址所在岩体内完整岩石渗透率	$1 \times 10^{-11} \sim 1 \times 10^{-10} \text{ m/s}$	$1 \times 10^{-11} \sim 1 \times 10^{-10} \text{ m/s}$
	场址所在岩体内节理带渗透率	$1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$	$1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$
地球化学	场址内地下水 pH 值	7.0~8.0	7.0~8.0
	场址内地下水 E _h 值	$-232 \sim 60 \text{ mV}$	$-232 \sim 60 \text{ mV}$
	场址内地下水温度	9∼19 °C	9∼19 °C
	场址内地下水 TDS	0.7~12.0 g/L	0.7~12.0 g/L
	场址内地下水类型	Cl・SO ₄ -Na 和 SO ₄ ・Cl-Na 型	Cl・SO ₄ – Na 和 SO ₄ ・Cl–Na 型
	场址内岩石类型	花岗闪长岩	花岗闪长岩
	场址内裂隙充填物类型	方解石、黏土矿物、褐铁矿、 绿帘石、石英等	方解石、黏土矿物、褐铁矿、 绿帘石、石英等
未来	场址与最近活动断裂的距离(断裂名称)	155 km(三危山断裂)	155 km(三危山断裂)
自然变化	场址所在地震构造区中最大弥散地震震级(地震构造区名称)	5.5级(北山地震构造区)	5.5级(北山地震构造区)
人类活动	场址与最近地表水体的距离(水体名称)	120 km(干海子)	120 km(干海子)
	场址与最近矿(点)的距离(名称)	20 km(小红山铁矿)	28 km(小红山铁矿)

出1个花岗岩处置库候选场址。

3)本次研究所筛选出的个处置库候选场址可 以作为我国下一阶段处置库场址特性评价候选对 象,研究成果可直接服务于我国高放废物地质处置 库场址筛选和场址特性评价,对保障我国核废物安 全管理和核能可持续发展具有重要的现实意义。

参考文献(References):

- Savage D. The scientific and regulatory basis for the geological disposal of radioactive waste [M]. Chichester: John Wiley and Sons, 1995.
- [2] 潘自强, 钱七虎. 高放废物地质处置战略研究[M]. 北京: 原 子能出版社, 2009.

Pan Z Q, Qian Q H. Strategic research for deep geological disposal of high level radioactive waste [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2009.

[3] 王驹.我国高放废物深地质处置战略规划探讨[J].铀矿地质, 2004.20(4):196-203.

Wang J. Srategic program for deep geological disposal of high level radioactive waste in China [J]. Uranium Geology, 2004, 20(4): 196-203.

[4] Wang J, Chen L, Su R, 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.

- [5] 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 J, Su R, Chen L, 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
- [6] 陈伟明,王驹. 高放废物地质处置场址安全要求 [J]. 世界核地质科学,2006,23(2):100-106.
 Chen W M, Wang J. Site safety requirements for high level waste disposal [J]. World Nuclear Geoscience,2006,23(2):100-106.
- [7] 陈亮,王驹,杨峰,等. 高放废物地质处置地下实验室开挖及精 细探测关键技术[J].世界核地质科学,2023,40(1):1-16. Chen L, Wang J, Yang F, et al. Excavation and fine detection technology of the underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste[J]. World Nuclear Geoscience, 2022,40(1):1-16.
- [8] 蒋实,罗辉,陈伟明,等.高放废物地质处置算井子地段地质条件适宜性研究[J]. 物探与化探,2021,45(5):1208-1216.
 Jiang S,Luo H, Chen W M, et al. Suitability of geological conditions in Suanjingzi area for the disposal of high-level radioactive wastes[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(5): 1208-1216.
- [9] 王驹,苏锐,陈亮,等. 论我国高放废物地质处置地下实验室发展战略[J]. 中国核电,2018,11(1):109-115.
 Wang J,Su R,Chen L, et al. The development strategy of the underground research laboratory for geological disposal of high level radioactive waste in China [J]. China Nuclear Power, 2018,11

(1):109-115.

[10] 云龙, 张进, 王驹, 等. 甘肃北山南部活动断裂的 发现及其区域 构造意义[J]. 地质力学学报, 2021, 27(2):195-207.

Yun L, Zhang J, Wang J, et al. Discovery of active faults in the southern Beishan area, NW China: Implications for regional tectonics[J]. Journal of Geomechanics, 2021, 27(2):195–207.

 [11]赵星光,王驹,马利科,等.高放废物地质处置库北山预选区新场岩体地应力场分布规律[J].岩石力学与工程学报,2014, 33(S2):3750-3759.

Zhao X G, Wang J, Ma L K, et al. Distribution characteristics of geostress field in Xinchang rock block of candidate Beishan area for high level radioactive waste repository in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 3750–3759.

 [12]赵宏刚,梁积伟,王驹,等.甘肃北山算井子埃达克质花岗岩年 代学、地球化学特征及其构造意义[J].地质学报,2019,93
 (2):329-352.

Zhao H G, Liang J W, Wang J, et al. Geochronology and geochemical characteristics of the Suanjingzi adakitic granites in the Beishan Mountains, Gansu Province, China, and their tectonic significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2019,93(2):329–352.

[13]国家核安全局.HAD 401/06—2013 核安全导则 高水平放射性 废物地质处置设施选址[S].北京:国家核安全局,2013.
 National Nuclear Safety Administration. HAD 401/06—2013 Nuclear safety guidelines for site selection of high-level radioactive waste geological disposal facilities[S]//. Beijing: National Nuclear Safety Administration, 2013.

[14] 苗来成, 朱明帅, 张福勤. 北山地区中生代岩浆活动与成矿构

造背景分析[J]. 中国地质, 2014, 41(4): 1190-1204.

Miao L C, Zhu M S, Zhang F Q. Tectonic setting of Mesozoic magmatism and associated metallogenesis in Beishan area[J]. Geology in China, 2014, 41(4): 1190–1204.

- [15]甘肃省地质调查院.区域地质调查报告(1:25万马鬃山幅)
 [M].北京:地质出版社,2001.
 Gansu Provincial Geological Survey Institute. Regional geological survey report (1:250,000 Mazoushan width)[M]. Beijing: Geological Publishing House,2001.
- [16] 中华人民共和国环境保护行业标准.HJ/T 5.2—1993 核设施 环境保护管理导则 放射性固体废物浅地层处置环境影响报告 书的格式与内容[S].北京:国家环境保护局,1993. Environmental Protection Industry Standards of the People's Republic of China.HJ/T 5.2—1993 Environmental protection regulation guidelines for nuclear facilities-Standard format and content of environmental impact reports for shallow ground disposal of solid radioactive waste[S]. Beijing: State Environmental Protection Administration, 1993.
- [17]中华人民共和国国家标准. GB/T 15950—1995 低、中水平放射 性废物近地表处置场环境辐射监测的一般要求[S]. 北京:中 国标准出版社,1995.

National Standards of the People 's Republic of China. GB/T 15950—1995 General requirements for environmental radiation monitoring around near surface disposal sites of low-intermediate level radioactive solid waste [S]. Beijing: Standard Press of China, 1995.

Investigation and suitability study of pre-selected sites for geological disposal of high level radioactive waste

LUO Hui^{1,2}, CHENG Wei-Ming^{1,2}, ZHOU Zhi-Chao^{1,2}, LIU Jian^{1,2}, LI Ya-Wei^{1,2}, TIAN Xiao^{1,2}, YUN Long^{1,2}

(1. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; 2. CAEA Innovation Center for Geological Disposal of High-level Radioactive Waste, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

Abstract: Based on the requirement of safe disposal of high-level radioactive waste, this study aims at the pre-selection area of the preferred pre-selection area of China's high-level radioactive waste disposal bank (Beishan pre-selection area). The data and materials of geology, hydrogeology, future natural change, geochemistry, construction and engineering, environmental protection and social economy were obtained by using the methods of geology, geophysics, hydrogeology and geochemistry. The constructability of preselected rock mass is demonstrated from the perspectives of engineering construction and engineering safety. The acceptability of the preselected rock mass in transport condition, land use, social economy and humanity was confirmed. On this basis, a relatively perfect site investigation and suitability comprehensive analysis method for the disposal warehouse is established, and a candidate site for the granite disposal warehouse is selected from the computational sub-section through the comprehensive analysis of site suitability and the comprehensive comparison of site identification and safety in the lot. The research results will directly serve the site screening and site characteristics evaluation of China's high-level radioactive waste geological disposal repository, and have important practical significance to ensure the safe management of nuclear waste and the sustainable development of nuclear energy in China.

Key words: geological disposal of high-level radioactive waste; pre-selected lots; candidate sites; investigate; evaluate