

蛇纹石化型天然氢地质调查进展与启示

——以贺根山和拉脊山蛇绿岩为例

腾格尔^{1,2}, 张 聪^{1,2}, 仝立华^{1,2}, 王 鑫³, 曹宝宝⁴, 魏佳林⁵, 冯乾乾⁶, 徐学敏⁷, 方榕慧^{1,2}, 罗林涛^{1,2},
陈维堃^{1,2}, 方 朋⁷, 张 远^{1,2}, 曾文人^{1,2}, 李浩涵^{1,2}, 王 梓^{1,2}

- [1. 多资源协同陆相页岩油绿色开采全国重点实验室, 黑龙江 大庆 163712; 2. 中国地质调查局 油气资源调查中心, 北京 100083;
3. 内蒙古自治区地质调查研究院, 内蒙古 呼和浩特 010020; 4. 中国地质调查局 自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083;
5. 中国地质调查局 天津地质调查中心, 天津 300170; 6. 中国石油大学(北京), 北京 102249; 7. 国家地质实验测试中心,
北京 100037]

摘要:蛇纹石化反应是地下自然生氢的重要机制之一,蛇绿岩带正在成为天然氢勘探重要领域。中国蛇绿岩带分布广泛且存在多处氢气高浓度异常,但是天然氢的成藏机理与资源前景不清楚。基于“仙女圈”构造识别、土壤氢气含量测量和地球物理深部探测等技术方法,在内蒙古中段和南祁连地区蛇绿岩带开展天然氢地质调查,取得阶段性进展。研究结果表明:①在内蒙古中段贺根山蛇绿岩带,初步识别出2个由隐伏超基性岩引起的“高磁高重”异常区,发现了一批“仙女圈”构造和封存于包裹体内的天然氢气,其伴随土壤氢气渗漏异常显示,圈定了天然氢形成与富集的有利区带。②南祁连拉脊山蛇绿岩带中,初步识别出2个大型超基性岩体,呈现“高磁、高重、高阻”特性。出露橄榄岩蛇纹石化强烈,具有高 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 含量及高 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 含量比值的特征,表明发生过蛇纹石化生氢过程,存在潜在氢源,并发现多处土壤氢气高浓度异常点,最高浓度达 $1\,000\times 10^{-6}$,展现出良好的勘探潜力。③初步调查结果既印证了调查区内存在活跃的天然氢源,又揭示了控制蛇纹石化型天然氢形成与富集的关键因素。超基性岩与充足水源的耦合效应;超基性岩的规模及其沉积覆盖条件(决定是否规模成藏);氢气生成时间与圈闭捕获时间的匹配关系(决定滞留时间);“持续性、瞬时性”聚集特性等。④早期沉积盆地基底中的富铁岩石和后期侵入沉积盆地内部的超基性岩为有利勘探方向,天然氢与地热资源的综合勘探开发前景广阔。中国天然氢调查研究尚处于起步阶段,潜力与挑战并存,上述进展和认识有助于降低天然氢勘探风险,尽早实现找矿突破。

关键词:有利区带;蛇纹石化;超基性岩;蛇绿岩带;成藏机理;天然氢气;南祁连;内蒙古

中图分类号:TE132.3 **文献标识码:**A

Progress in geological surveys of serpentinization-type natural hydrogen and related insights: A case study of the Hegenshan and Lajishan ophiolites

Tenger^{1,2}, ZHANG Cong^{1,2}, TONG lihua^{1,2}, WANG Xin³, CAO Baobao⁴, WEI Jialin⁵, FENG Qianqian⁶,
XU Xuemin⁷, FANG Ronghui^{1,2}, LUO Lintao^{1,2}, CHEN Weikun^{1,2}, FANG Peng⁷, ZHANG Yuan^{1,2}, ZENG Wenren^{1,2},
LI Haohan^{1,2}, WANG Zi^{1,2}

- [1. State Key Laboratory of Continental Shale Oil, Daqing, Heilongjiang 163712, China; 2. Oil and Gas Resources Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China; 3. Geological Survey Institute of the Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China; 4. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, China Geological Survey, Beijing 100083, China; 5. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 6. China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 7. National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China]

Abstract: Ophiolite belts are emerging as important targets for natural hydrogen exploration. Serpentinization is one of the major mechanisms responsible for natural hydrogen generation in the subsurface. Although ophiolite belts are widely distributed across China with numerous high-concentration hydrogen anomalies documented, the accumulation

收稿日期:2026-04-03;修回日期:2026-06-09。

第一作者简介:腾格尔(1967—),男,研究员,地球化学、油气和天然氢地质。E-mail: tenger67@163.com。

基金项目:深地国家科技重大专项(2025ZD1010304);国家战略性矿产资源调查项目(DD20250209001)。

mechanisms and resource potential of natural hydrogen remain unclear. Preliminary progress has been made in geological surveys of natural hydrogen in the ophiolite belts of central Inner Mongolia and the southern Qilian region through the integrated application of technical methods, including the identification of fairy circles, measurements of soil hydrogen concentrations, and deep geophysical exploration. As indicated by the research results, (1) two zones characterized by high-magnetic and high-gravity anomalies associated with concealed ultramafic rocks were preliminarily identified in the Hegenshan ophiolite belt in central Inner Mongolia. A set of fairy circles and occurrences of natural hydrogen trapped in inclusions were also discovered. Together with the associated soil hydrogen seepage anomalies, these findings enabled the delineation of favorable zones for natural hydrogen generation and enrichment. (2) In the Lajishan ophiolite belt in the southern Qilian region, two large ultramafic bodies were recognized, characterized by high magnetization, high gravity and high electrical resistivity. The exposed peridotites show intense serpentinization with high Fe^{2+} and Fe^{3+} contents, as well as high $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ ratios, indicating significant hydrogen generation through serpentinization and the presence of potential hydrogen sources. Several high-concentration soil hydrogen anomalies were detected, with a maximum value of $1\,000 \times 10^{-6}$, demonstrating promising exploration potential. (3) The preliminary survey results confirmed the existence of active natural hydrogen sources in the study areas, while revealing the key factors controlling the generation and enrichment of serpentinization-type natural hydrogen. These factors include the coupled effects of ultramafic rocks and an adequate water supply; the scale of ultramafic bodies and their coverage by sedimentary sequences, which serve to determine whether large-scale accumulation can occur; the residence time of hydrogen generation and trapping, which determines hydrogen retention time; and the persistent vs. transient accumulation behavior of hydrogen. (4) The findings also suggest favorable exploration targets: iron-rich rocks in the basement of early sedimentary basins and late-stage ultramafic intrusions rocks within sedimentary basins. The integrated exploration and development of natural hydrogen and geothermal resources have broad prospects. Geological surveys and research on natural hydrogen in China is still in its early stage, with both considerable potential and significant challenges. The progress and insights presented above are expected to help reduce the risks associated with natural hydrogen exploration and facilitate an early breakthrough in natural hydrogen resource discovery.

Key words: geological survey, favorable zone, serpentinization, ultramafic rock, ophiolite belt, natural hydrogen

引用格式: 腾格尔, 张聪, 全立华等. 蛇纹石化型天然氢地质调查进展与启示[J]. 石油与天然气地质, DOI: 10. 11743/oggXXXXXX01.

Tenger, ZHANG Cong, TONG lihua, et al. Progress in geological surveys of serpentinization-type natural hydrogen and related insights: A case study of the Hegenshan and Lajishan ophiolites[J]. Oil & Gas Geology, DOI: 10. 11743/oggXXXXXX01.

蛇绿岩是一种特殊的镁铁岩-超镁铁岩组合, 包括超镁铁岩、基性侵入岩、镁铁质火山岩和海相沉积物等^[1]。蛇绿岩形成于大陆板块俯冲、扩张和地幔柱活动等不同的构造环境, 分为与俯冲作用相关与无关2大类型^[2], 通常指示洋-陆板块俯冲碰撞带、地幔热活动和铬铁矿形成等重大地质和成矿事件^[1-6]。过去20年中, 无论是在大洋中脊还是大陆蛇绿岩系统中, 均发现橄榄岩蛇纹石化过程可持续释放大量的氢气, 使得蛇绿岩的指示性由构造演化、成矿作用向生命起源和能源资源拓展。前人研究认为, 超基性岩蛇纹石化产生的氢气为化学能自养微生物群落提供了所需要的能量和初始物质^[7]。而非洲马里 Bourakébougou 天然氢气藏的成功开采, 打破了人们对氢气难以长期大量积聚的传统认知, 表明地下多种地质过程自然产生的氢气

在特殊地质环境中能够聚集成藏, 可作为清洁能源资源供人类开发利用^[8-9]。

凭借零碳排、低成本及可再生的显著优势, 天然氢气正被视为推动全球能源绿色转型与应对气候变化的战略性潜在资源。天然氢气主要来自超基性岩(超镁铁岩)的蛇纹石化(水-岩反应)、富含放射性元素岩体对水的辐射分解以及深部幔源流体的脱气作用等^[9-10]。全球范围内至今已发现的天然氢气藏和高浓度氢气异常区主要与蛇纹石化作用密切相关。蛇纹石化型天然氢气(以下简称为天然氢气)主要来自大洋中脊、大陆缝合带和克拉通中富铁岩石的蛇纹石化作用。非洲克拉通 Taoudenni 盆地 Bourakébougou 天然氢气藏^[8]、美国中部大陆裂谷 Kansas 盆地 Scott 天然氢气藏^[11]、阿尔巴尼 Bulqizë 铬铁矿矿井深处天然氢气积

聚^[12]、阿曼 Semail 蛇绿岩露头区及碱性溪水中的高浓度氢气异常^[13]、以及南澳大利亚 Yorke 半岛 Ramsay1 井和 Ramsay2 井的高浓度氢气异常^[14]等典型实例,共同表明全球蛇绿岩带天然氢气的年通量可达 $(180 \sim 360) \times 10^4 \text{ t}^{[9,15]}$ 。前寒武纪大陆岩石圈每年通过蛇纹石化和辐射分解作用产生氢气 $4.54 \times 10^8 \text{ t}^{[15-16]}$,这表明天然氢气可以储集在蛇绿岩裂缝带及其与连通的圈闭构造中,具有大规模聚集的资源潜力。显然,在全球寻找天然氢气的热潮下,大陆蛇绿岩带是当前天然氢气勘探研究最关键、最现实的选择,一旦突破极有可能改变当今及未来的能源格局。

对比国外已发现天然氢气区,中国陆域同样具备形成和富集天然氢气的地质条件。在中西部地区,塔里木、华北和扬子等多个板块多期俯冲、碰撞与拼合,形成了多条规模巨大且长期活跃的区域性深、大断裂带及缝合带。这些缝合带发育多期、多条蛇绿岩带,是天然氢气的重要来源。在东部地区,受太平洋板块俯冲作用而发育的郯城-庐江深断裂带,其周缘形成了松辽、渤海湾等多个裂谷盆地,为深源氢气的运移与富集提供了良好的通道和储集空间^[17]。特别是,中国陆域已有多处天然氢气含量异常显示,如楚雄盆地乌龙1井高浓度氢气异常^[18-19]、松辽盆地中央坳陷区20余口钻井高浓度氢气异常^[20-23]、中国东部沿海地区和青藏高原主要断裂带温泉富氢气体^[24-25]、三水盆地和张北地区地表土壤氢气异常渗漏^[26-27]等。这些高含量氢气异常区(点)与上述富氢地质条件高度匹配,展现出天然氢气资源的良好勘探潜力。

目前,全球范围内的天然氢气勘探研究尚处在起步阶段,中国亦未开展深入、系统的调查研究。尽管已发现上述氢气异常,但这些异常多分布于沉积盆地或深、大断裂带。其氢气来源和成因类型尚不明确,尤其是广泛发育的蛇绿岩带能否形成天然氢气藏、资源潜力如何,仍亟待查明。针对上述科学问题,中国地质调查局近两年来部署了首个全国性天然氢气战略性矿产资源调查项目。该项目按照蛇纹石化型、辐射分解型和深部流体脱气型3种成因类型,选取内蒙古中段蛇绿岩带、楚雄盆地、渤海湾盆地、张北地区和鄂尔多斯盆地等8个重点地区,开展天然氢气资源地质调查与评价工作。

本文基于内蒙古中段和南祁连拉脊山地区蛇绿岩带天然氢地质调查的初步进展,重点讨论蛇纹石化型天然氢气资源调查评价的初步认识及勘探启示,为尽早实现中国天然氢气资源新发现及勘探开发提供借鉴。

1 地质背景

中国蛇绿岩(超基性岩)分布广泛,主要位于古亚洲洋、秦祁昆洋、特提斯洋及环太平洋等区域;形成时间贯穿整个显生宙,空间上主要沿缝合带和深、大断裂带呈线性或带状出露于横贯中国大陆南、中、北3条近东西向的造山带,构成了青藏三江(特提斯)蛇绿岩带、阿尔金山-昆仑山-祁连山-秦岭蛇绿岩带和天山-北山-内蒙古蛇绿岩带等20余条不同时代、不同规模的蛇绿岩带^[3-4]。这些蛇绿岩带在全国1:1 000 000航磁图上均表现出形态规则、宽度窄、异常幅值大的线性或串珠状磁异常特征,并提供了隐伏或埋深较大的蛇绿岩(带)分布与产状等深部信息^[6]。这些隐伏或埋深较大的蛇绿岩带(超基性岩)正是寻找蛇纹石化型天然氢气来源的重要目标。

1.1 内蒙古中段蛇绿岩带

内蒙古中部的兴蒙造山带地处华北板块与西伯利亚板块之间,系中亚造山带东段北部的重要构造单元,以发育古生代多期、多条蛇绿岩带为特征。该蛇绿岩带位于天山-北山-内蒙古蛇绿岩带的北段,是中国仅次于西藏的重要蛇绿岩集中分布区。目前,该地区已先后识别出贺根山、温都尔庙、索伦山、红格尔庙和柯单山等数十处蛇绿岩或蛇绿构造混杂岩带,形成了二连浩特-贺根山、红格尔庙、索伦山-林西和温都尔庙-柯单山4条蛇绿岩带^[28]。其中,位于二连盆地北部马尼特坳陷的二连浩特-贺根山蛇绿岩带,是本文的重点研究区之一(图1)。

贺根山蛇绿岩带主要出露于东乌旗与西乌旗之间,呈NNE向断续分布,长约120 km,宽约20 km,面积约2 158 km²,是中亚造山带内蒙古境内分布面积最大、研究程度较高的蛇绿岩带(图1)。该蛇绿岩带主要由蛇纹石化辉橄岩、辉长岩、玄武岩、辉绿岩及斜长花岗岩组成,形成于晚泥盆世一早石炭世,构造侵位时间早于早二叠世^[28]。

贺根山蛇绿岩带岩石组合序列上构成了一个完整的蛇绿岩套剖面,可以与世界上典型蛇绿岩剖面对比。该蛇绿岩带不但记录了古亚洲洋盆的演化历史及西伯利亚板块与华北板块的碰撞过程,同时也是内蒙古乃至整个华北最重要的铬铁矿产地。前人围绕该地区蛇绿岩的空间分布、岩石组合、形成时代及构造环境等研究均取得了重要成果^[29-31],为研究区天然氢调查研究奠定了坚实的基础。

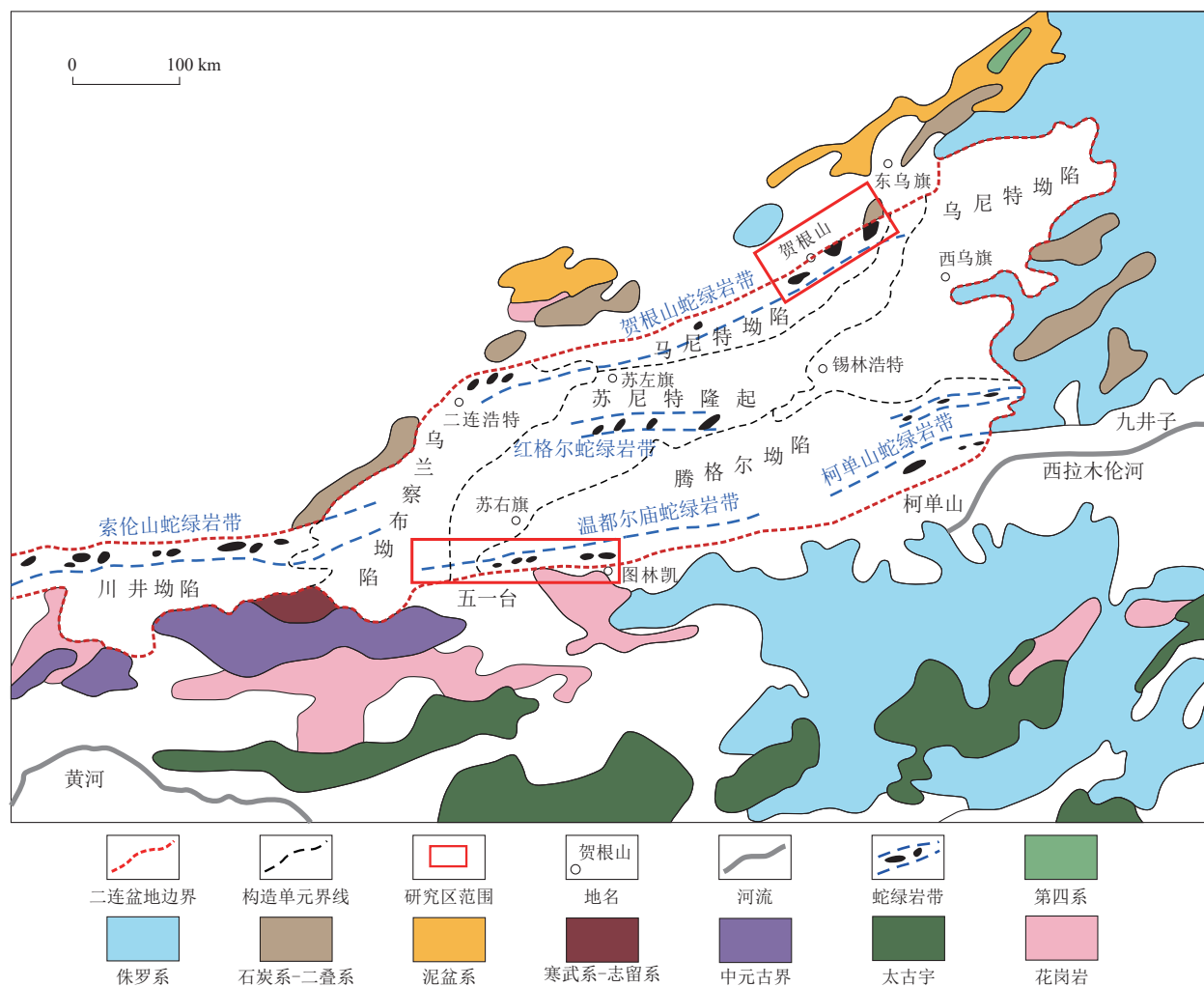


图1 内蒙古中段蛇绿岩带区域地质概况及研究区位置

Fig. 1 Regional geological setting of the ophiolite belt in central Inner Mongolia and location of the study area

已有研究表明,贺根山蛇绿岩带中出露多处超基性岩体,主要分布于二连盆地马尼特坳陷及其边缘(图1)。岩体四周被广厚的中、新生界覆盖,露头稀少,多为深埋于二连盆地内的隐伏岩体,主要被下白垩统碎屑岩层所不整合覆盖。各超基性岩体埋深不一,研究区油气钻孔资料显示在1 485.49 m和3 000.00 m深处均见到超基性岩;结合物探资料推算,最深可达5 800.00 m,表明该区深部存在隐伏超基性岩^[28]。综上所述,内蒙古贺根山蛇绿岩带中超基性岩体发育、规模较大,且被中、新生代沉积地层广泛覆盖,是天然氢气形成与富集的有利地区。

1.2 南祁连拉脊山蛇绿岩带

祁连山是中国经典的造山带,处于阿尔金-昆仑-祁连山-秦岭蛇绿岩带中部,是显生宙最古老的缝合带之一,被认为是早古生代原特提斯洋闭合和微陆块聚合的产物。该造山带以北祁连缝合带为典型代表,

发育大量早古生代蛇绿岩、高压低温变质岩及岛弧火山岩^[32-34]。南祁连缝合带出露的蛇绿岩以东部的NNW-SSE向展布并向NE凸出的拉脊山为代表(图2),长约200 km。该缝合带形成于寒武纪(510~480 Ma),主要出露于元石山、六台、药水泉、野牛圈滩、西沟和东沟等地区,构造侵位(闭合)时间为晚奥陶世—志留纪^[33]。缝合带岩石组合由橄榄岩、蛇纹岩、辉长岩、斜长花岗岩、辉绿岩和枕状熔岩组成,代表了一套典型的洋壳(蛇绿岩)岩石组合,构造上位于增生楔之中。^[34]

前人研究表明^[35-37],拉脊山与西宁盆地具有盆-山耦合关系,二者的形成与变形是印度板块与欧亚板块碰撞及青藏高原隆升变形的直接反映。从古近纪开始,西宁地区在前寒武系、寒武系—奥陶系和中生界基底上已形成碱化湖盆并接受盐湖沉积。例如,始新世中、晚期出现大套膏盐与泥岩互层沉积,广泛分布于西宁盆地。其中,拉脊山与西宁盆地结合区的古近系西

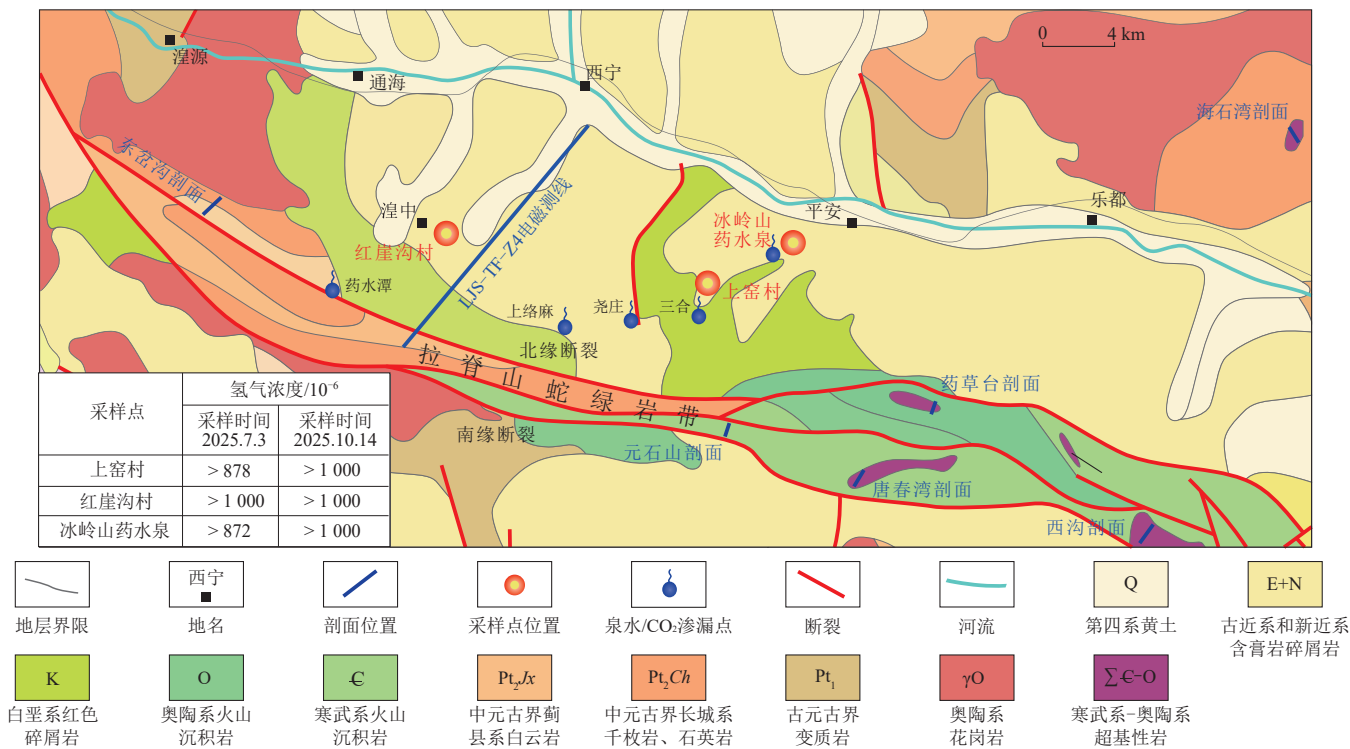


图2 南祁连拉脊山和西宁盆地区域地质概况及地表氢气异常分布
Fig. 2 Regional geological setting of Lajishan and the Xining Basin and distribution of surface hydrogen anomalies

宁群地层厚度约600 m,主要为粉砂岩和泥岩,并含超过200 m厚的膏盐岩及石膏与泥岩互层,构成良好的区域盖层,有利于天然氢气的封存。新近纪以来,西宁盆地及其周缘盆地遭受了一次强烈挤压变形,拉脊山开始隆起,构成了现今的盆-山构造格局,并在西宁盆地接受了中新世的细碎屑岩沉积和上新世的粗碎屑岩沉积(图2)。通过1:25 000的拉脊山昂思多蛇绿岩-增生杂岩专题地质填图^[33,38],基本查明了拉脊山内出露的蛇绿岩空间分布、岩石组合、形成时代、成因类型及构造环境等。这些蛇绿岩不仅广泛出露于西宁盆地南缘的拉脊山中,而且西宁盆地东北缘的民和一带也有较大规模出露,暗示着西宁盆地基底中可能存在深部隐伏的蛇绿岩。

值得关注的是,拉脊山蛇绿岩带与西宁盆地南部结合区内,隐伏热异常发育,地热资源丰富,地热梯度值高 $[3.89 \sim 5.74 \text{ }^{\circ}\text{C}/(100 \text{ m})]$ ^[39-40]。尤其在总寨坳陷和平安坳陷边缘,发育多处深部无机成因的天然CO₂泄漏显示,包括高含CO₂的温泉、废弃钻孔的间歇水气喷发和CO₂井喷等多种形式^[41],表明坳陷区内部为封闭或半封闭的对流体系,有利于地热异常的产生和流体聚集。同时,坳陷边缘区域性大断裂相对发育,为深部流体活动提供了重要通道。因此,如果西宁盆地基底中存在超基性岩,其与上覆新生代沉积地层的耦合

可形成类似于“美国Kansas盆地Scott氢气藏”类型^[11]的天然氢气系统。可见,拉脊山蛇绿岩带与西宁盆地结合区是深部蛇纹石化作用及天然氢气形成与成藏的潜在有利区域,具有地下人工刺激生产氢气与地热资源综合利用的潜力。

2 主要调查评价方法

目前,全球范围内尚未形成统一的天然氢气勘查指南和技术标准,但总体上普遍采用了“地表氢气异常调查、地球物理氢源探测和钻探资源潜力查证”的三段段勘查策略:①通过遥感卫星图像识别“仙女圈”构造,查找氢气异常渗漏区并确定调查范围和(或)直接测量地表氢气含量(如土壤及泉水中的氢气含量检测和老井天然气中的氢气含量复查等);②使用地球物理技术探测深部氢源潜在位置、断裂系统和储-盖条件;③钻探验证,查明资源潜力。本文主要涉及前2个勘查步骤,采用以下适合于调查区地质实际的关键技术方法。

2.1 寻找“仙女圈”构造

“仙女圈”构造作为氢气渗漏的独特地貌特征,已成为指示地下活跃天然氢气系统的重要标志。这类环形构造以特殊的植被格局及圆形、椭圆形浅凹陷形态

为特征。俄罗斯地表与天然氢渗漏相关的圆形凹陷^[42]、非洲马里的天然氢气藏地表覆盖区^[43]、南澳大利亚约克半岛^[14]、美国北卡罗来纳州海岸^[15]以及巴西沉积盆地地表氢气泄露(异常)区^[44]等全球多个地区均存在这一构造特征。氢气在其中心或周围长期广泛渗漏,预示了地下氢气资源的规模潜力和可持续性。目前,国外已发现的氢气“仙女圈”构造主要分布在沉积盆地、平原、高原的草原和戈壁滩等地区,并在遥感卫星影像中清晰可辨。因此,从地表识别出“仙女圈”构造并通过土壤氢气原位检测进行查证,已成为寻找天然氢源的首选途径。

本文采用中国首颗亚米级高分辨率立体测绘卫星——高分七号卫星(GF-7)的影像数据,经几何校正、精配准与融合处理后,采用人机交互与人工目视相结合的方式的综合解译。GF-7卫星搭载一台双线路阵相机,其全色空间分辨率优于0.8 m,多光谱分辨率优于3.2 m,幅宽为20 km。

2.2 土壤气体检测

地表土壤气体检测采用“冲击钻孔—密封导气—同步测试和取样”的现场工作流程,主要包括以下3步:①通过铁锤及钢钎(直径约2 cm,长度约1 m)进行人工冲击式钻孔,孔深控制为80 cm(± 5 cm);②拔出钢钎后,5 s内将带有气体导管的密封螺旋钻钻入孔中,使螺旋钻与钻孔侧壁紧贴保证密封,然后将螺旋钻的气体导管与检测仪器连接;③打开气体管路并启动检测仪器气泵进行抽气,持续观察仪器氢浓度示数3 min以上,待检测仪器读数趋于稳定后完成测试,记录氢浓度峰值,测试期间可同步连接集气装置(铝箔气袋)进行气样采集。测试开始前,确保螺旋钻气体导管密封,以最大限度避免大气干扰和密闭取样。检测使用仪器为GA5000型手持式气体检测仪,其氢气测量量程为0 ~ $1\,000 \times 10^{-6}$,可同时检测CH₄、CO₂和O₂等气体,每日使用前均经过校准。完成所有点的检测后进行数据处理,采用“统计界定—成因佐证”的分析方法来确定区域范围内氢气浓度的背景值界线并识别异常。核心步骤包括:①基于全样本数据绘制分位数—分位数图(Q-Q图)^[45],依其“拐点”统计界定背景阈值和异常值下限;②结合CO₂、氦气(He)和氡气(²²²Rn)等标志性伴生气体的分布进行校验,重点分析这些气体的来源及异常区域的重合性;③通过关键样品的氢同位素分析厘定氢气来源,为异常值与背景值的可靠性提供成因依据,最终实现统计结果与地球化学证据的相互印证和背景消除。

2.3 重磁资料重新解译

重磁资料重新解译主要包括:①收集调查区已有重力和航磁资料,跳出传统的小比例尺、大范围的区域性火成岩与断裂构造解译;②针对潜在氢源体——隐伏超基性岩体,以超基性岩体的“强磁—高重”耦合特征为基本判断标志,按照大比例尺、小范围重新解释;③对重磁数据开展化极处理,并结合多方向一阶导数与多高度解析延拓等多种数据处理手段与参数选取;④结合相关地质和钻探等信息,利用重磁联合反演圈定深部岩体和断裂。重力数据方面,在接边、扩边处理和数据拼接基础上,利用中国地质调查局发展研究中心提供的RGIS 2006软件Kriging网格化功能(搜索半径750 m)进行网格化处理,网格化采用250 m × 250 m的网格距。航磁数据方面,开展航磁化极垂向一阶导数处理,精细圈定重点区域(目标)深部岩体分布范围,其中航磁数据拼接及位场转换处理使用中国自然资源航空物探遥感中心自主研发的Geoprobe软件。

2.4 磁化率测量和穆斯堡尔谱分析

在地质剖面 and 钻孔岩心观察过程中,系统性测量岩石磁化率,采集超基性岩样品开展不同价态铁元素含量分析,为超基性岩体的蛇纹石化程度和生氢潜力评价提供关键参数。采用KM-7磁化率仪实地测量剖面和岩心不同时代、不同岩性及不同地区的岩石磁化率,获取不同岩性岩石磁性及其区内磁化率分布特征,KM-7测量的磁化率范围为0 ~ 999×10^{-3} ,灵敏度为 0.1×10^{-3} 。

采集露头剖面和钻孔岩心中超基性岩地球化学分析样品,重点开展穆斯堡尔谱的二价铁(Fe²⁺)、三价铁(Fe³⁺)及总铁(TFe)含量分析。样品送至中国科学院大连物理化学所实验室分析。穆斯堡尔谱术是一种基于穆斯堡尔效应的高精度光谱技术,用于研究物质的微观结构和性质,因其灵敏度高,通常用其对物质中铁的不同相(价态)及其含量进行高精度分析。

3 调查评价初步进展

3.1 贺根山蛇绿岩分布及氢气异常

依据上述内蒙古中段蛇绿岩带有关天然氢气形成的基本地质条件,重点选择贺根山蛇绿岩(超基性岩)开展天然氢气资源地质调查评价。

3.1.1 隐伏超基性岩的识别与分布

贺根山地区多为草原覆盖区,难以找到出露完整的蛇绿岩,地表地质工作开展难度较大。根据典型橄榄岩(弱或未蛇纹石化超基性岩)和蛇绿岩(强蛇纹石化超基性岩)的物性分析结果(图3),超基性岩尽管在蛇纹石化前、后物性发生显著变化(如纯橄榄岩密度 $\geq 3.0 \text{ g/cm}^3$,而强蛇纹石化橄榄岩密度则降低到 $2.6 \sim 2.8 \text{ g/cm}^3$),但其总体仍具有高密度、高磁性和高电阻率的“三高”特征,较其他类型岩石存在显著的物性差异。因此,重力、磁法和电法测量在寻找隐伏超基性岩(蛇绿岩)中具有独特的优势。

岩石的磁性是产生磁异常的基础。图3中典型岩性样品的磁化率差异尤为显著,橄榄岩和蛇绿岩(强蛇纹石化橄榄岩)的磁化率平均值分别为 29.13×10^{-3} (29个样品)和 40.32×10^{-3} (50个样品),其余岩性样品(205个样品)磁化率均小于 0.40×10^{-3} 。本文选取位于贺根山蛇绿岩带的铬铁矿矿区HGZK-A井和HGZK-B井岩心开展系统的磁化率测量(图4)。在HGZK-A井岩心中,橄榄岩类(纯橄榄岩、辉橄岩和橄长岩等)磁化

率普遍在 $36.70 \times 10^{-3} \sim 53.80 \times 10^{-3}$,平均值为 14.04×10^{-3} (146个检测点),明显高于辉长岩等非橄榄石类岩石,非橄榄石类岩石磁化率普遍小于 5.30×10^{-3} (94个检测点);HGZK-B井岩心磁化率分布特征与此相同。磁化率测试统计结果表明,该地区高磁性主要由超基性岩体(橄榄岩类)引起,证实岩石磁化率特征与航磁异常(见下文)通常存在对应关系,超基性岩可引起中-高强度的航磁异常。

航空重力测量和磁法勘探资料基本覆盖了研究区,包括1:50 000的航磁测量^[28],以及基于这些重磁资料的再处理和解释。在内蒙古中部苏尼特右旗至东乌珠穆沁旗区域内初步识别出超基性-基性岩体20余处(图5)。岩体总体沿苏尼特左旗—西乌珠穆沁旗及苏尼特右旗—锡林浩特呈SW-NE向带状展布,异常信息清晰,显示镁铁岩-超镁铁岩体良好的区域发育规模和空间分布特征,属于二连-贺根山蛇绿岩带。其中,少数几个超基性岩体出露于二连盆地边缘以外,其余岩体主要隐伏于二连盆地马尼特坳陷(图1,图5)。

从图5可以看出,航磁异常区西北部贺根山地区

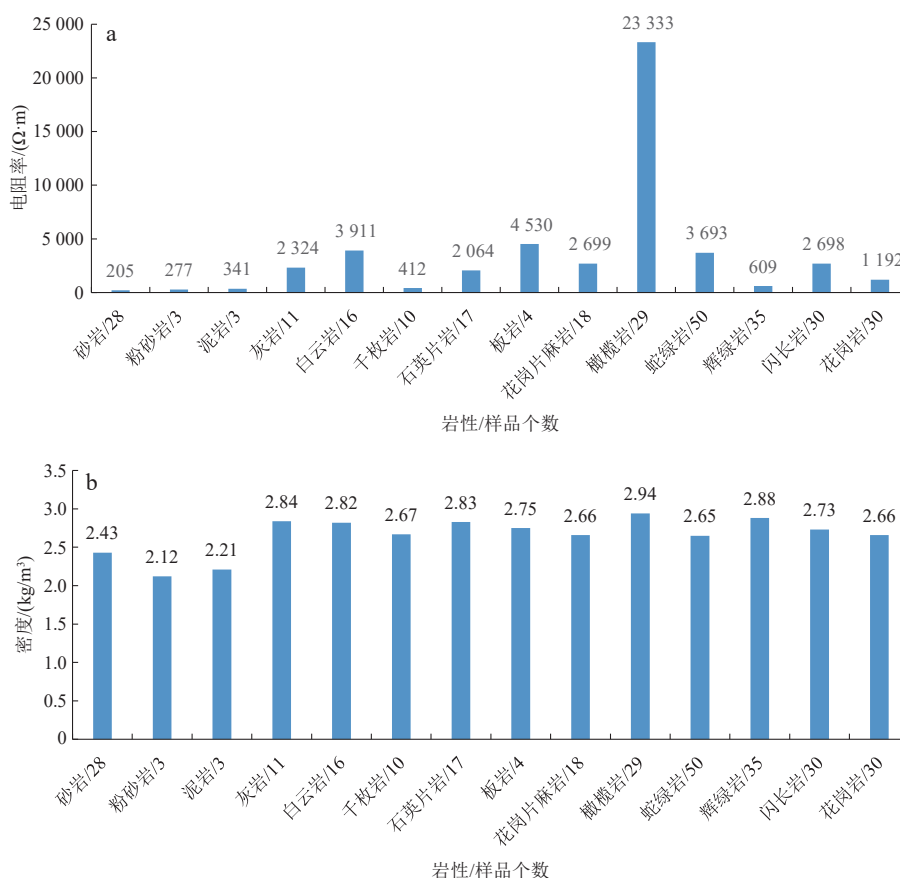


图3 内蒙古中段贺根山地区不同类型岩性电性(a)和密度(b)统计柱状图

Fig. 3 Statistical bar charts of the electrical properties (a) and density (b) of different lithologies in the Hegenshan area

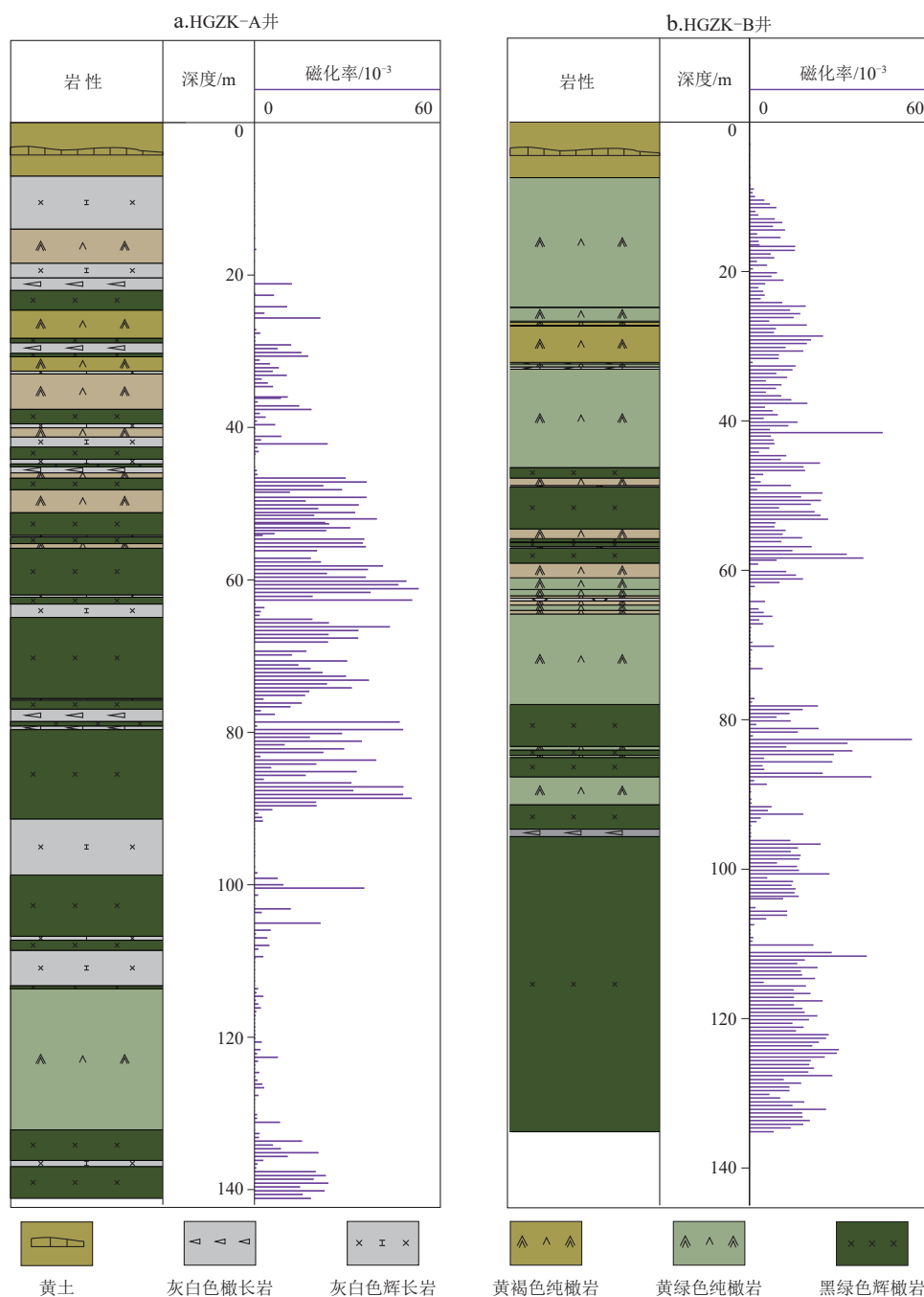


图4 内蒙古中段贺根山铬铁矿矿区HGZK-A井(a)和HGZK-B井(b)钻井岩心磁化率分布柱状图

Fig. 4 Columnar plots of drill-core magnetic susceptibility for wells HGZK-A (a) and HGZK-B (b) in the Hegenshan chromite mining area

隐伏岩体异常相对连续且规模更大。通过编制该地区大比例尺航磁化极等值线图 and 剩余重力异常等值线图以及进行磁异常综合解释,结合前人有关该地区蛇绿岩和铬铁矿体的分布特征研究^[30],初步圈定出2个“高磁-高重”耦合异常区。异常区符合超基性岩体的中-高磁性、高密度地球物理特征,尤其是西北部航磁异常区域沿SW-NE向呈带状展布范围长达50 km以上(图6蓝色虚线框范围)。2个“高磁-高重”耦合异常区位于马尼特坳陷中、东部的阿南凹陷,该凹陷的阿尔

善组粗碎屑岩储层与腾格尔组厚层泥岩的区域性盖层形成了白垩系良好的储-盖组合,是二连盆地中最主要的油气勘探区。现已发现的阿尔善油田重磁异常区内流体聚集,保存条件良好^[46]。二连盆地马尼特坳陷是寻找规模较大的潜在氢源岩——隐伏超基性岩(蛇绿岩)的远景区,贺根山地区则最为有利区带。

3.1.2 潜在生氢源和包裹体赋存的天然氢

蛇纹石化是指中、低温热液对含镁铁岩石交代而

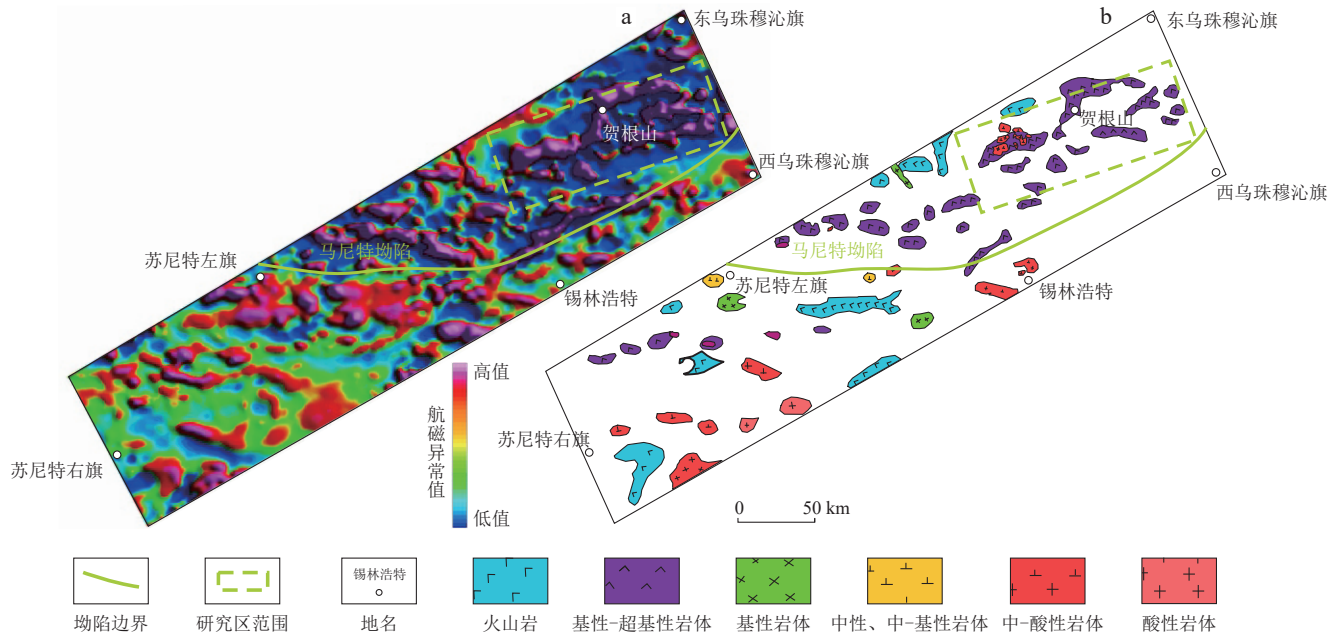


图5 内蒙古中段区域航磁异常分布(a)及其推断岩浆岩分布(b)

Fig. 5 Distribution of regional aeromagnetic anomalies in central Inner Mongolia (a) and inferred distribution of igneous rocks (b)

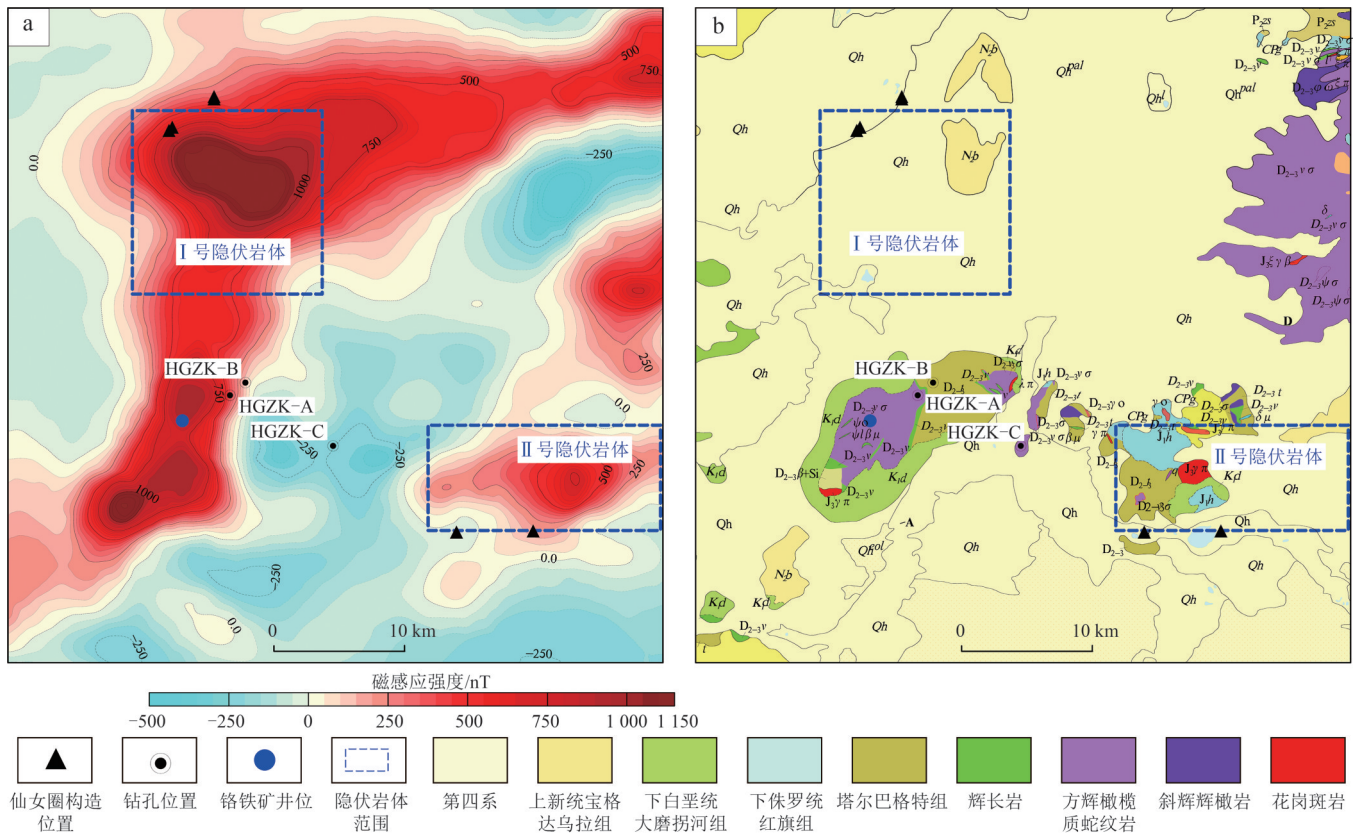


图6 内蒙古中段贺根山地区重磁异常、“仙女圈”构造及隐伏超基性岩分布

Fig. 6 Distribution of gravity and magnetic anomalies, fairy circles, and concealed ultramafic rocks in the Hegenshan area

a. 磁感应强度等值线及重磁异常分布; b. “仙女圈”构造及隐伏超基性岩分布

产生蛇纹石的一种水-岩反应,主要有2类:①超基性岩和基性岩的水热蚀变,主要是岩石中的橄榄石和斜方辉石蚀变为蛇纹石;②区域或接触变质条件下,含二

氧化硅的热液对含镁质碳酸盐的交代,多为热液交代白云石而形成蛇纹石^[47-48]。其中,超基性岩体蛇纹石化过程中的蚀变反应,是由不含水的铁镁质硅酸盐矿

物——橄榄石和辉石等矿物,蚀变为含水的富镁硅酸盐矿物——蛇纹石的过程。一般在地下温度为100~300℃条件下,橄榄石与岩体内部或表面接触的水发生蛇纹石化(水-岩反应),形成蛇纹石和磁铁矿,并释放出氢气。超基性岩蛇纹石化是生成天然氢气的重要机制之一,其原理是二价铁离子还原水产生氢气($\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{H}_2 \uparrow$)^[9-10]。现今大陆和海底正在发生的蛇纹石化过程表明蛇纹石化温度场范围较广,如阿曼超基性岩蛇纹化反应在大陆低温(<100℃)环境中正在持续进行^[13],大西洋的Rainbow黑烟囱喷口区域蛇纹石化原位温度达360℃^[49],而Lost City热流体喷口区域原位温度为75~116℃^[50]。实验研究也表明,温度是蛇纹石化和生氢的关键因素,蛇纹石化生氢的最佳温度范围为300~350℃^[51-52]。值得关注的是,橄榄石在催化作用下(如含适量 Ni^{2+}),90℃的低温下仍可蛇纹石化产生氢气^[53]。

根据贺根山铬铁矿区采出的矿石堆、2口铬铁矿钻井(HGZK-A和HGZK-B)岩心观察,橄榄岩普遍发生蛇纹石化和高磁化率(图4),表明此套橄榄岩发生了水-岩反应,生成丰富的蛇纹石和磁铁矿,指示其曾经历过生氢过程,也证实磁铁矿的生成是产生氢气的重要标志,其磁化率具有定量评价蛇纹石化生氢潜力的作用。

在内蒙古中段蛇绿岩带超基性岩中,首次发现了封存于包裹体内的天然氢气。橄榄岩类样品来自贺根山铬铁矿区HGZK-C井岩心,埋深在181.4~182.8 m之间,岩性为黑绿色辉橄岩(图6)。对其进行流体包裹体激光拉曼显微分析,检测到了氢气与甲烷,直接证

明了贺根山蛇绿岩带地下已经发生或正在发生蛇纹石化产氢过程(图7)。

根据上述研究区内超基性岩的强蛇纹石化、高磁化率和包裹体赋存的天然氢气等现象,结合蛇纹石化温度场范围^[13,49-53],说明同一超基性岩在地下更广泛的深度和温度范围内可以持续蛇纹石化并生成氢气。内蒙古中部隐伏超基性岩体在地下深部100~300℃具备蛇纹石化水-岩反应和生氢的基础条件(图8)。

3.1.3 地表“仙女圈”构造和氢气渗漏异常

目前,在全球已知天然氢气藏和氢气异常区内多具有相似的圆形和椭圆形洼地构造特征,俗称为“仙女圈”构造^[15]。关于其成因,一般认为是“氢气与岩石之间的化学反应使地面变得更疏松,容易下沉而形成洼地”^[44],从地质力学角度,则解释为“上升的氢气压力导致圆形地块先隆起后下沉”^[54]。最具典型且集中发育的“仙女圈”构造在俄罗斯被发现,从俄罗斯到哈萨克斯坦,已识别出数千个直径从数百米到几千米不等的圆形和椭圆形浅凹陷构造^[42]。通常这些构造对应于小型地表低洼区,其周边一般出现一圈土壤被漂白的现象,并伴有植被生长异常;这些构造的核心多为沼泽,有时还会有湖泊。构造的内部及周围土壤中氢气的浓度明显高于外部,如俄罗斯车里雅宾斯克“仙女圈”构造在埋深1.2 m的土壤中测得氢气浓度高达1.25%。全球多个“仙女圈”构造的形态、大小和地貌特征与俄罗斯车里雅宾斯克“仙女圈”构造相似,包括西澳大利亚的Pingrup^[14]、美国东海岸Carolina^[15]地区

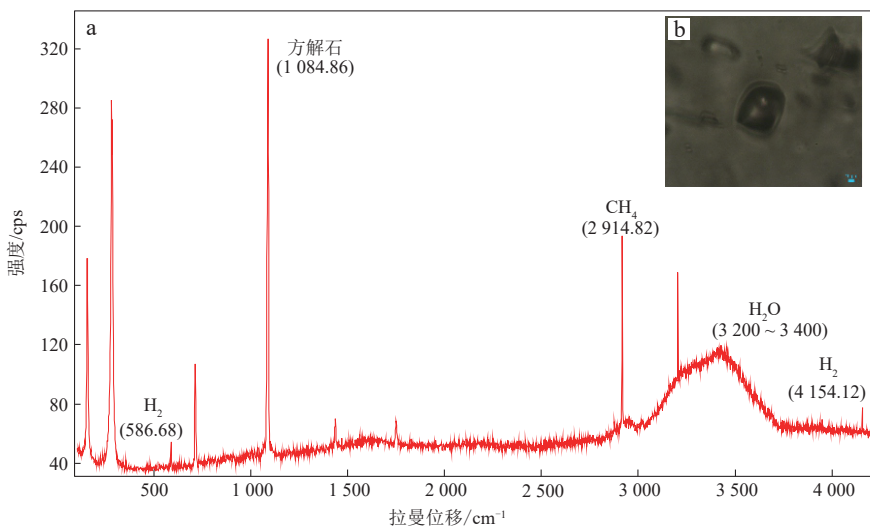


图7 内蒙古中段贺根山地区超基性岩中含 H_2 和 CH_4 流体包裹体激光拉曼光谱

Fig. 7 Laser Raman spectra of H_2 - CH_4 -bearing fluid inclusions in ultramafic rocks from the Hegenshan area

a. 激光拉曼光谱中检测到 H_2 和 CH_4 ; b. 含 H_2 和 CH_4 的流体包裹体显微镜下照片

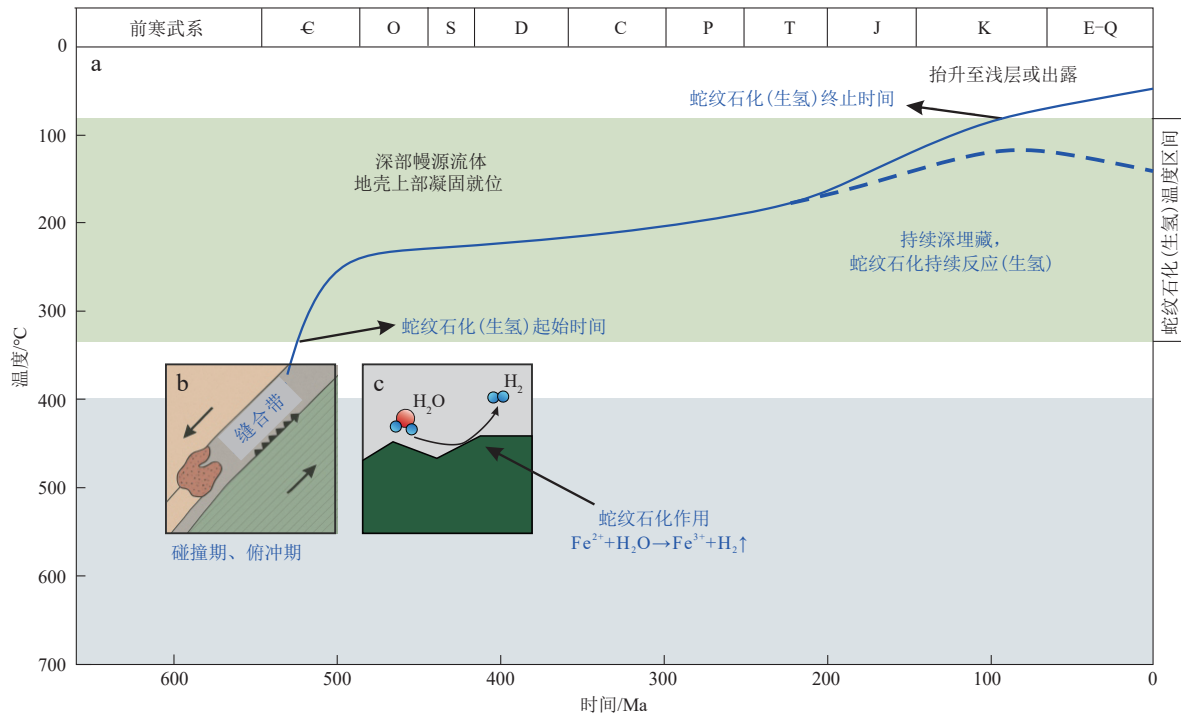


图8 贺根山地区超基性岩蛇纹石化生氢机制及其关键时间示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the hydrogen-generation mechanism through serpentinization of ultramafic rocks and its critical timing

a. 超基性岩蛇纹石化生氢关键时间; b. 深部幔源流体沿缝合带侵入; c. 超基性岩蛇纹石化反应

所发育的“仙女圈”构造群,均检测到氢气外泄。

如图9所示,基于GF-7号遥感影像数据解译结果,贺根山蛇绿岩带发育两组“仙女圈”构造群,分别位于贺根山蛇绿岩带北部和南部(图6)。两组“仙女圈”构造规模在数百米至数千米,构造核心——圆形和椭圆

圆形浅凹部分(蓝色圈)已积水成湖,凹陷边缘明显“漂白化”或“盐碱化”,植被生长异常(红色圈)。这是中国首次发现并报道清晰的“仙女圈”构造。贺根山地区发现的这些“仙女圈”构造,在GF-7号遥感卫星影像上显示的形状、规模和地貌等特征,与上述全球典型“仙女

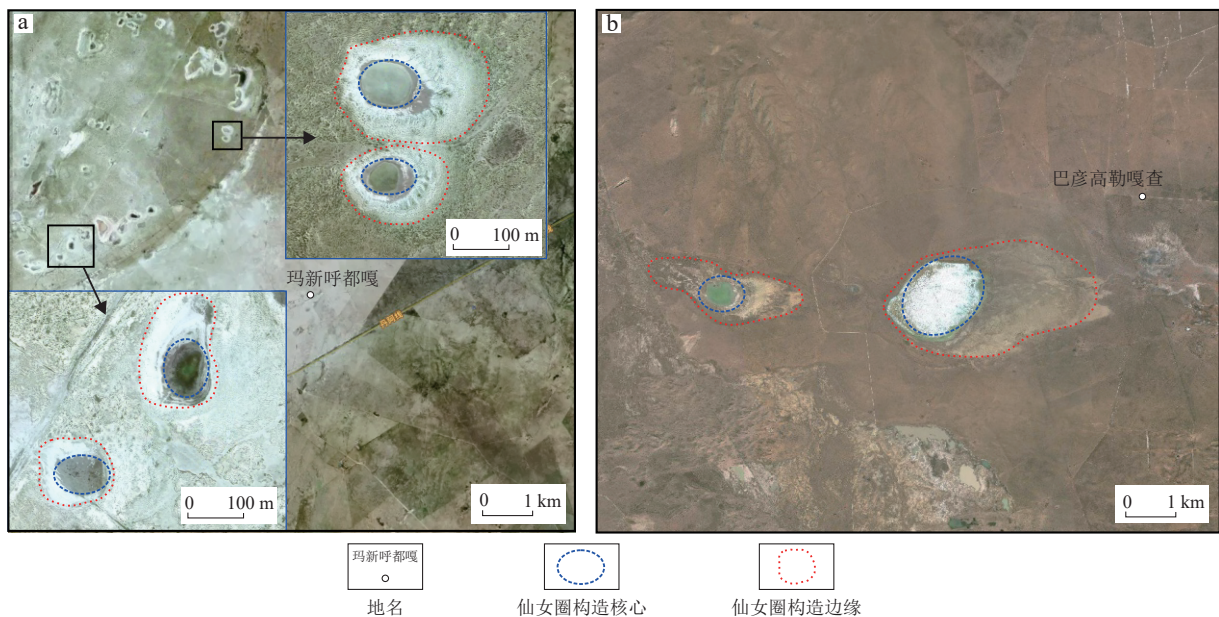


图9 内蒙古中段贺根山地区蛇绿岩带北部(a)和南部(b)“仙女圈”构造分布遥感卫星图像

Fig. 9 Remote sensing satellite images showing the distribution of fairy circles in the northern (a) and southern (b) parts of the Hegenshan ophiolite belt

圈”构造特征相近。

贺根山地区“仙女圈”构造位于两个隐伏超基性岩体(航磁异常区)及其周缘上部,二者在空间上具有明显的对应关系,暗示着二者可能存在某种成因联系(图6)。笔者在两组“仙女圈”之间已知的含铬铁矿蛇纹石化超基性岩浅层覆盖区,即贺根山铬铁矿采矿区、HGZK-A井区及HGZK-B井区开展了土壤氢气浓度的原位检测。十字形剖面长度200~300 m,测量点间距为20~30 m,总测点为123个(图6b),氢气浓度变化在 $9 \times 10^{-6} \sim 430 \times 10^{-6}$ 之间。分位数-分位数图(Q-Q图)统计分析表明(图10a),氢气浓度呈现多段线性特征。同时其背景阈值为 25×10^{-6} (样本占比约为10%),可以识别出三级异常:较低异常(氢气浓度 $25 \times 10^{-6} \sim 90 \times 10^{-6}$,样本占比37%)、中等异常(氢气浓度 $90 \times 10^{-6} \sim 310 \times 10^{-6}$,样本占比48%)和高异常(氢气浓度 $>310 \times 10^{-6}$,样本占比5%),指示蛇纹石化超基性岩覆盖区地表存在氢气的异常渗漏。特别是马新呼都嘎下部仙女圈构造的初步氢气检测结果显示(图9a),在核心区边缘(漂白化边缘/蓝线)氢气浓度在 $200 \times 10^{-6} \sim 500 \times 10^{-6}$ 之间(28个点),最高达 620×10^{-6} ,以高异常为主;核心区(蓝线)内氢气浓度在 $100 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$ 之间(16个点),以中等异常为主;仙女圈构造外围(红线以外)则多为背景阈值,即 $20 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$ 之间(19个点)。展现出典型“仙女圈”构造氢气泄漏“边缘高、内部低”的特征^[14-15,42-44]。因此,可以推测这些“仙女圈”构造的形成与深部天然氢气的活跃及其扩散密切相关。

3.2 拉脊山蛇绿岩分布及氢气异常

蛇绿岩在阿尔金-昆仑-祁连山-秦岭缝合带中非

常发育。该区域的拉脊山蛇绿岩带与西宁盆地呈盆-山耦合关系,不仅蕴藏有丰富的深部活动相关地热资源,还有深部成因 CO_2 流体的聚集与渗漏迹象。研究区内不仅有形成天然氢气系统的基本条件,而且还有活跃的深部流体活动和运移条件。因此,本研究在拉脊山蛇绿岩带及其与西宁盆地南缘结合部位开展了天然氢气资源地质调查。

3.2.1 隐伏超基性岩的识别与分布

重磁勘探资料已基本覆盖率拉脊山及西宁盆地。本研究通过对该地区的地球物理资料进行了重新处理,并开展了时频电磁剖面测量。在拉脊山及其与西宁盆地南缘结合部位,识别出2个高磁异常区,沿NW-SE方向呈斜行排列展布于拉脊山中、东部及西宁盆地南部地区,并延伸至西宁盆地基底,推测为2处大型超基性岩体(图11)。主要依据如下:①拉脊山中、东部瞿坛县药草台林场、昂思多镇塘春湾湾村等蛇绿岩露头地质剖面的现场磁化率测量结果表明(图2),磁化率的大小与岩性密切相关。蛇纹岩化辉橄岩的磁化率普遍较高,最高值为 56.96×10^{-3} ,平均值为 31.19×10^{-3} (12个检测点),与贺根山地区蛇纹石化橄榄岩相当;而辉长岩、闪长岩和坡积物等其他岩性磁化率均小于 5.00×10^{-3} (11个检测点)。由此可见,该地区岩体高磁性主要由蛇纹石化超基性岩体引起。②根据该地区的1:50 000的区域地质图和1:25 000的拉脊山昂思多蛇绿岩-增生杂岩专题地质图^[33,38]中蛇绿岩带的空间分布特征分析,拉脊山中部元石山-东部塘春湾及药草台林场等地区出露的蛇绿岩均处于2个高磁异常区内(图2,图11)。然而,蛇绿岩的出露面积远小于高磁异常区面积,表明西宁盆地南缘及拉脊山深部可能

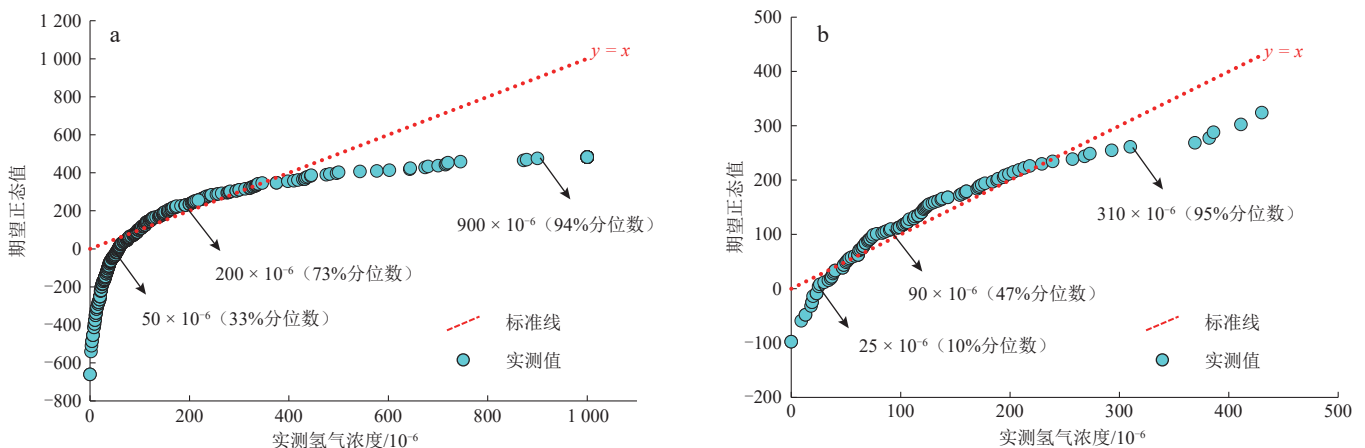


图10 内蒙古中段贺根山(a)及南祁连拉脊山(b)地区实测土壤氢浓度统计分位数-分位数图

Fig. 10 Statistical quantile-quantile plots of measured soil hydrogen concentrations in the Hegen Shan (a) and Lajishan (b) areas

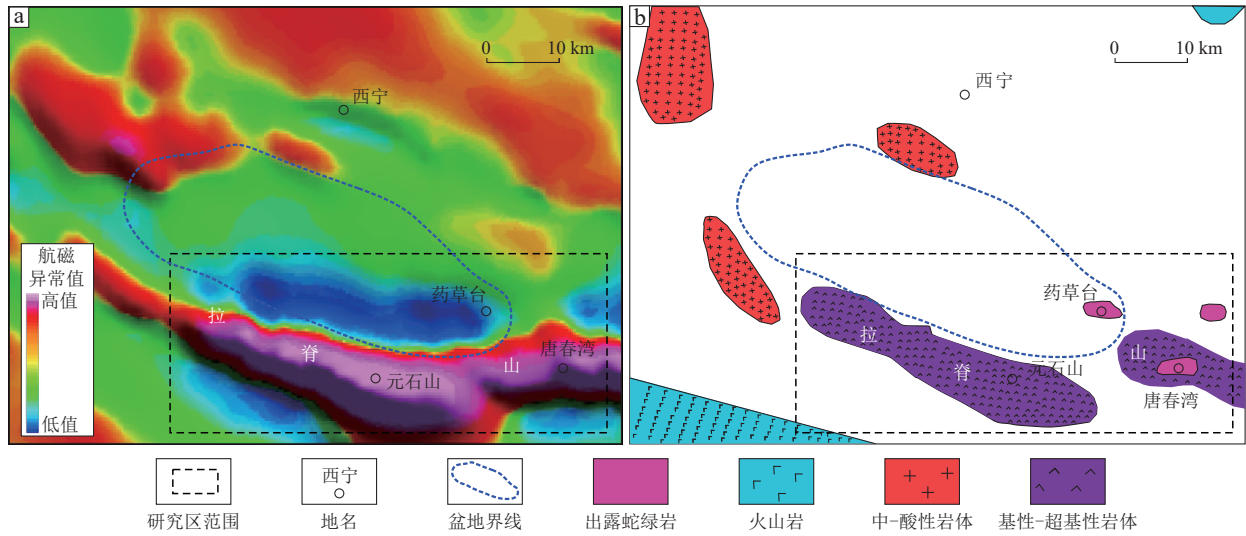


图 11 南祁连拉脊山蛇绿岩带与西宁盆地结合部位航磁异常分布(a)及超基性岩预测分布(b)

Fig. 11 Distribution of aeromagnetic anomalies (a) and predicted distribution of ultramafic rocks (b) at the junction between the Lajishan ophiolite belt and the Xining Basin

存在更大的隐伏超基性岩体。③在西宁盆地南缘总寨坳陷的时频电磁LJS-TF-Z4线电阻率反演剖面中,横向上在 $0 \sim 8\,000\ \Omega \cdot \text{m}$ 之间和 $12\,000 \sim 22\,000\ \Omega \cdot \text{m}$ 之间有

以上(图12)。根据调查区内不同类型岩石的物性分析结果(图3),结合图12中的岩体侵入状产出特征,推测为超基性岩(橄榄岩)侵入,根据时频电磁剖面预测(图12),此超基性岩现今埋深为 $2\,500 \sim 3\,500\ \text{m}$ 之间。

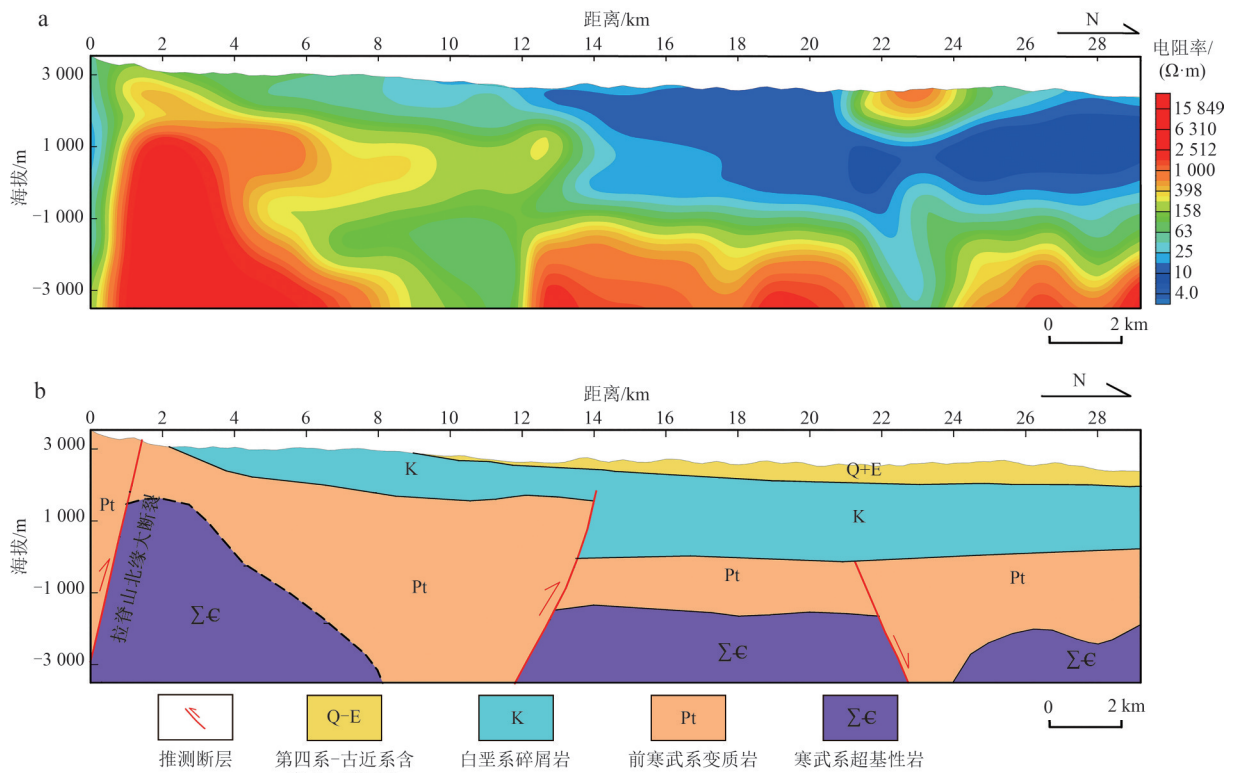


图 12 南祁连西宁盆地南缘总寨坳陷时频电磁Z4线(LJS-TF-Z4电磁测线)电阻率反演剖面(剖面位置见图2)

Fig. 12 Resistivity inversion profile of time-frequency electromagnetic line Z4 (LJS-TF-Z4) in the Zongzhai Depression on the southern margin of the Xining Basin (see Fig. 2 for the section location)

a. 时频电磁电阻率反演剖面;b. 地质解释剖面

3.2.2 潜在生氢源的评价

拉脊山中东部元石山、昂思多和瞿坛县等地区出露的多处蛇绿岩表明,超基性岩均发生了不同程度的蛇纹石化,局部地区蛇纹石化强烈(图13)。药草台林场剖面中普遍观察到蛇纹石化较强的超基性岩体(图13a—c),其现场测量的磁化率也相对较高,表明蛇纹石化超基性岩中富含磁铁矿;辉长岩和闪长岩中未见蛇纹石化,其现场测定的磁化率分别为 0.12×10^{-3} 、 0.17×10^{-3} ,呈现无磁性或弱磁性。该地区地表出露区清晰见有橄榄岩的新鲜面及微裂缝系统(图13c,d,h),表明拉脊山地区蛇绿岩和超基性岩基本保持了原始状态,风化作用对剖面现场磁化率测量和采集样品的微量元素含量分析等影响较小。

蛇纹石化生氢过程中,二价铁离子(Fe^{2+})和三价铁离子(Fe^{3+})分别为主要反应物和产物,二者的含量及其比值能够说明蛇纹石化反应程度及其生氢过程。表1展示了拉脊山蛇绿岩带地质剖面基性-超基性岩类的穆斯堡尔谱分析结果, $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 含量比值存在显著差异。以样品D08-02辉橄岩为例,该样品采自药草台

林场剖面,蛇纹石化强烈(图13a)。其 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 含量分别为38.44%和61.55%, $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值为1.6,表明通过蛇纹石化作用更多的 Fe^{2+} 转化为 Fe^{3+} 并形成磁铁矿,伴生氢气。样品D18-02辉橄岩和D18-01辉长岩样品均采自拉脊山东部西沟剖面,岩体露头处未见蛇纹石化,磁性亦弱(磁化率 $< 5.00 \times 10^{-3}$)。与D08-02蛇纹石化辉橄岩相比,这2个样品的 Fe^{2+} 含量均高,但是 Fe^{3+} 含量低, $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值更低, Fe^{2+} 矿物尚未转化为更多的 Fe^{3+} 的矿物相,指示蛇纹石化程度较弱,氢气生产率较低。

上述蛇纹石化超基性岩露头剖面的蛇纹石化、磁化率和 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值等特征证实,拉脊山蛇绿岩带经历过超基性岩的蛇纹石化及其生氢过程。不同地区或同一超基性岩不同部位的蛇纹石化程度存在差异,部分超基性岩尚未蛇纹石化或蛇纹石化较弱。研究区内超基性岩在深部仍具备水-岩反应和潜在生氢源的基础条件。

3.2.3 地表土壤氢气异常

目前,地表土壤、泉水等氢气含量的现场原位检测是天然氢气资源勘探研究的最简便最有效的路径。拉

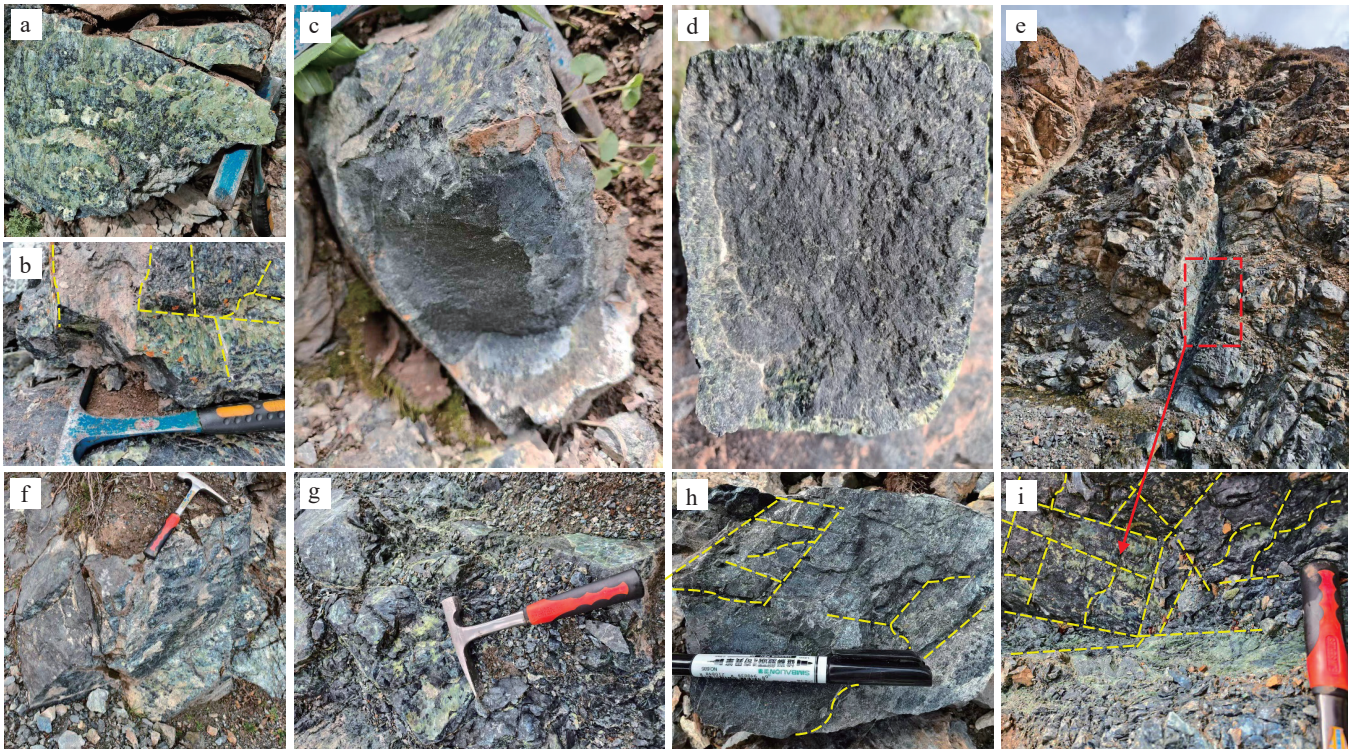


图13 南祁连拉脊山蛇绿岩带出露区橄榄岩蛇纹石化和微裂缝发育特征野外剖面照片(黄色虚线为微裂缝)

Fig. 13 Characteristics of serpentinization and microfracture development in peridotites exposed in the Lajishan ophiolite belt (yellow dashed lines indicate microfractures)

a. 药草台剖面,蛇纹石化橄榄岩;b. 药草台剖面,蛇纹石化橄榄岩,蛇纹石化沿裂缝发育;c,d. 药草台剖面,蛇纹石化橄榄岩,岩石内部未见蛇纹石化;e,i. 塘春湾剖面,蛇纹石化橄榄岩,断层邻近蛇纹石化较强;f. 塘春湾剖面,蛇纹石化橄榄岩;g. 塘春湾剖面,蛇纹石化橄榄岩,蛇纹石化沿裂缝发育;h. 塘春湾剖面,蛇纹石化橄榄岩,微裂缝发育,被方解石充填

表1 南祁连拉脊山蛇绿岩带不同类型岩石中不同价态铁元素含量及其比值
Table 1 Contents of iron in different valence states and their ratios in different rock types from the Lajishan ophiolite belt

剖面	样品编号	岩性	Fe ²⁺ 含量/%	Fe ³⁺ 含量/%	Fe ³⁺ /Fe ²⁺
药草台	D04-04	蛇纹石化辉橄岩	56.28	43.73	0.78
	D04-06	蛇纹石化辉橄岩	60.36	39.64	0.66
	D08-02	蛇纹石化辉橄岩	38.44	61.55	1.60
	D09-01	蛇纹石化辉橄岩	72.52	27.48	0.38
	D11-01	细晶辉橄岩	51.81	48.20	0.93
	D12-01	蛇纹石化中粗晶辉橄岩	69.10	30.90	0.45
唐春湾	D13-01	蛇纹石化辉橄岩	66.98	33.02	0.49
	D13-02	粗晶辉橄岩	51.46	48.54	0.94
	D14-01	蛇纹石化辉橄岩	47.76	52.23	1.09
	D15-01	辉长岩	54.98	45.02	0.82
西沟	D18-01	辉长岩	85.97	14.03	0.16
	D18-02	辉橄岩	66.85	33.15	0.50

脊山及西宁盆地内受区域断裂构造影响,泉水和地热资源发育,地下水的补给主要来自大气降水^[39-40]。然而,该地区尚未开展针对天然氢气潜力的原位检测工作。

本次研究在拉脊山蛇绿岩带出露区(药草台和唐春湾剖面)、西宁盆地南缘覆盖区的温泉发育区和CO₂渗漏区,开展了土壤氢气的剖面测量。剖面长度为500~1 000 m之间,测量点间距在30~50 m之间(局部加密为10 m)。其中,选择同一地区、同一地点开展了夏季、秋季两次的地表土壤、泉水和地热井的氢气含量原位检测。如图2所示,2025年7月初的现场测试发现,多个土壤高浓度氢气异常点分布于拉脊山北缘断裂带北部的北东向或北西向次级断裂上,包括冰岭山药水泉、红崖沟村东和上窑村等。这些异常点的氢气浓度普遍为800×10⁻⁶~900×10⁻⁶,最高浓度≥1 000×10⁻⁶,超过背景值(<100×10⁻⁶)数倍至数十倍。考虑到土壤氢气浓度波动大,易受地表温度、微生物等影响,2025年10月初对这些土壤氢气高浓度异常点进行了重复测试。结果显示,各处异常均重复出现,且均超过仪器氢气组分测量量程的上限(氢气浓度≥1 000×10⁻⁶)。其中,冰岭山药水泉土壤氢气浓度超限报警持续约1 min,推测氢气浓度高达1 000×10⁻⁶的数倍之多。

对全区的土壤氢气检测数据进行统计分析发现(图10b),氢气浓度变化在2×10⁻⁶~1 000×10⁻⁶(353个点)范围内。图10b呈现多段线性特征,揭示出背景值与多个异常群体的存在。背景阈值为50×10⁻⁶(样本个数占比约为33%),可识别出3个异常级别:较低异常(氢气浓度50×10⁻⁶~200×10⁻⁶,样本占比40%)、

中等异常(氢气浓度200×10⁻⁶~900×10⁻⁶,样本占比21%)和高异常(氢气浓度>900×10⁻⁶,样本占比6%)。值得注意的是,实测数据中有6%的样本氢气浓度超过了仪器的检测上限(999×10⁻⁶),在数据分析中暂记为1 000×10⁻⁶。尽管该部分群体被归为高异常值,但Q-Q图的趋势外推表明,这部分样本可能构成一个独立的极高异常群体,其真实浓度可能远超1 000×10⁻⁶,潜在界线或达2 000×10⁻⁶以上,这与上述氢气浓度超限报警持续约1 min的现象相符。以上证据表明,该区域高浓度氢气渗漏异常客观存在。其中,红崖沟村东的氢气渗漏异常点(区)位于LJS-TF-Z4电磁测线时频电阻率剖面所揭示的隐伏超基性岩体之上(图2,图12)。

综上所述,结合调查区内蛇绿岩(超基性岩)的发育、地热资源和深部无机成因机制的CO₂分布特征等,初步推断该区内土壤氢气渗漏异常主要来自深部地质活动。进一步结合中、新生代泥岩、膏盐与砂岩互层的沉积覆盖层条件,表明该地区具有良好的天然氢气与地热资源综合勘探开发潜力。

4 初步认识

通过上述调查评价,并结合前人相关研究成果,初步认识到蛇纹石化型天然氢气的生成与富集存在复杂的影响因素,除了运移通道、圈闭和保存条件等成藏关键要素以外,超基性岩和水作为相互作用生成氢气的物质基础,其规模、分布和蛇纹石化时间等地质因素也具有重要影响。

4.1 蛇纹石化型天然氢的来源

超基性岩与充足水源的耦合效应是蛇纹石化型天然氢气生成的物质基础。与常规天然气相似,天然氢气的聚集成藏同样需要“生-储-盖-运-聚-保”6大要素的组合与匹配,尤其是来源、迁移路径、圈闭和保存条件被认为是关键要素^[12-15]。然而,天然氢气地质系统不同于含油气系统,其关键差异在于“源”,油气系统的来源为黑色页岩中的有机质,而天然氢气则以无机成因为主。

对于蛇纹石化型天然氢气而言,其来源包括2类物质:超基性岩和地下水。通过二者的水-岩反应(蛇纹石化),才能将水转化为氢气,二者缺一不可,协同耦合效应是根基。前人研究更多关注超基性岩的蛇纹石化作用及其生氢机制,包括从温度、压力和矿物成分角度探讨蛇纹石化程度及其生氢能力^[9-10,49-53],但很少关注到氢气的直接来源——水的作用(包括参与反应的水的来源及其化学性质等),目前相关文献报道较少。实际上,除了潜在生氢源(如超基性岩、前寒武纪含铁建造)自身固有的水(或原生岩浆水)提供原始来源以外,来自围岩的外来水,包括邻近盆地的地层水、后期侵入的岩浆流体水、沿断裂带运移的大气降水和海水等,对氢气的生成至关重要,尤其是对于持续、大规模的蛇纹石化以产生大量氢气而言,充足的水源供给更是不可或缺。

在拉脊山和贺根山蛇绿岩的露头剖面中,强蛇纹石化橄榄岩(蛇绿岩)普遍发育多组微裂缝(图13b,g,i),蛇纹石基本沿裂缝面呈盖帽状分布(图13b,c,f)。敲开岩石观察可见,岩石内部新鲜,未见明显的蛇纹石化(图13c,f);沿超基性岩体边缘、尤其在断层带上,蛇纹石化明显强于周缘岩体(图13h,i)。这些现象表明,蛇纹石化作用可能与沿断层和裂缝渗透到超基性岩体的外来水(如大气降水)密切相关;超基性岩体抬升至浅层后更容易产生微裂缝和断裂系统(图13b,g,i),从而增加了橄榄石与水接触及其热蚀变反应面积。同时,沿断裂系统流动的地层水进一步促进了浅层低温条件下的蛇纹石化作用。这一特征类似于阿曼蛇绿岩带,超镁铁质岩石蛇纹石化反应在大陆浅层(埋深±500 m)、低温(<100℃)环境中正在持续进行,反应水主要来自大气降水供给^[13]。事实上,目前已发现的天然氢气藏,如非洲克拉通Taoudenni盆地的Bourakébougou天然氢气藏和美国大陆裂谷Kansas盆地的Scott天然氢气藏等,均与大气水的连续、充分供给有关^[8-12]。现代海洋底部的Rainbow和Lost City热流体通过地幔橄榄岩流体与海水直接发生蛇纹石化反应,产生大量氢气,更是这一机制的直接证据^[49-50]。

4.2 天然氢的规模成藏

规模成藏是天然氢气作为清洁能源实现勘探开发的核心所在,其取决于超基性岩体规模和盆地覆盖。马里天然氢气藏的发现,主要意义在于证实了天然氢气可以在特定地质条件下聚集成藏,但并不意味着能够大规模聚集成藏。尽管全球范围内具有巨大的生氢潜量,预测全球地下氢气资源总量可能在 $1.0 \times 10^9 \sim 1.0 \times 10^{16}$ t之间波动,最可能值约为 5.6×10^{12} t^[55],但人们至今尚未完全了解这些天然氢气是否能够大规模聚积、如何实现规模成藏,以及其商业开发前景究竟如何。本文认为蛇纹石化型天然氢气的规模成藏取决于“规模氢源”和“规模聚集”2个基本条件。

在规模氢源方面,如图1、图5和图11所示,内蒙古中段二连-贺根山和南祁连拉脊山蛇绿岩带等总体呈带状、串珠状分布,其中超基性岩(蛇绿岩)大小不等、产状各异。根据前人成果^[3-4,6],中国南部、中部和北部3条缝合带中的蛇绿岩带基本呈现类似的分布特征。蛇绿岩带的这种分布特征,与沉积盆地中大面积层状稳定分布的烃源岩形成了鲜明对比,使得从复杂的产出的蛇绿岩带或火成岩体(群)中寻找规模较大的隐伏超基性岩体(潜在氢源体)变得至关重要。同时,规模成藏还需要具备充足的水源供给,这是持续大量生成天然氢气的主要物质基础,上述拉脊山、贺根山地区蛇绿岩系统中的蛇纹石化及微裂缝的发育程度,充分说明了水源供给的重要性(图13)。

在规模聚集方面,天然氢气与其他天然气一样,需要规模性的储层与盖层的有效组合及时-空匹配,才能将更多的天然氢气捕捉并积累,形成规模性气藏。这主要依赖于以下2种地质条件。

1) 蛇绿岩自身的裂缝储集系统。蛇绿岩带通常发育裂缝系统,具有一定的储集能力。拉脊山、贺根山和温都尔庙蛇纹石化超基性岩广泛发育微裂缝(图13)。这些裂缝的形成,除了压力释放、侵蚀和风化作用增强以外,与蛇纹石化作用亦密切相关。这一点对于深部隐伏的蛇纹石化超基性岩尤为重要。因为橄榄石转化为蛇纹石后,岩石体积和密度会发生显著变化,导致岩石结构和物性改变,从而为天然氢气的原地积聚提供了重要场所。阿曼蛇绿岩带^[13]、阿尔巴尼亚含铬铁矿^[12]的超基性岩等均发育断裂及其微裂缝系统,其中阿尔巴尼亚的亚布尔基泽镁铬矿深部可能存在于一个连通侏罗系蛇绿岩的大型断层储层,为蛇纹石化释放的天然氢气成藏提供了重要的聚集场所^[12]。

2) 蛇绿岩带与沉积盆地的耦合系统。该系统是

规模成藏的最有利地区,被沉积盆地覆盖的蛇绿岩是最具天然氢气资源潜力的方向。尤其是存在一定厚度沉积盖层的条件下,深部基岩(超基性岩)与上覆沉积地层界面处的氢气储集潜力更大。这归因于基岩(氢源)的裂缝系统与其上覆沉积储-盖组合的叠加耦合效应。贺根山蛇绿岩带与二连盆地、拉脊山蛇绿岩带与西宁盆地之间均存在耦合关系。二连盆地和西宁盆地的深部可能存在规模较大的潜在氢源体(隐伏超基性岩),这也是本研究选择它们作为重点调查评价区的主要原因。

众所周知,现今洋中脊和造山带中大面积出露的蛇绿岩环境普遍缺乏氢气聚集和保存的基本条件,即使释放出大量氢气也难以规模成藏,如阿曼 Semail 蛇绿岩^[13]及现代大西洋底部 Rainbow 和 Lost City 热流体^[49-50]。目前,全球范围内已发现的天然氢气藏主要分布在超基性岩及其上覆沉积地层中。例如,美国 Kansas 盆地 Scott 氢气藏^[11]主要储集于 Kansas 盆地的富铁火成岩基底及其上覆砂岩和碳酸盐岩层,并被泥岩和含水层双重封闭。特别是 D2 井中,破碎的火成岩基底中氢气浓度高达 91.8%,且其上方直接覆盖致密沉积岩。马里 Bourakébougou 天然氢气藏则源于深部富铁基岩,富集于上覆砂岩、碳酸盐岩储层与含水层-辉绿岩封闭层的组合系统^[8]。

4.3 天然氢的形成与滞留时间

明确天然氢气何时开始生成、是否曾经或现今持续生氢并被圈闭捕获而滞留,是探索蛇纹石化型天然氢气成藏的关键。一般认为,蛇纹石化作用主要发生在超基性岩演化历史的早期,即洋盆和裂谷发育或碰撞(俯冲)阶段,如现代海洋底部正在发生的洋中脊、俯冲带中超基性岩系热液系统的蛇纹石化作用,包括中大西洋洋中脊的 Rainbow 热流区、汤加海沟和马里亚纳前弧俯冲带的蛇纹石化橄榄岩等^[49,56]。因此,蛇绿岩带对古海洋演化、板块碰撞甚至生命起源地研究具有标志性意义。

随着蛇纹石化型天然氢气资源调查研究的深入,超基性岩蛇纹石化及其生成氢气的“时间”成为亟待解决的关键问题。早期蛇纹石化释放出来的氢气,与现代海底超基性岩蛇纹石化产生的氢气一样,因缺乏沉积覆盖而难以积聚保存。超基性岩在碰撞期后或者大陆就位后,在地壳上部具备足够温度、充足水源等条件下,进一步发生蛇纹石化并产生大量氢气,这是天然氢气聚集成藏的前提,特别是早期已蛇纹石化的超基性岩在现今是否仍在持续发生蛇纹石化并释放氢气,成为关键所在(图8)。

根据上述贺根山和拉脊山蛇绿岩的调查进展,结合前人有关超基性岩蛇纹石化机制及天然氢气形成机理的研究成果^[9-16],可以推测大陆上的蛇绿岩带经历过多期蛇纹石化和生氢过程。在蛇纹石化发生时间上,至少可划分为早期和现代2个端元期。早期阶段以碰撞期蛇纹石化为主,现代阶段则以现今埋藏条件下的蛇纹石化为主。有关超基性岩的多期蛇纹石化和现代蛇纹石化,早在20世纪60—70年代已有报道,如古老克拉通内的津巴布韦 Great Dyke(大岩墙)和澳大利亚西部 Imberlana 侵入体中的现代蛇纹石化作用等^[57]。然而,板块构造理论兴起后,此类研究和认识并没有引起更多关注。近年来,超基性岩在中-浅层、中-低温条件下发生的蛇纹石化作用及其伴随的氢气释放机制已被不断揭示,如阿曼 Semail 蛇绿岩^[13]、阿尔巴尼亚 Bulqizë 铬铁矿的蛇绿岩^[12]、非洲克拉通 Taoudenni 盆地 Bourakébougou 天然氢气藏^[8]以及美国 Kansas 盆地 Scott 氢气藏等^[11]。这些证据表明,超基性岩的现代蛇纹石化作用是客观存在的。在蛇绿岩带和克拉通基岩中,现今深埋地下的超基性岩在合适的热力学和水文条件下仍在发生蛇纹石化过程,并持续释放氢气。这些氢气或通过断裂和裂缝系统不断地从地表渗漏,或被合适的圈闭捕获而聚集成藏。

在超基性岩多期(尤其是现代)蛇纹石化与圈闭协同演化的背景下,天然氢气生成后,被圈闭“捕获”和“滞留”的时间同样是重要因素。前者为天然氢气被圈闭捕获并开始聚集的时间,后者则为氢气在圈闭中持续滞留保存的时间。二者的关键在于沉积-覆盖期(储集、盖层和盆地)与达到蛇纹石化热力学(温度100~300℃)条件期的协同耦合(图8),从而形成以“氢源”为核心、与盆地耦合的天然氢气地质系统。这正是内蒙古中段和南祁连山蛇绿岩带中蛇纹石化型天然氢气资源勘探的潜在目标。

4.4 天然氢的持续产出、瞬时聚集和可再生性

天然氢气在地下形成、逸散与成藏过程中,具有持续产出、瞬时聚集和可再生的特性。与烃类天然气藏相似,天然氢气藏也是动态的。然而,与烃类天然气藏的数百万年至数亿年的漫长积累成藏及保存历史相比,天然氢气藏更凸显出“瞬时性”聚集的特性。在生成—运移—聚集—逸散的动态系统中,天然氢气得以保持持续产出与瞬时聚集的动态平衡。与常规、非常油气藏投产后产量快速递减直至最终枯竭不同,天然氢气藏表现出持续产出与可再生性,处于正在生成并连续供给的动态成藏状态。只要热力学和物源基础条

件不变(图8),这一过程至今仍在地下持续发生。对于这一差异性及其成藏特性的认识,主要来自以下证据:

1) 马里的 Bourakébougou 天然氢气藏^[8]和美国的 Scott 天然氢气藏^[11]等,自开采以来氢气产量在数十年内保持稳定,二者均显示氢气富集受近源连续供应,供给量显著大于散失量,致密岩层和含水层双重封闭。

2) 阿曼 Semail 蛇绿岩^[13]、南澳大利亚的 Gawler 克拉通^[14]和法国洛林盆地^[15]等地区,地表及钻井中普遍存在氢气的长期渗漏,且氢气浓度随深度增加而升高,预示着地下天然氢资源具有规模性和可持续性。其中,超基性岩蛇纹石化反应在大陆中-浅层、中-低温($< 200\text{ }^{\circ}\text{C}$)环境中现代仍在持续进行。

3) 氢气是自然界中最轻、化学活性最强、极易燃烧且难溶于水的气体。基于这些特性,人们普遍认为氢气在地下更容易扩散和消耗,缺乏在百万年地质时间尺度上大量聚集和滞留保存的条件。然而,上述天然氢气藏和氢气渗漏异常区(点)的发现表明,天然氢气在地下持续生成并供给条件合适的圈闭,“可再生、瞬时聚集”是客观事实,其始终伴随于超基性岩的整个蛇纹石化地质演化过程,直至蛇纹石化作用终止(图8)。Truche 等(2024)^[12]指出,阿尔巴尼亚 Bulqizë 蛇绿岩的强烈脱气揭示了深部储层及蛇纹石化产生氢气的长期积累,表明氢气可以在地质时间尺度上聚集成藏。大陆上的蛇绿岩不仅构成了有效的氢源岩,而且某些蛇绿岩可能蕴藏着具有经济价值的氢气积累。

5 勘探启示

众所周知,矿产资源的找矿思路和勘查策略主要来自物质来源及赋存规律。例如,石油和烃类天然气主要来自沉积盆地中的富有机质黑色页岩,并赋存于盆地内部;金属矿产则更多来自火成岩和热液活动,赋存于盆地边缘的造山带和断裂带中,二者找矿思路、方向和勘查策略截然不同。对于蛇纹石化型天然氢气而言,其找矿思路与勘查策略兼具油气与金属矿产二者的特点,同时亦有其自身特色。

首先,天然氢气主要来自超基性岩的蛇纹石化作用,与无机成因和岩浆岩密切相关(与金属矿产类似)。氢源岩的存在是氢气系统形成及富集的根本前提,其控制着天然氢气的分布。氢源岩勘探主要存在2个有利方向:①沿深大断裂侵入于沉积盆地的超基性岩,如沿西伯利亚板块与华北板块缝合带中的深大断裂侵入并被二连盆地覆盖的贺根山蛇绿岩。②沉积盆地基底中的超基性岩,如西宁盆地基底。西宁盆地前寒武系

基底中可能存在超基性岩(图12),其埋藏深度平均达3 000 m。根据现有地热资料^[39-40],预测其温度在 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上[平均地温梯度为 $4.82\text{ }^{\circ}\text{C}/(100\text{ m})$],尚处在有利于蛇纹石化生氢的温度范围内(图8)。

其次,超基性岩体内部裂缝系统,以及与其直接联通的断裂及邻近沉积覆盖层构成的二级构造带,是最有利的氢气聚集区。这类类似于沉积盆地中邻近生烃中心的构造带和储集层。在基础理论方面,需要由传统的有机生烃理论向无机生氢理论拓展,更多地关注和加强“正在生成-瞬时聚集-动态成藏”的天然氢气地质系统理论研究。在找矿思路方面,应突破油气勘探禁区,从沉积盆地内部向盆地边缘造山带、盆地深层克拉通基底跨越,寻找氢源体(区)。盆-山耦合带和富铁基岩是重要的勘探领域。在勘探策略方面,采用“定源选带”勘探路径,通过地表“仙女圈”构造识别、氢气测量和重磁电地球物理探测,确定氢源区(岩)及其连通断裂系统,优选邻近氢源体和连通断裂系统及其与区域性盖层耦合区内的二级构造带和储集层,将此区域作为潜在氢气地质系统的有利富集区开展钻探验证。

最后,基于超基性岩的水热蚀变生氢以及中-高温地热的供水供热机制,富铁基岩的天然氢气与地热资源的综合勘探及人工催化增产氢气等与地热多资源的协同开发是一个富有潜力的重要方向。在南祁连蛇绿岩带邻近的西宁盆地和共和盆地等地区发育基岩类(超基性岩和碱性花岗岩)地热资源,地表高矿化度水系分布广泛,地层温度普遍大于 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、最高达 $236\text{ }^{\circ}\text{C}$,地温梯度为 $3.89\sim 5.74\text{ }^{\circ}\text{C}/(100\text{ m})$ 、平均值达 $4.43\text{ }^{\circ}\text{C}/(100\text{ m})$ ^[39-40,58],具有良好的氢源、热力学和水源条件。如图14所示,拉脊山蛇绿岩带北缘西宁盆地内发育超基性岩和中-高温地热资源,具备蛇纹石化产氢的氢源岩、水源和热源条件,可作为超基性岩的潜在氢源及其伴生地热资源的耦合系统,开展地下“天然氢+地热”联合工厂的探索研究。

6 结论

1) 在内蒙古中段和南祁连蛇绿岩带内发现了多处地表氢气异常显示,包括“仙女圈”构造和土壤氢气高浓度异常渗漏区,推断出多个潜在氢源体——隐伏于盆地内部的超基性岩。首次在蛇纹石化橄榄岩包裹体中发现了天然氢气,直接证实了研究区超基性岩体内正在发生(或已发生)蛇纹石化生氢过程及天然氢气系统的存在。这不仅表明该区具有良好的蛇纹石化型天然氢气勘探潜力,也确立了蛇绿岩带作为天然氢资

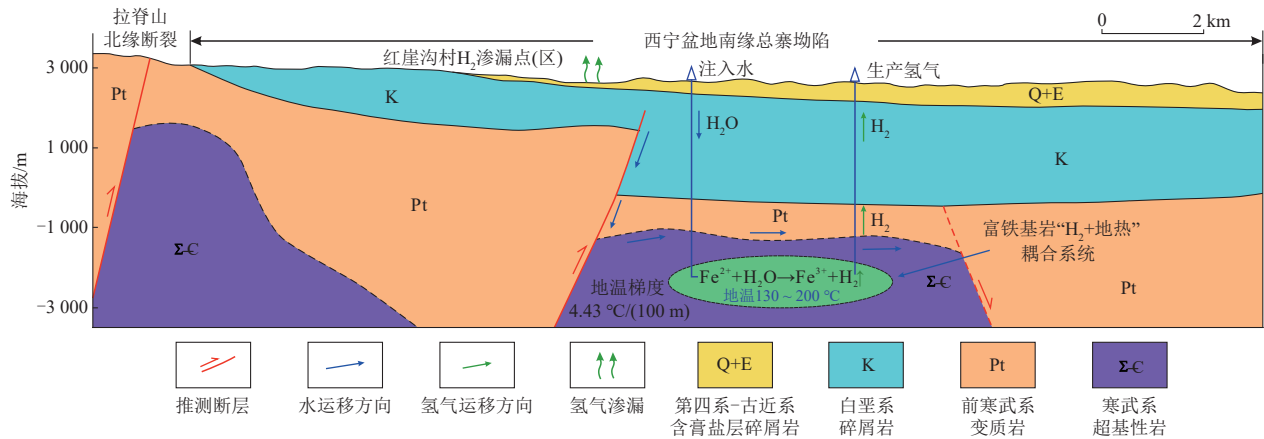


图 14 西宁盆地富铁岩石“天然氢+地热”耦合系统协同开发模式示意图

Fig. 14 Schematic diagram of the synergistic development model for a coupled “natural hydrogen + geothermal” system in iron-rich rocks

源主要来源与重要勘探领域的地位。

2) 初步调查结果印证了研究区内存在活跃的天然氢源,揭示了控制蛇纹石化型天然氢形成与富集的关键因素。其中超基性岩与充足水源的耦合效应是生氢基础;超基性岩的规模及其沉积覆盖条件是规模成藏的关键;氢气生成时间与圈闭捕获时间的匹配关系决定了滞留时间。研究区天然氢源具有持续产出、瞬时聚集和可再生的动态成藏特性。

3) 研究结果进展为其他地区蛇绿岩带天然氢气勘探提供了较好的启示。在勘探策略上,采用“定源选带”勘探路径,早期沉积盆地基底中的超基性岩及后期侵入于沉积盆地内部的隐伏超基性岩体为勘探有利方向。在产业发展上,蛇纹石化型天然氢气与基岩型地热资源综合开发为富有前景的领域。

致谢:评审专家对本论文章提出了建设性意见,在此表示诚挚的谢意!

参 考 文 献

- [1] Penrose field conference on ophiolites [J]. Geotimes, 1972, 17: 24-25.
- [2] Dilek Y, Furnes H. Ophiolite genesis and global tectonics: geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere [J]. GSA Bulletin, 2011, 123(3/4): 387-411.
- [3] 王希斌, 郝梓国. 中国造山带蛇绿岩的时空分布及构造类型 [J]. 地质通报, 1994, 13(3): 193-204.
Wang Xibin, Hao Zigu. Temporal-spatial distribution and tectonic types of ophiolites in orogenic belts of China [J]. Geological Bulletin of China, 1994, 13(3): 193-204.
- [4] 张旗, 周国庆, 王焰. 中国蛇绿岩的分布、时代及其形成环境 [J]. 岩石学报, 2003, 19(1): 1-8.
Zhang Qi, Zhou Guoqing, Wang Yan. The distribution of time and space of Chinese ophiolites, and their tectonic settings [J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(1): 1-8.
- [5] 杨经绥, 连东洋, 吴魏伟, 等. 蛇绿岩中铬铁矿研究的问题与思考 [J]. 地质学报, 2022, 96(5): 1608-1634.
Yang Jingsui, Lian Dongyang, Wu Weiwei, et al. Chromitites in ophiolites: questions and thoughts [J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(5): 1608-1634.
- [6] 熊盛青, 杨海, 范振宇, 等. 基于航磁资料的中国蛇绿岩带研究 [J]. 地质学报, 2024, 98(3): 725-757.
Xiong Shengqing, Yang Hai, Fan Zhenyu, et al. Research on ophiolite belts in China based on aeromagnetic data [J]. Acta Geologica Sinica, 2024, 98(3): 725-757.
- [7] Charlou J L, Donval J P, Konn C, et al. High production and fluxes of H₂ and CH₄ and evidence of abiotic hydrocarbon synthesis by serpentinization in ultramafic-hosted hydrothermal systems on the Mid-Atlantic Ridge [M]//Rona P A, Devoy C W, Dymet J, et al. Diversity of hydrothermal systems on slow spreading ocean ridges. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 2010: 265-296.
- [8] Prinzhofer A, Tahara Cissé C S, Diallo A B. Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali) [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(42): 19315-19326.
- [9] Zgonnik V. The occurrence and geoscience of natural hydrogen: a comprehensive review [J]. Earth-Science Reviews, 2020, 203: 103140.
- [10] Klein F, Tarnas J D, Bach W. Abiotic sources of molecular hydrogen on earth [J]. Elements, 2020, 16(1): 19-24.
- [11] Guélard J, Beaumont V, Rouchon V, et al. Natural H₂ in Kansas: deep or shallow origin? [J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2017, 18(5): 1841-1865.
- [12] Truche L, Donzé F V, Gokkolli E, et al. A deep reservoir for hydrogen drives intense degassing in the Bulqizë ophiolite [J]. Science, 2024, 383(6683): 618-621.
- [13] Leong J A, Nielsen M, McQueen N, et al. H₂ and CH₄ outgassing rates in the Samail ophiolite, Oman: implications for low-temperature, continental serpentinization rates [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2023, 347: 1-15.
- [14] Boreham C J, Edwards D S, Czado K, et al. Hydrogen in

- Australian natural gas: occurrences, sources and resources [J]. The APPEA Journal, 2021, 61(1): 163–191.
- [15] Hand E. Hidden hydrogen: Does Earth hold vast stores of a renewable, carbon-free fuel? [J]. Science, 2023, 379 (6633): 630–636.
- [16] Lollar B S, Onstott T C, Lacrampe-Couloume G, et al. The contribution of the Precambrian continental lithosphere to global H₂ production [J]. Nature, 2014, 516(7531): 379–382.
- [17] 窦立荣, 刘化清, 李博, 等. 全球天然氢气勘探开发利用进展及中国的勘探前景 [J]. 岩性油气藏, 2024, 36(2): 1–14.
Dou Lirong, Liu Huaqing, Li Bo, et al. Global natural hydrogen exploration and development situation and prospects in China [J]. Lithologic Reservoirs, 2024, 36(2): 1–14.
- [18] 李秀梅, 刘映辉, 温景萍. 楚雄盆地乌龙1井天然气的地球化学特征和地质意义 [J]. 天然气工业, 2002, 22(5): 16–19.
Li Xiumei, Liu Yinghui, Wen Jingping. Geochemical characteristics of the natural gas from well wulong-1, chuxiong basin, and its geological significance [J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(5): 16–19.
- [19] 翟常博, 孟庆强, 王国建, 等. 天然氢富集过程及勘探技术研究进展 [J/OL]. 石油与天然气地质, 2026–03–18. <https://link.cnki.net/urlid/11.4820.TE.20260318.1222.002>.
Zhai Changbo, Meng Qingqiang, Wang Guojian, et al. Research progress in enrichment processes and exploration technologies of natural hydrogen [J/OL]. Oil & Gas Geology, 2026–03–18. <https://link.cnki.net/urlid/11.4820.TE.20260318.1222.002>.
- [20] 孙龙德, 冯子辉, 江航, 等. 松辽盆地富氢天然气地质调查与研究 [J]. 大庆石油地质与开发, 2024, 43(3): 7–16.
Sun Longde, Feng Zihui, Jiang Hang, et al. Geological survey and study of hydrogen-rich natural gas in Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2024, 43(3): 7–16.
- [21] Liu Quanyou, Wei Yongbo, Li Pengpeng, et al. Natural hydrogen in the volcanic-bearing sedimentary basin: origin, conversion, and production rates [J]. Science Advances, 2025, 11 (4): eadr6771.
- [22] 韩双彪, 王缙, 黄劼, 等. 全球天然氢气研究现状与发展趋势 [J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(3): 790–808.
Han Shuangbiao, Wang Jin, Huang Jie, et al. Current status and future trends of global research on natural hydrogen [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(3): 790–808.
- [23] 韩双彪, 王缙, 黄劼, 等. 松辽盆地大陆科学钻探井天然氢气吸附特征及赋存规律 [J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(2): 462–477.
Han Shuangbiao, Wang Jin, Huang Jie, et al. Adsorption characteristics and occurrence pattern of natural hydrogen in a continental scientific drilling well of the Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(2): 462–477.
- [24] Hao Yinlei, Pang Zhonghe, Tian Jiao, et al. Origin and evolution of hydrogen-rich gas discharges from a hot spring in the eastern coastal area of China [J]. Chemical Geology, 2020, 538: 119477.
- [25] Tian Jiao, Li Jingchao, Wang Yuwen, et al. Preliminary results on hydrogen concentration time series in spring gases from the Pamir-Western Himalayan Syntaxis: variability and tectonic instability [J]. Applied Sciences, 2025, 15(17): 9736.
- [26] Jin Zhijun, Zhang Panpan, Liu Runchao, et al. Discovery of anomalous hydrogen leakage sites in the Sanshui Basin, South China [J]. Science Bulletin, 2024, 69(9): 1217–1220.
- [27] 刘玮, 卢民杰, 万燕鸣, 等. 尚义—张北地区天然氢调查研究进展及前景分析 [J]. 中国地质调查, 2025, 12(2): 9–19.
Liu Wei, Lu Minjie, Wan Yanming, et al. Progress and prospective analysis of natural hydrogen investigation research in Shangyi-Zhangbei area [J]. Geological Survey of China, 2025, 12(2): 9–19.
- [28] 内蒙古自治区地质调查研究院. 中国区域地质志·内蒙古志 [M]. 北京: 地质出版社, 2025.
Inner Mongolia Autonomous Region Geological Survey and Research Institute. Regional geology of China: Inner Mongolia [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2025.
- [29] 梁日暄. 内蒙古中段蛇绿岩特征及地质意义 [J]. 中国区域地质, 1994, 13(1): 37–45.
Liang Rixuan. The features of ophiolites in the central sector of Inner Mongolia and its geological significance [J]. Geological Bulletin of China, 1994, 13(1): 37–45.
- [30] 王成, 田江涛, 李大海, 等. 内蒙古贺根山地区蛇绿岩空间展布特征及找矿方向 [J]. 西部探矿工程, 2016, 28(5): 131–134.
Wang Cheng, Tian Jiangtao, Li Dahai, et al. Spatial distribution characteristics and prospecting directions of ophiolite in the Hegen mountain area, Inner Mongolia [J]. West-China Exploration Engineering, 2016, 28(5): 131–134.
- [31] 邵济安, 张丽莉, 周新华, 等. 贺根山镁铁-超镁铁岩与缝合带的关系——来自地球物理的证据 [J]. 地球物理学报, 2020, 63(5): 1867–1877.
Shao Jian, Zhang Lili, Zhou Xinhua, et al. The relationship between mafic-ultramafic rocks and suture zone in Hegenshan, Inner Mongolia—evidence from geophysical data [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(5): 1867–1877.
- [32] 许志琴, 徐惠芬, 张建新, 等. 北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩增生地体及其动力学 [J]. 地质学报, 1994, 68(1): 1–15.
Xu Zhiqin, Xu Huifen, Zhang Jianxin, et al. The Zhoulanguananshan Caledonian subductive complex in the northern Qilian mountains and its dynamics [J]. Acta Geologica Sinica, 1994, 68(1): 1–15.
- [33] Fu Changlei, Yan Zhen, Wang Zongqi, et al. Lajishankou ophiolite complex: implications for Paleozoic multiple accretionary and collisional events in the South Qilian belt [J]. Tectonics, 2018, 37(5): 1321–1346.
- [34] 吴福元, 万博, 赵亮, 等. 特提斯地球动力学 [J]. 岩石学报, 2020, 36(6): 1627–1674.
Wu Fuyuan, Wan Bo, Zhao Liang, et al. Tethyan geodynamics [J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(6): 1627–1674.
- [35] 青海省地质调查院. 青海省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 2019.
Qinghai Provincial Geological Survey Institute. Regional geology

- of Qinghai Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2019.
- [36] 方小敏, 宋春晖, 戴霜, 等. 青藏高原东北部阶段性变形隆升: 西宁、贵德盆地高精度磁性地层和盆地演化记录[J]. 地学前缘, 2007, 14(1): 230–242.
- Fang Xiaomin, Song Chunhui, Dai Shuang, et al. Cenozoic deformation and uplift of the NE Qinghai-Tibet Plateau: evidence from high-resolution magnetostratigraphy and basin evolution[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(1): 230–242.
- [37] Zhang Jin, Wang Yannan, Zhang Beihang, et al. Tectonics of the Xining Basin in NW China and its implications for the evolution of the NE Qinghai-Tibetan plateau[J]. *Basin Research*, 2016, 28(2): 159–182.
- [38] 闫臻, 牛漫兰, 付长垒, 等. 拉脊山昂思多蛇绿岩-增生杂岩 1:25000 专题地质图数据集[J]. 中国地质, 2021, 48(增刊2): 53–65.
- Yan Zhen, Niu Manlan, Fu Changlei, et al. Laji Mountain Angsiduo ophiolite-serpentinite and augmented complex 1:25,000 thematic geological map dataset[J]. *Geology in China*, 2021, 48(S2): 53–65.
- [39] 王斌, 何世豪, 李百祥. 从地球物理场信息分析西宁盆地地热地质条件[J]. 地震工程学报, 2011, 33(2): 149–154, 165.
- Wang Bin, He Shihao, Li Baixiang. Analysis on geothermal geological condition of Xining Basin on the basis of characteristic of geophysical field[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2011, 33(2): 149–154, 165.
- [40] 赵振, 于漂罗, 陈惠娟, 等. 青海省西宁地热田成因分析及资源评价[J]. 中国地质, 2015, 42(3): 803–810.
- Zhao Zhen, Yu Piaoluo, Chen Huijuan, et al. Genetic analysis and resource evaluation of the Xining geothermal field in Qinghai Province[J]. *Geology in China*, 2015, 42(3): 803–810.
- [41] 郑长远, 雷宏武, 崔银祥, 等. 西宁盆地南部天然 CO₂ 泄漏和浅部含水层响应[J]. 地质科技通报, 2023, 42(6): 223–232.
- Zheng Changyuan, Lei Hongwu, Cui Yinxian, et al. Natural CO₂ leakage and responses of shallow aquifers in the southern Xining Basin[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(6): 223–232.
- [42] Larin N, Zgonnik V, Rodina S, et al. Natural molecular hydrogen seepage associated with surficial, rounded depressions on the European craton in Russia[J]. *Natural Resources Research*, 2015, 24(3): 369–383.
- [43] Maiga O, Deville E, Laval J, et al. Characterization of the spontaneously recharging natural hydrogen reservoirs of Bourakebougou in Mali[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 11876.
- [44] Prinzhofer A, Moretti I, Françolin J, et al. Natural hydrogen continuous emission from sedimentary basins: the example of a Brazilian H₂-emitting structure[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(12): 5676–5685.
- [45] Lefeuvre N, Truche L, Donzé F V, et al. Native H₂ exploration in the western Pyrenean foothills[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2021, 22(8): e2021GC009917.
- [46] 杨烁, 丁毅, 杜发述, 等. 二连盆地阿南凹陷腾格尔组构造-岩性油气藏形成条件及富集模式[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2026, 56(3): 754–767.
- Yang Shuo, Ding Yi, Du Fashu, et al. Formation conditions and enrichment models of structural lithological oil and gas reservoirs in the Tengger Formation of A'nan Depression, Erlian Basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2026, 56(3): 754–767.
- [47] Mével C. Serpentinization of abyssal peridotites at mid-ocean ridges[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2003, 335(10/11): 825–852.
- [48] Evans B W, Hattori K, Baronnet A. Serpentinite: what, why, where?[J]. *Elements*, 2013, 9(2): 99–106.
- [49] Charlou J L, Donval J P, Fouquet Y, et al. Geochemistry of high H₂ and CH₄ vent fluids issuing from ultramafic rocks at the Rainbow hydrothermal field (36° 14'N, MAR)[J]. *Chemical Geology*, 2002, 191(4): 345–359.
- [50] Seyfried W E Jr, Pester N J, Tutolo B M, et al. The lost city hydrothermal system: constraints imposed by vent fluid chemistry and reaction path models on seafloor heat and mass transfer processes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2015, 163: 59–79.
- [51] Mccollom T M. Abiotic methane formation during experimental serpentinization of olivine[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(49): 13965–13970.
- [52] Klein F, Grozeva N G, Seewald J S. Abiotic methane synthesis and serpentinization in olivine-hosted fluid inclusions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(36): 17666–17672.
- [53] 宋晗. 低温蛇纹岩化过程中 Fe(OH)₂ 相转变产 H₂ 的机制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022: 31–55.
- Song Han. Mechanism of Fe(OH)₂ phase transformation to produce H₂ during low temperature serpentinization[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022: 31–55.
- [54] Schöpfer M P J, Detournay C, Tari G. The mechanical genesis of “fairy circle” depressions[J]. *Geology*, 2025, 53(9): 712–716.
- [55] Ellis G S, Gelman S E. Model predictions of global geologic hydrogen resources[J]. *Science Advances*, 2024, 10(50): eado0955.
- [56] Fryer P. Serpentinite mud volcanism: observations, processes, and implications[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2012, 4: 345–373.
- [57] Campbell I H. Direct evidence of present-day serpentinization in the Jimberlana Intrusion, Western Australia[J]. *Geological Magazine*, 1975, 112(1): 77–80.
- [58] 张盛生, 张磊, 蔡敬寿, 等. 共和盆地恰卜恰地区干热岩资源量初步估算及评价[J]. 青海大学学报, 2018, 36(4): 75–78, 85.
- Zhang Shengsheng, Zhang Lei, Cai Jingshou, et al. Preliminary estimation and evaluation of hot dry rock resources in Qiabuqia area of Gonghe Basin[J]. *Journal of Qinghai University*, 2018, 36(4): 75–78, 85.

(编辑 张济华)