

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.384

引用格式: 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 W, Lu M J, Wan Y M, et al. Research progress and prospective analysis of natural hydrogen investigation in Shangyi–Zhangbei area[J]. Geological Survey of China, 2025, 12(2): 9–19.)

尚义—张北地区天然氢调查研究进展及前景分析

刘 玮¹, 卢民杰^{2*}, 万燕鸣^{1,3}, 刘德成⁴, 徐 超⁵, 徐国忠⁶,
刘曦元⁷, 宿 鑫³, 寇 婷⁴, 杨汇群²

(1. 国家能源集团氢能科技有限责任公司, 北京 100007; 2. 北京天成元能源有限公司, 北京 100070;
3. 国能氢创科技有限责任公司, 北京 100007; 4. 北京市地质矿产勘查开发集团有限公司, 北京 100050;
5. 河北省地质矿产勘查开发局第三地质大队, 河北 张家口 075000; 6. 北京中勘国检工程技术有限公司, 北京 100085; 7. 熙晟能源有限公司, 北京 100070)

摘要: 在全球能源转型背景下, 天然氢已成为新能源领域的研究热点, 许多国家陆续开展了针对天然氢的调查工作。结合前人的研究成果, 将已发现有 H₂ 逸出显示的张北盆地作为天然氢研究重点区域, 选择在尚义—张北地区开展地质、土壤气体地球化学、重力及大地电磁测深调查研究工作。结果表明: 尚义—张北地区土壤的 H₂ 异常围绕胡家洼—马驹沟呈周边高、中间低的环形分布特征, 部分采样点土壤 H₂ 浓度超过 $5\ 000 \times 10^{-6}$; 氢同位素 δD 为 -567‰ ~ -461‰ , 表明 H₂ 主要为幔源成因。依据重力和大地电磁测深结果, 推断出 12 条隐伏断裂和 3 个沉积凹陷, 并解译了盆地基底埋深和构造格架。断裂是连接深部氢源的有利通道, 早白垩世和古近纪—新近纪的沉积组合具备储气潜力, 泥岩和致密块状玄武岩流起到了圈闭盖层的作用。通过综合分析, 划定 H₂ 逸出较少且被玄武岩流覆盖的沉积凹陷区域作为天然氢勘查有利区, 面积约 590 km²。研究可为尚义—张北地区天然氢的进一步勘探提供依据。

关键词: 尚义—张北地区; 天然氢综合调查; H₂ 测量; 重力测量; 大地电磁测深; 勘查有利区

中图分类号: X382; TE02; P618.13

文献标志码: A

文章编号: 2095–8706(2025)02–0009–11

0 引言

在全球能源转型的大背景下, 寻求清洁、可持续且经济的能源替代方案已成为当务之急。氢能凭借其低碳的排放特性, 以及在工业、交通和能源等领域的广泛应用潜力, 正逐渐成为新能源领域的研究热点。近年来, 地质成因的天然氢备受关注, 作为一种潜在的氢能源供应新路径, 有望在能源结构多元化进程中发挥重要作用。

随着近几年各国在天然氢勘查方面取得的成

果^[1–7], 以及在马里发现天然氢气藏并成功开发的案例^[8], 科学界与工业界对天然氢的关注度持续攀升, 相关研究的文献数量显著增加^[9], 专业从事天然氢勘探的公司也越来越多^[10]。在此基础上, 各国已开始在不同地质背景下开展天然氢勘探, 也开始了对各种勘探策略和勘探技术的开发。我国学者也较早地关注到天然气中的 H₂^[11], 并在近几年引入了天然氢的概念^[12–13], 但目前国内尚未系统开展以天然氢勘查为目标的地质工作。

从 2022 年开始, 为了研究和寻找国内的天然氢气藏, 本团队选择前期已在钻孔中发现有 H₂ 逸

收稿日期: 2025–01–15; 修订日期: 2025–03–19。

基金项目: 国能氢创科技有限责任公司项目“中国天然氢勘察关键技术研究”和北京市地质矿产勘查开发集团有限公司项目“天然氢成藏地质条件及找矿靶区研究”联合资助。

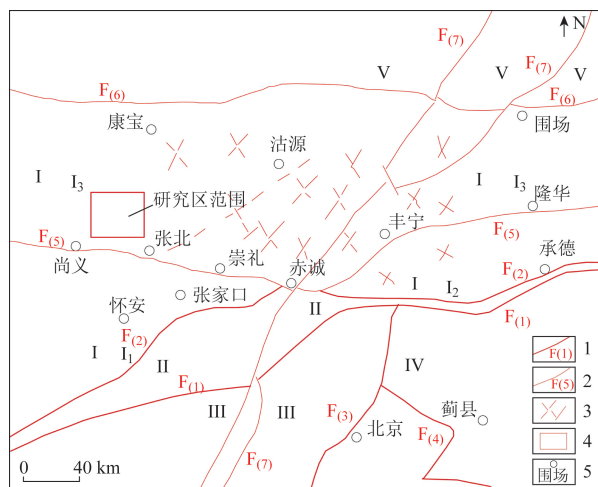
第一作者简介: 刘玮(1977—), 正高级工程师, 主要从事新能源、氢能与燃料电池方面的研究工作。Email: wei.liu@chnenergy.com.cn。

通信作者简介: 卢民杰(1955—), 研究员, 主要从事矿产地质勘查、天然氢成藏条件与勘查方面的研究工作。Email: luminjie55@aliyun.com。

出显示的张北盆地作为试验研究区域,由此开始了寻找天然氢气藏的探索性调查研究工作。2022—2024 年,研究团队通过卫星遥感影像识别了张北盆地的近圆形洼地(semi-circular depressions, SCDs)和断裂构造,并在商都—张北地区开展了土壤气体地球化学剖面测量试验。以此为基础,结合张家口地区的氢能产业和地理优势,确定将张北盆地南部的张北台凹区作为首选的天然氢调查研究区,随后在尚义—张北地区部署了面积性土壤气体地球化学、大比例尺重力调查和大地电磁测深工作。本文通过综合分析研究区的地质、土壤气体地球化学、地球物理资料,对尚义—张北地区天然氢的调查选区及成藏条件进行研究评价,为后续进一步开展天然氢勘查评价提供科学依据和技术支撑。

1 研究区概况

研究区位于张北盆地南部,该盆地地理位置处于内蒙古自治区乌兰察布市商都县及河北省张家口市尚义县、张北县境内,构造位置处于华北陆块北缘靠近板块边缘的活动带上,属华北陆块北缘隆起带^[14]的尚义—围场褶皱隆起带,夹持于南部的尚义—隆化大断裂($F_{(5)}$)与北部的康保—围场断裂($F_{(6)}$)之间^[15](图 1),属于高原盆地^[16]。张北盆地是一个中生代—新生代叠合盆地,在燕山晚期,由于 SN 向和 NW 向双向构造应力的作用,形成于中生代之前的 EW 向断裂构造恢复活动,产生了近 EW 向和 NE 向的两组深大断裂^[17-18],主要控制该盆地的形成和演化,整个张北盆地构造演化主要表现为断陷盆地的震荡升降运动^[19]。古近纪沉积时期,张北盆地是一个完整的构造断陷沉积盆地,在新近纪汉诺坝期的基性火山喷发期间,张北盆地发生局部隆起,盆地被分割成一系列洼陷,如商都台凹和张北台凹^[20-22]。张北盆地的地质构造演化历史可分为中元古代之前变质基底形成演化和中元古代—新生代盖层形成演化两个阶段^[15],中生代—新生代断陷盆地的基底主要由新太古代中深变质岩、中元古代沉积岩和花岗岩、晚古生代花岗岩组成,盆地东北部的中生代火山岩直接呈喷发不整合覆盖于古老基底或晚古生代花岗岩之上^[23-25]。



1. 区域深大断裂及编号; 2. 区域大断裂及编号; 3. 共轭断裂集中发育区; 4. 研究区位置; 5. 地名; $F_{(1)}$. 桑干—平泉构造带北界深大断裂; $F_{(2)}$. 桑干—平泉构造带南界深大断裂; $F_{(3)}$. 太行山山前深大断裂; $F_{(4)}$. 冀东古陆块南缘深大断裂; $F_{(5)}$. 尚义—隆化大断裂; $F_{(6)}$. 康保—围场大断裂; $F_{(7)}$. 大兴安岭—太行山中生代岩浆岩带主脊及上黄旗—乌龙沟大断裂; I. 冀北古陆块; I_1 . 怀安复式穹隆状褶皱隆起带; I_2 . 承德褶皱隆起带; I_3 . 尚义—围场褶皱隆起带; II. 桑干—平泉构造带(结合带); III. 太行山(冀西)古陆块; IV. 冀东古陆块; V. 华北陆块北缘陆缘活动带(天山—赤峰火山型被动陆缘)

图 1 研究区大地构造位置^[15]

Fig. 1 Geotectonic location of the study area^[15]

研究区地理位置为河北省张家口市尚义县大青沟镇和张北县公会镇一带(图 2),其构造—地层区属于华北北部地层区冀北地层分区,新太古界红旗营子群和中生界上侏罗统张家口组仅在研究区东北部零星出露,区内大面积出露的是新近系中新统汉诺坝组,中新统土井子组和上新统石匣组零星出露,更新统马兰组和全新世堆积物分布广泛。红旗营子群主要岩性为黑云母斜长片麻岩等;新近系中新统汉诺坝组玄武岩分布于研究区中部,岩性主要为玄武岩,其下伏的土井子组为河湖相砂泥组合,顶部含有泥岩层;上新统石匣组仅在安固里淖南沟谷中出露,为一套砂砾岩、砂岩及泥岩组合;更新统马兰组分布广泛,岩性以黏土、亚黏土为主。从已有钻孔资料可知,区内未出露的下白垩统青石砬组(K_1q)岩性主要以泥岩、砂岩及煤层为主^[22],是研究区有利的储盖层组合。侵入岩主要分布于研究区东北部,部分分布于西南部。元古代侵入岩为中粗粒二长花岗岩,古生代侵入岩为中粒二长花岗岩和中细粒钾长花岗岩。新近纪汉诺坝期的玄武岩来源于研究区南侧的张北火山群,其成因应



图2 研究区地质简图(据文献[22]修改)

Fig.2 Geological sketch of the study area (modified after reference [22])

属于幔源橄榄岩分异产物^[18]。

根据区内岩石物性测量结果,并结合前人物性资料^[26],对比发现研究区的地层密度由新到老逐渐增大,第四系、新近系、侏罗系及太古宇之间存在较明显的密度界面。新近系汉诺坝组表现为高阻,泥岩表现为低阻,太古宇表现为高阻。区内出露的不同时代花岗岩密度相近,表现为高密度、高电阻率的特征。

在研究区西北侧商都洼陷区域内的钻孔商探1井、商探2井中均有较好的 H_2 显示^[11], 地球物理测井初步表明 H_2 与水同层, 氢同位素 δD 测量证实其气源为典型的幔源成因, 推测 H_2 的聚集主要与深大断裂有关^[19]。此外, 研究区内新生代幔源岩浆活动多次喷溢形成的基性玄武岩分布广泛, 也

是天然氢气成藏的有利条件。2022 年,本团队通过土壤 H_2 和 CO_2 剖面测量,在商都 CO_2 气田调查区中,发现地震推断的断裂和遥感解译的断裂带上具有高浓度的 H_2 异常,且张北盆地中的尚义—张北地区与商都地区具有相似的地质条件及 H_2 、 CO_2 逸出异常。

2 天然氢综合调查

2.1 土壤 H₂ 地球化学测量

2022 年,在商都—张北地区开展了土壤气体地球化学剖面测量试验,土壤 H_2 采样方式采用土壤气体地球化学测量方法^[27-28],使用 JK90-H2 氢气分析仪和 GA5000 气体分析仪(检测范围为 0 ~

1 000) $\times 10^{-6}$) 进行 H_2 测量试验,共完成 20 条点距 40 m 的剖面测量,剖面总长度 67.4 km。此次试验不仅确定了土壤 H_2 测量方法的有效性,同时还发现该区域存在高浓度的土壤 H_2 逸出,这些都为后续土壤 H_2 地球化学测量和在尚义—张北地区寻找天然氢奠定了基础。2023 年,使用 GA5000 气体分析仪在尚义—张北地区进行了面积性土壤 H_2 地球化学测量。为了实现现场测量的快速简便采样,采取在野外直接抽气,再在室内利用 GA5000 气体分析仪对 H_2 浓度进行快速测量,共完成采样点 1 530 个测试,面积约 1 025 km²。2024 年,使用检测上限为 5 000 $\times 10^{-6}$ 的气体分析仪,对 2023 年测量的部分 H_2 浓度为 1 000 $\times 10^{-6}$ 的采样点进行复测,测得部分采样点 H_2 浓度超过 1 000 $\times 10^{-6}$,最大 H_2 浓度超过 5 000 $\times 10^{-6}$ 。在进行 H_2 持续逸出试验时,发现 H_2 呈脉冲式逸出(图 3),与巴西圣弗朗西斯盆地的 H_2 逸出量连续监测结果相类似^[29]。

2023 年测量的面积性土壤 H_2 地球化学空间

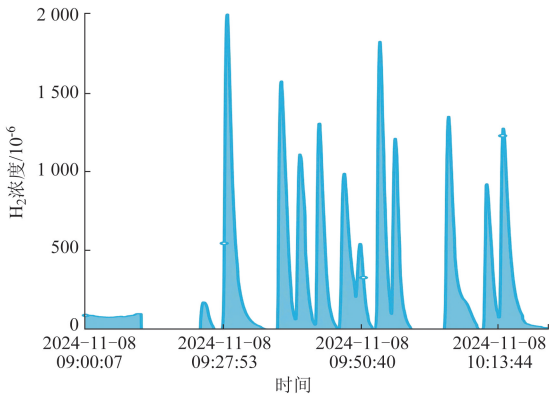


图3 土壤 H_2 浓度现场连续监测

Fig.3 Continuous on – site monitoring of H_2 concentration in soil

分布(图 4) 表现为围绕胡家洼—马驹沟呈周边高、中间低的环形分布特征, H_2 浓度为 1 000 $\times 10^{-6}$ 的点位基本都分布于研究区周边,中心环状区仅有 4 个 H_2 浓度为 1 000 $\times 10^{-6}$ 的点位,表明在研究区周边区域土壤中的 H_2 渗漏较多,中心环状区域的 H_2 渗漏较少。研究区 H_2 异常呈 SN 向、NW 向、NE 向展布的趋势。

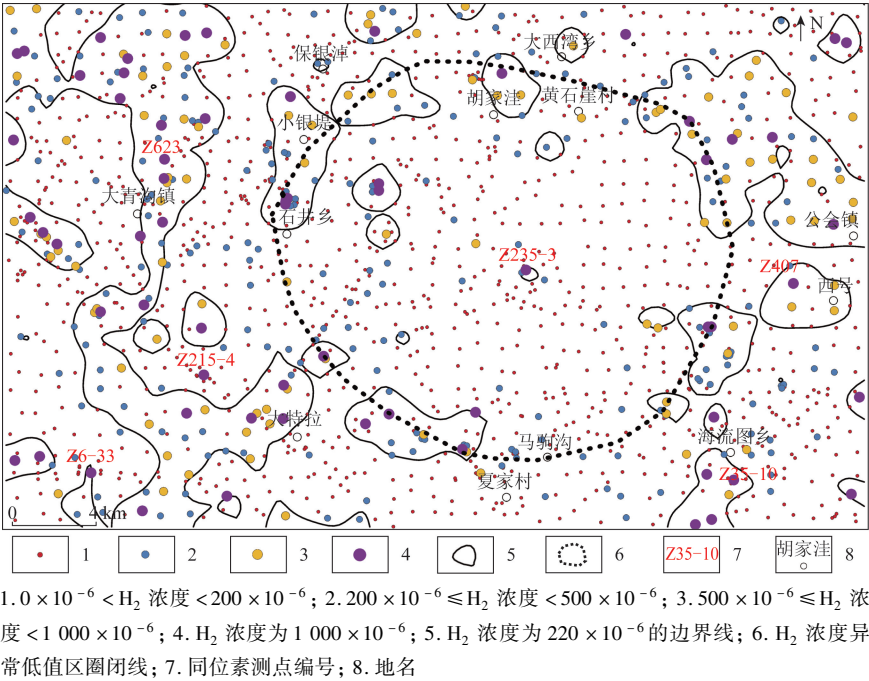


图4 研究区土壤 H_2 地球化学空间分布

Fig.4 Spatial distribution of soil H_2 geochemistry in the study area

2.2 重力测量

结合土壤 H_2 浓度异常分布特征,进一步划定重点研究区,部署重力及大地电磁测深调查。重点研究区范围与土壤 H_2 地球化学调查范围的东部边界重合,南北两侧各扩出约 2.5 km,西侧缩进约 5 km。

重力测量采用 CG-5 型重力仪进行野外数据采集,重力测点按 500 m $\times$ 250 m 规则网进行布设,测量面积为 480 km²,在此区域外围,按规则网 1 000 m $\times$ 1 000 m 布设重力测点,测量面积为 600 km²。重力测量总面积为 1 080 km²,测线走向为 SN 向。

研究区重力测量结果(图 5)显示,重力异常全为负值,呈周边高、中间低的特征,且有明显的分区特征,东西两侧重力高异常呈不同走向,东侧重力高主要呈 EW 向,西侧呈近 SN 向,局部叠加 EW

向重力高,并存在明显的 NW 向、NE 向、近 EW 向和近 SN 向梯度带。

2.3 大地电磁测深剖面测量

根据研究区内的重力异常特征,部署两条大地电磁测深剖面(位置见图 5)。剖面 AA' 为一条 NW—SE 向剖面,穿过两个重力推断凹陷区,剖面 BB' 为一条 NEE 向剖面,控制研究区南部凹陷区,剖面总长 48 km,野外数据采集使用 V8_sys-tem2000.NET 电法测量系统,采用“MT + AMT”模式,其中 MT 测深点 24 个,点距 2 000 m,频率范围 320 ~ 0.000 69 Hz。AMT 测深点 74 个,布设在 MT 测深点之间,点距 500 m。

从剖面 AA' 视电阻率拟断面(图 6(a),(b))可知,垂向上有明显的低阻和高阻分界,推断为基底的顶界。沿剖面方向,高阻与低阻存在明显的边界,推断为断裂的表现。剖面 BB' 两端未穿过凹陷区,从视电阻率拟断面(图 6(c),(d))可知,沿剖面方向,高阻与低阻有明显的边界,为凹陷内断裂的表现。

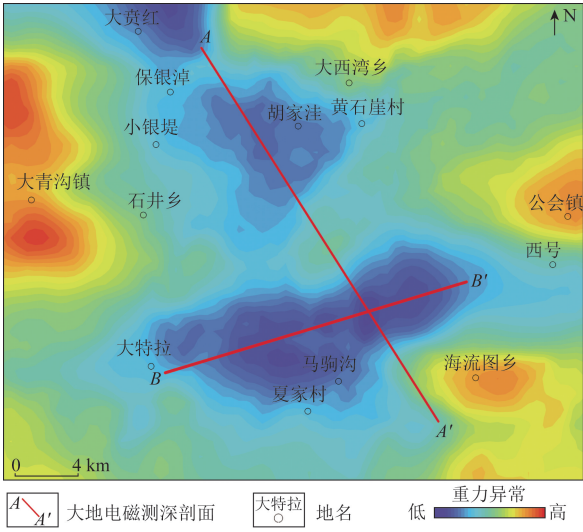


图 5 研究区布格重力异常

Fig. 5 Bouguer gravity anomaly in the study area

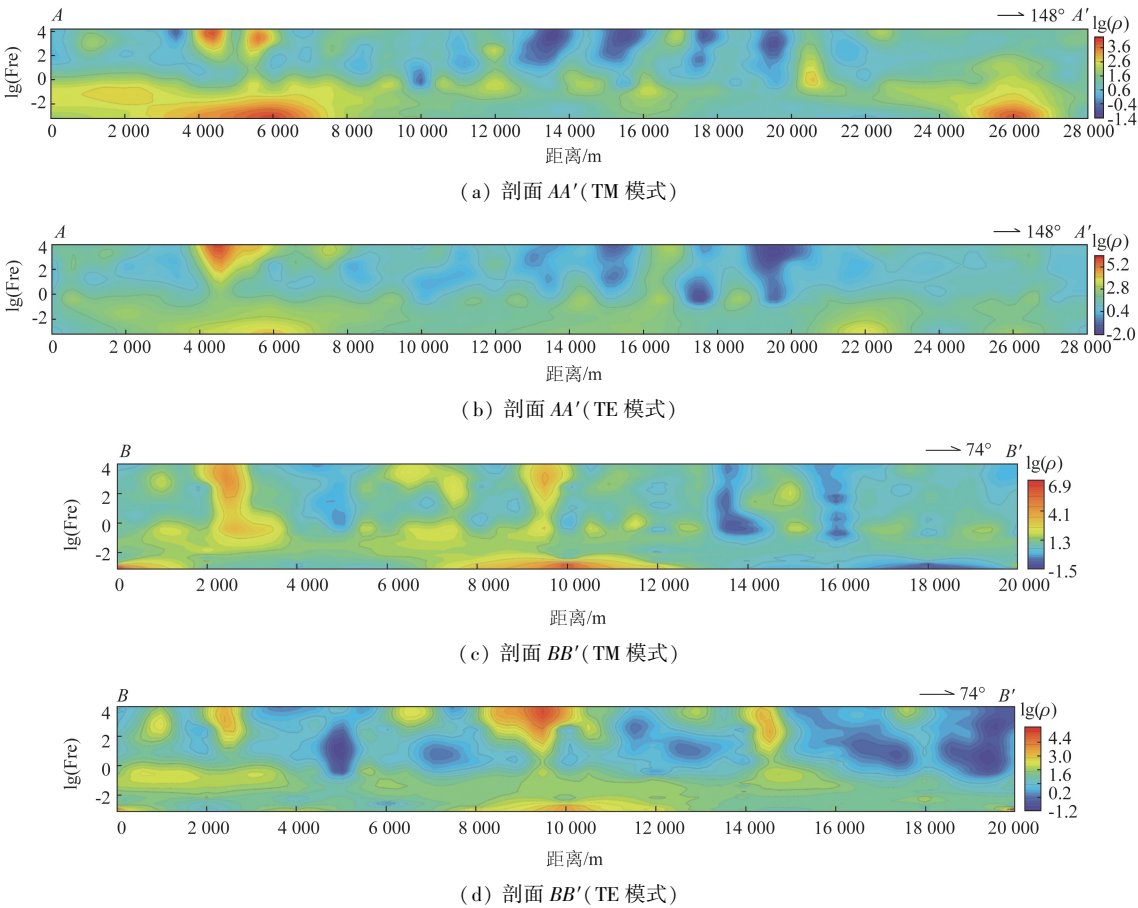


图 6 研究区视电阻率拟断面

Fig. 6 Pseudosection diagram of apparent resistivity in the study area

3 天然氢地球化学及地球物理综合分析

3.1 土壤 H₂ 地球化学特征和氢同位素

尚义—张北地区的面积性土壤 H₂ 浓度统计参数见表 1。由表 1 可以看出,尚义—张北地区土壤

中 H₂ 浓度最大值为 $1\,000 \times 10^{-6}$,最小值为 1×10^{-6} ,平均值为 200×10^{-6} 。其中 H₂ 浓度达到 $1\,000 \times 10^{-6}$ 的样品占比 4.97%,H₂ 浓度超过 200×10^{-6} 样品占比 28.9%。此外,H₂ 浓度的变异系数大于 1,说明 H₂ 的浓度变化范围较大且存在较为明显的 H₂ 异常,可能与区内存在的断裂构造有关。

表 1 土壤 H₂ 浓度统计参数特征

Tab.1 Characteristics of statistical parameters of H₂ concentration in soil

H ₂ 浓度/ 10^{-6}								
最大值	最小值	平均值	中位数	背景值	标准差	异常下限	极值比	变异系数
1 000	1	200	84	5	266	220	1 000	1.33

土壤 H₂ 浓度地球化学空间分布(图 4)显示,研究区的 H₂ 高逸出点大多分布在玄武岩覆盖区外的区域,在玄武岩覆盖区高浓度 H₂ 逸出点相对较少。对研究区玄武岩覆盖区外(图 7(a))和玄武岩覆盖区(图 7(b))H₂ 浓度进行统计,发现玄武岩覆

盖区与玄武岩覆盖区外的 H₂ 浓度平均值相差近 1 倍。箱线图显示,玄武岩覆盖区外 H₂ 浓度有较多的异常值,而玄武岩覆盖区的 H₂ 浓度异常值则相对较少,且较分散。推断大面积覆盖的玄武岩可能有效地阻止了 H₂ 逸出,可以作为很好的气体圈闭盖层。

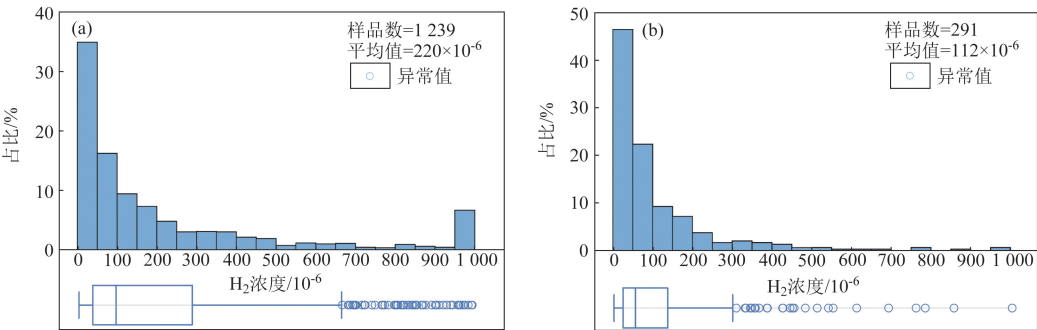


图 7 玄武岩覆盖区外(a)和玄武岩覆盖区(b)H₂ 浓度地球化学异常

Fig.7 Geochemical anomaly of H₂ concentration outside the basalt – covered area (a) and in the basalt – covered area (b)

本文测定了从 Z407、Z623、Z35 – 10、Z215 – 4、Z6 – 33、Z235 – 3 采样点(位置见图 4)采集气体的 H 同位素 δD ,其结果分别为 -461.95‰ 、 -546.65‰ 、 -463.55‰ 、 -465.93‰ 、 -517.03‰ 和 -567.83‰ ,根据 Milkov^[30]的研究结果, $\delta D < -650\text{‰}$ 的 H 来源于地壳, $\delta D > -650\text{‰}$ 的 H 来源于地幔或为原生 H,由此推断研究区的 H₂ 主要来源于地幔,为无机成因。

3.2 重力推断解释

根据重力场特征(图 5),结合已有的地质、区域重力、磁法等资料,依据断裂推断的原则和方法,在研究区内共推断出 12 条隐伏断裂(图 8)。这些断裂走向主要为 NE 向、NW 向和近 EW 向。由断裂的空间分布特征可以看出,研究区断裂构造复杂,显示研究区经历了多期构造活动。自燕山运动

以来,受太平洋板块的俯冲挤压影响,断裂以 NNE 向和 NE 向为主,NW 向次之。研究区早期断裂以近 EW 向为主,应属于尚义—隆化大断裂的派生断裂,活动时间早,属于中生代—新生代活化断裂。近 NE 向、NW 向断裂属于张北—高山堡断裂的次生断裂,主体为中生代形成、新生代活化的断裂,伴随发育的还有 SN 向和 EW 向的部分断裂。其中,NW 向断裂形成时代较新,多表现为再次活化,尽管其规模和强度均弱于 EW 向、NE 向断裂,但对新生代地质构造格架具有关键控制作用。

根据密度资料^[30],研究区盖层与太古代基底之间存在 $(0.2 \sim 0.3) \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的密度差异。利用钻孔资料进行控制,并结合区域重力异常反演,计算得到研究区的中生代底界埋深(图 8)。研究区基

底属太古代变质岩系,自古元古代晚期基底形成以来,研究区发生整体抬升,造成石炭系和二叠系遭受剥蚀,因此中生界直接覆盖于太古宙基底上^[31]。由钻孔资料可知(图2),在研究区东南侧,已有钻孔ZK0828和ZK0412钻遇太古宙基底,基底深度分别为959 m和1 081 m^[22],在基底之上存在一定厚度的砂岩—玄武岩—泥岩组合,最厚处超过1 000 m。

研究区发育马驹沟凹陷、胡家洼凹陷和大赉红凹陷,受基底断裂构造的影响,马驹沟凹陷呈近EW向的长椭圆形,胡家洼凹陷和大赉红凹陷(部分位于研究区外)呈近NW向三角形展布。马驹沟凹陷受近EW向断裂控制,由于其边界主断裂被NW向断裂所切割,造成该凹陷东窄西宽;胡家洼凹陷和大赉红凹陷受NE向、NW向及近SN向断裂控制。研究区凹陷具有一定沉积厚度,后期受断裂构造和岩浆活动影响,可能会影响原先形成的储层及盖层的构造,从表2及图9可以看出,虽然胡家洼凹陷(图9(a))和马驹沟凹陷(图9(b))都分布了高浓度H₂逸出点,但其平均值、中位数及上四分位数均低于凹陷区外(图9(c)),且箱线图显示凹陷区内包含的

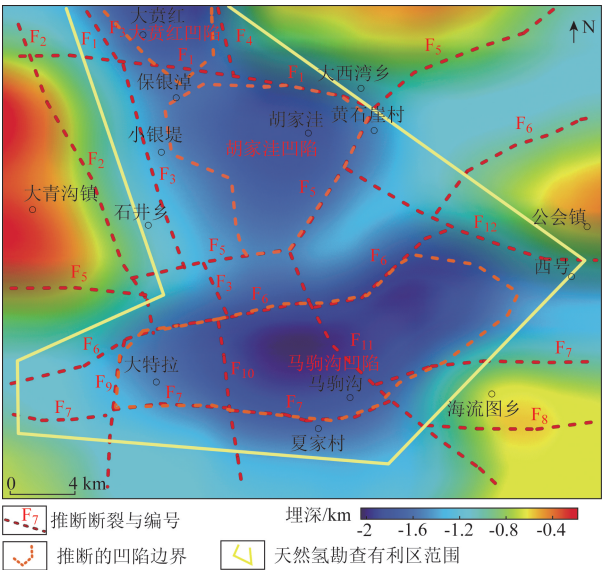


图8 研究区中生代底界埋深

Fig.8 Burial depth of the Mesozoic base in the study area

异常值相对较少且较分散,说明凹陷区内的局部区域具有存储H₂的潜力。土壤H₂地球化学测量尚未覆盖大赉红凹陷,因此未对该凹陷进行统计。

位置	H ₂ 浓度/10 ⁻⁶							总样本数/个
	最大值	最小值	平均值	中位数	下四分位数	上四分位数	标准离差	
胡家洼凹陷	967	1	142	74	34	180	179	113
马驹沟凹陷	1 000	1	186	84	30	219	250	248
凹陷区外	1 000	1	210	86	33	262	276	1 156

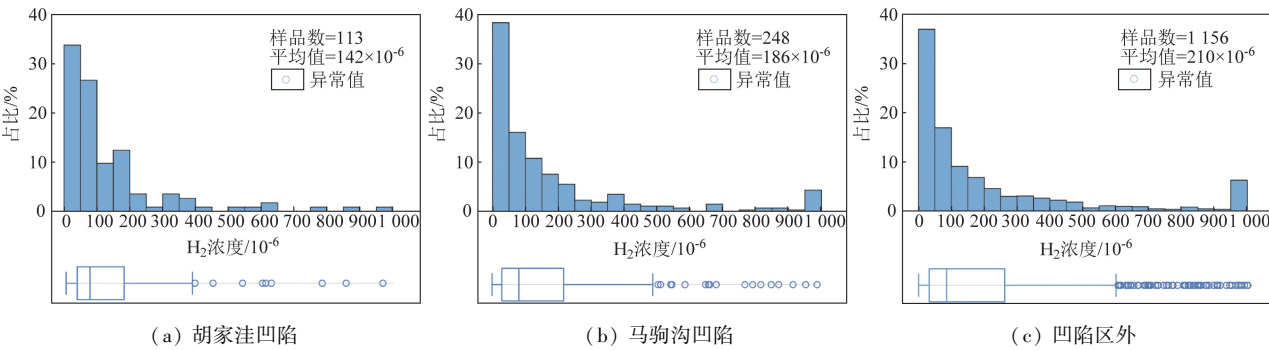


图9 推断的凹陷区内外H₂浓度地球化学异常

Fig.9 Geochemical anomaly of H₂ concentration inside and outside the inferred depression area

3.3 大地电磁测深推断解释

大地电磁测深剖面穿过第四纪松散沉积和中新统汉诺坝组玄武岩覆盖区,根据物性资料,该区太古宙基底为高阻层,剖面AA'反演结果(图10)表现出“两凹一隆”的特征,西北部基底界面深度超过

1 km,东南部的马驹沟凹陷比胡家洼凹陷更深,中部基底出现隆起,最浅埋深近0.5 km,凹陷边界均受断裂所控制,基底深度和凸凹格局控制了研究区盖层的厚度和空间形态。大地测深推断解释得到的断裂及基底形态与重力推断的结果基本一致。

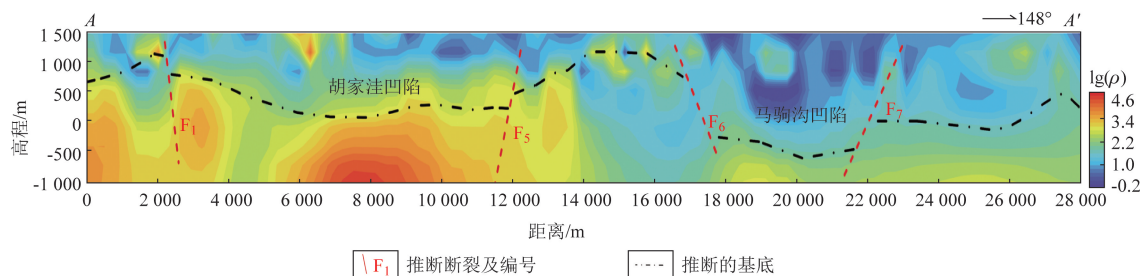


图 10 大地电磁测深二维反演及推断的基底埋深

Fig. 10 Two-dimensional inversion of magnetotelluric sounding and inferred burial depth of the basement

4 尚义—张北地区天然氢成藏前景分析

4.1 天然氢来源

根据土壤 H_2 地球化学调查结果,发现研究区存在高浓度的 H_2 异常,环绕胡家洼—马驹沟一带构成了似“仙女圈”环状构造形态,环外部的 H_2 高浓度逸出点较多,表明尚义—张北地区存在大量的 H_2 逸出,高浓度 H_2 异常点主要呈 NW 向、NE 向和近 SN 向展布(图 4),大部分位于基底隆升区和推断断裂带。

根据 H 同位素 δD ,确定研究区 H_2 主要为幔源成因,这为该区 H_2 来源于地下深部提供了证据。这些 H_2 可能与新近纪以来与基性玄武岩相关的火山喷发作用有关:基性玄武质岩石的水化作用可以产生 H_2 ,同时伴随着玄武质岩浆的喷发,也可将地壳深部(或地幔)的 H_2 带至地壳浅部或地表,或者沿深大断裂带运移至地表,造成 H_2 逸出。根据研究区高浓度 H_2 采样点的持续脉冲式逸出特征,推测本区深部可能存在较充足的天然氢,具备寻找天然氢气藏的良好地质基础。

4.2 运移或储集条件

近 EW—NWW 向的尚义—赤城—隆化区域深断裂是一条切穿地壳且持续活动的深大断裂带,同时喜马拉雅时期形成的与汉诺坝组玄武岩相伴生的 NE 向次生断裂切穿太古代结晶基底。这些深大断裂促进了深部 H_2 发生远距离迁移,并通过次生断裂扩散到盆地储层中。此外,自渐新世以来,尚义—张北地区地震频发,可能导致各种断裂释放出高浓度的 H_2 。因此,深部活动断裂使深层 H_2 向盆地迁移,而次级断裂则将 H_2 输送到储层中。

利用重力和大地电磁测深解释结果推断出 12 条隐伏断裂,断裂呈 NE 向、NW 向及近 EW 向展布,表现为近 EW 向断裂被 NE 向、NW 向断裂切断,且断裂切穿基底, H_2 沿断裂运移至地表,但也有部分断裂段无高浓度 H_2 逸出,由此推测断裂具有运移和存储天然氢的作用。研究区第四纪新构造活动产生的断裂、节理及裂隙等对地下存储的气藏均有破坏作用,可促使掩埋于地下空间的气体释放并逸出, H_2 逸出点的连线可能指示了新构造的线状展布。此外,地表被人为破坏也可以导致气体的逃逸。

研究区早白垩世和古近纪—新近纪的湖泊和三角洲砂岩具有通过浅部断裂二次运移和储存 H_2 的潜力。卢进才等^[20-21]在张北盆地商都凹陷内的古近系小丹岱组和新近系商都组中发现了一个中型规模的 CO_2 气藏。本区古近系—新近系的沉积岩相特征与商都地区基本一致,推测本区太古代基底之上的砂岩—泥岩(煤)组合或砂岩—玄武岩—泥岩组合可能也具备一定的储气能力。此外,研究区东南部的钻孔资料^[22]也证实了砂岩—泥岩(煤)组合的存在,最大厚度超 300 m。

4.3 盖层和圈闭

新近系汉诺坝组玄武岩发育多个岩流单元熔岩,覆盖于研究区中部,岩性为碱性橄榄玄武岩,其形成时代较晚,基本未受断裂构造破坏,岩石相对较为完整致密。在出露的玄武岩区,逸出的 H_2 浓度较低(图 7),表明可能存在溢流致密玄武岩层的封盖效应。因此,致密玄武岩也可以作为储存 H_2 的高质量盖层。根据重力和大地电磁资料,推断凹陷区存在一定厚度的砂岩—玄武岩—泥岩组合,通过统计分析逸出的 H_2 浓度(图 9),发现此区域逸出的 H_2 量相对较少,推断被古近纪—新近纪沉积组合及白垩纪断陷盆地内泥岩、泥质岩覆盖的断

裂、裂隙、砂质岩层、褐煤层、承压水含水层等都可能是有利的 H_2 存储空间。同时古近纪—新近纪砂砾岩、砂岩、膨润土及气孔状玄武岩层可以构成浅表层气体存储空间。

4.4 勘查有利区预测

根据研究区内天然氢成藏的地质因素,利用重力和大地电磁解释成果,识别凹陷特征、区域构造特征、断裂分布特征,结合 H_2 浓度异常分布,划定了尚义—张北天然氢气藏勘查有利区,其主要分布于尚义县、张北县境内,位于保银淖—马驹沟一带,东到黄石崖村—西号一线,西至小银堤—大特拉西一线,北到大赉红以北,南抵夏家村以南(图8),该区域 H_2 逸出较少,为玄武岩覆盖区,对应重力划分的凹陷区,高浓度 H_2 异常围绕此区呈环状分布。天然氢勘查有利区分布呈不规则多边形,南侧分布宽度大,北侧范围窄小,面积约 590 km^2 。

5 结论

(1)土壤 H_2 地球化学测量发现, H_2 异常围绕胡家洼—马驹沟呈周边高、中间低的环形分布特征,部分采样点土壤 H_2 浓度超 $5\,000 \times 10^{-6}$,持续监测显示 H_2 呈脉冲式逸出,具有持续的 H_2 补给。氢同位素分析表明 H_2 主要为幔源成因。

(2)重力测量显示异常全为负值,呈周边高、中间低,分区特征明显,存在多个方向的梯度带。通过重力和大地电磁测深解释,推断出12条隐伏断裂和3个沉积凹陷,明确了盆地基底埋深和构造格架。研究区断裂主要呈NE向、NW向及近EW向展布,为 H_2 运移与储集提供了地质条件。泥岩与玄武岩起到一定盖层作用,早白垩世和古近纪—新近纪的沉积组合具备储氢潜力。

(3)尚义—张北地区的 H_2 可能与幔源岩浆火山喷发作用有关,断裂、沉积组合和玄武岩分别为 H_2 的运移、储存和封盖提供了条件。由此划定了约 590 km^2 的天然氢勘查有利区,该区域高浓度 H_2 逸出少,被玄武岩覆盖且对应重力划分的凹陷区,在寻找天然氢气藏方面具有一定的潜力,值得进一步深入研究与勘查实施。

致谢: 感谢所有项目参与人员的专业支持、资源协助与高效协作,为研究的顺利实施提供了有力保障。

参考文献(References):

- [1] Guélard J, Beaumont V, Rouchon V, et al. Natural H_2 in Kansas: Deep or shallow origin? [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2017, 18(5): 1841–1865.
- [2] Prinzhofer A, Cissé C S T, 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.
- [3] Prinzhofer A, Moretti I, François J, et al. Natural hydrogen continuous emission from sedimentary basins: The example of a Brazilian H_2 – emitting structure [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(12): 5676–5685.
- [4] Lefevre N, Truche L, Donzé F V, et al. Native H_2 exploration in the Western Pyrenean foothills [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2021, 22(8): e2021GC009917.
- [5] Frery E, Langhi L, Maison M, et al. Natural hydrogen seeps identified in the North Perth Basin, Western Australia [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(61): 31158–31173.
- [6] Ramirez A C, Penagos F G, Rodriguez G, et al. Natural H_2 emissions in colombian ophiolites: First findings [J]. *Geosciences*, 2023, 13(12): 358.
- [7] Zgonnik V, Beaumont V, Deville E, et al. Evidence for natural molecular hydrogen seepage associated with Carolina bays (surficial, ovoid depressions on the Atlantic Coastal Plain, Province of the USA) [J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2015, 2: 31.
- [8] Hand E. Hidden hydrogen [J]. *Science*, 2023, 379(6633): 630–636.
- [9] Cha J, Lee J Y. A review on occurrence, mechanism and distribution of natural hydrogen as a promising energy source [J]. *Journal of the geological society of Korea*, 2023, 59(3): 513–526.
- [10] Rystad Energy. The white gold rush and the pursuit of natural hydrogen [EB/OL]. (2024–03–13). <https://www.rystadenergy.com/news/white-gold-rush-pursuit-natural-hydrogen>.
- [11] 李玉宏, 魏仙样, 卢进才, 等. 内蒙古自治区商都盆地新生界氢气成因 [J]. *天然气工业*, 2007, 27(9): 28–30.
Li Y H, Wei X Y, Lu J C, et al. Origin of Cenozoic hydrogen in Shangdu basin, Inner Mongolia Autonomous Region [J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(9): 28–30.
- [12] 万燕鸣. 全球天然氢的勘探、应用与发展 [J]. *中国能源*, 2020, 42(9): 33–37.
Wan Y M. Global exploration, application and prospect of natural hydrogen [J]. *Energy of China*, 2020, 42(9): 33–37.
- [13] 田黔宁, 张炜, 王海华, 等. 能源转型背景下不可忽视的新能源: 天然氢 [J]. *中国地质调查*, 2022, 9(1): 1–15.
Tian Q N, Zhang W, Wang H H, et al. Non-negligible new energy in the energy transition context: Natural hydrogen [J]. *Geological Survey of China*, 2022, 9(1): 1–15.
- [14] 张振利, 魏文通, 刘增校, 等. 河北省、北京市、天津市区域地

- 质志[R]. 石家庄:河北省区域地质矿产调查研究所,河北地质大学,河北省地球物理勘查院,2013.
- Zhang Z L, Wei W T, Liu Z J, et al. Regional Geology of Hebei, Beijing, and Tianjin[R]. Shijiazhuang: Hebei Institute of Regional Geology and Mineral Resources Survey, Hebei GEO University, 2013.
- [15] 郭金城, 张振利, 张计东, 等. 张家口幅 K50C004001 1:25 万区域地质调查报告[R]. 北京: 全国地质资料馆, 2008.
- Guo J C, Zhang Z L, Zhang J D, et al. Geological survey report of the Zhangjiakou Sheet (K50C004001), 1:250,000[R]. Beijing: National Geological Data Museum, 2008.
- [16] 易明初, 李晓. 燕山地区喜马拉雅运动及现今地壳稳定性研究[M]. 北京: 地震出版社, 1991.
- Yi M C, Li X. Himalayan Movement in Yanshan Area and Present Crust Stability[M]. Beijing: Seismological Press, 1991.
- [17] 胡玲, 宋鸿林. “内蒙地轴”南缘断裂带的活动时代及结构分析[J]. 中国地质, 2002, 29(4): 369–373.
- Hu L, Song H L. Ages of activities of the southern “Inner Mongolian axis” marginal fault belt and an analysis of its structure[J]. Geology in China, 2002, 29(4): 369–373.
- [18] 夏国礼. 坝上张北盆地成熟的可能性探讨[J]. 河北地质矿产信息, 2004(2): 28–31.
- Xia G L. Discussion on the possibility of maturity in the Zhangbei Basin on the Bashang Plateau[J]. Hebei Geology and Mineral Information, 2004(2): 28–31.
- [19] 魏仙样, 卢进才, 李玉宏, 等. 商都拗陷浅层 CO₂ 气藏成因与典型气藏分析[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2010, 25(3): 27–32.
- Wei X Y, Lu J C, Li Y H, et al. Origin of shallow carbon dioxide gas reservoir in Shangdu Depression and the analysis of typical gas reservoir[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2010, 25(3): 27–32.
- [20] 卢进才, 魏仙样, 曹莹铨, 等. 内蒙古商都地区 CO₂ 气藏地质条件研究[J]. 西北地质, 2002, 35(4): 122–134.
- Lu J C, Wei X Y, Cao X D, et al. Research on CO₂ gas pool – geological conditions in Shangdu area, Inner Mongolia[J]. Northwest Geology, 2002, 35(4): 122–134.
- [21] 卢进才, 李玉宏, 魏仙样, 等. 内蒙古商都地区二氧化碳 (CO₂) 气藏勘查报告[R]. 西安: 西安地质矿产研究所, 2009: 18–39.
- Lu J C, Li Y H, Wei X Y, et al. Investigation Report on CO₂ Gas Reservoirs in the Shangdu Area, Inner Mongolia[R]. Xi'an: Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, 2009: 18–39.
- [22] 河北省地矿局第三地质大队. 河北省张北县公会一带煤矿详查地质报告[R]. 2012: 81–105.
- The Third Geological Brigade of Hebei Geological and Mineral Bureau. Geological Report on Detailed Prospecting of Coal Resources in the Gonghui Area, Zhangbei County, Hebei Province[R]. 2012: 81–105.
- [23] 杜俐, 沈光银, 林银山. 华北地台北缘火山岩型铀钼矿床找矿模型研究[J]. 地质找矿论丛, 2012, 27(4): 458–462.
- Du L, Shen G Y, Lin Y S. Prospecting model research of volcanics – hosted U – Mo deposits at north margin of the North China platform[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2012, 27(4): 458–462.
- [24] 许洪才, 申宗义, 李新华, 等. 河北省沽源地区矿产成矿规律与找矿方向[J]. 地质调查与研究, 2016, 39(4): 260–272.
- Xu H C, Shen Z Y, Li X H, et al. Metallogenic regularity and prospect of the Guyuan area, Hebei Province[J]. Geological Survey and Research, 2016, 39(4): 260–272.
- [25] 王建青, 刘高杰, 董帅, 等. 河北省沽源县张麻井铀钼矿“三位一体”找矿预测地质模型[J]. 地质通报, 2023, 42(6): 931–940.
- Wang J Q, Liu G J, Dong S, et al. The “trinity” prospecting prediction geological model of the Zhangmajing uranium molybdenum deposit in Guyuan county, Hebei Province[J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(6): 931–940.
- [26] 董杰, 宫进忠, 赵琪. 河北省区域岩石物性调查成果报告[R]. 北京: 全国地质资料馆, 1994.
- Dong J, Gong J Z, Zhao Q. Regional Rock Physical – property Survey Report of Hebei Province[R]. Beijing: National Geological Data Museum, 1994.
- [27] 万卫, 陈振亚, 程志中, 等. CO₂ 气体测量方法在低山丘陵区隐伏勘查的试验研究[J]. 物探与化探, 2019, 43(1): 70–76.
- Wan W, Chen Z Y, Cheng Z Z, et al. Pilot study of CO₂ gas measurement method for mineral exploration in hilly areas[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(1): 70–76.
- [28] Moretti I, Prinzhofer A, Françolin J, et al. Long – term monitoring of natural hydrogen superficial emissions in a brazilian cratonic environment. sporadic large pulses versus daily periodic emissions[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(5): 3615–3628.
- [29] Milkov A V. Molecular hydrogen in surface and subsurface natural gases: abundance, origins and ideas for deliberate exploration[J]. Earth – Science Reviews, 2022, 230: 104063.
- [30] 张亚东, 刘俊长, 龚红蕾, 等. 河北省矿产资源潜力评价重力资料应用研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2017: 23–26.
- Zhang Y D, Liu J C, Gong H L, et al. Application Research on Gravity Data in the Potential Evaluation of Mineral Resources in Hebei Province[M]. Hubei: China University of Geosciences Press, 2017: 23–26.
- [31] 袁炳强, 张化安, 许延浪, 等. 集宁盆地商都拗陷重磁力场与石油地质特征[C]//2008 年重磁数据处理解释应用研讨会. 杭州: 浙江大学, 中国地质大学, 2008: 76–81.
- Yuan B Q, Zhang H A, Xu Y L, et al. The gravity – magnetic field and petroleum geological characteristics of Shangdu Depression in Jining Basin[C]//Symposium on the Processing, Interpretation and Application of Gravity – magnetic Data. Hangzhou: Zhejiang University, China University of Geosciences, 2008: 76–81.

Progress and prospective analysis of natural hydrogen investigation
research in Shangyi – Zhangbei area

LIU Wei¹, LU Minjie², WAN Yanming^{1,3}, LIU Decheng⁴, XU Chao⁵, XU Guozhong⁶,
LIU Xiyan⁷, SU Xin³, KOU Ting⁴, YANG Huiqun^{2*}

(1. CHN Energy Hydrogen Technology Co. , Ltd. ,Beijing 100007,China; 2. Beijing Tianchengyuan Energy Co. , Ltd. ,Beijing 100070,China; 3. CHN Energy Hydrogen Innovation Technology Co. , Ltd. , Beijing 100007, China; 4. Beijing Geological and Mineral Exploration Development Group Co. , Ltd. ,Beijing 100050,China; 5. The Third Geological Brigade of Hebei Geological and Mineral Bureau, Zhangjiakou Hebei, 075000, China; 6. Beijing Zhongkan Guojian Engineering Technology Co. , Ltd. ,Beijing 100085 China;7. Xisheng Energy Co. , Ltd. ,Beijing 100070,China)

Abstract: Under the background of the global energy transition, natural hydrogen has emerged as a research hotspot in the field of new energy, and many countries have successively launched investigations into natural hydrogen. On the basis of previous research findings, Zhangbei Basin, with the presence of H₂ escape, is designated as a key area for natural hydrogen research. Then, geological, soil gas geochemical, gravity, and magnetotelluric sounding investigations were carried out in Shangyi – Zhangbei area. The results reveal that soil H₂ anomaly in Shangyi – Zhangbei area exhibits a ring – shaped distribution pattern with high values in the periphery and low values in the center around Hujiawa – Majugou. H₂ concentration in some sampling points exceeds $5,000 \times 10^{-6}$. Hydrogen isotope analysis (δD values ranging from -567‰ to -461‰) indicates that H₂ is predominantly of mantle – derived origin. Twelve hidden faults and 3 sedimentary depressions have been identified according to gravity and magnetotelluric sounding results, and the basement depth and tectonic framework of the basin have been interpreted. It is considered that faults are favorable channels connecting deep hydrogen sources. The sedimentary assemblages of the Cretaceous and the Paleogene – Neogene have the potential for gas storage. Mudstones and dense massive basalt flows play the role of trap caprocks. The sedimentary sag areas with less H₂ escape and covered by basalt flows were delimited as favorable areas for further exploration of natural hydrogen, after comprehensive analysis, with an area of approximately 590 km². This study could provide basis for further exploration of natural hydrogen in Shangyi – Zhangbei area.

Keywords: Shangyi – Zhangbei area; integrated survey of natural hydrogen; H₂ measurement; gravity measurement; magnetotelluric sounding; favorable exploration area

(责任编辑：魏昊明)