

高含量氢气赋存的地质背景及勘探前景

孟庆强^{1,2}, 金之钧^{1,2,3}, 孙冬胜^{1,2}, 刘全有^{1,2}, 朱东亚^{1,2}, 刘佳宜^{1,2}, 黄晓伟⁴, 王璐³

(1.页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100083; 2.中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083;
3.北京大学能源学院, 北京 100871; 4.中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 氢气作为一种可燃气体, 是一种重要的清洁能源。随着过度依赖化石能源带来的环境问题日益加剧, 从自然界中获得氢气的研究得到了越来越多的重视。但是, 地质条件下能否形成高含量氢气, 它们的成因及分布规律如何, 目前研究较少。针对上述问题, 通过对比不同地质条件下氢气的形成及富集规律, 发现在裂谷系统以及板块俯冲带前缘均可能发育高含量氢气气藏。通过进一步总结氢气在不同大地构造位置的分布特征, 认为控制我国含油气盆地分布的板块碰撞带和俯冲带及其周缘, 具备高含量氢气发育的地质条件, 而且, 这些构造位置上发育的含油气盆地具备较好的天然气保存条件, 有利于高含量氢气的保存。

关键词: 高含量氢气; 发育条件; 勘探方向; 板块碰撞带; 板块俯冲带

中图分类号: TE02

文献标识码: A

Geological background and exploration prospects for the occurrence of high-content hydrogen

MENG Qingqiang^{1,2}, JIN Zhiyun^{1,2,3}, SUN Dongsheng^{1,2}, LIU Quanyou^{1,2},

ZHU Dongya^{1,2}, LIU Jiayi^{1,2}, HUANG Xiaowei⁴, WANG Lu³

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 100083, China;

2. SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China;

3. Department of Energy, Peking University, Beijing 100871, China;

4. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Gas of hydrogen is combustible and has been regarded as one of the important form of clean energy. With the increasing environmental concerns caused by the continues and high dependence on fossil fuels, more attention is being paid to the research on hydrogen exploration. However, only limited understanding about the geological, genetic as well as distribution characteristics of hydrogen gas has been addressed. In this paper, the formation and enrichment mechanisms of hydrogen gas under different geological conditions were compared, results showed that reservoirs of high-content hydrogen gas may develop in rift system and the front edge of plate subduction zone. By further summarizing the distribution of hydrogen gas in different tectonic members, it is concluded that the plate collision zone and subduction zone and their peripheries controlling the distribution of the development of high-content hydrogen gas and thus the petroliferous basins developed in these tectonic positions have good natural gas preservation conditions, hence are promising for the preservation of high-content hydrogen gas.

Key words: high-content hydrogen gas; formation condition; exploration trend; plate collision zone; subduction zone

作为一种清洁能源, 氢气越来越受到重视。目前, 各国均制定了氢燃料电池及其相关产业的发展规划。但是, 氢气的获取方式仍然以人工制氢为主, 即通过技术手段, 利用煤炭、天然气等化石能源与水反应获取氢气。这种方法在获取氢气的同时, 仍不可避免地排放 CO₂。从地质环境中直接获取氢气, 不但可以在获取氢气过程中降低碳排放, 而

且是一种更持续的氢气获取方式。由于氢气性质活泼, 易于被氧化, 因此, 传统观点认为自然界中很难存在自由态氢, 即氢气。本文在前人研究的基础上, 系统分析不同构造背景下气藏(气苗)中氢气的含量特征, 总结高含量氢气赋存的地质条件, 并结合我国含油气盆地构造特点, 初步分析了高含量氢气的勘探有利区域。

收稿日期: 2020-08-16; 修订日期: 2021-02-09。

作者简介: 孟庆强 (1978—), 男, 博士, 高级工程师, 从事油气地球化学与氢能研究。E-mail: mengqq.syky@sinopec.com。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0603102) 和国家自然科学基金项目 (41872164, 41102075, 41541019) 联合资助。

1 氢气的需求及获取方式

在减少碳排放的压力下,全球主要国家或地区扩大了氢气利用的领域,对氢气的需求量持续增加。2017 年世界氢气消费量为 $6\,905\times 10^4\text{ t}$,其中绝大部分(99%)用作工业原料或还原剂,而氢气作为能源(即燃料)的消费量仅有 $1\times 10^4\text{ t}$ 左右,应用于交通、建筑等行业^[1]。国际氢能委员会预计,当全球气温升高幅度控制在 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内的情景下,到 2050 年全球氢能需求潜力可达 $5.5\times 10^8\text{ t}$,减少 $60\times 10^8\text{ t}$ 二氧化碳排放,届时氢能在交通运输领域的需求可达 $1.6\times 10^8\text{ t}$ ^[2]。

尽管地质条件中存在一定量的氢气^[3-4],但目前获取氢气的方式主要是工业制氢,即通过一定的手段,从工业原料中大规模制取可燃气态氢产物。这种通过能量输入从含氢原料中提取工业氢气的过程,被称为人工制氢,包括化石燃料制氢、水分解制氢、生物技术制氢和太阳能制氢等^[5]。

中国对工业氢气的需求量和生产量呈逐年上升的态势。自 2009 年产量首次突破 $1\,000\times 10^4\text{ t}$ 以来,中国工业氢气的需求量与产量连续保持世界第一(图 1)。

当前的人工制氢技术主要是通过蒸汽重整法,利用石油、天然气、煤炭等化石能源资源与水作用从而实现工业化制氢。利用化石能源资源制氢技术具有工艺成熟、原料价格相对低廉的优点,但化石能源中的碳元素会转化为 CO_2 气体,从而释放大量的温室气体,环境压力持续紧张。并且,利用化石能源制氢,与所在地区的资源条件禀赋密切相关。在我国,煤炭和天然气是人工制氢的主要原料,占比分别为 62%和 19%。作为亚太地区氢能发展较发达的日本,其氢气主要靠电解水制氢。电解水制氢的产能占该国所有人工制氢总产能的 63%,这与日本缺乏化石能源的天然资源禀赋密切相关(图 2)。

由图 2 可知,无论是从全球还是中国的平均水平看,来自煤炭、石油、天然气等化石能源的氢气均超过 90%,这部分氢气并不能减少 CO_2 的排放,因此,全球及我国的节能减排依然任重道远。而且,随着氢气需求量的逐渐增加,无论利用化石能源重整制氢还是电解水制氢,均面临氢气供应不足的困境。以电解水制氢为主的日本,在本国大力发展氢能应用技术的同时,也在积极寻求海外氢能供应合作商,目前已与澳大利亚、文莱等国签署了氢

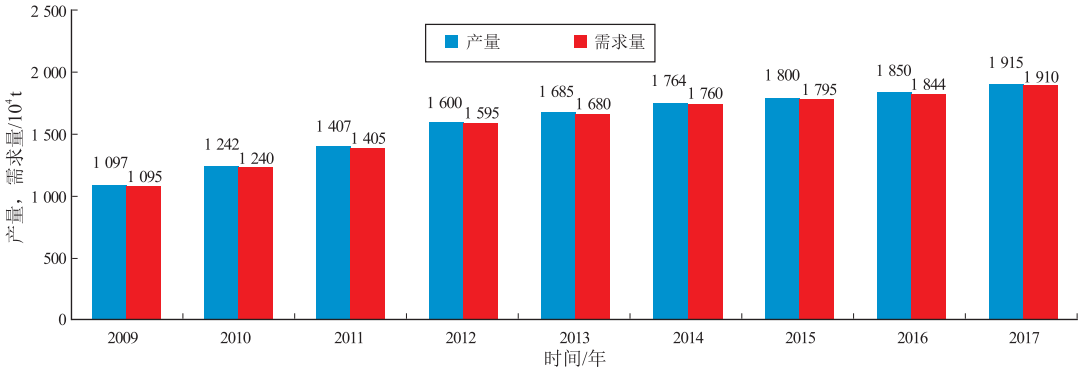


图 1 中国工业氢气需求量与产量变化
修改自文献[5]。

Fig.1 China's industrial hydrogen demand and production trends

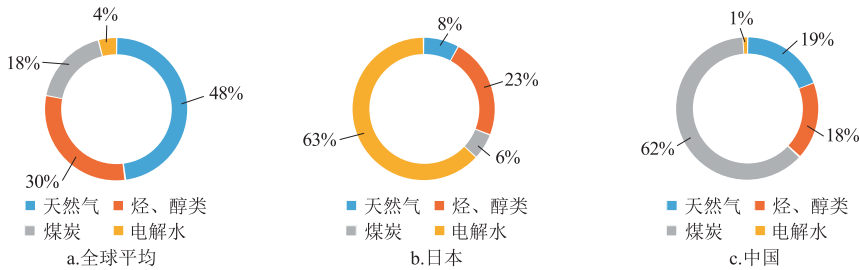


图 2 人工制氢原料来源分布与对比
数据来自文献[6]。

Fig.2 Distribution and comparison of sources of raw materials for artificial hydrogen production

能供应的合作协议。而在我国,预计 2050 年氢能需求将接近 $10\,000 \times 10^4 \text{ t}^{[6]}$ 。面对如此规模的氢气需求,我国的能源结构也需在现有“以化石能源重整为主”的格局基础上进行变革。

获取天然氢,是真正有效降低碳排放的重要途径。尽管氢在自然界中分布广泛,但在自然状态下仅存在着极少量的游离态氢^[3-4],这部分氢气的含量及分布目前研究基础薄弱,因此,尚未讨论过这部分氢气利用的可能性及其利用方法。

2 天然氢的赋存现状

传统观点认为,氢气是一种强还原性气体,由于地球表面含有大量氧化剂,氢气难以赋存。但是,前人^[7-12]的研究和勘探实践均表明,氢气在地表的分布比之前预想的要多,与其所处的地质环境密切相关。

2.1 不同环境下的氢气赋存状态

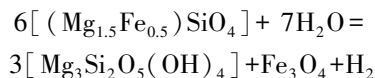
全球范围内,均在沉积盆地内发现了高含量氢气。在澳大利亚 New Guinea 地区发育有含量超过 10% 的氢气^[8];在俄罗斯南部的斯塔夫罗波尔,氢气的含量最高可达 27.3%^[9];在德国也发现了源自盆地深部的高含量氢气^[10];在北美的密歇根盆地中有高含量氢气^[11],Forest City 盆地也发现有含量高达 17% 的氢气^[12]。这些发现和研究都表明,沉积盆地中具备发育高含量氢气的地质条件。

除沉积盆地外,深部流体可以向地球浅部输送大量的氢气,并且不同类型的流体输送能力具有明显的差异性。一般而言,地下 15 km 的 1 kg 岩石,在地表可以释放出 75 cm^3 的 H_2 。具体而言,碱性岩中氢气的平均含量为 $3 \text{ cm}^3/\text{kg}$,而基性超基性岩中则为 $26.8 \text{ cm}^3/\text{kg}^{[13]}$,二者表现出极大的输氢能力差异性;而 1 kg 的水从地下 15 km 运移至地表,可以释放出 $12\,000 \text{ cm}^3$ 的 $\text{H}_2^{[14]}$,这表明水是极佳的输氢物质。因此,深部流体活动区,特别是基性、超基性火山岩发育地区是高含量氢气的主要富集区,而它们的形成往往与构造背景密切相关。比如位于构造活动带的菲律宾 Zambales 地区^[15-16]、阿曼北部火山岩地区^[17-18]、新西兰温泉^[19]、瑞典 Gravberg-1 井^[20]等地区的氢气含量一般均超过 10%。

我国地质构造背景复杂,火山活动区的地表氢气虽然含量较低,但是火山岩释气研究表明,火山岩中含有含量较高的氢气。我国构造活跃地区,如云南腾冲^[21-26]、长白山五大连池^[27-28]等以 CO_2 为主的温泉气中氢气的含量普遍在 1% 左右,均低于国外同类地区氢气的含量。但是我国东部幔源岩

石分步加热释放出的气体中,氢气含量最高可达 35%^[29-33]。这些幔源岩石在我国东部沉积盆地内发育较多,为沉积盆地输入了数量巨大的氢气。以渤海湾盆地惠民凹陷临南洼陷夏 38 井区为例,该地区发育的辉绿岩侵入体分布面积约 20 km^2 ,平均厚度约 $50 \text{ m}^{[34]}$,经前人预测该岩体可携带 $89 \times 10^6 \text{ m}^3$ 氢气^[13]。

大陆裂谷地区是高含量氢气的主要分布区。美国 CFA 石油公司于 1982 年在北美裂谷系中施工了 Scott 井,获得含量约为 50% 的氢气^[35]。该井稳产 2 年之后,氢气的含量下降至 24% ~ 43%^[36-37],但直到 1987 年,该地区钻井中的氢气含量仍能达到 30% 以上^[38]。为了获得高含量氢气,2009 年美国地质调查局 Kansas 分局在该地区进行了以氢气为目标的勘探活动,并施工了 2 个氢气钻孔。这 2 个钻孔在前寒武系基底中发现的氢气,含量最高可达 90%,日产能达到 $310 \sim 470 \text{ m}^3$ (含水在内),显示了良好的氢气开发前景^[39]。同样位于大陆裂谷上的冰岛 Hengill 地区,前人针对氢气实施的钻孔中,也获得了含量高达 37% 的氢气^[40]。该类型氢气被广泛认可的成因是深源基性、超基性岩石中的橄榄石发生蛇纹石化作用形成的^[38]:



并且这种成因的氢气具有含量高、持续时间长的特点。

因此,未来可以商业化开发的天然氢气资源,将首先从大陆裂谷系地质构造环境中获得突破。我国位于华夏裂谷系和汾渭裂谷系上的渤海湾盆地、渭河断陷等^[41],与北美 Kansas 大陆裂谷系具有相似的地质背景,都具有强烈的基性、超基性火山喷发活动。上覆的比较厚的沉积层,在适当的地质条件下,可以作为氢气的储层。因此,以上区域极具钻遇高含量氢气的机会,是未来以氢气为勘探目标的重点区域。但受到过去研究工作的制约,在这些地方尚未开展过系统的以氢气为目标的理论研究与勘探实践工作。

活动断层上方的土壤气中,氢气的浓度变化成为判断断层活动性的指标之一^[42-43],但氢气含量总体较低,在此不做详述。

2.2 氢气高含量典型地区及典型井分析

如上所述,在地表不同的地质环境中均可以发现氢气,而氢气的含量变化较大,这一方面造成对氢气的认识不足,另一方面也对能否利用地质环境

中的氢气产生了质疑。虽然特定的地质条件下氢气的含量可以高达 90%^[39],但过去由于相关报道较少,这类地质现象作为孤例,很难作为氢气可以广泛存在的地质证据。不过随着研究的不断深入,具有高含量氢气(本文暂定为体积分数大于等于 10%)的地质实例被不断发现^[15-20,35,38-40],为深入研究氢气的形成及赋存提供了典型案例。高含量氢气一般赋存在裂谷系统中,包括大陆裂谷盆地以及大洋中脊。此外,在板块碰撞带和俯冲带附近,残留洋壳形成的蛇绿岩可以通过蛇纹石化作用形成高含量氢气。下文拟对国外典型沉积盆地中的典型地区进行分析,探索高含量氢气的形成和赋存条件。

2.2.1 陆内裂谷系 (Mid-Continent Rift System)

北美 Kansas 盆地的高含量氢气,自 20 世纪 90 年代发现以来得到了广泛研究。对该地区高含量氢气研究进行梳理,有助于进一步厘清类似地质条件下氢气的成因及分布现状。

北美 Kansas 盆地高含量氢气主要以 Morria 郡的 Scott 井和 Grary 郡的 Heins 井为代表,相似的探井共有 10 余口,它们位于 Humboldt 断裂带西侧的 Nemaha 背斜上。由于 Humboldt 断裂带位于 Kansas 内陆裂谷地球物理异常带的东部,且其切穿了 Kansas 古生代地层至前寒武系基底。因此,该断层被认为是北美陆内裂谷系统的一部分(图 3)。

在早期研究中,Scott 井和 Heins 井的氢气含量分布在 29%~37%之间,其余的主要为氮气,很少见烷烃气体及 CO₂。但近期的研究表明,Scott 井的氢气含量有下降的趋势,至 2008 年该井氢气含量降为 18.3%;Heins 井的氢气含量则一直稳定在 25%±5%之间(表 1),而且,高含量氢气均围绕这两口井分布。在距离这两口井以北约 85 km、靠近金伯利岩区的 Duroche-2 井(图 4),氢气的含量自该井 2012 年施工以来逐渐降低,至 2014 年,氢气含量已经难以测到,目前的主要气体组分是氮气。在该地区最北端 Brown 郡,由 WTW 石油公司施工的 Wilson-1 井,在钻井到 1 641.3 m、钻进前寒武系基岩 427 m 时,泥浆中录得大量气泡。对基岩进行洗井、射孔后取得了产自基岩的气样。由于怀疑气体受到污染,并且 CO₂可能来源于洗井过程中注入的 HCl,因此,对组分分析结果去除 CO₂和空气组分后做了归一化处理。组分分析表明,这些气体中含有 17%的氢气、34.6%的氮气和 45.1%的甲烷气体,以及少量的 He 和 Ar 等。

长期以来,前人对于该地区氢气的成因进行了持续的研究。Scott 井氢气主要产层是前寒武系基底至石炭系密西西比亚系(相当于下石炭统)以及宾夕法尼亚亚系(相当于上石炭统)的砂岩及泥质砂岩。该井西部是由中生代—新生代地层形成的低山丘陵地形,在距离该井约100 km以西发育白垩

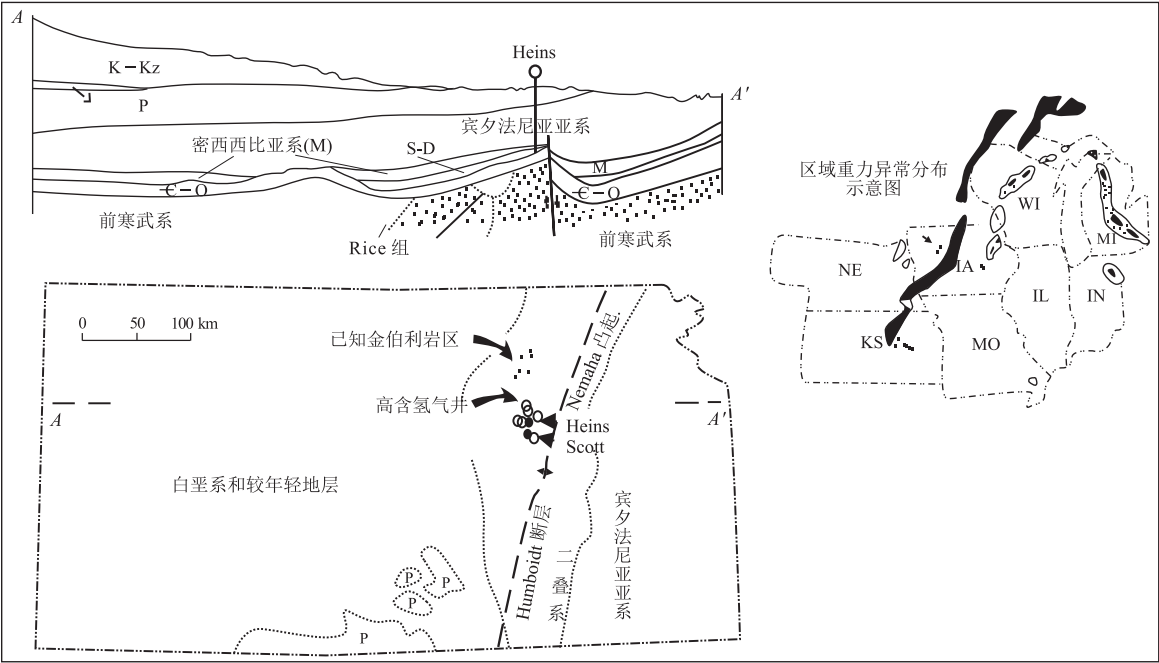


图3 北美 Kansas 盆地富氢气井构造地质及剖面
修改自文献[38]。

Fig.3 Geological map and profile of hydrogen-rich wells in Kansas Basin, North America

表 1 北美 Kansas 盆地 Scott 和 Heins 富氢天然气井中气体组分分析

Table 1 Gas components of hydrogen-rich natural gas wells of Scott and Heins in Kansas Basin, North America

井号	取样日期	数据来源	摩尔分数/%							
			He	H ₂	O ₂	N ₂	CO ₂	CH ₄	Ar	Σ C ₁₋₅
Scott	1982-08-12	文献[36]	-	36.62	1.88	61.03	-	-	-	0.47
Scott	1982-08-26	文献[36]	-	23.27	10.61	66.08	-	-	-	0.04
Scott	1982-08-26	文献[36]	-	40.65	1.78	57.51	-	-	-	0.06
Scott	1982-09-20	文献[36]	痕量	44.61	21.36	33.72	0.31	-	痕量	-
Scott	1982-09-20	文献[36]	-	57.20	-	41.88	0.92	-	痕量	-
Scott	1983-08-27	文献[36]	-	33.80	1.01	65.19	-	-	-	-
Scott	1983-08-27	文献[36]	<0.10	39.40	0.50	60.10	-	-	-	-
Scott	1984-06-10	文献[36]	-	1.42	0.01	97.45	-	-	1.12	-
Scott	1985-07-14	文献[36]	-	4.50	1.00	92.88	0.50	-	1.10	0.01
Scott	2008-07-08	文献[36]	0.08	17.32	-	71.36	0.02	5.39	-	5.91
Heins	1983-09-07	文献[44]	0.82	22.08	7.85	69.25	-	0.82	-	0.82
Heins	1983-09-07	文献[36]	0.75	33.86	3.60	61.81	-	0.74	-	0.74
Heins	1984-06-12	文献[38]	-	31.21	1.48	67.28	0.03	-	-	-
Heins	1985-06-14	文献[38]	0.06	35.03	4.49	59.38	0.30	0.10	0.70	0.10
Heins	2008-07-08	文献[44]	0.14	16.44	-	19.73	0.09	31.65	-	32.09
Heins	2012-03-12	文献[39]	-	25.06	0.46	59.95	0.01	7.24	-	7.28

注:本表对原始文献中的数据进行了归一化处理。

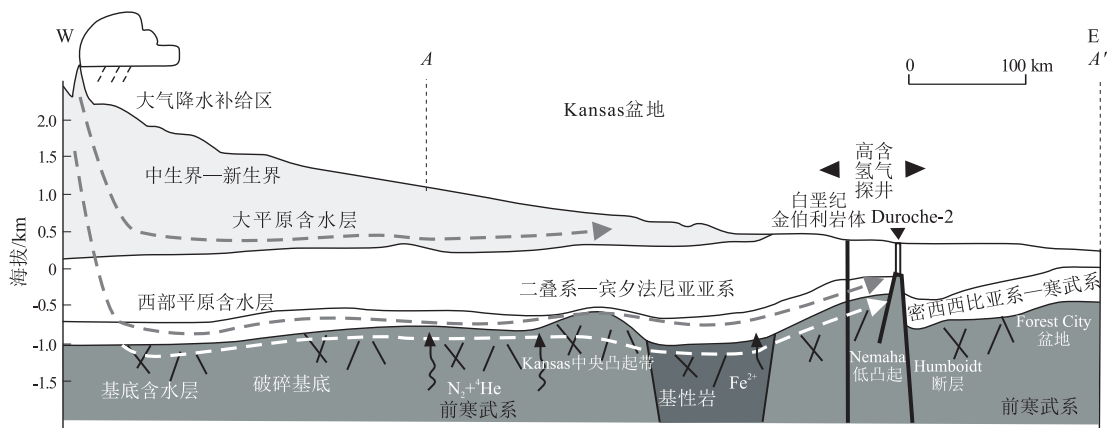


图 4 北美 Kansas 盆地富氢气藏形成过程示意

修改自文献[39]。

Fig.4 Accumulation process of hydrogen gas pools in Kansas Basin, North America

纪金伯利岩侵入体。研究表明,Scott 井中的氢气主要是密西西比亚系与宾夕法尼亚系含 Fe²⁺的矿物与水反应形成,并由地下水携带至有利区富集(图 4)。尽管有学者认为氢气的形成与该地区深大断裂发育及其带来的地幔脱气效应(mantle outgasing)密切相关,但根据地层水与氢气的氢同位素组成特征计算得到的氢气形成温度约在 25℃左右,与地幔脱气作用下的高温效应明显不符。利用幔源及大气中的 He 作为混源 He 的端元,对 Kansas 盆地 Scott 井区天然气中 He 的同位素组成特征进行研究,R/Ra 结果表明,来自幔源的 He 约为 15%。因此,该井附近的深大断裂对于气体的聚集具有一定

影响,但是否促进氢气的形成,尚需要进一步研究。

2.2.2 板块俯冲带

在自然界中,蛇纹石化反应是形成氢气最主要的方式,这个反应的本质是基性—超基性岩石中的橄榄石和辉石在气液交代作用下形成各种蛇纹石的过程。这种反应一般发生在大洋中脊,因为大洋中脊是目前壳幔相互作用最直接的地点,为以基性—超基性岩石为载体的幔源流体上涌提供了通道及蛇纹石化作用发生所需的温度条件(300~400℃),因此易于发生蛇纹石化作用^[45],形成高含量氢气,氢气的含量最高可达 90%以上。近年来,橄榄石的低温蛇纹石化反应^[46-48]的不断发现,进一步拓

展了氢气赋存的范围。

在板块俯冲带上,由于洋壳残留的蛇绿岩富含橄榄石和辉石,因此,在板块俯冲带上也分布有高含量氢气。特别是尚未经过高压—低温环境的蛇绿岩,其中的橄榄石尚未经过蛇纹石化作用,或者蛇纹石化程度很低。这些蛇绿岩在板块俯冲过程中被挤压在沉积岩层系中,从而位于陆壳或者洋壳等不同板块的碎屑岩或碳酸盐岩层系中。切穿沉积岩层系中蛇绿岩的大断裂,为橄榄石提供了不同盐度和酸碱度的地下水,从而有利于蛇纹石化的发生,产生富含氢气的天然气气藏。

在板块俯冲带的不同位置,气藏的组分差异较大,这些气藏组分的差异,与板块俯冲带不同位置上水的供应状态密切相关:若水的供应状态低于蛇纹石化作用进行的速度或二者大致相当,则产生的气体以氢气为主,此时,氢气的含量可以高达80%以上;若地下水的供应状态充沛,则水中溶解的CO₂可以继续参与反应,前期形成的氢气可以进一步还原CO₂,形成CH₄,此时,蛇纹石化作用的产物为氢气与甲烷的混合气体;若水的供应较为充分,且发生蛇纹石化作用的程度较浅,水中溶解的氮气与深源氮气混合,从而形成富氮气气藏,此时,氮气的含量可以超过90%(图5)。

氢气气藏在阿曼分布较广,其氢气的含量一般分布在60%~80%,气藏主要分布在温泉中,温泉水的pH值一般可达10~11。氢气被认为是蛇绿岩发生低温(20~50℃)蛇纹石化作用的产物^[17]。这些蛇纹石是晚白垩世时期阿拉伯陆壳俯冲至阿拉伯海洋壳之下,镶嵌在阿拉伯陆壳上的洋壳残留(图6a)。

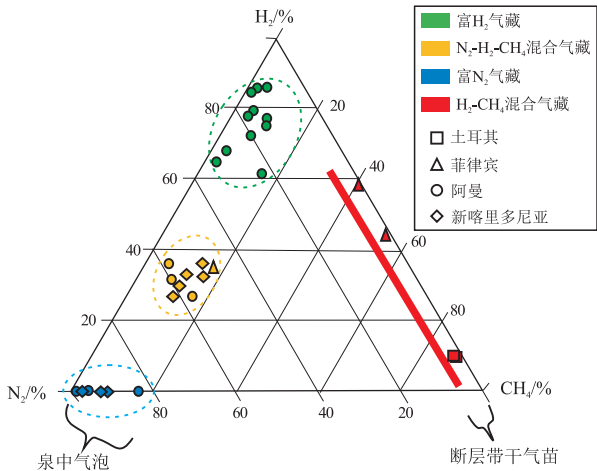


图5 板块俯冲带分布的气藏类型及其划分标准
图中为摩尔分数,修改自文献[44]。
Fig.5 Types of gas reservoirs distributed in plate subduction zones and relative classification criteria

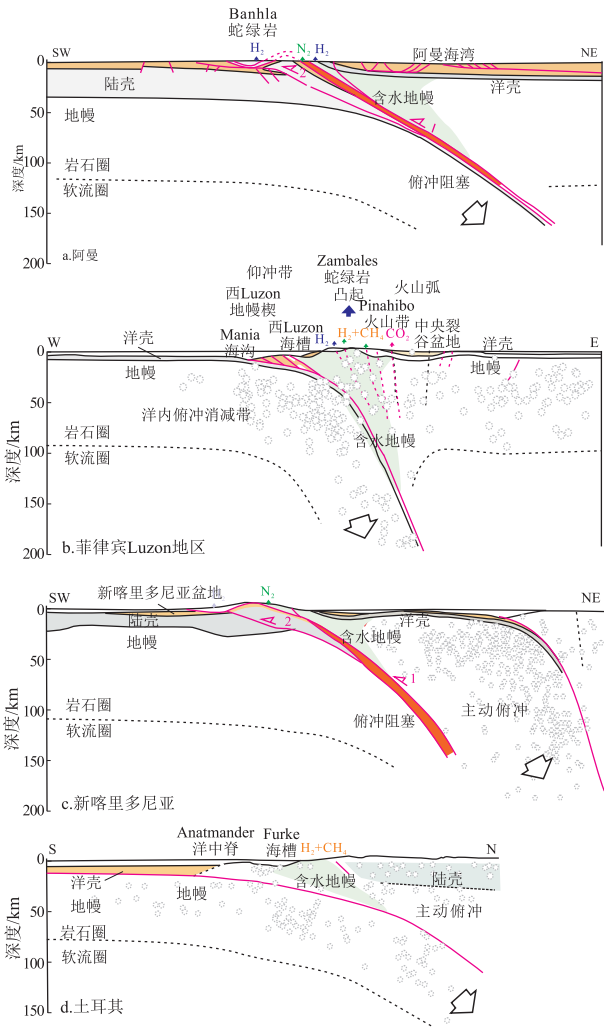


图6 板块俯冲带不同位置气藏成因机理示意
修改自文献[44]。

Fig.6 Genetic mechanism of gas reservoirs at different locations in plate subduction zones

菲律宾 Luzon 岛位于菲律宾海板块与太平洋板块的俯冲消减带上,Zambales 蛇绿岩体位于该岛的西北部。在 Luzon 岛上有多处温泉及气藏点,这些温泉气及气藏点的气体组分,可以分为 H₂、H₂+CH₄以及 CO₂为主。根据气体的同位素组成及组分之间的关系,如同土耳其 Chimaera 地区一样,这些 H₂的成因是蛇绿岩与水在深部发生蛇纹石化作用的产物,具备深源成因特征。而 CH₄是蛇纹石化第二阶段 H₂还原 CO₂的产物,而 CO₂是未反应完全的剩余气体。由于菲律宾所在地区发育多套断裂系统,为水提供了循环通道,通过地下水的循环,溶解于水中的气体被带至板块深处,从而为地壳或者上地幔附近的蛇纹石化作用提供了条件。前人研究表明,该地区蛇纹石化作用发生的温度约为110~150℃(图6b)。

新喀里多尼亚(New-Caledonia)处于澳大利

亚—印度板块与太平洋板块碰撞带附近的澳—印板块的构造活动带上,其上分布的蛇绿岩是目前已知的陆上最大超基性岩体,是始新世时期板块碰撞形成的橄榄岩推覆体。在这些推覆体的西侧发育富氢温泉,而在推覆体的北侧分布有 N_2 气藏。气体的组分及稀有气体同位素和 N 同位素研究表明, N_2 主要来自于深层,即地幔脱气和橄榄岩变质过程中释放的 N 以及浅层 N_2 ,即大气降水中的水溶气,并以深源 N_2 为主(图 6c)。

与俯冲带相关的 CH_4 气藏分布较多,但无机成因的 CH_4 ,目前研究较为充分的是分布在土耳其南部的 Antalya 地区和 Chimaera 地区。土耳其位于非洲板块与欧亚板块碰撞带上,Chimaera 一线是明显的岩性分界线:以北是白垩系蛇绿岩,以南是三叠系碎屑岩。该地区具有较高 CH_4 含量的气藏,并有零星的富含 H_2 (5%~10%) 气藏^[49]。 CH_4 的成因,既有三叠系碎屑岩中有机质热解形成的有机成因 CH_4 ,也有蛇绿岩经蛇纹石化作用形成的 CH_4 。由于蛇纹石化作用的阶段性,在初期阶段,富含 Fe^{2+} 离子的矿物与水作用,形成 H_2 ;在第二阶段, H_2 与水中溶解的 CO_2 相互作用形成 CH_4 。由于第二阶段并不能彻底消耗 H_2 ,因此,会形成高氢气含量的气藏。根据氢气与水的同位素计算,得到的蛇绿岩蛇纹石化作用的温度约在 50℃ 左右(图 6d)。

综上所述,无论是在陆上裂谷系统还是在板块的俯冲消减带或者板块碰撞地带,均可以发育高含量氢气气藏。前人基于天然气组分及同位素地球化学的研究表明,氢气的形成主要以含有 Fe^{2+} 的矿物,如铁橄榄石、镁橄榄石、蛇纹石等与水经蛇纹石化作用形成的。这个作用发生的温度范围较宽,最低可以低至 50℃,而最高可达 375℃,而深大断裂的发育,为水循环至深部提供了通道。这表明在地壳或者上地幔深度范围内,均可以发生上述反应从而形成氢气。由于水可以溶解部分 N_2 和 CO_2 ,受水循环提供的水溶气的影响,蛇纹石化作用的进行程度也不一样。当水中溶解较少的 CO_2 和 N_2 时,该反应最终的产物以 H_2 为主;当水溶 CO_2 与 H_2 的形成速率大致相当时, CO_2 可全部还原为 CH_4 ,此时,气体中以 CH_4 为主,仅在部分地区有少量 H_2 伴生;当水溶 CO_2 供应充分时,蛇纹石化作用进行得更为彻底,此时, CO_2 进一步被还原为 CH_4 ,仅有少量未反应完的 CO_2 与 CH_4 共存,这在菲律宾 Luzon 岛上最为明显。气藏的类型及规模与这些板块俯冲带的位置密切相关。前人在细致研究的基础上,提出了板块俯冲带不同位置气藏分布示意图(图 7),这对

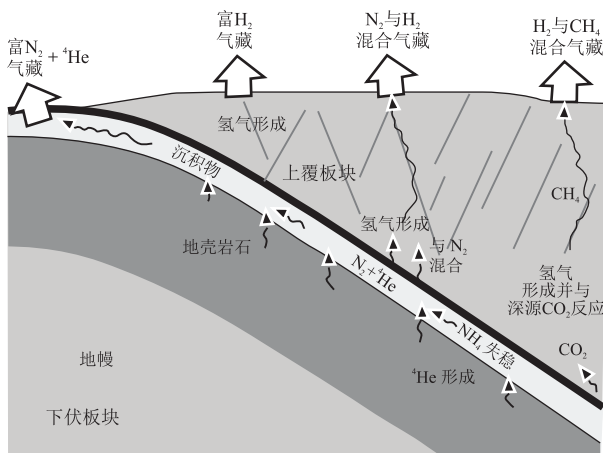


图 7 板块俯冲带不同位置气藏类型分布示意

修改自文献[44]。

Fig.7 Distribution mode of various types of gas reservoirs at different locations in a plate subduction zone

于寻找氢气富集气藏具有宏观的指导意义。

3 高含量氢气勘探有利区预测

如前文所述,尽管氢气易于被氧化,但在特殊的构造背景下,仍可以存在高含量氢气。特别是在板块碰撞带周边,由于板块碰撞导致的板块俯冲引发的地球圈层之间物质的交换作用,形成高含量氢气。

我国主要由多个板块互相拼接而成,主要包括西伯利亚板块、塔里木板块、柴达木—华北板块、羌塘—扬子—华南板块、冈瓦纳板块、太平洋板块以及菲律宾海板块等^[50]。这些板块互相镶嵌和拼接造成板块的碰撞与俯冲。在板块碰撞与俯冲带的不同位置,具备发育高含量氢气的地质条件。

在我国东部太平洋板块与柴达木—华北板块俯冲带附近发育一系列沉积盆地,如松辽盆地、渤海湾盆地、苏北盆地、三水盆地、莺歌海盆地等,因具备较好的天然气盖层条件,有利于高含量氢气的保存。在西部西伯利亚板块与塔里木板块以及羌塘—扬子—华南板块与冈瓦纳板块碰撞带周边的塔里木盆地、羌塘盆地以及腾冲地区等,均可以形成高含量氢气。

由于在过去的研究中,对氢气的形成与赋存条件认识有限,对氢气的重视程度不足,因此,对于我国是否存在高含量氢气及其形成条件研究较少,但该领域应该是今后重点研究的方向。

4 结论

(1) 沉积盆地中存在天然氢气,氢气的含量范围跨度极大,这与氢气的成因密切相关。

(2)氢气的成因类型多样,但在沉积盆地中,高含量氢气的成因主要是含强还原性二价铁离子的矿物与水作用形成的,这种作用一般以基性—超基性岩中的矿物发生蛇纹石化作用为主。蛇纹石化作用发生的温度范围约为 50~375 ℃,可以广泛发生在含油气沉积盆地中。

(3)沉积盆地中以蛇纹石化作用形成的氢气及与之伴生的气体种类及含量,与发生蛇纹石化作用时水及其溶解气的供应状况密切相关,可形成 H₂气藏(H₂含量可达 60%~80%)、N₂气藏(N₂含量可以超过 90%)和 CH₄气藏(含量超过 80%)。

(4)在板块碰撞带与俯冲带不同的位置,具备发育高含量氢气的地质条件。

(5)我国具备多个板块碰撞带与俯冲带,在这些板块边缘不同的位置上,极有可能发育高含量氢气。但受制于过去对氢气研究的重视程度不够,目前对于这些地区是否存在高含量氢气的研究薄弱,是今后重点研究领域。

参考文献:

[1] 罗佐县,曹勇.氢能产业发展前景及其在中国的发展路径研究[J].中外能源,2020,25(2):9-15.
LUO Zuoxian, CAO Yong. Development prospect of hydrogen energy industry and its development path in China[J]. Sino-Global Energy, 2020, 25(2): 9-15.

[2] Hydrogen Council. Hydrogen scaling up: a sustainable pathway for the global energy transition [EB/OL]. (2017-11-13). http://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-Scaling-up_Hydrogen-Council_2017.compressed.pdf.

[3] 孟庆强,金之钧,刘文汇,等.天然气中伴生氢气的资源意义及其分布[J].石油实验地质,2014,36(6):712-717.
MENG Qingqiang, JIN Zhijun, LIU Wenhui, et al. Distribution and genesis of hydrogen gas in natural gas[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(6): 712-717.

[4] MENG Qingqiang, SUN Yuhua, TONG Jianyu, et al. Distribution and geochemical characteristics of hydrogen in natural gas from the Jiyang Depression, Eastern China[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2015, 89(5): 1616-1624.

[5] 邹才能,张福东,郑德温,等.人工制氢及氢工业在我国“能源自主”中的战略地位[J].天然气工业,2019,39(1):1-10.
ZOU Caineng, ZHANG Fudong, ZHENG Dewen, et al. Strategic role of the synthetic hydrogen production and industry in Energy Independence of China[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(1): 1-10.

[6] 符冠云.氢能在我国能源转型中的地位和作用[J].中国煤炭,2019,45(10):15-21.
FU Guanyun. The status and role of hydrogen energy in China's energy transformation[J]. China Coal, 2019, 45(10): 15-21.

[7] PETERSEN H C. Does natural hydrogen exist? [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1990, 15(1): 55.

[8] WOOLNOUGH W G. Natural gas in Australia and new guinea[J]. AAPG Bulletin, 1934, 18(2): 226-242.

[9] BOHDANOWIC C. Natural gas occurrences in Russia (U.S.S.R.)[J].

AAPG Bulletin, 1934, 18(6): 746-759.

[10] MEINCKE W. Zur herkunft des wasserstoffs in tiefenproben[J]. Zeitschrift fur Angewandte Geologie, 1967, 13(7): 346-347.

[11] NEWCOMBE R B. Natural gas fields of Michigan[C]//LEY H A. Geology of Natural Gas. Tulsa: AAPG, 1935: 787-812.

[12] NEWELL K D, DOVETON J H, MERRIAM D F, et al. H₂-rich and hydrocarbon gas recovered in a deep Precambrian well in northeastern Kansas [J]. Natural Resources Research, 2007, 16(3): 277-292.

[13] 郭占谦.从全球油气田分布看我国东南沿海火山岩覆盖区的含油气前景[J].石油实验地质,2001,23(2):122-132.
GUO Zhanqian. Hydrocarbon-bearing prospects of volcanic rock covered regions in the southeastern coastal waters of China judged by the distribution of global oil and gas fields[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2001, 23(2): 122-132.

[14] HAWKES H E. Geothermal hydrogen[J]. Mining Engineering, 1980, 1(6): 671-675.

[15] THAYER T P. Serpentinization considered as a constant-volume metasomatic process [J]. American Mineralogist, 1966, 51(5/6): 685-710.

[16] ABRAJANO T A, STURCHIO N C, BOHLKE J K, et al. Methane-hydrogen gas seeps, Zambales ophiolite, Philippines: deep or shallow origin? [J]. Chemical Geology, 1988, 71(1/3): 211-222.

[17] NEAL C, STANGER G. Hydrogen generation from mantle source rocks in Oman[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1983, 66: 315-320.

[18] SANO Y, URABE A, WAKITA H, et al. Origin of hydrogen-nitrogen gas seeps, Oman [J]. Applied Geochemistry, 1993, 8(1): 1-8.

[19] LYON G L, HULSTON J R. Carbon and hydrogen isotopic compositions of New Zealand geothermal gases [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1984, 48(6): 1161-1171.

[20] JEFFREY A W A, KAPLAN I R. Hydrocarbons and inorganic gases in the Gravberg-1 well, Siljan Ring, Sweden [J]. Chemical Geology, 1988, 71(1/3): 237-255.

[21] 戴金星.云南省腾冲县硫磺塘天然气的碳同位素组成特征和成因[J].科学通报,1988,33(15):1168-1170.
DAI Jinxing. Composition characteristics and origin of carbon isotope of Liuhuangtang natural gas in Tengchong county, Yunnan province[J]. Chinese Science Bulletin, 1989, 34(12): 1027-1030.

[22] 戴金星,戴春森,宋岩,等.中国一些地区温泉中天然气的地球化学特征及碳、氢同位素组成[J].中国科学(B辑),1994,24(4):426-433.
DAI Jinxing, DAI Chunsen, SONG Yan, et al. Geochemical characters, carbon and helium isotopic compositions of natural gas from hot springs of some areas in China[J]. Science in China (Series B), 1994, 37(6): 758-768.

[23] 王先彬,徐胜,陈践发,等.腾冲火山区温泉气体组分和氮同位素组成特征[J].科学通报,1993,38(9):814-817.
WANG Xianbin, XU Sheng, CHEN Jianfa, et al. Composition and helium isotopic characters of natural gas in Tengchong volcanic hot spring[J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(9): 814-817.

[24] 上官志冠,白春华,孙明良.腾冲热海地区现代幔源岩浆气体释放特征[J].中国科学(D辑),2000,30(4):407-414.
SHANGGUAN Zhiguan, BAI Chunhua, SUN Mingliang. Mantle-

- derived magmatic gas releasing features at the Rehai area, Tengchong county, Yunnan province, China [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2000, 43(4): 132–140.
- [25] 上官志冠, 霍卫国. 腾冲热海地区逸出 H_2 的 δD 值及其成因[J]. *科学通报*, 2001, 46(15): 1316–1320.
- SHANGGUAN Zhiguan, HUO Weiguo. δD values of escaped H_2 from hot springs at the Tengchong Rehai geothermal area and its origin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(2): 148.
- [26] SHANGGUAN Zhiguan, HUO Weiguo. δD values of escaped H_2 from hot springs at the Tengchong Rehai geothermal area and its origin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(2): 146–149.
- [27] 高清武. 长白山天池火山水热活动及气体释放特征[J]. *地球学报*, 2004, 25(3): 345–350.
- GAO Qingwu. Volcanic hydrothermal activities and gas-releasing characteristics of the Tianchi Lake region, Changbai mountains[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2004, 25(3): 345–350.
- [28] 高清武, 李霓. 腾冲和五大连池火山区流体地球化学特征及成因探讨[J]. *地质论评*, 1999, 45(4): 345–351.
- GAO Qingwu, LI Ni. A discussion on fluid geochemistry and origin of the Tengchong and Wudalianchi volcanic areas[J]. *Geological Review*, 1999, 45(4): 345–351.
- [29] 杨晓勇, 刘德良, 陶士振. 中国东部典型地幔岩中包裹体成分研究及意义[J]. *石油学报*, 1999, 20(1): 19–23.
- YANG Xiaoyong, LIU Deliang, TAO Shizhen. Compositions and implications of inclusions in the typical mantle rocks from East China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1999, 20(1): 19–23.
- [30] 张铭杰, 王先彬, 李立武, 等. 幔源矿物中 H_2 赋存状态的初步研究[J]. *地质学报*, 2002, 76(1): 39–44.
- ZHANG Mingjie, WANG Xianbin, LI Liwu, et al. Mode of occurrence of H_2 in mantle-derived minerals[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76(1): 39–44.
- [31] ZHANG Mingjie, HU P Q, WANG Xianbin, et al. The fluid compositions of lherzolite xenoliths in Eastern China and Western American [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69: 146.
- [32] 陶明信, 徐永昌, 史宝光, 等. 中国不同类型断裂带的地幔脱气与深部地质构造特征[J]. *中国科学(D辑 地球科学)*, 2005, 35(5): 441–451.
- TAO Mingxin, XU Yongchang, SHI Baoguang, et al. Mantle degassing and deep structure characters of different kinds of fracture, China[J]. *Science in China (Series D Earth Sciences)*, 2005, 35(5): 441–451.
- [33] 胡沛青. 中国东部上地幔不同类型流体组成及其性质[D]. 兰州: 兰州大学, 2006.
- HU Peiqing. The chemical and isotopic compositions and their origin of upper mantle volatiles in Eastern China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2006.
- [34] 曹学伟, 胡文瑛, 金之钧, 等. 临盘油田夏 38 井区辉绿岩热效应对成烃作用的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(3): 317–322.
- CAO Xuewei, HU Wenxuan, JIN Zhijun, et al. Influences of thermal effect of diabase intrusion on hydrocarbon generation in Xia 38 wellblock, Linpan oilfield[J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(3): 317–322.
- [35] GOEBEL E D, COVENEY JR R M, ANGINO E E, et al. Naturally occurring hydrogen gas from a borehole on the western flank of Nemaha anticline in Kansas; abstract[J]. *AAPG Bulletin*, 1983, 67(8): 1324.
- [36] GOEBEL E, COVENEY R, ANGINO E, et al. Geology, composition, isotopes of naturally occurring H_2/N_2 rich gas from wells near Junction City, Kansas [J]. *Oil & Gas Journal*, 1984, 82(19): 215–222.
- [37] ANGINO E E, COVENEY R M. Hydrogen and nitrogen-origin, distribution, and abundance [J]. *Oil & Gas Journal*, 1984, 82(3): 142–146.
- [38] COVENEY JR R M, GOEBEL E D, ZELLER E J, et al. Serpentinization and the origin of hydrogen gas in Kansas [J]. *AAPG Bulletin*, 1987, 71(1): 39–48.
- [39] 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.
- [40] MARTY B, GUNNLAUGSSON E, JAMBON A, et al. Gas geochemistry of geothermal fluids, the Hengill area, southwest rift zone of Iceland [J]. *Chemical Geology*, 1991, 91(3): 207–225.
- [41] 吴振明, 刘和甫, 汤良杰, 等. 中国东部中、新生代主要裂谷盆地的演化及评论[J]. *石油实验地质*, 1985, 7(1): 60–69.
- WU Zhenming, LIU Hefu, TANG Liangjie, et al. Evaluation and evolution of the major rift valley of Meso-Cenozoic in eastern China [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 1985, 7(1): 60–69.
- [42] KITA I, MATSUO S, WAKITA H, et al. D/H ratios of H_2 in soil gases as an indicator of fault movements [J]. *Geochemical Journal*, 1980, 14: 317–320.
- [43] SUGISAKI R, IDO M, TAKEDA H, et al. Origin of hydrogen and carbon dioxide in fault gases and its relation to fault activity [J]. *The Journal of Geology*, 1983, 91(3): 239–258.
- [44] VACQUAND C, DEVILLE E, BEAUMONT V, et al. Reduced gas seepages in ophiolitic complexes: evidences for multiple origins of the $H_2-CH_4-N_2$ gas mixtures [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2018, 223: 437–461.
- [45] KLEIN F, BACH W, JÖNS N, et al. Iron partitioning and hydrogen generation during serpentinization of abyssal peridotites from 15°N on the Mid-Atlantic Ridge [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(22): 6868–6893.
- [46] MAYTHEW L E, ELLISON E T, MCCOLLOM T M, et al. Hydrogen generation from low-temperature water-rock reactions [J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(6): 478–484, doi: 10.1038/NGEO1825.
- [47] OKLAND I, HUANG S, THORSETH I H, et al. Formation of H_2 , CH_4 and N-species during low-temperature experimental alteration of ultramafic rocks [J]. *Chemical Geology*, 2014, 387: 22–34.
- [48] NEUBECK A, DUC N T, BASTVIKEN D, et al. Formation of H_2 and CH_4 by weathering of olivine at temperatures between 30 and 70°C [J]. *Geochemical Transactions*, 2011, 12(1): 6, doi: 10.1186/1467-4866-12-6.
- [49] ETIOPE G, SCHOELL M, HOSCÖRMEZ H. Abiotic methane flux from the Chimaera seep and Tekirova ophiolites (Turkey): understanding gas exhalation from low temperature serpentinization and implications for Mars [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 310(1/2): 96–104.
- [50] 刘训, 游国庆. 中国的板块构造区划[J]. *中国地质*, 2015, 42(1): 1–17.
- LIU Xun, YOU Guoqing. Tectonic regional subdivision of China in the light of plate theory [J]. *Geology in China*, 2015, 42(1): 1–17.