

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

氦气盖层的分子动力学模拟

关平^{1*}, 宋丹丹¹

1. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871

氦气在气藏中的封闭机制涉及复杂的地质和物理过程, 是氦气资源得以保存的关键因素。氦的分子尺寸、质量相对于其他气体分子更小, 扩散系数高, 易散失, 需要密封性更好的盖层。那么, 微纳米尺度的盖层孔隙中氦气的密封机制究竟是什么? 环境条件、孔隙尺寸有何影响? 不同岩性的盖层对于氦气的密封效果的具体差异是什么? 伴生气体和孔隙水对氦气的封存的影响是什么? 这些科学问题尚未有明确的理论与实验答案。分子动力学可以为上述问题提供解决方案。选取膏岩(石膏、岩盐), 泥页岩(高岭石、蒙脱石), 致密碳酸盐岩(方解石)等围岩材料建立多种盖层矿物层状孔隙模型, 模拟氦气在上述不同盖层孔隙中的吸附、扩散、流动行为, 再加入甲烷和水, 考察其对氦气运移影响。结果表明, 在实际

地质条件下, 膏岩层是氦气最好的盖层, 其次为泥页岩, 最后是致密碳酸盐岩。在总气压恒定的情况下, 随着气体中甲烷含量的增加, 氦气的扩散逐渐减慢, 因此, 纳米孔隙中的甲烷分子对氦气的扩散存在明显的阻碍作用; 随着氦气扩散的加快, 其受到甲烷的影响越明显, 扩散系数减小的幅度越大。当含水量较少时, 氦气在五种矿物孔隙中的扩散系数有明显差异; 含水量超过 30% 后, 孔隙结构影响就变得不明显; 随着含水量的升高, 氦气的扩散系数明显降低, 当含水量超过 90% 时, 氦气扩散系数接近于 0。结合赋存状态: 含水量超 90% 后, 氦气以孤立气团存在, 难以在孔隙中连通及扩散。此时盖层的密封效果最好。

关键词: 氦气; 分子动力学、盖层、扩散

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

沉积有机体系的氢逸度表征方法及意义

吴嘉^{1*}, 方朋², 王远³

1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;

2. 国家地质实验测试中心, 北京 102200;

3. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214216

沉积盆地深层的氢逸度水平(氧化还原条件)往往由区域地质背景的无机矿物组成决定,并且能够影响沉积有机物,特别是小分子有机物的地球化学行为。对应体系中,部分小分子有机物之间可达到准热力学平衡,并且与体系的氢逸度水平相关。在自然体系中,此类平衡中的高活性有机质无法以游离态形式稳定存在,常规检测中无法识别。但是在地质有机聚合物中,包裹态的小分子烃类有更稳定的保存环境,活性分子可以长期保存其中。因此,建立沥青质基质中包裹烃中的烯烃与烷烃比值与氢逸度之间的相关性,有助于理解沉积有机质系统中氢逸度的变化。在本研究中,利用分散固相萃取法,对四川盆地西北部

的低熟寒武纪沥青质样品中的正烷烃和正烯烃进行了鉴定。在水热条件下,它们会发生裂解反应和烯烃-烷烃的相互转化反应。值得注意的是,从 C16 到 C18 的正烷烃分布主要受烯-烷转化反应的控制,并且对应的烯-烷比对体系氢逸度的响应灵敏。这表明基于样品所处的温压条件,该反应可以用来估算地层的体系氢逸度。该方法通过沉积有机质体系的固体样品即可准确评估地层氢逸度,对微量的氢逸度水平的计算响应灵敏,为地层氢逸度的普查工作提供了一种有效的补充方法,可以为进一步理解氢在沉积盆地的地球化学行为提供新的证据。

关键词: 氢逸度; 包裹烃; 烯烷比;

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

天然氢渗漏机理探讨

王国建^{1*}

1. 中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所 实验研究中心, 江苏 无锡 214126

天然氢是国际能源气体理论与勘探实践的新热点; 全球已经发现 140 余处天然氢气气苗, 中国在松辽、渤海湾、苏北、四川、鄂尔多斯、柴达木、楚雄等盆地的油气井中先后发现了天然氢气气苗; 在商都、腾冲、即墨等地的温泉中也有发现。在三水、塔里木、松辽等盆地等地表壤气中也发现了高浓度氢气异常。预示着中国具有良好的天然氢勘探前景。目前, 对于天然氢的勘探方法, 主要有地球物理、地球化学、遥感技术。尽管基于微渗漏理论的地球化学勘探技术作为天然氢勘探的一项重要方法已在国内外得到应用, 但是对于天然氢渗漏机理研究甚少, 天然氢渗漏与天然气渗漏机理之间的差异性不清, 导致勘探上对天然氢有利区的确定存在争议, 因此深化天然氢渗漏及其近地表地化异常机理的认识是天然氢勘探的重要科学议题之一, 可为地球化学勘探技术应用提供理论指导。针对上述问题, 以高含氢气藏垂向微渗漏理论模型为基础, 气藏结构要素主要考虑高含氢气藏、直接盖层及上覆地层、第四系沉积层, 运移通道上只考虑地层中的孔隙以及优势路径。在室内研制天然氢气垂向微渗漏的三维模拟实验装置, 对高含氢气气藏通过直接盖层及上覆地层、第四系沉积层微渗漏过程进行实验模拟, 研究了氢气在盖层内渗漏的分散晕, 渗漏氢气和渗漏烃类的关系, 地表氢气异常与烃类异常的关系。同时, 以松辽盆地北部林甸区块断

陷层火成岩基底区新胜 1 井为例, 研究井中天然氢气与烷烃类的关系, 以及地表氢气异常与烃类异常的关系。模拟实验和已知区实测结果表明, 由于氢分子半径与甲烷分子半径的差异, 在盖层及上覆地层渗漏通道相同的情况下, 氢气渗漏与甲烷渗漏具有很大程度差异的分布特征, 甲烷对氢气有稀释作用, 但同时值得注意的是, 氢气和甲烷的渗漏也具有一定程度相似性; 同一渗漏源的氢气和烷烃渗漏在地表形成的氢气异常与甲烷异常并不处于相同位置, 地表氢气异常和甲烷异常相关性较弱, 也说明了甲烷对氢气具有稀释作用。前人研究认为, 油藏和天然气藏对富氢气体有稀释和破坏作用, 未来天然氢气藏的勘探应该避开油气充注的有利区。通过本次研究一方面验证了油藏和天然气藏对富氢气体有稀释和破坏作用, 但同时又指出同源的氢气和甲烷的渗漏也具有一定程度相似性, 因此, 建议天然氢气藏的勘探不能完全避开油气充注的有利区, 天然气共伴生的氢气也应是勘探重点关注的对象。另外, 对于天然氢气勘探而言, 地球化学勘探指标应用需结合地质、地球物理资料具体分析, 实现综合勘探, 为天然氢赋存的有利区确定提供可靠地球化学依据。

关键词: 天然氢; 渗漏机理; 模拟实验; 已知区实测; 有利区

基金项目: 中国石化基础前瞻项目“天然氢气形成富集机理及资源潜力”和国家自然科学基金项目“近地表轻烃来源判识模型及其油气勘探应用基础研究”(41872126)

第一作者简介: 王国建(1972-), 研究员, 研究方向: 地球化学勘探及石油实验地质研究, Email: wanggj.syky@sinopec.com

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

地热系统与氦气、氢气协同成藏的地质耦合机制

王帅^{1*}

1. 中国地质大学(武汉), 武汉 430078

地热系统作为深部流体活动的重要载体, 与氦气(He)、氢气(H₂)等非传统资源的形成和富集存在密切的地质耦合关系。本研究基于典型地热区的地球化学与同位素分析, 结合构造-热演化模型, 揭示了地热流体中 He 与 H₂ 的成因机制及其协同运移规律。结果表明: (1) 壳幔脱气作用与岩石水岩反应是 He、H₂ 的主要来源, 其中高 ³He/⁴He 比值指示幔源贡献, H₂ 则与蛇纹石化及有机质裂解密切相关; (2) 地热活动通过断裂网络驱动流体垂向运移,

形成 He-H₂-地热流体的多相耦合输运模式; (3) 高温地热区(>150 °C) 更有利于 H₂ 的生成与保存, 而中低温地热系统(80~120 °C) 则可能成为氦气富集的有利靶区。研究提出“地热-稀有气体-氢气”三位一体的资源评价框架, 为深部清洁能源协同勘探提供理论支撑。

关键词: 地热系统; 氦气成藏; 氢气生成; 壳幔脱气; 水岩反应

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

柴达木盆地尖北气田氦气地化特征、 成因来源及成藏主控因素研究

王晓波^{1*}, 李剑¹, 王晓梅¹, 田继先¹, 徐朱松¹, 国建英¹, 崔会英¹

1. 中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院 石油地质实验研究中心, 北京 100083

氦气是一种重要的战略稀缺资源, 因其特殊的物理化学性质, 在航天、国防、高端制造、医疗和科研等领域具有不可替代性。尖北气田位于我国西北部柴达木盆地柴北缘, 氦气平均含量超过四川盆地威远气田平均氦含量, 是目前国内评价发现的氦气含量分布最稳定的富氦气田。系统研究表明: (1) 尖北气田氦气含量分布范围较窄, 氦气平均含量超过四川盆地威远气田平均氦含量, 是国内目前评价发现的氦气含量分布区间变化范围较小、分布相对最稳定的富氦气田, 具有显著的工业利用价值; (2) 尖北气田氦气同位素比值表明氦气以壳

源放射性衰变为主, 氦气主要来源元古代古老基底花岗岩及片麻岩中铀钍等元素衰变; (3) 氦气成藏主要受元古代花岗岩及片麻岩氦源、基底断裂与沉积层断裂构成复合输导体系、烃类等载体气的携带、区域性新近系优质泥岩盖层封盖等因素控制; (4) 未来柴达木等盆地勘探应聚焦大型含气盆地古老基底花岗岩及片麻岩分布区、基底断裂带周缘的古隆起区。

关键词: 柴达木盆地尖北气田; 氦气、地化特征、成因来源、成藏主控因素

基金项目: 国家重点研发项目课题四 (2021YFA0719004)

第一作者简介: 王晓波 (1982-), 高级工程师, 研究方向: 氦气检测技术、资源评价与富集成藏规律, 天然气地球化学与成藏研究. Email: wangxb69@petrochina.com.cn

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

中国克拉通盆地氦气成藏分布特征及勘探方向

彭威龙^{1*}, 刘全有², 张继标¹, 周波¹, 朱东亚¹, 马安来¹, 孟庆强³

1. 中国石化石油勘探开发研究院 西北地区勘探开发研究中心, 北京 102260;

2. 北京大学 能源研究院, 北京 100871;

3. 中国石化石油勘探开发研究院 科学技术实验研究中心, 北京 102260

基于对我国三大克拉通盆地天然气中氦气相对含量及同位素组成特征, 结合地质背景与典型气藏分析富氦天然气地球化学特征、成藏主控因素及有利勘探区。研究表明: 克拉通盆地富氦气藏中氦气主要为典型的壳源成因, 深大断裂发育地区氦气具有相对较多的幔源贡献; 氦气源岩主要为花岗质基岩以及富含铀钍的泥页岩和铝土岩; 富氦天然气中氦气与氮气相对含量具有一定的正相关关系, 氮气含量较高的气藏中氦气相对含量一般较高。氦气形成主要受到源岩铀钍含量、源岩规模以及时间的控制; 氦气运移受到构造运动控制明显, 尤其是断裂活动、地层抬升剥蚀作用。地层流体是氦气运移载体, 主要包括地层水以及烃类气体等。氦气在地层水中运移脱溶符合亨利定律,

流动的地层水在富氦天然气运聚中可以起到“提氦泵”的作用而促进气藏中氦气富集, 膏盐岩和泥页岩是富氦天然气的优质盖层。富氦天然气勘探需要优先考虑大气区, 寻找大气田。具有大型隆起或者斜坡构造背景的圈闭, 邻近规模分布的高含铀钍矿物岩石, 适宜的构造运动是富氦天然气成藏的关键。氦气勘探普查可以重点关注氮气相对含量高的气藏。综合分析认为塔里木盆地巴麦地区、塔北地区, 鄂尔多斯盆地伊盟隆起、渭北隆起以及伊陕斜坡南部地区, 以及四川盆地川西南地区、川中地区是富氦天然气有利勘探区。

关键词: 氦气; 地球化学特征; 成藏主控因素; 提氦泵; 克拉通盆地

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 42472220, U20B6001, 41902160, U19B6003, U21B2063); 中国博士后科学基金项目(编号: 2019M650967, 2020T130721) 联合资助。

作者简介: 彭威龙(1988-), 男, 湖北武汉人, 高级工程师, 博士, 主要从事天然气地质与地球化学研究.E-mail: pengwl26@yeah.net.

通信作者: 刘全有(1975-), 男, 山西朔州人, 特聘教授, 博士, 主要从事天然气地质与地球化学研究.E-mail: qyouliu@sohu.com.

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

塔里木盆地阿满过渡带氦气地球化学特征与来源判识

李朋朋¹, 刘全有^{1*}, 刘佳润¹

1. 北京大学 能源研究院, 北京 100871

氦气是新型战略性能源矿产。壳源氦是目前工业开采的主要类型。本研究以塔里木盆地阿满过渡带油气田为例, 基于碳-氮-氦同位素及气体组分相关性, 系统地探讨了壳源氦气来源。多个油气田奥陶系碳酸盐储层中氦气含量普遍低于工业开采阈值 (约 0.05%), 然而哈得逊石炭系砂岩储层中氦气含量普遍高于 0.1%, 最高约 0.7%, 属于富氦天然气。不同气田的氦同位素并无显著差异, 均为 10^{-8} 量级, 指示壳源成因。与奥陶系碳酸盐储层完全不同的是, 石炭系砂岩储层中氦气伴生组分主要为氮气, 且二者呈显著正相关性。而且, 随着氮气含量的增加, 氮气的氮同位素呈同步增长的趋势。石炭系 CO_2 与 CH_4 的碳平衡系数 ($\alpha(\text{CO}_2\text{-CH}_4)$)

反演温度 (最高约 460 °C) 明显高于流体包裹体均一温度 (110~130 °C), 然而奥陶系两者温度大致相当。而且, 石炭系反演温度与甲烷与乙烷的碳同位素的差值、以及氮气、甲烷、氦气含量呈现显著的相关性, 因此, 推断哈得逊石炭系富氦天然气的形成需要深部富氦流体的充注。基于甲烷碳同位素组成、基底挥发分体系甲烷与氮气两者之间的相关性、以及气藏的探明储量, 评估深部富氦流体的主要成分为 N_2 和 CH_4 , 平均占比分别约为 80% 和 14%。

关键词: 氦气; 阿满过渡带、来源判识、伴生组分相关性

国家自然科学基金项目 (42203027, 42141021, U2244209)

第一作者简介: 李朋朋 (1991-), 助理研究员, 研究方向: 氦气富集成藏。Email: lipengpeng@pku.edu.cn

通讯作者简介: 刘全有 (1975-), 教授, 研究方向: 深部流体作用下有机-无机相互作用与油气成藏、稀贵气体富集成藏、CCUS。Email: liuqy@pku.edu.cn

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

俯冲地表水转化为地球深部地幔中天然氢气的关键媒介： 铁氢化物 (FeH_x)

陶仁彪^{1,5*}, 朱金涛^{2,1,3}, Takayuki Ishii³, Daijo Ikuta³, 徐文博¹, 张立飞²,
苏宇通^{4,1}, 刘润超^{4,5}, 金之钧^{4,5}

1. 北京高压科学研究中心, 北京 100193;

2. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871;

3. 日本冈山大学, 鸟取 100193;

4. 北京大学 能源研究院, 北京 100871;

5. 北京大学鄂尔多斯能源研究院, 内蒙古 鄂尔多斯 017010

地球深部释放的氢气 (H_2) 是一种潜在的天然清洁能源, 但其在深部地幔中的形成机制仍不明确。本研究利用大腔体压机模拟实验, 结合原位同步辐射 X 射线衍射技术, 模拟了俯冲板片在上地幔温度压力下, 水 (H_2O) 与地幔矿物、金属铁 (Fe^0) 之间的相互作用。实验结果表明, 随着压力和温度的升高, H_2O 能与 Fe^0 、硅酸盐矿物发生反应, 形成富铁镁的硅酸盐矿物 (如顽火辉石、橄榄石及其高压多型) 和铁氢化物 (FeH_x) ($0 < x < 1$)。在高温条件下, FeH_x 随压力的降低逐渐分解为 Fe^0 , 并同时释放出大量

H_2 。综合实验结果和板块构造地质模型, 我们认为 FeH_x 在俯冲水向地球深部 H_2 的转化过程中起着关键作用。 FeH_x 在深部地幔物质上涌过程中的分解可能是超深金刚石包裹体或地幔捕虏体中 $\text{H}_2 \pm \text{CH}_4$ 流体和金属铁包裹体形成的原因。 FeH_x 分解释放的 H_2 沿深大断裂系统或通过岩浆脱气向上运移, 或许参与了地球浅部天然 H_2 渗漏或储层的形成。

关键词: 天然氢气; 铁氢化物, 壳幔相互作用, 高温高压, 实验地球化学

基金项目: 1、中国石油天然气集团公司-北京大学基础研究战略合作项目 2、地球多圈层碳氢化物的富集理论项目支持 (THEMSIE04010102)

第一作者简介: 朱金涛 (1998-), 博士研究生, 研究方向: 变质地质学。Email: jintao.zhu@hpstar.ac.cn

*通讯作者简介: 陶仁彪 (1984-), 研究员, 研究方向: 深部碳氢循环。Email: renbiao.tao@hpstar.ac.cn

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

天然氢形成与富集机制研究

韩双彪^{1*}, 王成善²

1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083;

2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

未来能源格局中低碳甚至零碳的能源将成为重要组成部分, 氢气燃烧热值高于传统化石能源, 而天然氢气是一种真正零碳的极具发展前景的清洁能源, 形成机制多样且广泛分布, 具有广阔的发展前景。天然氢气富集成藏是一个包括“氢源”、“运移通道”、“储层”及“盖层或屏障”在内的动态变化过程, 但天然氢气富集成藏理论相关研究仍处于探索阶段。天然氢气发现或许自 1888 年就已开始, 尤其是近年来马里天然氢气成功商业开发、美国及澳大利亚等天然氢气专探井的布置。Science 正刊相关报道与文章均昭示着天然氢气成为了全球重要的研究热点。本团队开展的实际研究表明沉积盆地有着高含量的天然氢气, 利用实验测试与微观数值模拟技术, 结合地质资料对沉积盆地中天然氢气分布、储层特征、成因来源、

运移通道及赋存机理进行了深入研究, 最终明确了沉积盆地中天然氢气吸附机理, 并建立了天然氢气动态赋存模型, 吸附态天然氢气或许是深部地下天然氢气主要赋存状态。在未来一个较长时期, 天然氢气富集成藏理论研究将是重要内容, 考虑消耗与逸散在内的天然氢源通量预测评价、天然氢气赋存相态动态转化机理研究、天然氢气扩散运移机制将会是天然氢气领域所需要面临的三个关键问题。由于氢气特性, 未来天然氢气系统理论与勘探评价需要多学科交叉融合, 坚持科技攻关, 加强开展国际合作, 增进学术交流, 促进人才培养。

关键词: 天然氢气; 富集成藏; 勘探开发; 研究进展; 趋势展望

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“松辽盆地徐家围子断陷深层氢气来源及成因机理研究”(42072168)

第一作者简介: 韩双彪(1987-), 男, 副教授、博士研究生导师, 天然氢气地质评价、非常规油气成藏机理。E-mail: bjcuphan@163.com。

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

鄂尔多斯盆地大牛地气田氦气成藏特征及其贫化主控因素

王杰^{1*}, 安川², 马亮帮¹

1. 中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126;

2. 中国石化华北油气分公司, 郑州 450006

摘要:近年来, 相继在杭锦旗东胜气田、大牛地气田等天然气中发现了一定含量的氦气, 但大牛地气田氦气平均含量仅为东胜气田氦气平均含量的 1/4 左右, 那么在盆地基底和构造背景相似的情况下, 究竟是何因素造成二者氦气含量差异如此之大, 值得深入研究。为此, 基于天然气伴生氦气地球化学特征与氦气成藏关键要素的系统分析, 明确大牛地古生界天然气中氦气含量介于 0.0001%~0.15%, 为低氦-中氦气田。相对于下古生界, 上古生界氦气含量相对较高, 纵向上从下往上氦气含量逐渐增加, 显示出浅部相对富集的特征。研究发现大牛地古生界氦气为典型壳源氦, 上古生界潜在氦源岩所生成的氦气成藏贡献很小, 氦气主要来源于盆地基底的太古宇-中元古界变质岩-花岗岩系。无论是基底岩石类型、矿物组成, 还是其厚度及 U、Th 含量, 大

牛地与杭锦旗基底氦源岩特征都比较接近, 推断出基底氦源岩特征不是造成大牛地和东胜气田氦气含量差异如此之大的原因。大牛地仅发育一条二级基底深大断裂, 且在燕山-喜山期活动较弱, 造成次一级断裂活动也较弱, 氦气由基底氦源岩向上运移以及纵向输导和横向调整都缺乏有效通道, 氦气与常规气成藏关键要素组合的时空配置不匹配, 氦气仅靠扩散进入大牛地古生界气藏中, 造成大牛地气田氦气含量偏低, 进而系统剖析了大牛地气田氦气贫化的主要控制因素为基底深大断裂及次一级断裂不发育且活动强度弱、氦气与常规气成藏要素组合不匹配、缺乏有效输导体系、浓度扩散。

关键词: 氦源岩; 断裂发育; 贫化主控因素; 大牛地气田; 鄂尔多斯盆地

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

多圈层作用与中国东部幔源氦运聚过程的动力机制探讨

洪智宾¹, 王晓锋^{1*}, 赵栋¹, 陈科羽¹, 张东东¹, 刘文汇¹

1. 西北大学地质学系 大陆演化与早期生命全国重点实验室, 西安 710069

中国东部新生代玄武岩广泛发育幔源捕虏体, 其稀有气体同位素组成是揭示深部地幔脱气过程与资源效应的关键载体。基于中国东部新生代玄武岩中橄榄岩捕虏体的系统采样, 通过真空破碎后的稀有气体同位素分析, 结合前人区域地质构造与地球化学研究, 探讨东部克拉通破坏背景下幔源氦资源的动力来源、运移路径与富集机制, 揭示地球多圈层相互作用对幔源氦资源形成的控制规律。结果显示, 捕虏体氦同位素比值具有显著的空间分异性: 郯庐断裂带西侧样品 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值接近 MORB 型地幔 (6.5~8.0 Ra), 而胶辽地块样品呈现更高比值 (8.2~9.5 Ra), 暗示晚中生代以来太平洋板块俯冲导致软流圈上涌与富集地幔的局部熔融。地幔氦气存在两种端元混合: 其一为深部地幔柱贡献的高 ^3He 组分, 其二为受太平洋板块俯冲改造的岩石圈地幔脱气产物。提出晚白垩世-新生代岩石圈伸展引发的减压熔融是驱动幔源氦向上迁移的主要动力, 而郯庐断裂带、燕山期基底断裂网络则构成氦气垂向输运的优势通道。氦同位素空间

分布与区域布格重力异常、地壳厚度呈显著负相关, 表明岩石圈减薄区因软流圈上涌加剧地幔脱气通量。构造显示, 不同区域氦气运聚模式受控于盆地动力学背景: 华北克拉通破坏事件导致岩石圈减薄, 拆沉与岩浆侵入的共同作用形成了垂向熔融网络; 松辽盆地的新生代裂谷运动诱发岩石圈减薄, 同时地幔柱头部减压熔融产生大量碱性玄武岩, 伴随大规模脱气。华南地区古太平洋板块俯冲引起板块活化, 形成弧后伸展体系, 板片脱水诱发地幔楔熔融, 释放富氦流体。本研究从地球系统科学视角, 将深部地幔动力学过程与浅表资源效应纳入统一时空框架, 提出中国东部幔源氦资源的形成"深部过程驱动脱气强度-构造体制转换决定疏导体系-浅层流体-岩石特征响应"多尺度协同的结果, 为幔源氦资源整体预测提供了新的理论认识与动力学模型。

关键词: 幔源氦; 捕虏体; 构造差异; 壳幔相互作用; 地球系统科学

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42472187)

第一作者简介: 洪智宾 (1998-), 博士研究生, 研究方向: 氦气运移及动力学模拟. Email: 202410418@stumail.nwu.edu.cn

*通信作者简介: 王晓锋 (1979-), 研究员, 研究方向: 天然气地球化学. Email: wangxf@nwu.edu.cn

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

沉积盆地深层水-岩产氢对有机质裂解的影响: 来自沥青质热模拟实验的启示

方朋¹, 吴嘉^{2*}, 沈斌¹, 徐学敏¹, 翟佳¹, 洪智宾³, 金霄⁴, 王远⁵

1. 国家地质实验测试中心, 北京 100037;

2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;

3. 西北大学 地质学系, 西安 710069;

4. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京 100055;

5. 中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126

沉积盆地深层较高的温压条件下, 水-岩作用往往会产生较高的氢逸度, 这导致无机氢可能参与沉积有机质的生烃反应。通过探究深部地层氢逸度与沥青或原油二次裂解产烃特征的关系, 可以进一步厘定在外源氢参与的条件沉积有机质的产烃效应, 为准确预测深层油气资源的类型和潜力奠定基础。本研究选取低成熟的天然固体沥青为原始实验样品, 在双层金管的实验装置中分别加入矿物缓冲剂(磁铁矿和赤铁矿-MH; 钴和一氧化钴-CoCoO)和沥青质以进行含水体系的热模拟实验。通过分析实验条件下矿物缓冲剂控制的氢逸度与烃类产物的潜在耦合关系, 探讨了有机-无机相互作用对沥青质二次裂解生烃的促进效应。与不含矿物的对照组相比, 含有矿物缓冲剂的体系中水-岩反应产生的无机氢促进了沥青质裂解, 并抑制了其结焦。外源无机氢介入沥青质裂解使得体系中氢通量增加而存量减少, 从而产生了相对较多的气

态烃和相对较少的二氧化碳。同时, 外源无机氢加入提高了液态烃产率。其中, 含 MH 体系液态烃的产率提高了 7.14%, 含 CoCoO 体系液态烃的产率提高了 54.78%。外源氢对不同裂解位点的差异促进效应使得液态烃产物的族组成显著不同, 含有矿物缓冲剂体系的极性组分, 尤其是沥青质的产率有明显的升高, 而饱和烃与芳烃组分的产率则相对降低。芳烃分子标志物的对比分析表明外源氢加入也可以一定程度上促进小分子烃类的二次裂解, 同时还可能明显改变芳烃成熟度参数的大小。热模拟实验的结果为理解深部地层中水-岩产氢作用对沥青或原油二次裂解的产烃效应提供了重要见解, 有助于更准确地评估深部油气资源的类型、稳定性及资源潜力。

关键词: 沉积盆地深层; 有机-无机相互作用; 二次裂解; 氢逸度; 热演化

基金项目: 中国地质科学院基本科研业务费专项经费资助项目(CSJ-2024-05); 国家重点研发计划项目(2017YFC0603102)。

第一作者简介: 方朋(1995-), 助研, 研究方向: 有机地球化学和能源地球化学。E-mail: fangpeng@mail.cgs.gov.cn。

通信作者简介: 吴嘉(1984-), 副教授, 研究方向: 实验地球化学和油气地球化学。E-mail: jia.wu@cup.edu.cn。

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

氦气富集理论中关键问题讨论

秦胜飞^{1*}

1. 中国石油勘探开发研究院 石油天然气地质研究所, 北京 100083

天然气藏中是否富氦, 取决于气藏中氦气的供给量和天然气对氦气的稀释程度, 正常的天然气成藏体系, 天然气由烃源岩到储集层形成气藏, 由于烷烃气对氦气的稀释作用, 氦气含量往往较低, 为贫氦气藏。氦气富集理论强调氦气富集为“多源供氦、主源富氦; 氦氮耦合、同溶共聚”的过程。氦气主要来自岩石中 U 和 Th 的放射性衰变, 任何岩石都含有微量的 U 和 Th, 但以花岗岩等大型古老基底往往是富氦气藏的主力氦源。氦气富集与天然气成藏条件和过程有很大差异, 不能用天然气成藏的思路来研究和寻找氦气。富氦气藏分布于有断裂沟通的古老基底之上、后期经历大幅度构造抬升、盖层相对薄弱、地下水比较活跃的常压或低压区。氦气富集与天然气的成因类型(煤型气、油型气、无机气)及气藏类型都无关,

氦气富集关键问题涉及到氦源岩评价问题、主力氦源的判识问题、气藏的盖层问题、氦气运移途径和运移载体、构造背景、油气充注的诸多问题。不能用简单的测定岩石中 U 和 Th 的含量来判断主力还源岩, 需涉及到岩石规模和地质年代, 以及与气藏沟通的可能性; 更不能因氦气分子量小、易扩散, 认为氦气富集需要更好的盖层; 尽管富氦气藏类型很多, 氦气只与天然气中的氮气相互耦合; 也不能简单认为火山活动带来了幔源氦, 认为应该在火山岩储集层找氦气等。另外, 氦气富集所需要地质条件和勘探选取与天然气也有较大差异。

关键词: 氦气; 富集理论, 富氦气藏, 氦气富集, 富集因素

国家自然科学基金专项项目《中西部叠合盆地氦气富集机理与资源潜力》(42141022)、国家自然科学基金面上项目《富氦煤层气和页岩气藏氦气富集机理》(42272189)。

第一作者简介: 秦胜飞(1969-), 正高级工程师, 博士生导师, 研究方向: 天然气地质与地球化学、油气成藏、氦气富集机理和分布规律. E-mail: qsf@petrochina.com.cn。

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

国际天然氢研究现状及资源勘查进展

房大任^{1*}, 张炜¹

1. 中国地质图书馆, 北京 100083

在全球从化石燃料向低碳可持续能源转型过程中, 氢能以其能量密度高、无污染等特性将成为能源结构中的重要一环。目前人类利用的绝大部分氢气是通过煤炭、石油、天然气等化石燃料制取的二次能源, 具有碳排放量大和获取成本高等缺点。而天然氢作为地球上通过多种自然过程生成并赋存于地质体中的一次能源, 近年来成为了全球能源地质领域关注的热点之一。尽管对自然界中地下氢气赋存的发现可追溯至 19 世纪 80 年代, 并且随后在洋中脊、板块汇聚边缘蛇绿岩带、以前寒武纪大陆基底为代表的构造稳定区、以岩浆及温泉为代表的构造活动带等多种地质环境中均有发现, 但对其关注一直以来多处于科学研究阶段。据不完全统计, 已有美国、加拿大、巴西、哥伦比亚、法国、西班牙、俄罗斯、中国、马来西亚、菲律宾、阿曼、澳大利亚、马里等涵盖各大洲的数十个国家探索性地部署和实施了对天然氢的资源勘查开发。其中, 法国、澳大利亚、美国等已开始从政府层面积极推动天然氢领域的科学研究、资源调查与评价、政策法规修订与完善。此外, 来自上述国家的 20 余家科研

机构和 40 余家企业正积极投身天然氢相关领域, 工作重点包括地表近圆形凹陷构造调查和土壤气体测量、成因机制和成藏机理研究、成藏系统构建、勘查开发远景区和有利目标区圈定、“地物化遥钻”综合资源调查、以及资源量和储量评估等, 天然氢在科学研究和勘探发现方面呈现出加速发展态势。在分析研究全球天然氢勘查开发发展趋势及成因/成藏研究与资源勘探进展的基础上, 认为可能的成藏地质条件包括法国比利牛斯造山带地幔超镁铁质岩的蛇纹石化、法国巴黎盆地构造缝合带橄榄岩的蛇纹石化、澳大利亚 Yilgarn 克拉通和 Pinjarra 造山带深部超镁铁质岩的蛇纹石化及浅部富铁花岗岩的氧化、马里 Bourakebougou 条带状含铁建造的氧化、吉布提 Asal-Ghoubbet 活动裂谷带磁铁矿的黄铁矿化及绿泥石的氧化、巴西 Maricá 新元古代变质岩内花岗岩的辐解及俯冲洋壳超基性岩的蛇纹石化以及巴西 Paraná 盆地古生代至中生代克拉通富有机质过成熟岩石的有机质热解及花岗岩的辐解。

关键词: 白氢; 能源革命, 零碳能源, 氢气藏

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

土壤气样品中氦浓度异常识别测试技术

李军杰^{1*}

1. 核工业北京地质研究院, 北京 100029

土壤氦气地球化学勘探技术是寻找隐伏氦气藏的直接手段, 由于氦气极强的扩散性, 在具备一定压力条件下, 氦气藏中会有少量氦气扩散至上覆土壤层中。通过采集一定深度的土壤气, 对其氦浓度进行检测, 提取氦浓度的异常信息, 可有效地圈定隐伏氦气藏位置, 进而为气藏的钻探开发提供直接依据。然而, 由于土壤的松散性, 土壤气会与空气进行充分交换, 导致土壤气的氦浓度异常信息相对较弱, 一般来说, 仅比空气氦浓度高 5% 左右 (约 5.5×10^{-6}), 这对于测试仪器的灵敏度、稳定性等都提出了极高的要求, 传统的气相色谱分析技术很难识别出如此低的氦浓度异常信息。

本研究围绕小型四极杆质谱仪, 组建超高真空气体进样和纯化分离系统, 在静态模式下采用“稀释剂法”测试技术, 实现了极低氦气浓度的全流程自动化

测试。静态模式测试技术显著地提高了测试灵敏度, 降低了检出限, 可实现氦浓度为 1×10^{-9} ppb 的样品的准确测试; 采用一定量的 ^3He 作为稀释剂, 和样品一起进入质谱测试, 通过测定 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值, 计算样品氦浓度, 可有效避免仪器灵敏度的波动性带来的误差, 通过连续对 187 组空气标准进行测定, 测试的精密度优于 1%, 这对于有效分辨出土壤气微弱的氦异常信非常关键; 基于 CX-ONE 编程软件对控制逻辑进行编写, 并采用 MCGS 组态软件制作交互式界面, 实现了样品全流程自动化测试, 减小人为干预而带来的误差, 有效地提高测试准确度。

关键词: 氦气资源; 土壤气; 四极杆质谱仪; 静态模式测试; 稀释剂法

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

柴达木盆地氦气成藏规律与有利区预测

徐朱松^{1*}

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

氦气是重要的战略稀缺资源, 在柴达木盆地已发现多个富氦气藏, 但氦气富集主控因素和成藏规律缺乏系统的研究。本次研究通过对柴达木盆地天然气开展氦气含量的测试, 结合基础地质资料及前人研究成果, 对柴达木盆地氦气分布特征、来源及富集主控因素进行分析, 建立氦气成藏模式。结果表明: 柴达木盆地具有良好氦气资源前景, 富氦气藏整体分布在盆地边缘的山前地带; 氦气属于典型的壳源成因, 主要来源于花岗岩、花岗闪长岩、花岗片麻岩等古老基底岩石, 泥页岩、页岩等沉积岩系作为补充; 氦气富集主要受古老基底岩石、输导体系、构造运动和天然气充注强度的控制。广泛分

布的基底花岗岩、花岗闪长岩、花岗片麻岩提供了充足的氦源; 断裂、不整合面等输导体系为氦气的垂向运移和横向运移提供了优势通道; 挤压和构造抬升控制了氦气的运移方向, 且促进了溶解氦的脱溶; 适量的天然气充注促进了氦气的富集。结合柴达木盆地构造背景和氦气富集控制因素, 建立了盆地边缘古隆起背景下天然气捕获氦气的富集模式, 预测盆地边缘的祁连山、昆仑山和阿尔金山三大山前古隆起/古斜坡区是氦气资源富集有利区。

关键词: 氦气; 柴达木盆地; 富集规律; 成藏模式; 远景区

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2021YFA0719004); 中国石油天然气集团有限公司关键核心技术攻关项目 (编号: 2021ZG13); 中国石油集团科技管理部超前战略储备基金项目 (编号: 2018D-500802); 中国石油股份有限公司科技项目 (编号: 2021DJ06, 2022KT0901-5) 联合资助。
第一作者简介: 徐朱松 (1993-), 博士后, 研究方向: 天然气及氦气成藏物理模拟等研究.E-mail: zhusongxu1222@petrochina.com.cn.

通讯作者简介:

李剑 (1966-), 教授级高级工程师, 研究方向: 天然气及氦气地球化学、成藏及资源评价等研究.E-mail: lijian69@petrochina.com.cn.

王晓波 (1982-), 高级工程师, 研究方向: 氦气勘查与资源评价、地球化学、富集成藏及分析检测关键技术研发等研究.E-mail: wangxb69@petrochina.com.cn.

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

克拉通沉积盆地 H_2 -He 系统: 以鄂尔多斯盆地为例

魏永波¹, 刘全有^{2*}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100871;

2. 北京大学能源研究院, 北京 100871

氢气是在能源转型中发挥重要作用的零碳清洁能源, 氦气是高新技术产业发展中不可或缺的重要稀缺战略资源。天然氢气和氦气在成因和富集机制上具有一定相似性, 克拉通沉积盆地天然气藏往往会同时含有高浓度的氢气和氦气。然而, 目前氢气和氦气在克拉通沉积盆地中的形成和富集机制尚未被很好揭示, 二者在地下耦合构成的 H_2 -He 系统也缺乏深入研究。本研究获取了鄂尔多斯盆地 9 个气田的 350 组含氢气和氦气的天然气地球化学数据, 囊括了上古生界和上古生界主要含气层系。整体上, 鄂尔多斯盆地天然气藏中天然氢气含量介于 0.001%~34.7%, 平均含量为 0.8%; 氦气含量介于 0.006%~0.387%, 平均含量 0.089%。上古生界下石盒子组氦气含量最大, 平均 0.11%; 下古生界马家沟组氢气含量最大, 平均 2.6%。东胜气田中氦气主要来源于沉积型氦源岩(上古生界石炭系-二叠系煤层、泥岩层、铝土岩层), 其他气田的氦气主要来源于基底型氦源岩(花岗岩、变

质岩)。相比于上古生界碎屑岩气藏, 下古生界碳酸盐岩气藏中天然氢气含量更高, 其来源于盆地结晶基底水岩反应和水辐射分解; 上古生界气藏中天然氢气来源于石炭-二叠系煤系烃源岩热演化和结晶基底。进一步 H_2 -He 动态耦合富集模拟揭示氢气富集是短时间尺度内的快速汇聚(小于 1 万年), 而氦气富集是长地质时间尺度上的逐渐累积(数十个百万年)。据成因法评估显示, 鄂尔多斯盆地共产生了 $81.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 的天然氢气和 $377.3 \times 10^9 \text{ m}^3$ 的氦气, 天然气藏对氢气和氦气的捕获率分别为 0.15% 和 3.7%。结合模型估算鄂尔多斯盆地地下古生界储层中氢气最大资源量为 $675.0 \times 10^9 \text{ m}^3$, 整个盆地的最大氦气资源量为 $22.6 \times 10^9 \text{ m}^3$, 所估算的氢气和氦气最大资源量分别是目前评价资源量的 11 倍和 1.6 倍。

关键词: 天然氢气; 氦气; 天然气; 克拉通; 鄂尔多斯盆地

基金项目: 国家自然科学基金项目(42488101, 42141021)

第一作者简介: 魏永波, 博士研究生, 研究方向: 沉积盆地氢气和氦气资源研究. E-mail: weiyongbo@mail.iggcas.ac.cn

*通信作者简介: 刘全有, 教授, 研究方向: 油气地质与地球化学研究. E-mail: qyouliu@sohu.com

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

鄂尔多斯盆地神木地区氦气运移相态及效率

刘成林^{1*}, 杨广坤¹, 张雪¹, 胡浩然¹, 范立勇², 陈兰³, 王海东¹,
丁振刚¹, 陈践发¹, 朱玉新⁴, 康锐², 董明祥¹

1. 中国石油大学(北京), 北京 102249;

2. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 西安 710018;

3. 重庆科技大学, 重庆 401331;

4. 中国石油油气和新能源分公司, 北京 100007

含氦天然气藏中氦气与烃类气为同储异源, 氦气在水介质、在高浓度烃类中的运移、聚集机制尚需要深入研究。本文以鄂尔多斯盆地神木地区含氦天然气藏为例, 开展气藏地质条件、氦气运移通道、介质、相态、距离、方向、质量与聚集效率研究, 明确氦气运聚机理及对天然气中氦气丰度的影响。(1) 神木地区以平缓褶皱带及斜坡为构造背景, 上石炭统本溪组、下二叠统太原组、山西组富铀、钍暗色泥岩、碳质泥岩、煤、铝土岩为氦源岩, 氦气运移通道与储层为下二叠统太原组、山西组和中二叠统石盒子组砂体和微裂缝, 盖层为上二叠统石千峰组及上覆泥岩。(2) 模拟显示氦气运移分为三个阶段: 海西期-印支期氦气部分释放, 烃源岩多未成熟—低成熟, 生成烃类气少, 氦气以水溶相运移至砂岩储层中, 运移效率高, 地层水中氦气丰度高; 印支期

末-燕山期, 氦气全部释放, 烃类气生成并达到高峰, 氦气先以水溶相, 随烃类气增加, 呈游离相与烃类气一起运移, 运移效率较高, 天然气中氦气丰度低; 喜山期, 随烃类气生成速率降低与散失, 砂岩储层逐渐致密化, 氦气呈扩散相与烃类一起运移, 运移效率较低, 天然气中氦气丰度升高;(3) 在已建立的斜坡—沉积源岩型含氦天然气富集模式基础上, 提出氦气与烃类气运聚动平衡模型, 计算侏罗纪前、侏罗纪—白垩纪、白垩纪后氦气生成量、释放量、运移量、聚集量与散失量, 明确神木地区二叠系氦气资源量与天然气中氦气丰度及影响机理。本文提出的氦气运聚机制与模型对氦气富集研究与勘探有借鉴意义。

关键词: 鄂尔多斯; 神木; 天然气; 氦气; 富集

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFA071900); 国家自然科学基金项目(41872127); 重庆市自然科学基金创新发展联合基金项目(CSTB2024NSCQ-LZX0108)。

第一作者简介: 刘成林(1970—), 男, 教授, 博士研究生导师, 油气成藏与资源评价。E-mail: liucl@cup.edu.cn。

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

非常规天然气中氦气资源形成分布及资源潜力

刘祥柏¹, 陶士振^{1*}

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

我国氦气资源分布广泛, 东部地区氦气主要分布在在郯庐断裂带两侧的含油气断陷盆地, 主要为壳幔混源氦气, 主控因素为深大断裂。断裂带两侧已经发现了多个含有氦气的油气藏和非烃气藏。在松辽盆地徐家围子断陷发现的烷烃气藏中氦气含量相对较低, 基本小于 0.05%, 烃类气体显示出无机地球化学特征。在松辽盆地、渤海湾盆地济阳坳陷花沟地区、苏北盆地溪桥气田发现 CO₂ 含量较高的气藏, 部分气藏中 CO₂ 含量可以达到 70%以上, CO₂ 碳同位素较重, 显示典型的幔源岩浆脱气成因。在松辽盆地尚深 1 井、渤海湾盆地济阳坳陷花沟地区、苏北盆地溪桥气田发现氦气含量相对较高的氦气藏, 在部分 N₂ 含量大于 50%的气藏中氦气含量相对较高, 如花 501-1 井中, 氦气含量为 50.94%, 氦气含量达到了 3.08%。同时在松辽盆地发现 N₂ 含量小于 10%, 但氦气含量相对较高的气藏, 如芳深 1 井、升深 201 井、汪 9-12 井, 氦气含量最高可达 2.104%。以上发现的这些气藏中氦气的 ³He/⁴He 比值平均值超过 2.0 Ra, 整体表现出了明显的幔源氦气参与成藏的特征。四川盆地威远气田是中国首个实现氦气商业化利用的气田, 前震旦系、震旦系、寒武系、奥陶系气藏中普遍氦气含量较高, 可以达到富氦天然气的标准 (氦气含量大于 0.1%), 其中主力气藏震旦系灯影组气藏氦气含量整体最高, 可以达到 0.36%。地层自下向上, 不同地层中氦气含量降低趋势明显。鄂尔多斯盆地庆阳气田、东胜气田, 氦气含量较高, 并都已经进入商业提氦阶段。柴达木盆地发现北缘东坪气田、马北气田、柴北

缘全吉山地区、尖北气田等高品质富氦天然气藏。塔里木盆地巴楚隆起东南缘和田河气田氦气含量 0.26%~0.53%, 折算氦气探明储量 1.9591×10⁸ m³, 塔里木盆地塔西南、塔北、塔中地区氦气含量 0.05%~2.19%, 均展现出一定的氦气富集前景。中西部这些气田中氦气 ³He/⁴He 比值较低, 表现为典型壳源成因。汾渭盆地地热水中的氦气资源也十分丰富, 在西安凹陷和固市凹陷地热井井口气体中氦含量大于 1%的 38 口井中氦气含量最高达 9.226%, 在晋中凹陷新发现的 6 口地热井井口气体中氦气含量达 10%以上, 资源潜力巨大。从资源类型来看, 目前我国已经在无机成因气、常规天然气、致密气、页岩气、地热水中发现氦气含量较高的气藏。在前人对煤层气中氦气含量的研究中也曾发现氦气含量较高的气藏, 但多在外国煤层气藏中。通过对大宁—吉县区块和三交北区块煤系气样品的精细取样、分析, 发现了三交北区块煤系气中氦气含量较高, 属于富氦煤层气田, 这是我国在常规天然气、致密气、页岩气、地热水、非烃气藏之外发现的新的资源类型中富含氦气。通过对煤系气中氦气富集机理的初步探讨, 认为煤层气中氦气主要是壳源异源型, 运移、保存条件是富氦煤层气藏形成的必要条件。建议加强煤系气中氦气富集机理研究, 为寻找富氦煤系气田/区提供理论指导。

关键词: 非常规天然气; 氦气; 资源分布; 富集机理; 勘探开发

基金项目: 中国石油天然气集团有限公司关键核心技术项目 (编号: 2021ZG13)。

作者简介: 刘祥柏 (1991-), 男, 江苏连云港人, 博士 (后), 主要从事氦气地质、石油地质和油气成藏综合研究。地址: 北京市海淀区学院路 20 号, 中国石油勘探开发研究院石油天然气地质研究所, 邮政编码: 100083。E-mail: xiangbai_liu@163.com。

通信作者: 陶士振 (1966-), 男, 安徽阜阳人, 博士, 中国石油勘探开发研究院企业高级专家、教授级高级工程师, 主要从事岩性地层油气藏、非常规油气、无机成因气及氦气地质研究与评价工作。地址: 北京市海淀区学院路 20 号, 中国石油勘探开发研究院石油天然气地质研究所, 邮政编码: 100083。Email: tsz@petrochina.com.cn。