

## ◀ 油气勘探开发与绿色转型 ▶

四川盆地永川地区页岩型氦气富集  
主控因素及资源潜力分析张治平<sup>1</sup>, 童小畅<sup>2,3</sup>, 杨欢<sup>2</sup>, 刘忠华<sup>2</sup>, 向滔<sup>3</sup>, 满向杰<sup>2,3</sup>, 向晋秦<sup>2</sup>(1. 中石化经纬有限公司西南测控公司, 四川 成都 610000; 2. 重庆绿色低碳能源科学技术  
研究院, 重庆 402160; 3. 重庆泛嘉地质勘查有限公司, 重庆 402167)

**摘要** 氦气作为一种稀有战略资源, 关系国家安全和高新技术产业发展。目前中国氦气资源需求缺口巨大, 对外依存度极高, 急需加强氦气资源的勘探及研究工作。永川地区发育五峰组和龙马溪组页岩, 具有“三滑脱层、坡坪式断层”的剖面结构特征, 断裂对目的层未起到明显破坏作用, 页岩气及伴生氦气保存条件良好。研究区页岩中有机质含量(平均2.6%)较高,  $R_o$  为2.09%~2.35%, 黏土含量平均值为42.65%, 页岩中铀、钍元素的较高, 具有高伽马值( $>160$ API)、高放射性的特征, 是一种良好的壳源氦源岩, 生氦能力巨大。研究区五峰组—龙马溪组页岩型氦气分布均匀, 大部分井位氦气含量在0.03%~0.05%之间, 良好的保存条件有利于氦气的富集, 且氦气正处于富集阶段, 页岩气幕式排烃后, 氦气仍在不断衰变生成, 经过估算氦气资源量约为 $7.91 \times 10^{10} \text{m}^3$ , 具有氦气丰度较低, 资源量较大的特征。若要在该区实现氦气的效益开发, 建议应围绕贫氮-含氮天然气的提氦技术, 积极创新开发新型吸附材料与膜技术, 提升低浓度氦提取效率, 推动页岩气等非常规气源的氦综合利用。

**关键词** 永川页岩气 氦气 富集因素 资源潜力 非常规气源

## 1 前言

氦气(He)作为一种单原子惰性气体, 具有无色透明、无刺激性气味、密度小、沸点低、难液化、高扩散性、低溶解性等多种独特的物理化学特性。基于这些特性, 氦气在众多高科技领域发挥着重要作用, 包括军事工业、石油化工、低温工程、医疗技术、电子半导体、光学器件制造、超导研究等领域<sup>[1-3]</sup>。根据勘探数据, 我国已在超过10个沉积盆地内发现具有工业价值的氦气资源。然而, 整体来看, 这些氦气资源的品位较低, 探明储量较少, 且勘探程度仍处于较低水平<sup>[4]</sup>, 氦气资源勘探开发已成为中国矿产资源勘察领域最紧迫的任务之一。在国内已探明的氦气藏中, 具备工业开采价值的主要为与烃类气藏共生的壳源型氦气。典型实例包括威远气田(四川盆地)、和田河气田(塔里木盆地)和东胜气田(鄂尔多斯盆地)等<sup>[5-9]</sup>。

2020年以前, 四川盆地是我国唯一实现工业氦气开采的含油气盆地, 该区域的氦气资源总体丰度较低, 浓度范围主要集中在0.01%~0.05%之间, 典

型代表包括涪陵、长宁、威远等页岩气田<sup>[10-12]</sup>。页岩气藏中的氦气资源通常以伴生形式存在, 受页岩气等载气稀释效应影响, 其浓度普遍维持在0.03%~0.05%的较低水平, 但胜在分布均匀、含量稳定、资源量大。永川地区位于四川盆地页岩气发育有利区内, 处于川中平缓构造带、川南低陡构造带、川东高陡构造带交接融汇地带, 开展页岩型氦气研究具有特殊地质意义。本文聚焦四川盆地永川区块志留系页岩气藏伴生氦气资源, 重点探讨了页岩氦气的富

**基金项目:** 国家重大科研仪器设备研制专项“页岩含气性关键参数测试及智能评价系统”(编号:41927801); 永川区自然科学基金计划“四川盆地川东南低陡构造带璧山—永川断褶带北区志留系页岩气中伴生氦气成因及资源前景”(编号:2023yc-jckx20090)。

**作者简介:** 张治平, 工程师, 2008年毕业于重庆科技学院资源勘查工程专业, 目前主要从事录井、定测录一体化技术及管理工作。  
**通讯作者:** 童小畅, 博士, 油气地质与勘查专业研究员, 重庆绿色低碳能源科学技术研究院院长, 致力于非常规天然气与中深层地热能的地质基础研究工作。E-mail: 1096486374@qq.com

集主控因素,通过系统解析页岩氦气的富集规律,进而对研究区氦气资源潜力进行评价,旨在为该区域页岩伴生氦气的勘探开发提供理论依据。

## 2 地质条件

### 2.1 地层发育

永川地区为主四川盆地东南部,位于重庆西南端(见图 1),主要发育中上寒武统一中侏罗统地层,

除缺失上志留统一石炭系外,还受泸州古隆起影响而缺失中三叠统雷口坡组,表现为上三叠统须家河组与下三叠统嘉陵江组平行不整合接触。寒武系一下三叠统为海相沉积,上三叠统一侏罗系为陆相沉积。背斜区出露最老地层为下三叠统飞仙关组、向斜区出露最新地层为中侏罗统上沙溪庙组。区内地层横向分布稳定、可对比。

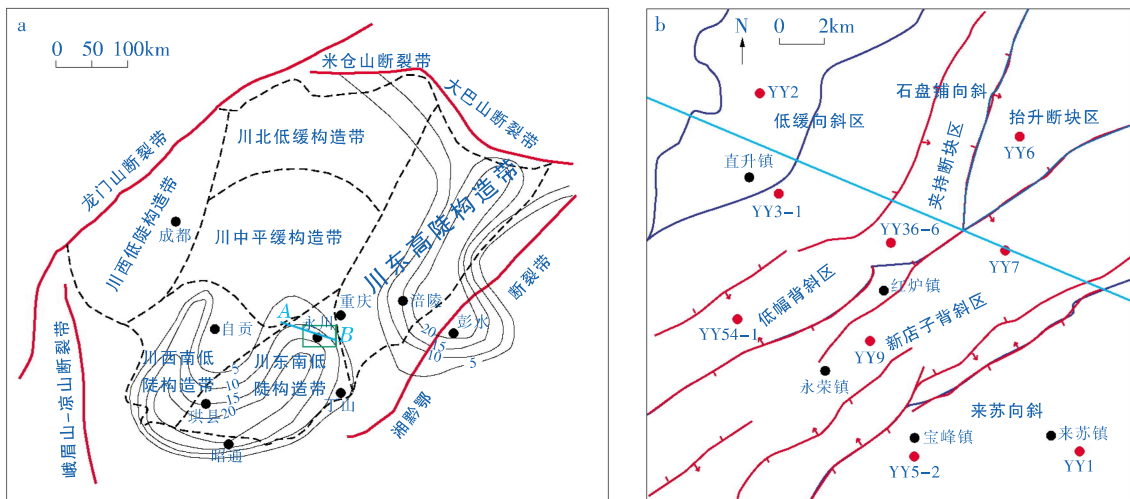


图 1 永川断裂分布图

- 盆地断裂带;   盆地构造单元;   龙马溪组优质页岩厚度等值线(m);   地名;  
  研究区; — 剖面线;   构造界线; ● 井位; — 逆断层

五峰组—龙一段中下部是一套富有机质、富铀及磷酸钙的黑色泥页岩,全区稳定分布,在中部背斜带埋深相对较浅(3000~3500m),而两侧向斜构造区埋藏深度显著增加(3500~4200m)。从沉积相带分布看,五峰组至龙马溪组整体属于深水陆棚沉积环境<sup>[13,14]</sup>,可进一步划分两个沉积亚相:发育于五峰组—龙一段的深水陆棚亚相,以富有机质黑色页岩为典型特征;分布于龙二段—龙三段的浅水陆棚亚相,主要岩性为低有机质含量的灰色泥页岩。龙马溪组共分为三段:龙三段为绿灰色泥岩、偶夹含灰泥岩,厚 245~310m;龙二段为灰色含砂质泥岩,厚 25~40m;龙一段为黑色碳质笔石页岩、灰黑色薄层页岩夹灰黑色灰质页岩,厚 77~118m,在区内自 NW 向 SE 逐渐增厚,背斜区挤压增厚。五峰组分为两段:上部为观音桥段介壳灰岩、水云母黏土岩;下部为黑色硅质泥岩、泥页岩、灰质泥岩等,含大量笔石。

### 2.2 构造背景

永川地区构造位置位于四川盆地东南缘低陡

构造带,华蓥山断裂东侧(见图 1a),在构造演化史上经历了多期次构造变革。东吴构造阶段该区主要表现为拉张应力环境;至印支期,区域应力场由张性应力过渡为挤压推覆构造体系;燕山期持续受到 NW 向强烈隆升作用,在此构造背景下形成了研究区 NE 向断裂系统及褶皱构造;喜马拉雅期受印度—亚洲板块碰撞闭合影响,川南地区遭受 NE 向强烈挤压作用<sup>[15]</sup>。永川区域现今构造样式主要表现为典型的隔档式褶皱体系,总体呈 NE—SW 走向,形成“两凹夹一隆”的构造组合样式(见图 1b)。“一隆”为中部新店子背斜,具有明显的空间分异性:东段表现为 NW 向逆冲推覆构造,主控断裂呈现坡坪式几何学特征;西段发育多组 NW 或 SE 向逆冲断层,构成复杂的冲起构造与对冲构造组合,区内规模较大的断裂主要集中分布于新店子背斜的轴部区域。“两凹”为北部石盘铺向斜和南部来苏向斜,其中北部向斜为复式向斜,内部发育东部抬升断块、夹持断块和西部低缓向斜,构造较为简单,断层欠发育,

地层相对较为平缓,低缓向斜区小断层及裂缝不发育<sup>[16,17]</sup>;南部向斜发育北东—南西断距小于 50m 的层间逆断层,天然裂缝发育。永川地区在垂向上发育典型的多层滑脱构造体系<sup>[16]</sup>(见图 2),其剖面结构特征表现为“三套滑脱层+坡坪式断层”的组合模式。区内主要发育三套关键滑脱层:中—下寒武统

膏盐岩层、下志留统龙马溪组泥页岩层以及嘉陵江组膏盐岩层,这些滑脱层将研究区垂向划分为三个变形层。各滑脱层之间发育坡坪式逆断层<sup>[18]</sup>,断层彼此不连通。这种特殊的构造使得断裂活动对储层的破坏作用显著减弱,为页岩气及其伴生氦气资源的保存提供了有利的构造条件。

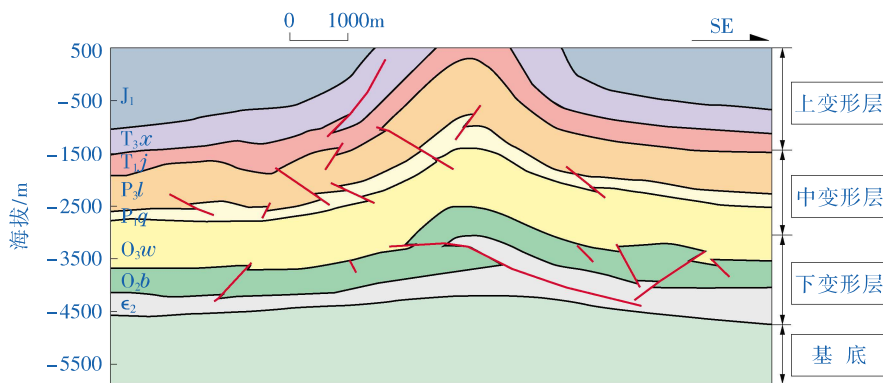


图 2 永川地区典型剖面

■ 下侏罗统; ■ 须家河组; ■ 嘉陵江组; ■ 龙潭组; ■ 栖霞组;  
■ 五峰组; ■ 宝塔组; ■ 中寒武统; ■ 基底; / 断层

### 2.3 页岩储层特征

永川地区的主要氦气产气层系为五峰组—龙一段,整体埋深介于 3550~4200m,其中主体埋深超过 3700m,沉积期处于深水陆棚环境,主要岩性为富含有机质的暗色页岩,页岩厚度大、品质好。产气层储层厚度自 NW 向 SE 逐渐增厚,中部背斜区因构造挤压增厚。北区 I 类+II 类储层厚 52~59m,中区厚 65~77m,南区厚 63.0~69.5m。页岩储层静态参数好,具有高总有机碳(*TOC*)含量(平均值 2.6%)、较好物性(孔隙度平均值 5.05%)、较高脆性(脆性矿物平均值 54.07%)、较高黏土含量(平均值 42.65%)的特点。该储层孔隙系统以有机质孔隙为主,其形态特征多样,包括蜂窝状、线状及串珠状等多种类型,分散填充在粒间孔、黄铁矿之间以及与片层状黏土矿

物伴生的有机质内,孔径主要介于 10~300nm,微孔隙间连通性好。在同等地质背景下,随着埋藏深度增加,储层封闭性显著增强,导致游离态天然气运移受阻,保存条件较好<sup>[13]</sup>。

永川地区五峰组—龙一段有机质显微成分以腐泥组为主,占比 93%~97%;其次为惰质组,占比 3%~7%。干酪根类型为典型的 I 型干酪根,具有极强的生烃潜力,显微组分分析表明,有机质以无定形体为主。五峰组—龙马溪组一段岩心样品分析表明,镜质体反射率( $R_o$ )平均 2.09%~2.44%。表 1 中 6 口井 44 个样品的  $R_o$  为 2.06%~2.58%,平均 2.3%,有机质演化程度较高。*TOC* 含量平均 2.6%左右,中值 2.19%。纵向上,*TOC* 含量自上往下逐渐增高;平面上,各井 *TOC* 基本相当。

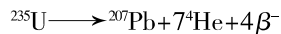
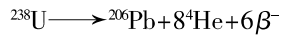
表 1 研究区龙马溪组  $R_o$ 、*TOC* 及 He 含量统计表

井号	岩性	$R_o$ , %	$R_o$ 平均值, %	样品个数	<i>TOC</i> 平均值, %	He, %
YY54-1 井	黑色页岩	2.21~2.40	2.22	24	2.60	0.03
YY6 井	黑色页岩	2.28~2.58	2.44	4	2.62	0.05
YY36-6 井	黑色页岩	2.06~2.12	2.09	2	3.36	0.04
YY3-1 井	黑色页岩	2.12~2.40	2.22	4	2.60	0.03
YY2 井	黑色页岩	2.09~2.43	2.32	5	3.18	0.04
YY1 井	黑色页岩	2.17~2.50	2.35	5	2.73	0.03

### 3 氦气富集成藏主控因素

#### 3.1 铀(U)、钍(Th)含量

在自然界中,氦气以单原子气体的形式存在,拥有两种稳定同位素<sup>3</sup>He和<sup>4</sup>He。其中,<sup>3</sup>He主要来源于深部的地幔,相对丰度低;<sup>4</sup>He主要由地壳岩石(主要为页岩、花岗岩等)中的<sup>238</sup>U、<sup>235</sup>U和<sup>232</sup>Th经 $\alpha$ 衰变形成。铀(U)和钍(Th)均为天然放射性元素,U在地壳中的平均含量为3 $\mu$ g/g;Th在地壳中的平均含量为8 $\mu$ g/g<sup>[19]</sup>。U在自然界中以<sup>238</sup>U、<sup>235</sup>U和<sup>234</sup>U这3种同位素形式存在,分别占U总量的99.275%、0.720%和0.005%;Th在自然界中几乎全为<sup>232</sup>Th,占Th总量的99.995%。<sup>238</sup>U、<sup>235</sup>U和<sup>232</sup>Th的半衰期分别为4.5Ga、0.7Ga和13.9Ga,其衰变公式<sup>[20,21]</sup>简单表示如下:



<sup>4</sup>He的生成与岩石中铀、钍含量以及形成时间有关,铀、钍含量越高,地层越老,生成的氦气量越大,且放射性元素衰变是持续发生的。

页岩型氦来自含铀钍岩石的放射性衰变,氦气的生气速率极低但持续稳定<sup>[22]</sup>,不会出现短时间内生成大量氦气的情况。一般来说,岩浆岩富含铀和钍等放射性元素,其含量显著高于变质岩系。相对而言,大多数沉积岩中这些元素的丰度相对较低,然而富有机质页岩铀、钍含量表现出异常富集的特征,其浓度与花岗岩相当或略高<sup>[23]</sup>。研究区五峰组—龙马溪组页岩地质年龄约为442Ma,富有机质页岩层较老,有机质含量(平均2.6%)很高,页岩中铀、钍元素的平均含量分别约为25 $\mu$ g/g和20 $\mu$ g/g,页岩储层具备页岩气与氦气的双重成藏特征,但页岩气量远远高于氦气,导致页岩储层中的氦气被页岩气所稀释。优质烃源岩的黑色页岩是铀、钍元素相对富集的层段,在一般情况下,烃源岩中铀元素含量与总有机碳(TOC)含量存在正相关关系<sup>[24]</sup>,永川区五峰组—龙马溪组是一套富有机质、富铀及磷酸钙的黑色泥页岩,是良好的氦源岩,氦气生成量与TOC呈间接的正相关关系。因此,永川地区泥页岩层不仅是页岩气勘探的重要目的层段,还是良好的氦气源岩。

#### 3.2 保存条件

氦气富集成藏是生成、运聚、保存与散失的动态平衡。若想富集成藏,则需增加供给、减少散失。因此,氦气源强度的有效供给是根本、保存是关键。

永川地区内未发育深大断裂,断裂规模相对较小,未深入基底,断裂构造主要发育于背斜轴部和倾伏端,以逆断层为主,集中发育在构造高点附近,多为陡倾断层。五峰组—龙马溪组页岩型氦气与页岩气在富集分布方面具有良好的一致性。五峰组—龙马溪组页岩底部为灰黑色、黑色页岩,铀、钍元素含量较高,底部页岩的铀含量为20~30 $\mu$ g/g,普遍具有高伽马值(>160API)、高放射性的特征,与页岩气的高产富集层段基本吻合。五峰组—龙马溪组在上侏罗统—下白垩统之后抬升且裂缝闭合时间较早,有利于气藏富集<sup>[25]</sup>。研究区龙马溪组页岩层系呈现典型滑脱型构造样式,断层系统呈现出双向滑脱特征:上部沿志留系泥岩层发生层间滑移,下部终止于寒武系滑脱面。由于滑脱层的发育,断裂构造对储集层的破坏作用较为有限,氦气主要通过缓慢扩散方式逸散,氦气全部散失需要上亿年时间,这一时间刚好对应五峰组—龙马溪组页岩气的最后一期抬升,地层受到后期改造幅度较小<sup>[26]</sup>,地层保存条件相对完好,为氦气的长期保存提供了比较有利的条件。

研究区气藏原始地层压力为68.69~78.57MPa,压力系数为1.6~2.1,地应力86~110MPa,水平应力差为10~20MPa<sup>[27]</sup>,应力整体较为集中。图3为川东南地区龙马溪组页岩地层压力系数预测图<sup>[28]</sup>。研究区钻井实测地压系数为1.78~1.99,属于高压气藏<sup>[29]</sup>,进一步表明侏罗纪与白垩纪燕山运动和新生代喜山运动,未对永川地区高压页岩气藏进行破坏。稳定的高地层压力进一步反映出研究区内龙马溪组地层的顶底板条件、区域盖层条件相对较好,氦气的保存条件整体较好<sup>[30]</sup>。

### 4 氦气资源潜力

#### 4.1 资源量计算

目前对氦气资源量计算主要有2种方法<sup>[31]</sup>:一类是组分法,依据天然气藏的储量、气体组分进行资源量估算;另一类是成因法,基于放射性衰变原理,从氦气的生成量方面进行资源量估算。

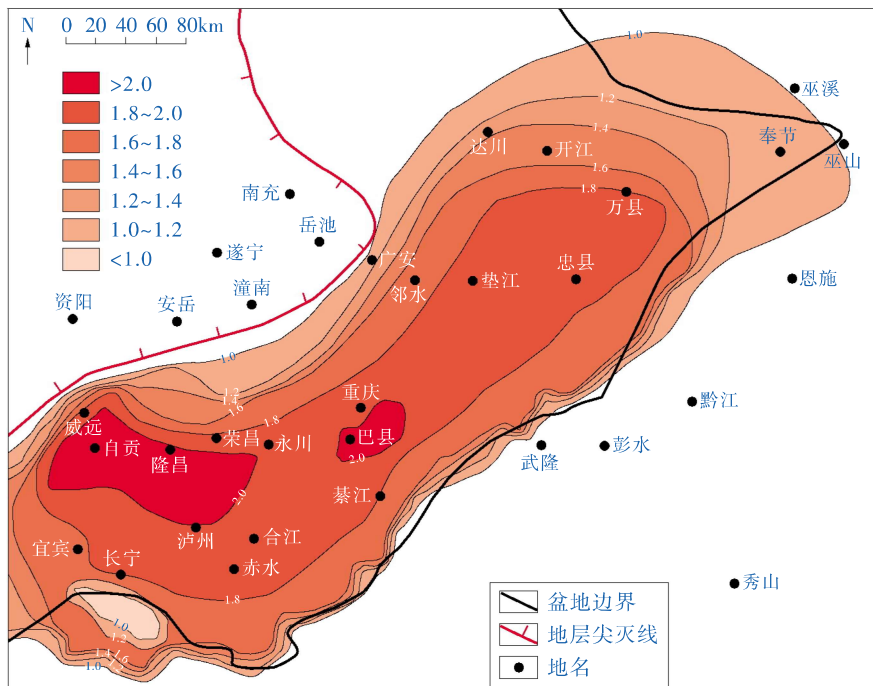


图3 川东南地区龙马溪组页岩地层压力系数预测图

#### 4.1.1 组分法计算

永川地区龙马溪组天然气组分 He 含量占比集中 于 0.03%~0.05%附近(见图 4),个别样品氦气含量大于 0.05%,总体表现较均匀。

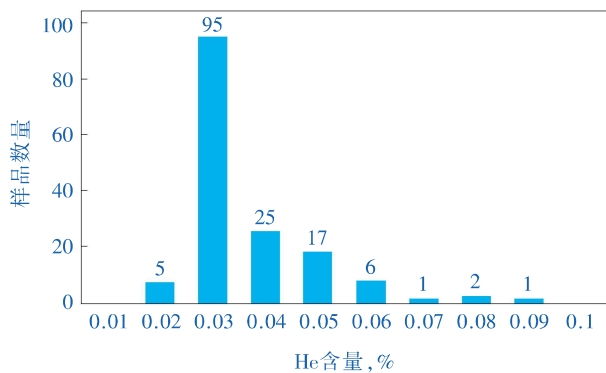


图4 永川地区龙马溪组天然气组分 He 含量分布柱状图

氦气资源量可由天然气地质资源量与气体组分中的氦气体积百分比相乘得到。根据已公布的永川页岩气田的探明储量为  $234 \times 10^8 \text{m}^3$ ,由永川地区龙马溪组天然气组分 He 含量分布计算得到平均含量为 0.036%,因此估算永川页岩气田氦气资源量为  $8.42 \times 10^6 \text{m}^3$ 。

#### 4.1.2 成因法计算

BALLENTINE 等<sup>[32]</sup>根据放射性衰变原理及铀、

钍放射性衰变方程计算得到每年每克铀、钍分别产生约  $1.21 \times 10^{-13} \text{m}^3$  和  $2.89 \times 10^{-14} \text{m}^3$  氦气。五峰组—龙马溪组页岩地质年龄约为 442Ma,每克页岩中元素的平均含量分别约为  $25 \mu\text{g/g}$  和  $20 \mu\text{g/g}$ ,因此计算得出每年每克页岩产生  $36.05 \times 10^{-19} \text{m}^3$  氦气量。只要再得到页岩的质量就能计算出氦气的生成量。根据所查资料,永川地区页岩储层全区稳定分布,平均厚度约 72m,页岩气含气面积约  $26.51 \text{km}^2$ ,页岩层平均密度  $2.6 \text{g/cm}^3$ ,由此计算出永川页岩气田层页岩的质量为  $4.962 \times 10^{15} \text{g}$ 。最终计算得到氦气的总生成量为  $7.91 \times 10^6 \text{m}^3$ 。这一数据与组分法计算的氦气资源量相近。

#### 4.2 资源潜力分析

据蒙炳坤等<sup>[23]</sup>研究,我国上扬子地区铀含量泥页岩>岩浆岩>变质岩;钍含量泥页岩>变质岩>岩浆岩。从氦气生成量来看,钍元素较铀元素相差一个数量级<sup>[32]</sup>,因此氦气生成量多少主要取决于铀元素的多少。永川地区基底为弱—无磁性的元古界变质岩系,基底古老,沉积盖层厚,晚近期无岩浆活动<sup>[33]</sup>,因此认为永川地区页岩气伴生氦气来源于泥页岩中铀、钍元素衰变。永川地区未发育深大断裂,断裂规模相对较小,未深入基底。该区纵向上发育 3 套塑形滑脱层,断层难以断穿。另外,通过分析钻

井实测的地质系数可知:永川地区页岩气藏为高压气藏,进一步证明该区特殊的构造样式未遭到破坏,为页岩气及伴生氦气提供良好的保存条件的同时,隔绝了外源氦气的补充。并且通过页岩储层铀、钍元素成因法和组分法估算的氦气资源量基本一致,吻合较好,也表明氦气是由原位泥页岩中铀、钍元素生成。

氦气在矿物或岩石内铀、钍发生放射性衰变产生后需要脱离宿主矿物进入孔隙空间。氦能否从矿物中迁移出来,主要取决于不同矿物对氦的封闭温度。埋藏越深,地层温度越高,矿物对氦的封闭能力越差。当温度超过矿物的封闭温度后<sup>[34]</sup>,生成的氦才能从宿主矿物中迁移出来。根据永川地区钻井地层温度资料,地表常年平均温度为 18.2℃,目的层龙马溪组地层温度为 116.5~131.6℃,埋深约 3000~4200m,表现为中部背斜处浅,两翼向斜深,整体埋深较深,有利于氦气的初次运移。

铀、钍等元素放射性成氦的过程很少受外界条件的影响,其形成氦气的量的多少与铀和钍含量、富铀和钍的氦源岩的分布规模和时代有关<sup>[31]</sup>。因此,氦源岩分布规模越大、铀和钍含量越高、时代越古老的岩石,其产氦的量就会越大。对于页岩气伴生氦气藏而言,在相对封闭的页岩或煤层气体系中,随着有机质热演化程度逐渐增加,烃类气体逐渐富集增加;此过程中,铀和钍通过放射性衰变产生的<sup>4</sup>He 也逐渐富集。至过成熟阶段,烃类气体的生成量逐渐减少;然而,铀和钍放射性<sup>4</sup>He 仍源源不断地汇集到页岩或煤层气中,经历较长的地质时间便可以形成含(富)氦气藏。氦气相对丰度的演化可分为“早期累积阶段”“生烃稀释阶段”和“保持富集阶段”<sup>[24,35]</sup>。永川地区五峰组—龙马溪组页岩地质年龄约为 442Ma,热演化程度  $R_o$  为 2.09%~2.35%,普遍进入过成熟阶段,氦气正处于富集阶段,页岩气幕式排烃后,氦气仍在不断衰变生成,因此其丰度在缓慢提高。永川地区具有较好的保存条件,可以近似地将计算得到氦气的生成量当成目前氦气的资源量,约  $7.91 \times 10^6 \text{m}^3$ ,具有氦气丰度较低,资源量较大的特征。

#### 4.3 展望

氦气因其独特的物理化学性质,广泛应用于低

温超导、半导体制造、航天推进、核反应堆冷却等领域。然而,中国氦资源极度匮乏,95%以上依赖进口,且全球氦供应受地缘政治影响较大。因此,自主提氦技术对国家科技与产业安全至关重要。传统提氦主要从含氦天然气中提取,但中国天然气田氦浓度普遍低于 0.1%(远低于美国 0.5%以上的富氦气田),导致提氦成本高昂。近年来,四川、塔里木盆地等地通过改进工艺(如深冷分离+膜分离耦合技术)实现了低浓度氦气提取。2021 年,中国石化在重庆建成首套页岩气提氦装置,年产能达 20t,成为重要突破。永川地区页岩气伴生氦气具有氦气丰度较低,资源量较大的特征,若要在该区实现氦气的效益开发,应围绕贫氦-含氦天然气的提氦技术,积极创新开发新型吸附材料与膜技术,提升低浓度氦提取效率,推动页岩气等非常规气源的氦综合利用,为我国的氦气工业发展作出相应的贡献。

#### 5 结论

① 永川地区发育五峰组—龙马溪组页岩,具有“三滑脱层、坡坪式断层”的剖面结构特征,断裂对目的层未起到明显破坏作用。另外,永川地区属于高压气藏,页岩气及伴生氦气保存条件良好。

② 永川地区页岩中有机质含量(平均 2.6%)较高, $R_o$  为 2.09%~2.35%,黏土含量平均值为 42.65%,页岩中铀、钍元素的平均含量较高,具有高伽马值(>160API)、高放射性的特征,是一种良好的壳源氦源岩,生氦能力巨大。

③ 研究区五峰组—龙马溪组页岩型氦气分布均匀,总量大。大部分井位氦气含量在 0.02%~0.05%之间,平均值为 0.036%。

④ 永川地区良好的保存条件有利于氦气的富集,且氦气正处于富集阶段,页岩气幕式排烃后,氦气仍在不断衰变生成,经过估算氦气资源量约为  $7.91 \times 10^6 \text{m}^3$ ,具有氦气丰度相对较低,资源量较大的特征。

#### 参考文献:

- [1] 黄元,黄泽平,张全震,等.寻找氦资源的新思路及初步实践[J].科学通报,2021,66(33):4212-4217.
- [2] 朱洪法,朱玉霞.无机化工产品手册[M].北京:金盾出版社,2008:88-89.
- [3] 李玉宏,张文,王利,等.壳源氦气成藏问题及成藏模式[J].

- 西安科技大学学报, 2017, 37(4): 565-572.
- [4] 张亮亮, 孙庆国, 刘岩云, 等. 氦气全球市场及我国氦气安全保障的建议[J]. 低温与特气, 2014, 32(3): 1-5.
- [5] 陶小晚, 李建忠, 赵力彬, 等. 我国氦气资源现状及首个特大型富氦储量的发现: 和田河气田[J]. 地球科学, 2019, 44(3): 1024-1041.
- [6] 陈新军. 典型富氦区资源特征及开发利用前景分析——以中国石化油气矿业权区为例[J]. 中国国土资源经济, 2021, 34(4): 84-88.
- [7] 李玉宏, 王行运, 韩伟. 渭河盆地氦气资源远景调查进展与成果[J]. 中国地质调查, 2015, 2(6): 1-6.
- [8] 张云鹏, 李玉宏, 卢进才, 等. 柴达木盆地北缘富氦天然气的发现——兼议成藏地质条件[J]. 地质通报, 2016, 35(2/3): 364-371.
- [9] 冯子辉, 霍秋立, 王雪. 松辽盆地北部氦气成藏特征研究[J]. 天然气工业, 2001, 21(5): 27-30.
- [10] 陈新军, 丁一, 易晶晶, 等. 氦气资源的分类、特征及富集主控因素分析[J]. 石油实验地质, 2023, 45(1): 41-48.
- [11] 秦胜飞, 李济远, 梁传国, 等. 中国中西部富氦气藏氦气富集机理——古老地层水脱氦富集[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(8): 1203-1217.
- [12] 陈悦, 陶士振, 杨怡青. 中国氦气地球化学特征、聚集规律与前景展望[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(1): 145-167.
- [13] 郭旭升, 李宇平, 腾格尔, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组深水陆棚相页岩生储机理探讨[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(1): 193-201.
- [14] 冯动军, 胡宗全, 高波, 等. 川东南地区五峰组—龙马溪组页岩气成藏条件分析[J]. 地质论评, 2016, 62(6): 1521-1532.
- [15] 葛勋, 郭彤楼, 黎茂稳, 等. 深层页岩储层“工程甜点”评价与优选——以川南永川、丁山地区为例[J]. 石油实验地质, 2023, 45(2): 210-221.
- [16] 郭卫星, 唐建明, 欧阳嘉穗, 等. 四川盆地南部构造变形特征及其与页岩气保存条件的关系[J]. 天然气工业, 2021, 41(5): 11-19.
- [17] 陶祖文, 李钦, 徐力群, 等. 四川盆地永川区块五峰组—龙马溪组深层页岩可压性评价[J]. 天然气技术与经济, 2020, 14(5): 7-12, 27.
- [18] 金文正, 万桂梅, 王俊鹏, 等. 四川盆地陆相碎屑岩油气圈闭分布特征及成因机制[J]. 地质学报, 2011, 85(10): 1672-1680.
- [19] 杨振周, 张增瑞, 陈炎武. 矿石中铀、钍、镭标准样品[J]. 放射性地质, 1982(4): 370-379.
- [20] VAN SCHMUS W R. Natural Radioactivity of the Crust and Mantle[M]//AHRENS T J. Global Earth Physics: A Handbook of Physical Constants. Washington DC, USA: American Geophysical Union, 1995: 283-291.
- [21] ARTEMIEVA I M, THYBO H, JAKOBSEN K, et al. Heat Production in Granitic Rocks: Global Analysis Based on a New Data Compilation GRANITE2017[J]. Earth-Science Reviews, 2017, 172: 1-26.
- [22] 戴金星, 裴锡古, 戚厚发. 中国天然气地质学: 卷一[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992.
- [23] 蒙炳坤, 周世新, 李靖, 等. 上扬子地区不同类型岩石生氢潜力评价及泥页岩氦气开采条件理论计算[J]. 矿物岩石, 2021, 41(4): 102-113.
- [24] 王晓锋, 赵栋, 张东东, 等. 有效氦源岩类型及氦气释放机理[J]. 天然气地球科学, 2025, 36(3): 381-389.
- [25] JIN Zhijun, NIE Haikuan, LIU Quanyou, et al. Source and Seal Coupling Mechanism for Shale Gas Enrichment in Upper Ordovician Wufeng Formation-Lower Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin and Its Periphery[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 97: 78-93.
- [26] 刘树根, 邓宾, 钟勇, 等. 四川盆地及周缘下古生界页岩气深埋藏-强改造独特地质作用[J]. 地学前缘, 2016, 23(1): 11-28.
- [27] 詹国卫, 杨建, 赵勇, 等. 川南深层页岩气开发实践与面临的挑战[J]. 石油实验地质, 2023, 45(6): 1067-1077.
- [28] 胡东风, 张汉荣, 倪楷, 等. 四川盆地东南缘海相页岩气保存条件及其主控因素[J]. 天然气工业, 2014, 34(6): 17-23.
- [29] 郭彤楼, 何希鹏, 曾萍, 等. 复杂构造区页岩气藏地质特征与效益开发建议——以四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组为例[J]. 石油学报, 2020, 41(12): 1490-1500.
- [30] 聂海宽, 张金川, 金之钧, 等. 论海相页岩气富集机理——以四川盆地五峰组—龙马溪组为例[J]. 地质学报, 2024, 98(3): 975-991.
- [31] 陈新军, 陈刚, 边瑞康, 等. 四川盆地涪陵页岩气田氦气资源潜力与成因机理[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(3): 469-476.
- [32] BALLENTINE C J, BUMARD P G. Production, Release and Transport of Noble Gases in the Continental Crust[J]. Reviews in Mineralogy & Geochemistry, 2002, 47(1): 481-538.
- [33] 曾敏. 重庆温泉分布与成因研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
- [34] 秦胜飞, 窦立荣, 陶刚, 等. 氦气富集理论及富氦资源勘探思路[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(5): 1160-1174.
- [35] WANG Xiaofeng, LIU Wenhui, LI Xiaobin, et al. Application of Noble Gas Geochemistry to the Quantitative Study of the Accumulation and Expulsion of Lower Paleozoic Shale Gas in Southern China[J]. Applied Geochemistry, 2022, 146: 105446.

(编辑 谢守国)

## Analysis of Main Controlling Factors and Resource Potential of Shale Helium Enrichment in Yongchuan Area, Sichuan Basin

Zhang Zhiping<sup>1</sup>, Tong Xiaochang<sup>2,3</sup>, Yang Huan<sup>2</sup>, Liu Zhonghua<sup>2</sup>,  
Xiang Tao<sup>2</sup>, Man Xiangjie<sup>2,3</sup>, Xiang Jinqin<sup>2</sup>

(1.Southwest Measurement and Control Company, Sinopec Jingwei Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610000;

2.Chongqing Institute of Green and Low-Carbon Energy Science and Technology, Chongqing 402160;

3.Chongqing Fanjia Geological Exploration Co., Ltd., Chongqing 402167)

**[Abstract]** Helium, as a rare strategic resource, is closely related to national security and the development of high-tech industries. At present, China has a huge demand gap for helium resources and is highly dependent on foreign sources. It is urgently necessary to strengthen the exploration and research of helium resources. The Wufeng and Longmaxi shales developed in the Yongchuan area have a profile structure characterized by "three slip layers and sloping-type faults". The faults have not significantly damaged the target layers, and the preservation conditions for shale gas and associated helium gas are good. The organic matter content (average value of 2.6%) in the shale of the study area is relatively high, with Ro of 2.09% to 2.35%. The average clay content is 42.65%. The uranium and thorium elements in the shale are relatively high, exhibiting a high gamma value (>160API) and high radioactivity. It is a good shell-source helium rock with a huge helium production capacity. The shale-type helium gas in the Wufeng Formation-Longmaxi Formation of the study area is evenly distributed. The helium gas content in most wells is 0.03% to 0.05%. The good preservation conditions are conducive to the enrichment of helium, and the helium is currently in the enrichment stage. After the shale gas episode-type hydrocarbon expulsion, helium is still continuously decayed and generated. It is estimated that the helium resources are approximately  $7.91 \times 10^6 \text{m}^3$ . It has the characteristics of low helium abundance and large resources. To achieve the efficient development of helium in this area, it is suggested that efforts should be made to actively innovate and develop new adsorption materials and membrane technologies around the helium extraction technology of helium-poor to helium-containing natural gas, improve the extraction efficiency of low-concentration helium, and promote the comprehensive utilization of helium from shale gas and other unconventional gas sources.

**[Keywords]** Yongchuan shale gas; helium; enrichment factors; resource potential; unconventional gas source

### · 能源链接 ·

#### 煤电与新能源协同共进

在能源结构调整的大背景下,煤电与新能源协同配合正变得越来越密切,这种协同关系是能源行业发展的必然趋势,也是保障能源稳定供应和推动能源转型的关键所在。新能源如风电、太阳能发电具有间歇性、波动性、随机性的特征。而煤电则具有稳定性强、可控性好的优势,能够根据电力需求的变化及时调整发电量。当新能源发电不稳定时,煤电可以迅速补充电力缺口,确保电力供应的稳定。中国电力企业联合会预计,2025年我国电力消费需求将保持平稳较快增长态势,同比增加600TW·h。预计2025年煤炭发电量增量在100TW·h左右。这表明在未来的电力供应中,煤电和新能源都将发挥重要作用。煤电在其中扮演着调峰和基本保障的关键角色,能够有效应对新能源的波动变化。这种协同配合不仅能够提高能源利用效率,还能降低能源供应的风险。(供稿 舟丹)