

文章编号: 1006-6616 (2012) 02-0195-08

渭河盆地水溶氦气资源评价

张福礼, 孙启邦, 王行运, 邹彦荣

(中国石化集团华北石油局三普石油工程公司, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 通过对渭河盆地水溶氦气资源的评价, 认为渭河盆地水溶氦气资源分布广泛、品位高, 水溶气成因类型具有异岩多源混合的特点。水溶氦气主要来自于壳源气, 富铀花岗岩是其主要的源岩; 盆地中深层地热水水溶氦气有4种成藏模式, 即深大断裂带对流型水溶氦气成藏、断块对流-传导复合型水溶氦气成藏、断阶传导型水溶氦气成藏、凹陷传导型水溶氦气成藏; 采用含氦水溶气算法和铀放射性衰变算法求得盆地水溶氦气资源量为 $984.20 \times 10^8 \sim 1141.31 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

关键词: 渭河盆地; 水溶气; 水溶氦气; 发现和评价; 发展前景

中图分类号: TE132.2

文献标识码: A

0 前言

氦 (He) 在化学元素周期表上被列为零族元素, 是一种稀有惰性气体, 有“黄金气体”之称, 可见其之贵重。

1868年8月18日, 法国天文学家彼埃尔·让桑 (Pierre Janssen) 在印度南部观测日全食时, 意外发现太阳光谱里面有一条陌生的明亮黄线, 英国天文学家约瑟夫·洛基尔 (Joseph Lockyer) 也独立地发现了这条黄线, 并把这种元素命名为“氦”, 它的英语为 helium (来自希腊语“太阳”) 一词首音节的音译。1895年英国化学家威廉·拉姆塞 (William Ramsay) 从一种含铀矿物中分离到氦的时候, 让人们认识到地球上也有氦的分布。

氦是无色、无味、无毒的气体, 化学性质极不活泼, 不能燃烧, 也不助燃, 几乎不与任何物质发生化学反应。由于氦具有诸多独特性质, 它在工业、国防及许多尖端科学领域有很重要的用途:

①用作提升气。氦气相对密度较空气小, 为氢气浮力的93%, 氦又是惰性气体, 因此是比氢气更为可靠的提升气, 用于充填气球和飞艇。

②合成呼吸气。由于氦在血液和细胞组织中的溶解度很小, 用氦与氧混合的呼吸气, 代替空气供深水潜水员呼吸用, 可以减少病理学上称作“潜水病”的危险。氦气渗透性很强, 可以较快地渗透肺部, 用于治疗哮喘、肺气肿等呼吸道疾病。

③航天发射中用作压送和吸扫气。氦气具化学惰性, 沸点低, 在航天发射中用作燃烧系统吹扫气和各种燃料及氧化剂如液氢、液氧等压送, 还用于火箭助推器和宇宙飞船上气动机加压。

④焊接和其它用保护气。广泛用于不锈钢、铜、镁、锆、钛等易氧化金属或合金的焊

收稿日期: 2011-12-01

作者简介: 张福礼 (1939-), 男, 汉族, 教授级高级工程师, 长期致力于地质力学找油实践, 近年主要从事渭河盆地地热流体资源研究。

接。氦气还可用作半导体、光导纤维等生产过程的保护气。

⑤传热介质。由于氦不与原子反应堆的燃料和其它物质起化学反应,故氦气可用作原子反应堆冷却和热交换的传热介质。

⑥光学仪器填充气。由于氦气的性质与理想气体接近,折射率又小,因此用作光学仪器的填充气,使光学仪器获得很高灵敏度。

⑦低温—超低温和超导技术材料。还可用作气相色谱载气,用于真空设备检漏等。

由于空气中氦含量极低,从空气中分离氦成本太高,世界市场上消费的氦气主要来自含氦天然气。目前世界上仅有少数几个国家存在具经济价值的氦资源,氦资源最丰富的国家为美国,其次是阿尔及利亚、俄罗斯、加拿大等国。氦气已成为各个国家的重要战略资源,在国内经济和国防建设中发挥越来越重要的作用。

1 渭河盆地水溶氦气资源的发现

渭河盆地是指陕西省中部秦岭以北、北山以南的狭长平坦地带,地理坐标东经 $107^{\circ}10'$ — $110^{\circ}20'$,北纬 $34^{\circ}10'$ — $35^{\circ}10'$ 。西端为宝鸡峡谷地带,东以潼关与汾河盆地为界,略作东西向延伸,长约300 km,西部局促,东部渐行开阔,宽约35~70 km,面积约20000 km²。渭河自西而东贯穿盆地之中部,形成了现今的“关中”冲积平原,古有“八百里秦川”之称。

在构造成因上,渭河盆地是喜马拉雅期构造运动裂隙、伸展发展而来的新生代断陷盆地,具有凹陷深、地层新、形成晚的特点。沉积盖层在南部最厚,约7000 m,为南深北浅、南陡北缓的不对称箕状断陷(见图1)。

1961—1965年和1971—1975年,中国石化集团华北石油局第三普查勘探大队(原地矿部第三石油普查勘探大队,简称三普,下同)曾先后两上渭河盆地开展石油天然气普查,在区域综合物探、油气综合地质研究基础上,打出油气普查井32口,其中发现气测异常井15口。1974年在周至的渭深13井气测中,发现8个组段气测异常,其中深部新近系上新统蓝田—灞河组底部和中新统高陵群顶部异常层段,试气测得少量天然气流,天然气甲烷含量20.8%~22.1%,重烃含量0.09%~0.18%,氮气含量50%~76%,氦气含量2.13%~4.14%。氦气含量超过天然气氦气工业指标(0.1%),已经达到富氦(0.7%)标准,这是在盆地首次发现稀有气体氦气。限于当时工作的局限性和后来石油普查区域的转移,这一发现未能引起更多的重视。

1986年,三普三上渭河盆地,开展地热新能源开发。2004年年初,笔者在分析西安四军大地热井地热水污染问题时,在提取的地热水水溶气分析样品中发现氦气含量高达1.005%,联想到渭深13井的富氦天然气,笔者意识到渭河盆地可能形成分布广泛、储存规模很大的水溶性富氦资源。之后在西安和咸阳等多口地热井中提取地热水溶气样品,实测氦气含量均高于其工业标准,达到0.214%~1.740%。从2004年至2010年,连续立项开展了对渭河盆地新型水溶氦资源的评价和综合利用的攻关研究,取得了系统、完整的研究成果,其中《渭河盆地水溶含氦天然气的资源评价及综合利用》项目获得了中国石化集团科技进步三等奖。取得的主要成果有:

①通过深化渭河盆地形成大型地热盆地、大型水溶氦气盆地的基础地质、区域地质、地热地质特征研究,明确了盆地地下热水和水溶氦气赋存的优越地质条件。

②依据地热井实测数据及铀放射性衰变生氦机理,进行了两种方法氦气资源量定量计算。

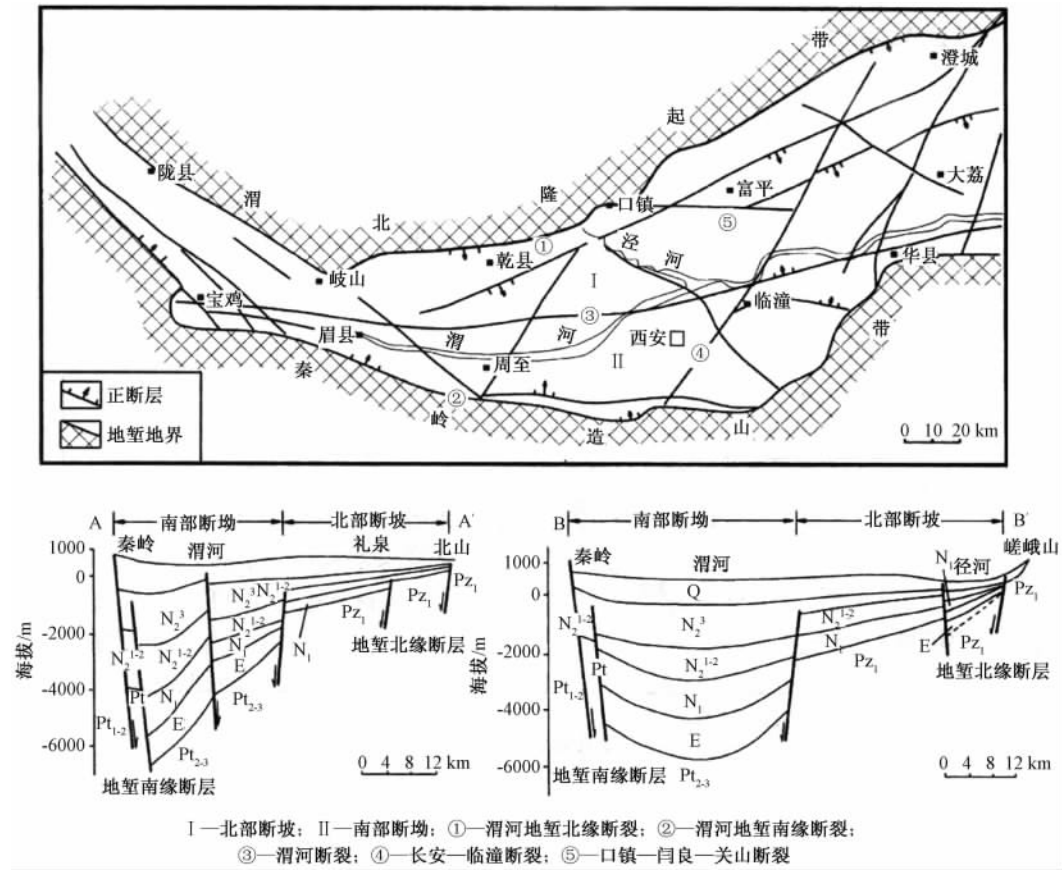


图 1 渭河盆地构造-地质略图

Fig. 1 Schematic structural-geological map of Weihe Basin

③依据盆地流体循环特点，建立了渭河盆地流体系统和水溶氦气成藏模式、类型。

④完成了盆地水溶氦气成藏区和深部热流溶氦成藏远景区划分，优选出了重点勘探开发区块和靶区。

⑤完成了地热井井口含氦水溶气的气水分离和提浓技术方法实验，为盆地氦气资源的评价提供了直接实物证据。

综上所述，渭河盆地新型水溶氦气资源的系统评价和水溶氦气提取技术方法的进展和突破，为我国开辟水溶氦气新领域及氦气资源的开发利用提供了地质依据、勘探方向和工艺技术保证，其应用前景十分广阔。

2 渭河盆地水溶氦气资源评价

2.1 含氦水溶气特征

2.1.1 水溶氦气含量及分布特征

盆地内 58 口地热井井口水溶气样品测试结果（见表 1）表明，井井含气、井井有氦。地下热水实际是溶解大量含氦天然气的特殊溶液。地下热水受盆地性质、深部构造、深大断裂、活动性构造和断裂、热源、水源、热储及成藏类型、资源规模等诸多条件的综合控

制。含氦水溶气除受上述因素影响外,还受到压力、温度、水溶剂矿化度、天然气成分的控制。

表1 渭河盆地地热井水溶气中氦气含量统计

Table 1 Water soluble Helium content statistics in geothermic wells in Weihe Basin

地区	采样井数/口	氦气最低含量/%	氦气最高含量/%	氦气平均含量/%
西安	14	0.524	3.416	1.783
咸阳	39	0.191	4.140	1.077
宝鸡	2	0.528	0.968	0.748
渭南	3	0.115	3.511	2.211

检测结果表明,所检样品氦气含量均超过0.1%的氦气工业标准,其中达到富氦标准(0.7%)的样品占总检测井次的68%,反映出盆地富氦程度相当高。

2.1.2 含氦水溶气气体组成

盆地含氦水溶气样品中检测出的烃类气体有甲烷、乙烷、丙烷、异丁烷、正丁烷、异戊烷、正戊烷共7种组分,其中甲烷含量0.072%~82.860%,平均10.860%;乙烷含量0~3.422%,平均0.190%;丙烷以后至戊烷含量更低,多在0.001%~0.010%之间。

C_2/C_3 比值从1.0到87.0,高低相差悬殊,以低比值为主,说明有机质成熟度高、低并存,以高成熟度为主。

iC_4/nC_4 比值0.44~1.93,比值较低,也反映有机质成熟度高的特点。

检测出非烃类气体 H_2 、 N_2 和 CO_2 ,在氦气提浓过程中检测出痕量 H_2S 。其中 H_2 含量0~1.895%,平均0.224%; N_2 含量4.593%~98.900%,平均78.300%; CO_2 含量0~44.62%,其中有4口地热井 CO_2 含量高达70%以上。

检测氦气含量最小为0.115%,最大4.140%(见表1),平均1.295%。

2.1.3 水溶氦气主要来源

氦同位素($^3He/^4He$)测定结果显示盆地水溶氦气同位素值在 $(9.02 \pm 0.39) \times 10^{-8}$ ~ $(3.23 \pm 0.74) \times 10^{-7}$ 之间。

14口地热井水溶氦气中幔源百分含量0.11%~6.92%,壳源百分含量为99.89%~93.08%,表明盆地内水溶氦气主要为壳源气,只有在深大断裂带附近有少量的幔源氦气混入。

2.2 地热井含氦水溶气动态监测和组分分析数据处理

2.2.1 地热井含氦水溶气动态监测

为了全面了解掌握地热井井口水溶气和氦气含量的稳定性与变化规律,笔者在盆地内选择了2口地热井(XSP1、XSP2)进行了连续5年的动态监测,监测数据表明,水溶气和氦气稳定存在;水溶气含量与出水量成正比,与井口压力成反比;水溶氦气的含量非常稳定,几年来基本无大变化,分别为2.1%和2.2%。

2.2.2 地热井含氦水溶气气体组分分析数据处理

对盆地有代表性的58口地热井样品的气体组分分析数据进行了电算处理。 R 型聚类结果显示,变量(指标)明显分为3类(组),第一类为 C_1-C_5 烃类,第二类为 He 、 H_2 、 CO_2 ,第三类为 N_2 ,显示组分指标成因上的关联,烃类以有机烃源为主, He 、 H_2 、 CO_2 以深成无机成因为主, N_2 为两者的混合成因。

Q 型聚类结果显示了平面上水溶氦气富集程度的差别,其中富集程度高的有利远景区均处于活动性深大断裂带附近的构造大斜坡、河流相和河湖相砂体发育的大沉积相带中。

2.3 盆地含氦水溶气成藏特征

2.3.1 盆地深部壳源氦气生成的特殊性

首先, 燕山期富铀花岗岩是盆地壳源氦气生成的主力源岩。盆地周缘及深部除燕山期富铀花岗岩外, 还有中元古代武陵期、新元古代扬子期、加里东期、海西期、印支期等多期花岗岩体, 因铀含量过低, 或因所处年代过于久远, 大大超过了铀的半衰期 (^{235}U 的半衰期为 $7.5 \times 10^8 \text{ a}$), 只有燕山期花岗岩年龄 ($1.2 \times 10^8 \text{ a}$) 与 ^{235}U 半衰期相当, 成为盆地壳源氦的主力源岩。

其次, 壳源氦的生成过程具有长期性、连续性和稳定性。放射性的衰变过程随时间呈指数变化, 其他任何外界作用 (温度、压力、电场、磁场等) 都不影响放射性衰变速度。衰变速度唯一取决于放射性本身的性质, 其衰变规律为:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (1)$$

上式中 N_0 、 N 分别表示放射性元素在时间为 0 和 t 时的原子数, λ 为衰变常数。衰变常数指单位时间内铀发生变化的原子数在原子总数中所占比例。燕山期花岗岩形成的 $1.2 \times 10^8 \text{ a}$ 年以来, 按照上述指数法则, 衰变量随时间呈几何级数逐年减少, 铀的衰变常数为 9.8458×10^{-10} , 这个过程是长期的 ($7.5 \times 10^8 \text{ a}$ 才衰变一半)、持续的和稳定的。这与传统的油气烃类进入成油门限和成油高峰期后在短期内大量生成油气的状况截然不同, 使壳源氦形成了特有的生成、运移、储集规律。

第三, 富铀花岗岩中放射性铀衰变生成的氦气具有显著的分散性和稀有性。世界上含铀花岗岩平均含铀 3.5×10^{-6} , 渭河地区燕山期花岗岩中铀含量平均高达 5.9×10^{-6} , 仁宗庙花岗岩中铀含量更高达 22.1×10^{-6} 。由于其绝对值仍是百万分之几, 故此年生氦气总量并不多, 且生成的壳源氦气具有分散性和稀有性的特点, 致使氦气不能独立成藏, 而是通过溶解在深部壳源热流体并经过运移混合于上部盆地热水流体中, 在有利的条件下提高其溶解浓度, 达到氦气的富集和成藏。

2.3.2 盆地深部壳源氦气运移的特殊性

形成燕山期富铀花岗岩的中生代岩浆活动, 属于盆地南部秦岭造山带向北部逆冲推覆的构造热事件的组成部分。一方面大的逆冲推覆带下的滑脱面发育破碎带, 成为储集深部热流溶幔源氦气的有利空间; 同时深部壳源物质上隆, 使部分深埋在地下 25 km 的富铀花岗岩体被带入到地下 7~10 km 的中深部, 为后期盆地水溶氦气的运移聚集创造了便利条件。

活动性的深大断裂深切深部富铀花岗岩源岩, 沟通深部壳源热流溶氦气, 成为富集导热流与导热流溶氦气、传输能量和物质的重要通道。

盆地深部能量和物质向上部传输, 并不是处处上涌、处处排气, 渭河盆地的相对沉降和周缘活动性深大断裂的发育, 导致了深部物质上隆、深部热流体上涌和沿深大断裂热流溶 (或水溶) 对流等形式的运移机制。

2.3.3 盆地含氦水溶气是异岩多源混合气

按照天然气成因类型指标划分, 盆地含氦水溶气具有 5 个混合的特点, 即幔源无机气与壳源有机气混合、无机气与有机气混合、有机但不同母质类型 (煤型、油型) 气混合、不同成熟度 (未成熟、成熟、过成熟) 天然气混合、不同运移机制 (扩散、混相涌流、水溶对流) 的混合。

2.4 盆地中深层地热水水溶氦气成藏类型

渭河盆地的氦气是溶解于地下热水并富集成藏的水溶氦气新类型, 其成藏特点显然与地

下热水成藏类型相关联,依据盆地内地下热水成藏类型的划分,可以确定盆地水溶氦气有4种成藏类型,即深大断裂带对流型水溶氦气成藏类型、断块对流-传导复合型水溶氦气成藏类型、断阶传导型水溶氦气成藏类型、凹陷传导型水溶氦气成藏类型。

上述4种成藏类型,宏观控制了全盆地深层水溶氦气的分布和富集成藏。深大断裂带对流型水溶氦气藏主要分布在盆地边缘深大断裂带,富集带是狭窄条带状,沿断裂带富水、富氦,温度、压力异常变化大。断块对流-传导复合型水溶氦气藏主要分布在盆地的南部陡斜坡带,由二、三级不同方向断裂交叉形成断块网络系统,连通相邻深大断裂,利于水溶氦气的传输和聚集,网络的结点和网眼中的传导型热储,常为富集创造良好条件。此类成藏类型局部水动力条件变化大,水溶气成藏的分割性较强,开放条件较复杂。断阶传导型水溶氦气藏主要分布在盆地的北部缓坡带,几条横贯的深大断裂分割形成3个断阶带,热储层连片性强,水动力环境统一,与邻近深大断裂沟通的连片热储层,往往形成垂向上迭加错列、平面上复合连片的整装性成藏类型,成藏规模大,单井产量较大且稳定性好,是开发风险较小的成藏类型;凹陷传导型水溶氦气藏分布在盆地的中心部位,因为处于现代盆地水动力循环系统中的滞流区,远离沟通深源热流和氦源的深大断裂,其水溶氦气聚集成藏的条件较差,是一种潜在的成藏类型。

2.5 盆地水溶氦气资源量计算

采用2种方法对盆地水溶氦气资源量进行了计算。第一种为含氦水溶气计算法,计算步骤:①地下热水资源定量评价(采用热储法、类比法、静储量法、动态分析法等);②水溶气资源定量评价(采用类比法,借鉴松辽、下辽河、柴达木等油田模拟实验及井下水溶气实测数据,选定2500 m深度水溶气与地热水的比例为1:5);③水溶氦气资源定量评价(氦气在水溶气中含量的实测值)。以此法求取西安凹陷(1620 km²)内水溶氦气的资源量为 $176.82 \times 10^8 \sim 353.53 \times 10^8 \text{ m}^3$,渭河盆地(10000 km²)水溶氦气资源量为 $841.75 \times 10^8 \sim 1126.65 \times 10^8 \text{ m}^3$,平均 $984.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

第二种为铀放射性衰变计算法,首先确定出盆地周缘及盆内深埋的10个主要富铀花岗岩体的形成地质年代、分布面积、厚度、密度及同位素含量,根据绝对地质年代学公式($T = \frac{1}{\lambda} \ln(1 + \frac{D}{N})$, λ 为衰变常数, N 为剩余铀同位素含量, D 为已衰变同位素含量),计算出已衰变的铀的资源量;再利用²³⁵U的衰变公式(${}_{92}^{235}\text{U} \rightarrow {}_{82}^{235}\text{Pb} + 7{}^4\text{He}$),计算出铀衰变生成氦气的资源量,求得盆内氦气资源总量为 $1141.31 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

3 氦气资源的开发现状及发展前景

据2000年公布数据,全世界探明氦气储量约 $250 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中美国为 $140 \times 10^8 \text{ m}^3$,其次为俄罗斯、阿尔及利亚、加拿大等少数国家,美国占52%,阿尔及利亚占25%,俄罗斯占18%,加拿大占3%,其他国家占2%,年产已超过 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

到目前为止,我国获得探明储量的天然气田中含氦达到有回收经济价值的极少,只有四川威远气田局部地层的天然气中氦含量为0.18%~0.20%,生产氦能力为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,但该气田开采已超过30 a。目前我国需要的氦产品,主要从国际市场美国等西方国家购买,处于贫氦的被动地位。

根据有关专家预测,到2030年前,氦气的世界年产量将从 $1.57 \times 10^8 \text{ m}^3$ 下降到 $1.34 \times$

10^8 m^3 , 其主要原因是主产国美国原有产氦的部分气田进入气田开发衰竭期, 其氦气年产量将从 $7.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 下降到 $4.4 \times 10^8 \text{ m}^3$; 而氦气需求将从 $1.54 \times 10^8 \text{ m}^3$ 提高到 $3.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。以目前的氦气开采速度和 2030 年预计需求数量来看, 氦气短缺每年达到 $1.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

大量的氦气短缺, 迫使氦气资源开发要开辟新的思路。一方面要加快发现新的含氦天然气田, 以补充和扩大原有含氦天然气田开发氦气的规模, 据报道俄罗斯西伯利亚地区亦有新发现; 另一方面, 要开拓新的氦气成藏类型或从贫氦天然气资源中提取氦。

这次在中国渭河盆地发现和评价的水溶氦气成藏新类型和新领域, 适应了世界氦气资源开发需求的大趋势, 具备较大规模开发的潜力, 有望挑起加快中国氦气资源开发和改变中国贫氦资源面貌的重任。随着盆地氦气富集规律和盆地整体评价的进一步深入, 地热和氦气等资源开发项目的逐步实施, 渭河盆地将成为中国集热、矿、水于一体的地热综合性资源开发利用的重要基地。

参 考 文 献

- [1] 张福礼, 黄舜兴. 鄂尔多斯盆地天然气地质 [M]. 北京: 地质出版社, 1994.
ZHANG Fu-li, HUANG Shun-xing. Natural gas geology in Erdos Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.
- [2] 张福礼, 孙启邦. 渭河盆地含氦天然气资源前景评价 [M]. 北京: 地质出版社, 2006.
ZHANG Fu-li, SUN Qi-bang. Potential evaluation of natural gas containing Helium in Weihe Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006.
- [3] 张义纲. 天然气的生成聚集和保存 [M]. 南京: 河海大学出版社, 1991.
ZHANG Yi-gang. The generation, accumulation and preservation of natural gas [M]. Nanjing: Hehai University Press, 1991.
- [4] 姚志温. 汾渭盆地含氦天然气成因探讨 [C] //石油地质论文集 [C]. 北京: 地质出版社, 1982.
YAO Zhi-wen. Discussion on the genesis of natural gas containing Helium in Fenwei Basin [C] //Petroleum geology symposium. Beijing: Geological Publishing House, 1982.
- [5] 易明初. 新构造运动及渭延裂谷构造 [M]. 北京: 地震出版社, 1993.
YI Ming-chu. Neo-tectonic movement and Weiyan rift structure [M]. Beijing: Seismological Press, 1993.
- [6] 武晓春, 庞雄奇, 于兴河, 等. 水溶气资源富集的主控因素及其评价方法探讨 [J]. 天然气地球科学, 2003, 14 (5): 416~421.
WU Xiao-chun, PANG Xiong-qi, YU Xing-he, et al. Discussion on main control factors and evaluation methods in the concentration of water soluble gas [J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14 (5): 416~421.
- [7] 徐永昌, 沈平, 陶明信, 等. 中国含油气盆地天然气中氦同位素分布 [J]. 科学通报, 1994, 39 (16): 1505~1508.
XU Yong-chang, SHEN Ping, TAO Ming-xin, et al. Helium isotope distribution in natural gas in the oil and gas bearing basins in China [J]. Chinese Science Bulletin, 1994, 39 (16): 1505~1508.
- [8] 于崇文. 数字地质方法与应用 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1980.
YU Chong-wen. Digital geological methods and applications [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1980.
- [9] 严阵. 陕西省花岗岩 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1985.
YAN Zhen. Granite in Shaanxi Province [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1985.

EVALUATION OF WATER SOLUBLE HELIUM RESOURCES IN WEIHE BASIN

ZHANG Fu-li, SUN Qi-bang, WANG Xing-yun, ZOU Yan-rong

(Sanpu Petroleum Engineering Company, Sinopec North China Petroleum Bureau, Xianyang 712000, China)

Abstract: The discovery of water soluble helium in Weihe Basin was introduced in this paper. Researches showed that the water soluble helium resources in Weihe Basin the resources are widely distributed and highly graded in Weihe Basin. The cause types of water-soluble gas are of different rock multi-source mixed characteristics, and the water soluble helium gas mainly comes from the shell source gas, with uranium rich granite being the main source rock; four reservoir models build in deep basin geothermal water soluble helium; two kinds of methods to obtain the basin water soluble helium resources with quantity of $(984.2 - 1141.31) \times 10^8 \text{m}^3$.

Key words: Weihe Basin; water soluble gas; water soluble helium; discovery and evaluation; development prospect