

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.381



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

陶小晚¹, 李建忠¹, 赵力彬², 李立武³, 朱文平², 邢蓝田³,
苏法卿¹, 单秀琴¹, 郑红菊¹, 张立平¹

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

2. 中国石油塔里木油田分公司, 新疆库尔勒 841000

3. 中国科学院地质与地球物理研究所兰州油气资源研究中心, 甘肃兰州 730000

摘要: 氦气是一种重要的战略稀有资源, 关系国家安全和高新技术产业发展, 但我国贫氦且绝大部分依赖进口, 资源安全形势十分严峻, 因此开展氦气资源调查非常迫切。通过全国七大含油气盆地及其他地区氦气资源及成因系统调研, 明确我国中西部含油气盆地天然气中氦气基本为壳源放射成因, 其富集受富含 U、Th 的酸性岩或基底的分布、背斜圈闭及断裂共同控制。东部郯庐断裂带两侧含油气盆地中氦气为壳源和幔源混合成因, 其富集受断裂控制明显。地热或温泉的水溶气中, 含量较高的氦气主要为壳源。优选了氦气显示良好、但存在不确定性的塔里木盆地和田河气田及周缘开展氦气资源系统勘查。通过对和田河气田及周缘 11 口井天然气样品精细取样、分析, 首次发现和和田河气田为富氦气田, 氦气体积含量为 0.30%~0.37% (平均 0.32%), 为壳源成因, 折算氦气探明储量 $1.959 \times 10^8 \text{ m}^3$, 是我国发现的首个特大型富氦氦气田。因此建议: (1) 加快建设和和田河气田氦气分离、液化装置, 实现气田开发整体效益最大化; (2) 尽快论证建设“塔里木盆地氦气战略储备基地”的可行性, 开展全国主要含油气盆地氦气资源系统调查; (3) 加强氦气成藏理论研究, 指导氦气资源勘探。

关键词: 氦气; 和田河气田; 威远气田; 安岳气田; 塔里木盆地; 四川盆地; 郯庐断裂带; 地球化学。

中图分类号: P593

文章编号: 1000-2383(2019)03-1024-18

收稿日期: 2018-12-03

Helium Resources and Discovery of First Supergiant Helium Reserve in China: Hetianhe Gas Field

Tao Xiaowan¹, Li Jianzhong¹, Zhao Libin², Li Liwu³, Zhu Wenping², Xing Lantian³,
Su Faqing¹, Shan Xiuqin¹, Zheng Hongju¹, Zhang Liping¹

1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China

2. Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla 841000, China

3. Lanzhou Center for Oil and Gas Resources, Institute of Geology and Geophysics,
Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract: Helium is a kind of important strategic scarce resources, which is related to national security and the development of high-tech industries. However, China is poor in helium and most of it depends on imports. The situation of resources security is very serious, so it is very important to carry out helium resources survey. Based on the investigation of helium resources in the seven major petroliferous basins and other areas in China, it can be concluded that the helium in natural gas in petroliferous ba-

基金项目: 国家重点研发计划“深地资源勘查开采”重点专项 (Nos. 2017YFC0603106, 2018YFC0603706).

作者简介: 陶小晚 (1981-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事油气地球化学研究. ORCID: 0000-0003-0017-6025.

E-mail: taoxiaowan@petrochina.com.cn

引用格式: 陶小晚, 李建忠, 赵力彬, 等, 2019. 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. 地球科学, 44(3): 1024-1041.

sins in central and western China is radioactive origin from crust. Its enrichment is controlled by the distribution of acid rock or basement rich in U and Th, structural traps and fracture. The helium in the petroliferous basins located on both sides of Tanlu fault zone in eastern China is originated from the mixing of mantle and crustal sources. Its enrichment is controlled obviously by fracture. The high content of helium in water-soluble gas in geothermal water or hot springs is mainly crustal source. In this study, the Hetianhe gas field and its peripheral areas in Tarim Basin with good helium display but uncertainties are selected for the systematic exploration of helium resources. Through fine sampling and analysis of the 11 natural gas samples from Hetianhe gas field and its peripheral areas, it is found for the first time that Hetianhe gas field is rich in helium, with helium volume content ranging from 0.30% to 0.37% (average 0.32%). As originated from crust, the proven reserve of helium gas is $1.9591 \times 10^8 \text{ m}^3$. So, Hetianhe gas field is the first supergiant helium-rich gas field discovered in China. Therefore, in this paper it is suggested that: (1) accelerating the construction of helium separation and liquefaction units in Hetianhe gas field to maximize the overall benefits; (2) demonstrating the feasibility of constructing "Tarim Basin helium strategic reserve base" as soon as possible, and carrying out systematic investigation of helium resources in petroliferous basins throughout the country; (3) strengthening the theoretical study of helium accumulation to guide helium resources exploration.

Key words: helium; Hetianhe gas field; Weiyuan gas field; Anyue gas field; Tarim Basin; Sichuan Basin; Tanlu fault zone; geochemistry.

0 引言

氦是宇宙中丰度第二高的元素,形成于3种核过程:(1)宇宙形成演化阶段,氢元素聚变反应生成的原始氦;(2) ^{238}U 、 ^{235}U 和 ^{232}Th 等放射性衰变及其诱发的核反应产生的放射性成因氦;(3)宇宙射线同物质相互作用,散裂反应产生的宇宙成因(散裂成因)氦。氦有 ^3He 和 ^4He 两种稳定同位素。地球上 ^3He 基本上是地球形成时捕获的太阳系的原始氦。地球形成后新生成的氦主要为 ^4He ,基本上是 ^{238}U 、 ^{235}U 和 ^{232}Th 经过 α 衰变产生的。由于地球圈层分异、地幔脱气和放射性衰变,导致不同圈层具有特征的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值,可用来很好的示踪氦气来源、地质作用和地球化学过程。大气来源氦 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值几乎是一常数,用 R_a 表示,为 $(1.39 \pm 0.01) \times 10^{-6}$ 。以大气氦 R_a 为标准,典型地壳来源的放射性成因氦 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值约为0.02 R_a ,代表上地幔端元值的大洋中脊玄武岩(MORB)的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值约为8.0 R_a ,代表下地幔的洋岛玄武岩(OIB) $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为10~50 R_a 。

氦气是一种无色、无味的稀有气体,具有不易液化、稳定性好、扩散性强、溶解度低等性质,是国防军工和高科技产业发展不可或缺的稀有战略性物资之一,在医疗、半导体、超导实验、光电子产品生产、金属制造、石化、制冷、管道检漏、深海潜水、高精度焊接等领域中发挥了不可替代的作用。

氦气制备方法主要有4种,分别为天然气分离法、合成氨法(在合成氨中,从尾气分离提纯的氦)、空气分馏法和铀矿石法。其中,天然气分离法是目前唯一工业化获取氦的方法。天然气中氦气有3种来

源,即大气源、壳源和幔源(上地幔为主),可根据其 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值予以区别。大气中氦体积含量很低,仅为 5.24×10^{-6} ,一般在天然气中的贡献可以忽略不计。根据天然气 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值,可用壳、幔(上地幔)二元复合模式来计算各自的贡献。

本文在全球氦气资源、储量分布与需求现状调研基础上,通过分析我国氦气勘探现状,优选塔里木盆地塔西南地区天然气为研究对象,重点分析了和田河气田及周缘氦气体积含量,发现和和田河气田为我国首个特大型富氦氦气田,这对于提高天然气勘探、开发整体效益、保障我国氦气资源战略安全均具有重要意义。

1 全球氦气资源、储量现状与需求

1.1 全球氦气资源量

全球氦气资源分布极不平均。据美国地质调查局(United States Geological Survey,简称USGS^①)2017年调查报告,全球氦气总资源量约 $51.9 \times 10^9 \text{ m}^3$,主要分布在美国、卡塔尔、阿尔及利亚、俄罗斯,资源量分别为 $20.6 \times 10^9 \text{ m}^3$ 、 $10.1 \times 10^9 \text{ m}^3$ 、 $8.2 \times 10^9 \text{ m}^3$ 、 $6.8 \times 10^9 \text{ m}^3$ (Hamak,2017),四国资源量总和占全球总量的88%。此外,加拿大和中国资源量分别为 $2.0 \times 10^9 \text{ m}^3$ 、 $1.1 \times 10^9 \text{ m}^3$ (Hamak,2017),波兰和澳大利亚也有一定资源量。

1.2 全球氦气储量

截至2017年,全球已探明的剩余氦气储量总量

^① <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/helium/>; 2019-01-04.

为 $7.4 \times 10^9 \text{ m}^3$, 其中美国 $3.9 \times 10^9 \text{ m}^3$ 、阿尔及利亚 $1.8 \times 10^9 \text{ m}^3$ 、俄罗斯 $1.7 \times 10^9 \text{ m}^3$ 、波兰 $0.025 \times 10^9 \text{ m}^3$ (据 USGS^①; 图 1)。目前还未发现有关卡塔尔和澳大利亚可靠的氦气探明地质储量数据。虽然卡塔尔氦气资源量为 $10 \times 10^9 \text{ m}^3$, 仅次于美国, 但氦气含量低, 仅为 0.04%, 一般情况下难以达到商业利用价值。卡塔尔是世界最大的液化天然气(LNG)生产国。在天然气液化过程中, 烷烃气被液化, 导致 LNG 尾气中氦气富集程度大幅增加, 从而达到氦气商业利用价值。据估算, 卡塔尔氦气储量约为全球氦气储量的 1/4。

整体而言, 世界探明剩余氦气储量表现为逐渐减少的趋势, 但也有一些大型氦气田陆续被发现。例如, 2016 年在坦桑尼亚的东非大裂谷发现的“世界级”氦气田, 据挪威 Helium One 公司, 按照美国石油工程师协会(SPE)储量标准, 其概算储量(probable reserves)可达 $2.8 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

1.3 全球氦气供应与需求

2008 年以前, 全球氦气供应整体处于增长状态, 从 1995 年的年产 $111 \times 10^6 \text{ m}^3$ 增长到 2008 年的年产 $175 \times 10^6 \text{ m}^3$ (据 USGS^①)。之后, 全球氦气产量震荡、缓慢减少(图 2)。2016 年 7 个主要氦气生产国氦气总产量为 $154 \times 10^6 \text{ m}^3$, 其中美国 $85 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、卡塔尔 $50 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、阿尔及利亚 $10 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、澳大利亚 $4.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、俄罗斯 $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、波兰 $2 \times 10^6 \text{ m}^3$ (据 USGS^①; 图 2)。

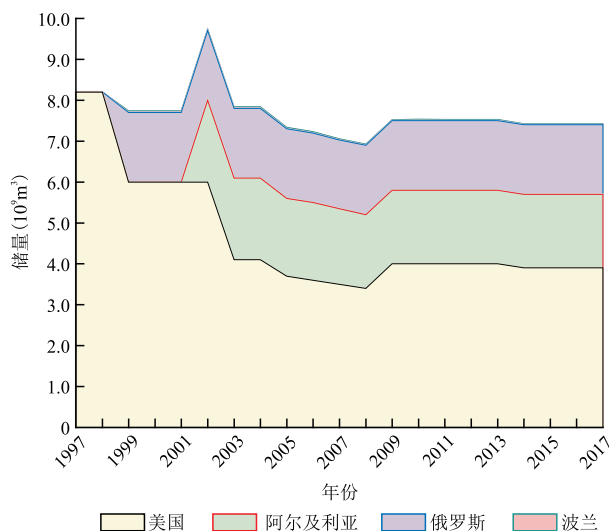


图 1 1997~2017 年全球各国剩余探明氦气储量分布

Fig. 1 Global distribution of remaining proven helium reserves in 1997–2017

据 USGS^①

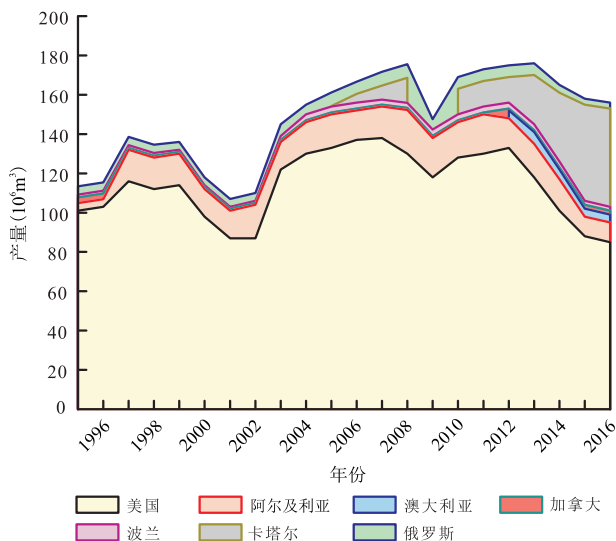


图 2 1995~2016 年全球各国氦气产量

Fig. 2 Global distribution of helium yields in 1995–2016
据 USGS^①

美国是世界上最大的氦气生产国和供应国。1996 年之前, 全球氦气产量中 90% 以上来自美国, 其氦气主要分布在 Cliffside 气田、Hugoton 气田、Panhandle 气田、Greenwood 气田、Keyes 气田和 Riley Ridge 气田。据美国内政部陆地资源管理局(BLM)氦气办公室的统计报告, 美国老区块氦气资源枯竭严重, 除了怀俄明州西南的 Riley Ridge 和横跨堪萨斯州西南—奥克拉荷马州—德克萨斯州的 Hugoton 两大富氦天然气田, 其他大部分富氦的天然气田在 2000 年后已进入气田开发的衰竭期(如西弗吉尼亚州的 Panoma 气田)(张亮亮等, 2014)。如今随着美国将氦气列为重要的战略资源加以保护, 美国限制了对新区块的开发。2012 年之后, 美国氦气的开采以每年约 10% 的速度下降。

2005 年以来, 卡塔尔氦气投产后产量迅速增加到 $50 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。加拿大从 2015 年开始生产氦气, 但年产量小于 $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。随着阿尔及利亚、特别是近年来卡塔尔氦气产量的迅速增加, 美国氦气产量占全球的比例从 20 世纪 90 年代的 $>90\%$ 降为 2016 年的 55%。卡塔尔、阿尔及利亚、澳大利亚、俄罗斯和波兰氦气产量占全球的比例分别为 32%、6.5%、2.6%、1.9% 和 1.3%。但 2013 年之后, 受美国氦气减产影响, 世界氦气供应整体保持逐渐减少的趋势(图 2)。

近 20 年来, 随着氦气应用范围的大幅增加, 特别是在医疗、工业和电子行业的广泛应用, 全球氦需求以每年 4%~6% 的速率增长(赵荟鑫等, 2012),

导致目前氦气供不应求,长期短缺。据估算,2016年全球氦的需求量大约为 $230 \times 10^6 \text{ m}^3$,但年产量仅有 $154 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。2017年全球已探明剩余氦气储量总量为 $7.43 \times 10^9 \text{ m}^3$,如果氦气产能每年增加5%,到2040年全球氦气储量将完全耗尽。

1.4 我国氦气供应与需求

1990年前,受氦气产能、价格及应用领域限制,我国氦气需求量非常小。20世纪70年代成都天然气化工总厂(成化厂)以威远气田为气源,在自贡建成国内唯一的一套天然气提氦装置。1989年前,氦气最高产量只有 $3 \times 10^4 \text{ m}^3$,供应全国(封万芳,1989)。由于资源枯竭(戴金星,2003)及成化厂制备精氦的成本高于国外精氦的销售价格(封万芳,1989),成化厂已于2004年关闭。

现今我国氦气基本依赖进口。据统计,2005年我国进口氦气 $2.00 \times 10^6 \text{ m}^3$,2012年进口的氦气总量达到 $5.00 \times 10^6 \text{ m}^3$ (张亮亮等,2014),2017年进口液氦总量3586.7 t,折算为 $20.086 \times 10^6 \text{ m}^3$,同比2016年增长13.3%^②。我国氦气供应基本依赖进口,主要来源于卡塔尔、美国和澳大利亚3个国家。2017年液氦批量进口均价为45.5美元/公斤^②,折氦气55.8元/ m^3 。2012年,投资1.143亿元的四川荣县天然气提氦装置投产成功,设计处理天然气规模 $40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{天}$ 。在气源充足情况下,按照威远气田氦气平均含量0.2%计算,每年可生产氦气 $29.2 \times 10^4 \text{ m}^3$,仅相当于2017年氦气进口量的1.45%。因此,我国氦气资源安全形势十分严峻。

2 我国氦气勘探现状

我国氦气资源稀缺,氦气勘探进展缓慢、勘探程度低,资源量和储量情况不明。目前已发现氦气主要集中在中—西部盆地和东部郯庐断裂带两侧含油气盆地。中—西部主要发现于四川盆地、塔里木盆地、鄂尔多斯盆地及南部渭河断陷、柴达木盆地;东部郯庐断裂带主要发现于苏北、渤海湾、海拉尔、松辽、三水等盆地。此外,部分地区地热井/温泉中也有一定氦气发现。四川盆地威远气田震旦系气藏发现于1964年,揭开了我国商业氦气勘探开采的篇章。20世纪80年代在我国东部郯庐大断裂及其附近的松辽盆地万金塔二氧化碳气田、苏北黄桥和广东三水等气田陆续发现了氦工业气田,但规模偏小。90年

代,发现了塔里木盆地塔北地区个别单井含氦量达0.23%~0.61%(邓树立,1995)。近年来在渭河盆地、松辽盆地北部、塔里木盆地西南部、柴达木盆地阿尔金山前东段及柴北缘、准噶尔盆地均有一定发现。

国内已开展的天然气中氦气相关研究,多侧重利用 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值判定天然气成因与来源,而对氦气含量关注不够。部分地区同一气藏、甚至同一口井氦气含量数值存在数量级差异,其原因主要有:(1)采样或分析时进样过程中空气污染,导致氦气含量偏低;(2)由于天然气样品中氦气含量一般较低,与烷烃气组分一起分析时,未采用合适的标样,导致氦气含量数值明显偏离真实值;(3)样品运输、保存过程中泄漏,导致氦气含量变低。因此,利用已发表的氦气含量数据时,需对其可靠性进行判断。整体而言,四川盆地寒武系—震旦系及基底天然气、渭河盆地水溶气及部分郯庐断裂带附近天然气中氦气含量数据相对可靠。

2.1 四川盆地

四川盆地是我国目前唯一开展商业利用氦气的地区。川西南威远气田震旦系探明天然气储量 $408.61 \times 10^8 \text{ m}^3$ (戴金星,2003),氦气含量为0.120%~0.342%(张子枢,1992;戴金星,2003;Ni *et al.*,2014;Wei *et al.*,2014),平均0.2%,折算氦气储量约 $0.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。威远气田基底及寒武系气藏氦气含量也较高,可达0.270%(张子枢,1992;戴金星,2003),二叠系部分样品氦气含量可大于0.1%(戴金星,2003),三叠系样品氦气含量均小于0.1%(表1)。

川中古隆起安岳气田寒武—震旦系天然气中氦气含量0.005%~0.102%,总体由震旦系灯二段、灯四段至寒武系龙王庙组逐渐降低。其中,震旦系灯二段氦气含量0.018%~0.102%,平均0.05%;灯四段氦气含量0.012%~0.029%;寒武系龙王庙组氦气含量0.005%~0.008%(Wei *et al.*,2014),基本不具备工业利用价值。

四川盆地震旦—寒武系及基底天然气样品氦气含量数据相对可靠,二叠系氦气含量大于0.1%的数据,需要进一步核实。整体而言,四川盆地地层越老,氦气含量相对越高。川南、川北、川东北、川西地区二叠系—侏罗系天然气样品氦气含量均小于0.1%(表1)。

四川盆地天然气样品 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为0.001~0.090 Ra,均为壳源成因。威远气田基底、震旦—寒武

②http://www.sohu.com/a/223489223_771369;2019-01-04.

表1 四川盆地天然气中氦气体积含量统计
Table 1 Statistics of helium volume contents in natural gases in Sichuan Basin

区带	油气田	层位	井名	井深(m)	He(%)	R/Ra	来源	
川中	高石梯-磨溪	Z ₂ dn ₂	HS1; GS1、2、3; MX8、10、11	-	0.018~0.102	0.026~0.090	魏国齐等, 2014	
		Z ₂ dn ₁	GS1、2、3、6; MX8、11 MX8、10、11; GS3	-	0.012~0.029 0.005~0.008	0.016~0.024		
	安岳	T	Yue106、118、101-1-H1、121、101-9-X1	-	0.019~0.039	0.011~0.015	Ni <i>et al.</i> , 2014	
				HC001-2、106、109	-	0.027~0.032		0.012~0.013
	八角场	T	Jiao33、48、49、57	-	0.018~0.026	0.016~0.017	-	
		J	-	-	0.020	-		
	南充	蓬菜	J	-	-	0.029	-	张子枢, 1992
				-	-	0.049	-	
	桂花	广安	-	-	-	0.035	-	-
				-	-	0.028	-	
川南	鹿角场	P	-	-	0.027~0.035	-	-	
			李子坝	-	0.022~0.025	-		
	白节滩	-	-	-	0.032~0.041	-	-	
			丹凤场	-	0.024~0.044	-		
	永安坝	-	-	-	0.011~0.050	-	张子枢, 1992	
			宋家场	-	0.044~0.050	-		
	广福坪	-	-	-	0.047~0.050	-	-	
			九奎山	-	0.027~0.054	-		
	合江	P-T	-	-	0.027~0.057	-	-	
			南井	-	0.043~0.057	-		
	荔枝滩	-	-	-	0.051~0.057	-	-	
			庙高寺	-	0.035~0.064	-		
	纳北	-	-	-	0.039~0.065	-	-	
			阳高寺	-	0.046~0.065	-		
	老翁场	-	-	-	0.040~0.066	-	-	
			付家庙	-	0.047~0.066	-		
	长垣坝	-	-	-	0.027~0.090	-	-	
			太和场	T	-	0.081~0.084		-
川西南	-	Pt	Wei28	3 226~3 736	0.248	-	戴金星, 2003	
			Wei2、27、28、30、39、46、100、106	2 789~3 041	0.218~0.342	0.021	-	
	-	Z	Wei39、46	-	0.147~0.210	-	魏国齐等, 2014	
			Wei12	2 836.5~3 005	0.250	0.021	Ni <i>et al.</i> , 2014	
	威远	Z-ε	威基井; Wei2、23	2 438~3 005	0.120~0.235	0.021	徐永昌等, 1989	
			Wei23	3 017~3 142	0.262	-	戴金星, 2003	
	-	ε	-	-	0.270	-	张子枢, 1992	
			Wei7	1 079	0.166	-	徐永昌等, 1989	
	-	P	Wei5、7	1 319~1 346	0.003~0.108	0.022	戴金星, 2003	
			-	-	0.063	-	张子枢, 1992	
	-	T	-	-	0.037~0.074	-	-	
			Weiqian1	140~200	0.033	-	徐永昌等, 1989	
自流井	P	-	-	0.020~0.030	-	-		
		孔滩	-	0.022~0.047	-	-		
黄家场	P-T	-	-	0.029~0.048	-	-		
		兴隆场	-	0.012~0.064	-	张子枢, 1992		
观音场	-	-	-	0.018~0.064	-	-		
		瓦布	-	0.039~0.084	-	-		
圣灯山	T	-	-	0.027	-	-		
		邓井关	-	0.037~0.054	-	-		
川东	铁山坡	C	Tie4	-	0.037	0.034	-	
			Feng6; TD1	4 213~4 923	0.036~0.039	0.006~0.015	Ni <i>et al.</i> , 2014	
	高峡	-	QL7、13、24	4 666~4 944	0.026~0.067	0.009~0.024		-
			雷音铺	Lei11	3 839	0.079	0.017	-
	沙罐坪	C-P	Guan2、4、10	3 747~4 774	0.022~0.090	0.011~0.028	-	
			Xiang6、14、15、18	1 593~2 311	0.037~0.070	0.011~0.016	张子枢, 1992	
	相国寺	-	-	-	0.034~0.078	-	张子枢, 1992	
			福成寨	Cheng13、16	2 549~3 809	0.030~0.031	0.004~0.005	Ni <i>et al.</i> , 2014
	陈家场	C、T	-	-	0.036~0.124	-	张子枢, 1992	
			板东	Zhang2、9、23	2 762~4 479	0.015~0.023	0.007~0.009	-
	卧龙河	C-P-T	Ban4、5、16	2 853~3 994	0.011~0.040	0.010~0.018	Ni <i>et al.</i> , 2014	
			Wo3、5、14、17、50、58、88、120、127	1 288~4 439	0.008~0.044	0.003~0.035	-	
	大池干	-	-	-	0.011~0.122	-	张子枢, 1992	
			板桥	Chi4、18、26	2 220~3 307	0.022~0.072	0.002~0.008	Ni <i>et al.</i> , 2014
	铜锣峡	P	-	-	0.072~0.146	-	张子枢, 1992	
			双龙	Tong4	2 625	0.023	0.026	Ni <i>et al.</i> , 2014
	新市	P	-	-	3 989	0.150	0.011	张子枢, 1992
			新市	Xin8	3 176	0.001	0.007	Ni <i>et al.</i> , 2014
石龙峡	P-T	-	-	-	-	张子枢, 1992		
		黄草峡	Caol、5	1 095~1 226	0.045~0.047	0.010~0.011	Ni <i>et al.</i> , 2014	
石油沟	T	-	-	-	-	-		
		沙坪坝	-	-	-	-	张子枢, 1992	
川东北	普光	P-T	Puguang2、3、7、8、9、10、101	5 028~6 080	0.007~0.022	-	Liu <i>et al.</i> , 2017	
			Yuanba103H、221、222、223、273	-	0~0.02	0.001~0.007	-	
川北	元坝	T	Yuanba221、223; Heba2;	-	0~0.02	0.005~0.018	件宗涛等, 2017	
			Yuanlu301H、7、8、9、10	-	0	0.012		
-	J	-	Yuanba3	-	0	0.015~0.016	-	
			Yuanlu5	-	0	0.015~0.016	-	
川西	河湾场	P	He1; Hs1	-	0.001~0.029	0.011~0.012	Ni <i>et al.</i> , 2014	
			Zhong18、31	2 543~3 170	0.061~0.063 0.007~0.008	0.009~0.018	张子枢, 1992 Ni <i>et al.</i> , 2014	
	孝泉	-	Cx96	2 628	0.012~0.056	0.05	张子枢, 1992	
			Ch127	4 566	0.016 0.008	0.01	Ni <i>et al.</i> , 2014	
	合兴场	T	QX3、6、10、13	-	0.015~0.017	0.017~0.018	-	
			邛西	-	0.010~0.026	-	-	
	老关庙	-	-	-	0.018	-	-	
			大兴	-	0.022	-	张子枢, 1992	
	雾中山	-	-	-	0.060~0.095	-	-	
			汉王场	-	0.014	-	-	
海棠铺	-	-	-	0.061	-	-		
		新场	CX129、134、135、136、152	650~2 752	0.008~0.027	0.010~0.020	Ni <i>et al.</i> , 2014	
洛带	J	LS35、Lpmg55	-	0.029~0.041	0.012~0.013	-		

系氦气含量较高,为0.120%~0.342%(表1),含量明显高于安岳气田.究其原因,可能是以下几种因素导致的:(1)威远地区基底为前震旦纪花岗岩(戴金星等,2003),U和Th含量高,分别为 3.0×10^{-6} ~ 12.3×10^{-6} 、 21.8×10^{-6} ~ 49.1×10^{-6} (谷志东等,2013),高石梯一磨溪地区基底U和Th含量可能较低.(2)威远构造为一巨型穹隆背斜,沟通基底的断裂和裂缝是氦气的高效运移通道,背斜的存在有利于氦气从水溶态进入气相,并在背斜高部位圈闭富集;而高石梯一磨溪地区无明显背斜圈闭,氦气富集效应不明显.(3)因为穹隆背斜的存在,威远气田充注过程中,烷烃气可以长距离、大范围运移;烷烃气作为载体,可降低氦气在地层水中的溶解度,使氦气从水溶相进入气相,并随烷烃气运移、在高部位圈闭成藏.高石梯一磨溪地区,纵向上从底部震旦系灯二段向上部灯四段、寒武系龙王庙组氦气含量依次降低(表1),说明纵向上氦气无运移富集效应;横向上无明显地势高差,氦气运移距离短,富集效应有限,因此含量低.

目前,我国南方页岩气勘探已经进入寒武系和震旦系.对于基底酸性岩体发育及寒武一震旦系烃源岩U、Th富集地区,如扬子克拉通核部黄陵穹隆元古一太古代花岗杂岩发育区(魏运许等,2018),应加强氦气资源调查.

2.2 塔里木盆地

塔里木盆地塔西南、塔北、塔中地区均展现出一定氦气富集前景(表2).塔西南地区巴什托普油气管道二叠系南闸组和石炭系小海子组异常高压气藏氦气含量0.68%~0.73%(常兴浩和宋凯,1997;余琪祥等,2013),亚松迪石炭系小海子组气藏氦气含量0.22%(余琪祥等,2013),和田河气田玛4、玛4-H1井奥陶系氦气含量最高可达0.25%,阿克莫木气田阿克1井三叠系氦气含量最高可达0.09%(刘全有等,2009),预示塔西南地区可能整体富氦.

塔北地区塔河油田沙6井寒武系氦气含量0.34%,奥陶系部分单井氦气含量0.15%~0.94%,沙13井可达2.19%(余琪祥等,2013).东河塘油田和哈得逊油田石炭系原油伴生气氦气含量也可能较高,分别可达0.40%(徐永昌等,1998)和0.29%(刘全有等,2009).轮南和解放渠三叠系油气藏氦气含量最高可达0.93%(徐永昌等,1998;Liu *et al.*, 2012).上覆白垩系、古近系和新近系氦气含量低,除了沙6井和牙哈1井,氦气含量均低于0.10%(表2).塔中地区,塔中4井区、塔中16井区石炭系氦气

含量0.16%~0.23%(Liu *et al.*, 2012),奥陶系和志留系氦气整体含量低.库车前陆冲段带克拉2、大北、迪那气田氦气含量均较低,大宛齐油气田氦气含量稍高,但均低于0.10%.

整体而言,塔里木盆地天然气样品已有氦气含量数据可靠性相对较差,如和田河气田同一口井的氦气含量相差5倍(表2).

塔里木盆地绝大部分天然气样品 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为0.015~0.091 Ra,属壳源成因.塔河北部沙参2(O)、沙7(K)、雅克1(K)井 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为0.132~0.166 Ra.阿克莫木气田 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为0.549 Ra,可能是少量(7%)幔源氦混入导致.

2.3 柴达木盆地

柴达木盆地已发现氦气均分布在盆地北缘.德令哈凹陷柴页2井钻遇石炭系海陆过渡相克鲁克组富有机质泥页岩,部分井段泥页岩现场解析气中氦气含量可高达0.78%(曹军等,2016)(表3).

全吉山地区一口煤炭预查钻孔在施工过程中出现涌水涌气现象,在井口利用排水法收集气体,氦气含量可达1.10%(张云鹏等,2016).在困鱼山地区进行煤炭详查钻孔过程中,对中侏罗统大煤沟组暗色泥页岩发育段进行了现场解析,解析气氦气体积含量达0.47%~1.14%(表3).

2018年5月,在郑州召开的第三届天然气地球科学论坛上,张晓宝首次报道了在阿尔金山前东段及柴北缘的东坪3气藏和尖探1井天然气中检测到氦气含量0.085%~1.069%,应是基底富含U、Th,由放射性衰变形成的.

2.4 准噶尔盆地

目前,准噶尔盆地氦气含量大于0.05%的天然气样品仅见于侏罗系(表3),分布在中央拗陷区和南部拗陷区.中央拗陷区氦气含量最高为0.203%,南部拗陷区沙1955井氦气含量0.236%(Xu *et al.*, 2017).其他地区 and 层系未见工业氦气发现.准噶尔盆地中部拗陷 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为0.014~0.076 Ra,为壳源成因.南部拗陷 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值以0.186~0.306 Ra为主(Xu *et al.*, 2017),幔源氦含量不超过4%.

2.5 中西部其他盆地

除了上述四川、塔里木、柴达木、准噶尔盆地,中国中西部地区鄂尔多斯盆地、吐鲁番一哈密盆地氦气整体含量偏低.Dai *et al.*(2017)对鄂尔多斯盆地多个油气田不同层系共94个样品进行了分析,氦气含量0.000 2%~0.091 0%,平均为0.033%(Dai *et al.*, 2017).刘全有等(2007)曾对苏里格气田二叠

系天然气样品进行了测定,氦气含量均低于 0.04%。表 3 系统展示了鄂尔多斯盆地氦气含量大于 0.05% 的天然气样品数据,其³He/⁴He 比值为 0.010 ~ 0.097 Ra,为典型壳源成因。

吐鲁番—哈密盆地氦气含量低,目前发现氦气含量最高的为 Hongtai 2 井侏罗系天然气,氦气含量 0.069%;其次为 Wenxi7-1 井和 Wen21 井,侏罗系天然气氦气含量 0.051%~0.055%(Xu *et al.*, 2017)。吐

表 2 塔里木盆地天然气中氦气体积含量统计

Table 2 Statistics of helium volume contents in natural gases in Tarim Basin

区带	油气田	层位	井名	井深(m)	He(%)	R/Ra	来源			
塔西 南	和田河	O	玛 4、4-H1	—	0.213~0.249	0.083~0.091	刘全有等,2009			
				—	0.044~0.048		Liu <i>et al.</i> ,2012			
	巴什托普 亚松迪	C	麦 3、4 巴探 2	4 300~4 347	0.68~0.73	—	常兴浩和宋凯,1997			
				1 920~1 930	0.22	—	余琪祥,2013			
	阿克莫木 柯克亚	K	阿克 1	—	0.038	0.549	Liu <i>et al.</i> ,2012			
				—	0.093		刘全有等,2009			
				—	0.004		Liu <i>et al.</i> ,2012			
—	J-K	柯深 102	—	0.004	—	Liu <i>et al.</i> ,2012				
			N	柯 8	3 283~3 304	0.005	0.056	Xu <i>et al.</i> ,1995		
塔 中	—	O	塔中 1、16-6、242、26、45、62、621	—	0.005~0.054	0.032	Liu <i>et al.</i> ,2012			
			塔中 1	3 666	0.054	0.033	徐永昌等,1998			
			塔中 117	—	0.014	—	Liu <i>et al.</i> , 2012			
			塔中 103、4-7-H22、4-8-30、4-18-7、6	—	0.001~0.233 1	0.027~0.030				
塔 河	—	Pt	沙 3	—	0.03	0.042	Liu <i>et al.</i> ,2012			
			沙 6、7	—	0.04~0.34	—	余琪祥,2013			
			沙参 2;沙 5、13、15	4 969~5 782	0.07~2.19	—	Liu <i>et al.</i> ,2012			
			沙参 2;沙 13	—	0.07~0.94	—	Xu <i>et al.</i> ,1995			
			沙参 2	5 300	0.049	0.159				
			沙 14	—	0.005	—	邓树立等,1995			
			沙 18	—	0.004	—				
			沙 14、18、9	—	0.010~0.068	—				
			沙 4	—	0.020	—	余琪祥,2013			
			沙 6、15	5 361.50~5 393	0.05~0.19	—	邓树立等,1995			
			沙 5、21	—	0.003~0.013	—				
			沙 7、雅克 1	—	0.001	0.132~0.166	Liu <i>et al.</i> ,2012			
			塔 北	—	C-P	沙 45	—	0.000 1	—	
轮古 201	—	0.04				0.021~0.061	刘全有等,2009			
轮南 10;轮古 201、15-18、16-2	—	0.002~0.031				—	Liu <i>et al.</i> ,2012			
轮南 10	—	0.243				0.059	徐永昌等,1998			
轮南 17	—	0.028				0.032	Xu <i>et al.</i> ,1995			
轮南 17	—	0.19				0.034				
轮南 14	5 266	0.103				0.043	徐永昌等,1998			
轮南 2-2、2-2-3、2-24-2	—	0.024~0.928				0.035~0.061				
轮南 2-25-H1、2-33-1、2-34-5	—	0.001~0.302 9				0.040~0.061	Liu <i>et al.</i> ,2012			
轮南 3	—	0.004				—	邓树立等,1995			
轮南 33-1、34-2、5	—	0.022~0.052				0.056~0.076	徐永昌等,1998			
解放渠	—	O				解放 123	—	0.181	0.029	徐永昌等,1998
						解放 127	—	0.000 4	—	
			解放 1-13-4、1-6-4、100、138	—	0.001~0.206	0.045~0.048	Liu <i>et al.</i> ,2012			
			解放 100、131、138	4 251~4 430	0.066~0.085	0.044~0.045	徐永昌等,1998			

续表 2

区带	油气田	层位	井名	井深(m)	He(%)	R/Ra	来源
塔北	牙哈	∈-O	牙哈 7x-1	—	0.000 7	0.044	Liu <i>et al.</i> ,2012
		K	牙哈 1	—	0.007	—	
		E	牙哈 1、102、104、23-1-5	—	0.001~0.132	0.024~0.030	
		N _{1j}	牙哈 4	—	0.000 6	0.024	
	东河塘	O	东河 12	—	0.044	—	Liu <i>et al.</i> ,2012
		C	东河 1、1-6-8、11	—	0~0.030	0.047~0.061	徐永昌等,1998
			东河 1、4	—	0.230~0.396	0.016~0.047	
	P	东河 23	—	0.022	—	Liu <i>et al.</i> ,2012	
	哈得	C	哈得 113、2-7	—	0.035~0.054	—	Liu <i>et al.</i> ,2012
				—	0.153~0.29	0.022~0.025	刘全有等,2009
	桑塔木	T	桑塔木 5-4	—	0.000 6	0.040	Liu <i>et al.</i> ,2012
	吉拉克	C	吉拉 107	5 406	0.205	0.015	徐永昌等,1998
		T	吉南 1、4-H2	—	0.009~0.014	—	Liu <i>et al.</i> ,2012
	玉东	K	玉东 2	—	0.023	—	Liu <i>et al.</i> ,2012
	羊塔克	E	羊塔克 5	—	0.066	—	
英买力	E	英买 19	—	0	0.062	Liu <i>et al.</i> ,2012	
	E	英买 7	4 700	0.063	0.044	徐永昌等,1998	
	N	英买 6	—	0.007	0.059	Liu <i>et al.</i> ,2012	
库车	克拉 2	K-E	克拉 2-1、2-4、2-7、2-10、2-11、2-14	—	0.004~0.006	0.028~0.061	Wang <i>et al.</i> ,2018
	大北	K	大北 102、103、201、202、302	—	0.006	0.045~0.080	Wang <i>et al.</i> ,2016
	迪那	N	迪那 102	—	0.020	—	Liu <i>et al.</i> ,2012
	提尔根	K	提尔根 2	—	0.006	—	
	大宛齐	K-N	大宛 105-25	—	0.095	0.041	Liu <i>et al.</i> ,2012
	红旗渠台 2	E-N	红旗 1、2	—	0.006	0.059	
台 2	E-N	台 2	—	0.005~0.023	—		

表 3 柴达木、准噶尔、鄂尔多斯盆地天然气中氦气体积含量统计

Table 3 Statistics of helium volume contents in natural gases in Qaidam, Junggar and Ordos basins

盆地	区带/地区	层位	井名	井深(m)	He(%)	R/Ra	来源
柴达木	德令哈凹陷	C	柴页 2	939	0.10	—	曹军等,2016
				943	0.78	—	
	全吉山地区	E-N	全吉山 9-8	1 000	0.09	—	张云鹏等,2016
				—	1.10	0.02	
准噶尔	团鱼山地区	J	KT-7	874~925	0.47~1.14	0.05~0.93	Xu <i>et al.</i> ,2017
				—	0.107~0.203	0.014~0.053	
	中部拗陷	J	彩 508、510、514; 泉 6; 滴 20	—	0.107~0.203	0.014~0.053	Xu <i>et al.</i> ,2017
				—	0.236	0.186	
	富县	O	富古 4	—	0.053	0.038	倪春华等,2010
				—	0.07	0.027	
鄂尔多斯	—	P	苏 1、140-31、21、33-18、48-14-76、48-2-86、53、75、77-2-5、77-6-8、95、120-52-85、139; Zhao61; Zitan1	—	0.05~0.09	0.031~0.097	Dai <i>et al.</i> ,2017
	—	J	Mu16-10	—	0.07	0.022	刘全有等,2007
	—	T	Hu43-10	—	0.08	0.020	
苏里格	P	苏 6、13-16、16、19-18、22-15、25、33-18、35-17、38-14、38-16、40-16、41-8	3 226~3 373	0.016~0.035	0.01~0.03		

表 4 郯庐断裂带两侧盆地天然气中氦气体积含量统计

Table 4 Statistics of helium volume contents in natural gases in the basins on both sides of Tanlu fault zone

盆地	构造/油气田	层位	井名	井深(m)	He (%)	R/Ra	来源	
海拉尔	乌尔逊断陷 苏仁诺尔构造带	T-K	新乌 1	—	0.17~0.18	>0.6	王江等, 2002	
			杜 613	705	0.119	—	冯子辉等, 2001	
	泰康隆起带	K ₂	来 63	589.6~625.0	0.130	—	黄福堂, 1999	
			江 37-5	551.4~572.4	0.152	—	—	
			五深 1; 五 101、102、106、 109	713.1~848.4	0.10~0.21	0.19~0.28	—	
	长春岭背斜带	K ₁	三 102、202、203、2-4、 3、4-1、4-2	595~953	0~0.08	0.09~0.13	王杰等, 2006	
			龙虎泡大安阶地	K ₂	英 20	1 453.0~1 475.2	0.130	—
	松辽	明水阶地	K ₁	宋 3	1 124.6~1 128.6	0.110	—	冯子辉等, 2001
				朝阳沟阶地	K ₁	朝 90	1 201.0~1 311.0	0.251
		王府凹陷	K ₁	双 13	728.0~816.0	0.124	—	冯子辉等, 2001
庄深 1、双 17、万 11				707.3~1265	0.14~0.19	0.31~0.48	王杰等, 2006	
古龙凹陷		K	万 2、5、6	863~1011	0.01~0.08	4.50~5.14	徐永昌等, 2000	
			K ₂	古 106	1 682.4~1 688.6	0.310	—	—
	K ₁	升 63	1 822.0~1 847.7	0.241	—	—		
		汪 9-12	2 434.8~2 417.4	2.104	—	—		
三肇凹陷	K ₁ -J	芳深 1	2 926.0~2 940.2	0.404	—	—		
		汪 902	2 795.0~2 806.0	0.102	—	冯子辉等, 2001		
	J	尚深 1	2 660.0~2 680.1	0.226	—	—		
长岭凹陷	K	升深 201	2 929.4~3 630.0	0.333	—	—		
		芳深 701	3 575.8~3 602.0	0.120	—	—		
	K	昌 201	3 206.6~3 223.8	0.220	—	—		
渤海湾	济阳坳陷花 501 井区	Nm	徐深 1-1、1-201、5、6、 6-104、6-2、6-208、603	3 328~3 759	0.008~0.014	0.9~1.3	杨春等, 2014	
			长深 1、103、1-1、1-2、 2、6	3 165~3 863	0~0.013	0.9~1.3	杨春等, 2014	
	济阳坳陷花 17井区	E	花 501	459~813	2.08~3.08	3.10~3.19	曹忠祥等, 2001	
			花 17	1 965~2 010	0.036~0.085	3.18	Zheng <i>et al.</i> , 1996	
			Lu27-15、27-16	—	0.210~0.260	0.36~0.37	—	
—	—	—	—	0.120	0.48	Dai <i>et al.</i> , 2017		
—	J	Liu25	—	0.100	3.90	—		
苏北	黄桥气田	P	X3、HT3	2 292	0.109~0.571	1.96~3.24	Liu <i>et al.</i> , 2017	
			黄浅 2、14	376~377	1.200~1.340	3.20~3.69	徐永昌等, 1998	
	溪桥气田	N	浅 2、4、14	—	1.029~1.330	—	郭念发等, 1999	
			HQ1、2、4	—	1.051~1.420	2.65~3.49	戴金星等, 1995	
	海安	—	安丰 1	—	0.42	—	—	
金湖凹陷	E	闵 7; 天深 33、45	1 334~1 836	0.081~0.096	1.25~3.14	徐永昌等, 1998		
溱潼凹陷	E	苏 190、203	2 342~2 592	0.089~0.096	2.54~2.74	—		
三水	宝月背斜三水农场 断块	E	水深 3、12、24、44	1 107~1 733	0.110~0.259	4.09~4.56	徐永昌等, 2000	
			水深 3、12、13	1 103~1 112	0.250~0.419	4.071	戴金星等, 1995	
	—	—	—	宝 1	—	0.259	1.143	杜建国和刘文 汇, 1991
—	—	E	南 35	—	0.192	3.06	徐永昌等, 2000	
宝月背斜高岗断块	E	南 7	1 162	0.110	—	戴金星等, 1995		

鲁番—哈密盆地绝大部分样品 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为0.013~0.095 Ra, Hongtai 2井天然气 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为0.120,均为壳源氦,幔源氦含量小于2%。

2.6 郯庐断裂两侧的裂谷型含油气盆地

中国东部郯庐断裂带两侧分布有海拉尔、松辽、渤海湾、苏北、三水等裂谷型含油气盆地,目前已发现多个工业性氦气聚集(表4)。虽然部分样品氦气含量高,但规模均较小,经济价值相对有限,幔源氦含量高。

松辽盆地北部、双城—太平川地区及南部万金塔也有氦气发现(表4)。盆地北部已有30多口井发现工业氦气,含量0.102%~0.404%,最高可达2.104%,主要分布在中部含油组合萨尔图油层、下部含油组合扶余、杨大城子油层和深部含气组合登娄库和侏罗系(冯子辉等,2001)。其中,汪9-12井氦气含量高达2.104%(冯子辉等,2001);升深201井日产气 $4 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上,氦含量为0.333%(于勇,2010),相当于日产氦气 133 m^3 。双城—太平川地区五站和太平庄氦气含量0.10%~0.21%(王杰等,2006)。盆地南部万金塔和双城—太平川地区三站氦气含量最高为0.08%。徐家围子断陷和长岭断陷氦气含量一般低于0.05%(杨春等,2014)。气藏沿断裂带分布(王民等,2017)。松辽盆地北部 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为0.721~3.007 Ra,幔源氦含量可高达38%(冯子辉等,2001)。盆地南部万金塔二氧化碳气田 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为4.50~5.14 Ra,幔源氦含量可高达64%(徐永昌等,2000)。

苏北盆地在黄桥气田、溪桥气田、海安地区、金湖凹陷和溱潼凹陷均有氦气发现。溪桥气田氦气含量1.051%~1.420%(戴金星等,1995),是苏北盆地首次发现的含氦气田(郭念发等,1999),天然气探明地质储量 $1\ 036 \times 10^4 \text{ m}^3$,落实氦气探明地质储量 $12.77 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。黄桥浅层新近系盐城组含氦天然气田氦气含量1.340%,溱潼凹陷和金湖凹陷古近系氦气含量0.096%(徐永昌等,1998)。松辽盆地北部 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为1.25~3.69 Ra,幔源氦含量可高达46%。

海拉尔盆地乌尔逊断陷苏仁诺尔地区中生代地层氦气含量0.003%~0.198%,其中新乌1井氦气含量0.17%~0.18%, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值大于0.6(王江等,2002),幔源氦含量大于7%。在渤海湾盆地发现的氦气含量高值区位于济阳拗陷花501井区,花501井新近系明化镇组氦气含量2.08%~3.08%(曹忠祥等,2001)。渤海湾盆地 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值最高为

6.45 Ra(Dai *et al.*, 2017),幔源氦含量可达80%。三水盆地二氧化碳气藏伴生氦气含量最高可达0.419%, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为1.143~4.56 Ra(戴金星等,1995),幔源氦含量可达56%。

2.7 地热或温泉含氦区

虽然氦气主要赋存在天然气中,但部分地区地热井/温泉中也有一定含量,主要以水溶态存在。在我国渭河盆地、辽宁、山东、云南、内蒙古、浙江、湖南、广东等地的地热井/温泉中均发现了工业氦气。表5列出了笔者整理的全国各地氦气含量大于0.10%的地热井/温泉样品及其R/Ra比值。

目前在温泉/地热井中进行氦气勘探、开发和利用的地区主要集中在渭河盆地,已在古近系—新近系多口地热井的水溶气中发现了氦气,其体积含量一般为0.8%~1.2%,最高达9.226%(薛华锋等,2004;卢进才等,2005;李玉宏等,2011,2016)。渭河盆地绝大部分水溶气样品 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为0.023~0.073 Ra(表5),为典型壳源氦,来源于秦岭地区富铀、钍的花岗岩等磁性体(李玉宏等,2011),其U含量 $3.45 \times 10^{-6} \sim 9.41 \times 10^{-6}$,Th含量 $15.77 \times 10^{-6} \sim 21.63 \times 10^{-6}$ (张文等,2018)。靠近秦岭北缘断裂的少量水溶气样品, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值稍高,如来自骊山南蓝田峪的样品 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为0.557 Ra,幔源氦含量小于7%。渭河盆地氦气富集受断裂和花岗岩等磁性体共同控制(李玉宏等,2011),其资源量为 $21.30 \times 10^8 \text{ m}^3$ (张文等,2018),寻找局部富集的游离气是实现规模建产的关键。

辽宁和山东郯庐断裂带附近地热井/温泉中氦气含量多在0.1%~0.5%之间, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为0.2~1.9 Ra,地幔来源氦为1%~8%,空气来源氦含量一般小于1%(Xu *et al.*, 2014)。值得注意的是,当水溶气中氦气体积含量很低,接近大气氦含量(5.24×10^{-6}),且样品 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比值接近空气的 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比值(0.32)时,需要考虑空气中氦的混入对样品 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值的影响;当样品 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比值远大于0.32时(数量级以上差异),可认为空气对样品 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值无明显影响。例如,辽宁省辽阳Tonghe样品氦气含量 $5.6 \times 10^{-6} \sim 5.7 \times 10^{-6}$, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为1.57~1.58 Ra, $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比值为0.32~0.33,空气来源氦为97%~100%。如果样品的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值明显高于大气值,很可能是20世纪五、六十年代全球核试验中大量的氦(^3He)释放到空气中发生 β 衰变生成 ^3He 、进入地下水系统导致的(Xu *et al.*, 2014)。云南、内蒙古、浙江、湖南、

表 5 中国地热或温泉(井)水溶气中氦气体积含量统计

Table 5 Statistics of helium volume contents in water-soluble gases from geothermal or hot spring wells in China

省/盆地	地热/温泉井	He(%)	幔源贡献 He 含量(%)	R/Ra	来源	
渭河盆地	华阴 051 基地地热井	3.35~3.51	0.02	0.073	张文等,2018	
	蓝田峪后泉地热井	3.43~3.59	0.24	0.557		
	兴平华兴金浪地热井	3.12~3.42	—	—		
	周至楼观台地热井	2.46~3.20	—	—		
	辽宁省	咸阳 202 所地热井	2.17~2.29	—	—	张福礼等,2012
		西安地热井	0.524~3.416	<0.02	0.023~0.064	
		咸阳地热井	0.191~3.140	<0.02		
		宝鸡地热井	0.528~0.968	<0.01		
渭南地热井		0.115~3.511	<0.02			
Wenquanci, Benxi		0.115	0.003	0.225		
Tonggangzi, Anshan		0.122~0.132	<0.01	0.623~0.638		
Qianshan, Anshan		0.134	0.009	0.531		
山东省	Donghuangdi, Haicheng	0.148	0.012	0.654	Xu <i>et al.</i> ,2014	
	Xiongyue, Gaixian	0.129	0.007	0.476		
	Anbo, Pulandian	0.100	0.004	0.321		
	Jiantang, Pulandian	0.115	0.004	0.327		
	Hadabei, Xiuyan	0.122	0.005	0.34		
	瓦房店龙门汤	0.212	0.009	0.34		
	凤城宝山温泉	0.166	0.012	0.60		
	辽阳汤河冷泉	0.084	0.015	1.46		
云南省	大连皮口 CO ₂ 泉	0.529	0.123	1.87	Shangguan <i>et al.</i> ,1998	
	新金剑汤温泉	0.316	0.013	0.34		
	沂南新王温泉	0.315	0.011	0.31		
	威海洪水岚温泉	0.187	0.017	0.76		
福建省	安宁县天下第一场(安宁温泉)	0.143	<0.001	0.025	戴金星等,1994	
	盘溪盘 3(温泉或地热井)	0.19	0	0.011		
广东省	克什克腾旗热水镇温泉	0.66~0.73	<0.005	0.06	戴金星等,1992	
浙江省	泰顺承天温泉	0.44	0.012	0.24		
湖南省	汝城热水温泉	0.24	0.002	0.07	戴金星等,1992	
福建省	地震局漳州水化站地震 1 号孔	0.13	0.007	0.48		
广东省	丰顺县邓屋地热站	0.162	0.016	0.83		

福建、广东等地部分地热井/温泉水溶气中发现工业氦气,³He/⁴He 比值为 0.011~0.830 Ra(表 5),幔源氦含量最高约 10%。

表 5 显示,中国地热或温泉水溶气中氦气体积含量大于 0.1% 的样品,氦气主要来自壳源,幔源氦在水溶气中的体积含量小于 0.02%。水溶气中幔源贡献的氦气体积含量大于 0.1% 的仅发现 2 个样品:

(1)渭河盆地蓝田峪后泉地热井样品氦气体积含量 3.43%~3.59%,其中幔源氦气体积含量约 0.24%;(2)大连皮口 CO₂ 泉样品氦气体积含量 0.529%,其中幔源氦气体积含量为 0.123%。云南温泉水溶气的³He/⁴He 比值大于 1 Ra 的样品(戴金星等,

1994)氦气体积含量均小于 0.05%;中国腾冲、长白山和五大连池 3 大火山区相关地热井/温泉中,³He/⁴He 比值为 1.62~5.51 Ra,幔源氦占比 16.65%~70.15%,水溶气中氦气体积含量低于 0.03%(上官志冠和武成智,2008),进一步说明幔源氦在水溶气中形成工业聚集难度较大。

3 中国首个特大型氦气储量的发现:和田河富氦气田

据上文可知,地球上具工业价值氦气主要存在

于油气田(藏)伴生气和地热、泉水伴生气中.其中,天然气田(藏)伴生氦气最为普遍,全球已发现规模氦气储量均为天然气伴生气.如果天然气储量规模很大,即使氦气含量相对较低,氦气总体储量也会非常可观.如横跨卡塔尔和伊朗的北方—南帕斯气田,天然气总探明储量为 $3.8 \times 10^{13} \text{ m}^3$,为世界最大的天然气田,其中卡塔尔境内的北方气田天然气总探明储量为 $2.55 \times 10^{13} \text{ m}^3$ (胡安平和周庆华,2006),虽然氦气含量仅为 0.04%,但氦气资源量达 $10.1 \times 10^9 \text{ m}^3$,氦气储量约为全球氦气储量的 1/4.受总含气量限制,油田(藏)伴生氦气储量规模明显较小.而地热水和泉水中溶解气体非常有限,即使溶解气中氦气含量相对较高,氦气总体储量也很小,难以形成规模.因此,为了发现氦气规模储量,本研究聚焦国内四川、塔里木、柴达木、准噶尔、鄂尔多斯、松辽、渤海湾七大含油气盆地,通过上文各盆地及地区氦气资源系统调研,首先优选了氦气显示良好、但存在不确定性的塔里木盆地和田河气田及周缘开展氦气资源系统勘查.

和田河气田位于塔里木盆地巴楚隆起南缘玛扎塔格构造带,发现于 1997 年,是塔里木盆地已探明的最大的古生界海相碳酸盐岩气田(周新源等,2006;Wang *et al.*,2008;谢会文等,2017).气田由玛 4 号、玛 2 号、玛 8 号 3 个断背斜圈闭组成,分别位于玛扎塔格构造带的东、中、西段.玛 4 号圈闭有 2 个高点,分别对应东部的玛 4 井区和西部的玛 5 井区.玛 2 号圈闭也有 2 个高点,分别对应玛 2 井区和玛 3 井区.

和田河气田储层既有碎屑岩,也有碳酸盐岩.其主力储层为石炭系生屑灰岩段(C^6)及奥陶系潜山两套碳酸盐岩(O)储层.石炭系生屑灰岩段分布稳定,一般厚 35~45 m,由生物碎屑灰岩、亮晶粒屑灰岩和泥晶灰岩、云质灰岩互层组成,溶蚀孔洞非常发育,构造缝为主要的渗滤通道,储层类型以裂缝—孔隙型为主.奥陶系以巨厚状灰岩为主,遭受强烈溶蚀作用,形成大量溶蚀孔、洞,在潜山顶部风化壳发育,储层以裂缝—孔隙型为主.次要储层为石炭系巴楚组砂砾岩段(C^8)和石炭系卡拉沙依组砂泥岩段(C^2)砂岩.巴楚组砂砾岩段厚 0~38.5 m,整体东厚西薄,玛 3 井缺失,储层基质孔隙度低,非均质性强,但裂缝发育.卡拉沙依组砂泥岩段纵向发育多个砂层组,砂岩总厚度 99~141 m,最大单层厚度 29.5 m,一般厚 10~20 m,横向上分布稳定,连通性较好,储层为中孔高渗,以粒间溶蚀孔为主.石炭系

底部的砂砾岩段与奥陶系潜山之间并无隔层,构成一个统一的储集体(周新源等,2006;Wang *et al.*,2008).

和田河气田探明天然气地质储量总计 $616.94 \times 10^8 \text{ m}^3$,由 7 个气藏组成(周新源等,2006).石炭系生屑灰岩段(C^6)发育 3 个独立的边水层状背斜碳酸盐岩气藏,分别位于玛 4 号、玛 2 号和玛 8 号圈闭中,探明天然气地质储量分别为 $157.99 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $130.84 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $36.61 \times 10^8 \text{ m}^3$.玛 8 号圈闭奥陶系潜山(O)发育底水块状气藏,探明天然气地质储量为 $9.59 \times 10^8 \text{ m}^3$,玛 4 号圈闭奥陶系潜山(O)与石炭系砂砾岩段(C^8)构成一个统一的气藏,探明天然气地质储量为 $222.43 \times 10^8 \text{ m}^3$.此外,玛 4 号圈闭的玛 5 井区石炭系卡拉沙依组砂泥岩段(C^2)的两套砂层(C^{2-1} 和 C^{2-2})分别发育边水层状背斜气藏,探明天然气地质储量分别为 $21.74 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $37.74 \times 10^8 \text{ m}^3$.

刘全有等(2009)曾检测到玛 4、玛 4-H1 井氦气含量 0.213%~0.249%,但由于氦气含量测试数据准确度相对较差,且当时研究的重点是氦同位素的测试及其在气源判识中的应用,因此氦气的含量并未引起重视.

3.1 样品采集与分析

为了最大限度减少空气污染,在采样过程中选用带双阀的耐高压钢瓶.采样位置为井口,用气压 $>5 \text{ MPa}$ 的天然气冲洗钢瓶 4 次以上,保证钢瓶中空气残留量小于 1.0×10^{-6} .本研究在和田河气田及罗斯 2 井共采集 11 口井天然气样品(图 3,图 4),送到中国科学院地质地球物理研究所油气资源重点实验室进行氦气含量及其同位素检测,其中氦气含量采用质谱仪和色谱仪 2 种方法分析.

2017 年,笔者用 Nobleless SFT 型稀有气体质谱仪分析氦气含量及其同位素.将天然气钢瓶连接减压阀,并连接到稀有气体质谱仪的样品净化系统上,抽真空至压强小于 2 Pa,截取 $2 \text{ cm}^3 \cdot \text{STP}$ (标准状态下)气体导入稀有气体净化系统;接着依次用海绵钛炉($800 \text{ }^\circ\text{C}$)和吸气泵除去样品中的非稀有气体.净化后的气体通过冷泵分离为 He+Ne、Ar 和 Kr+Xe 三部分,依次进入稀有气体质谱仪分析系统,分析 He 的丰度与同位素组成.冷泵中有活性炭,He+Ne 和 Ar 的分离温度为 $-203 \text{ }^\circ\text{C}$,Ar 和 Kr+Xe 的分离温度为 $-23 \text{ }^\circ\text{C}$.采用兰州市皋兰山顶的大气作实验室标样,每测试 5 个样品后测试一次标样,比较天然气样品与标样的进样量和峰高,计算氦气含量及其同位素组成.氦气含量测定的相对偏差为 $\pm 3.36\%$.

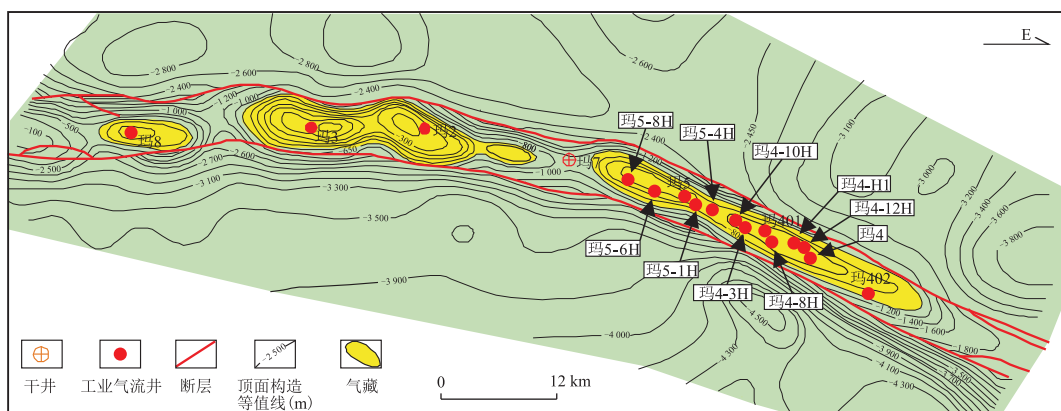


图 3 和田河气田石炭系生屑灰岩段顶面构造图

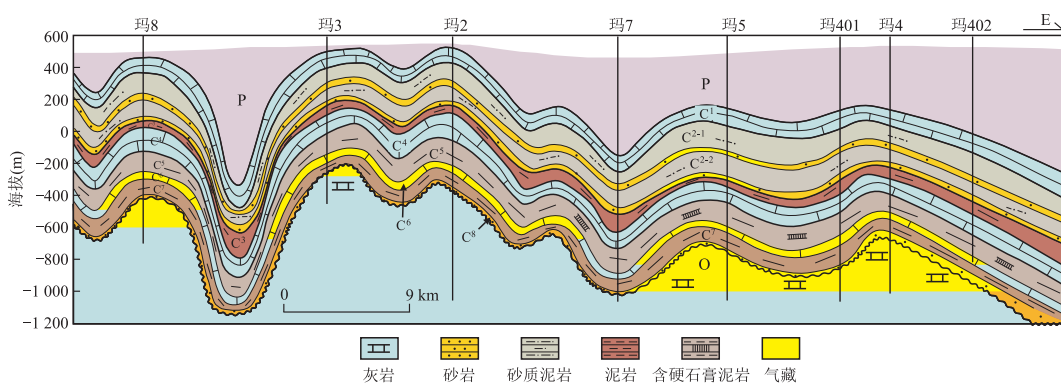
Fig.3 Top structure map of Carboniferous clastic limestone section in Hetianhe gas field
据周新源等(2006)

图 4 和田河气田气藏剖面图

Fig.4 Profile of gas reservoirs in Hetianhe gas field
据周新源等(2006)

2018年,笔者用GC9790型气相色谱仪分析天然气的氦含量。GC9790气相色谱仪为浙江福立分析仪器股份有限公司生产。色谱柱为5A分子筛柱,3 m×3 mm;载气为高纯氦,纯度≥99.999%。注样口温度120℃,柱前压0.15 MPa,升温程序为:40℃,保持10 min,以10℃/min升到120℃,保持5 min。检测器为TCD,温度100℃,桥流60 mA。采用实验室配置氦气标样,氦气含量测定的相对偏差为±5%。

3.2 氦气含量及探明储量

质谱仪所用标样为大气,色谱仪所用标样为实验室配制标准气。配制的标准气氦气含量存在一定偏差。此外,样品分析时,质谱仪采用真空进样系统,色谱仪为非真空进样系统。以上因素导致两种分析方法得到的氦气含量具有一定差异。相较而言,用Nobleless SFT质谱仪分析得到的氦气含量数据更为可靠。下文中涉及的氦气含量数据,均为采用Nobleless SFT质谱仪分析的结果。

检测数据(表6)表明,和田河气田石炭系生屑灰岩段(C⁶)气藏中氦气体积含量为0.32%~0.37%(平均0.34%),稍高于石炭系底部砂砾岩段与奥陶系潜山(C⁸+O)气藏的氦气体积含量0.30%~0.33%(平均0.31%)。罗斯2井氦气体积含量为0.26%,柯克亚凝析气田氦气体积含量为0.009%。和田河气田及罗斯2井天然气³He/⁴He比值为0.06~0.08 Ra,⁴He/²⁰Ne比值大于9 000,为典型壳源成因,幔源氦含量小于0.8%。柯克亚凝析气田³He/⁴He比值为0.11,⁴He/²⁰Ne比值大于20 000,也为壳源成因,幔源氦含量1.14%。

和田河气田从东向西具有干燥系数、CO₂含量和δ¹³C₁值升高、N₂含量降低的趋势(赵孟军,2002; Wang *et al.*, 2008),向西部罗斯2井天然气地化特征继续保持着干燥系数、CO₂含量、δ¹³C₁值明显升高、N₂含量降低的趋势(朱心健等,2017)。此外,和田河气田H₂S含量一般低于0.2%,而罗斯2井H₂S含量超

表 6 和田河及周缘天然气中氦气体积含量

Table 6 Helium volume contents in natural gases from Hetianhe gas field and its peripheral areas

气田/藏	井号	层位	He 含量(10 ⁻⁶)			R/Ra
			2017 年 Nobleless SFT 质谱仪检测	2018 年 GC9790 色谱检测	2018 年 GC9790 色谱检测	
和田河	玛 5-8H	C ⁸ +O	2 995.2	2 758	2 928	0.06~0.08
	玛 5-6H		3 253.5	2 659	2 826	
	玛 5-1H	C ⁶	3 206.6	2 697	2 892	
	玛 5-4H	C ⁸ +O	3 104.8	2 499	2 667	
	玛 4-10H		3 030.5	2 464	2 787	
	玛 4-3H	C ⁶	3 699.5	2 995	3 350	
	玛 4-8H	C ⁸ +O	3 016.6	2 256	2 485	
	玛 4-H1	C ⁶	3 277.8	2 723	2 657	
	玛 4-12H	C ⁸ +O	2 984.7	2 472	2 882	
	玛 4		3 004.2	2 451	2 819	
罗斯 2	罗斯 2 井	O	2 625.3	2 396	2 436	0.07
柯克亚	柯中 104	E	93.6	73	76	0.11

过 3%。由以上数据可以推断罗斯 2 井和和田河气田天然气一起经历了自西向东的充注过程,且越向西部 TSR 作用越明显,原油裂解程度及裂解气含量相对更高,油气充注时间相对更晚。由于氦气来源与烷烃气来源不同,原油裂解气含量的明显增加会明显稀释氦气含量,由此推断和田河气田氦气含量应整体高于罗斯 2 井。和田河气田玛 2 号和玛 4 号圈闭天然气地化特征差异(赵孟军,2002)明显小于整个和田河气田与罗斯 2 井天然气地化特征的差异(朱心健等,2017),因此玛 8 号和玛 2 号圈闭氦气含量应该更加接近玛 4 号圈闭,而相对高于罗斯 2 井(0.26%)。

和田河气田玛 4 号圈闭石炭系生屑灰岩段(C⁶)气藏天然气探明储量为 157.99×10⁸ m³,氦气平均含量 0.34%,折算氦气探明储量 0.5372×10⁸ m³。玛 4 号圈闭石炭系底砾岩和奥陶系潜山气藏探明储量为 222.43×10⁸ m³,氦气平均含量 0.31%,折算氦气探明储量 0.689 5×10⁸ m³。由于氦气分子直径明显小于甲烷,氦气扩散能力更强,导致位于上部的石炭系生屑灰岩段(C⁶)气藏氦气含量(平均 0.34%)高于石炭系底砾岩和奥陶系潜山气藏(平均 0.31%)。同理,位于石炭系生屑灰岩段(C⁶)气藏之上的卡拉沙依组砂岩气藏,氦气含量可能更高。石炭系卡拉沙依组砂岩气藏天然气探明储量为 59.48×10⁸ m³,其折算氦气探明储量应不少于 0.202 2×10⁸ m³。由以上数据可知,玛 4 号圈闭氦气探明储量不少于 1.428 9×10⁸ m³。

据前文所述,罗斯 2 井和和田河气田一起经历了自西向东的天然气充注过程,对于玛 4 号圈闭,玛 2 号圈闭和玛 8 号圈闭受原油裂解气稀释作用更加明显,氦气含量应稍低于玛 4 号圈闭,但应相对明显高于罗斯 2 井氦气含量。玛 2 号圈闭和玛 8 号圈闭石炭系生屑灰岩段(C⁶)气藏天然气探明储量总计 167.45×10⁸ m³,其氦气含量取玛 4 号圈闭石炭系生屑灰岩段(C⁶)氦气平均含量(0.34%)与罗斯 2 井氦气含量(0.26%)的中间值(0.30%),折算氦气探明储量 0.502 4×10⁸ m³。玛 8 号圈闭奥陶系潜山气藏天然气探明储量 9.59×10⁸ m³,其氦气含量取玛 4 号圈闭石炭系底砾岩段(C⁸)与奥陶系潜山(O)氦气平均含量(0.31%)与罗斯 2 井氦气含量(0.26%)的中间值(0.29%),折算氦气探明储量 0.027 8×10⁸ m³。

和田河气田不同气藏氦气探明储量累加,折算氦气总探明储量为 1.959 1×10⁸ m³。按照 Dai *et al.* (2017)对氦气田的划分标准(表 7),和田河气田为我国首个特大型富氦氦气田。和田河气田天然气可采储量 382.17×10⁸ m³(周新源等,2006),采收率为 61.95%,折探明可采氦气储量 1.213 7×10⁸ m³,按照前文中氦气 55.8 元/m³ 单价计算,和田河气田氦气总效益为 67.72 亿元。

在塔西南麦盖提斜坡及周缘已发现多个油气田(藏):和田河气田、乌山气藏、罗斯 2 气藏、亚松迪凝析气田、巴什托普油田、玉北 1 油田、玛东 3 油藏等。本研究发现和和田河气田和罗斯 2 气藏富氦,推测位于两者之间的乌山气藏富氦可能性非常大。在亚松迪凝析气田、巴什托普油田中曾检测到较高含量氦气(常兴浩和宋凯,1997;余琪祥等,2013),推测玉北油田和玛东 3 油藏伴生气富氦可能性也较大。位于塔西南喀什凹陷北缘的阿克莫木气田也具有发现工业氦气的前景。综上所述,塔西南地区已经展现出整体富氦的前景。

表 7 氦气田工业划分标准

Table 7 Industrial classification of helium gas fields

氦气储量 (10 ⁶ m ³)	规模分类	氦气含量 (体积%)	含量分类
≥100	特大型气田	≥0.500	特富氦气田
50~100	大型气田	0.150~0.500	富氦气田
25~50	中型气田	0.050~0.150	含氦气田
5~25	小型气田	0.005~0.050	贫氦气田
<5	特小型气田	<0.005	特贫氦气田

注:标准据 Dai *et al.*(2017)。

4 我国氦气资源勘探开发的启示

4.1 加快建设和田河气田氦气分离、液化装置

2017 年,和田河气田年产天然气约 $2.7 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中氦气产量 $81 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。由于缺少氦气分离装置,氦气相关经济损失达 4 520 万元。随着和田河周缘天然气的后续探明、投产,由于氦气浪费导致的经济损失会更大。因此,本文建议尽快在和田河气田建立氦气分离、液化装置。

中石油西南油气田分公司曾于 2010 年投资 1.143 亿元建立了处理天然气规模 $1.46 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{年}$ 的提氦装置。经对照、粗略折算,和田河气田投资 2.11 亿元可建成 $2.7 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{年}$ 规模的天然气提氦装置。德国林德集团于 2010 年投资 0.413 亿美元在澳大利亚建成了可分离、液化氦气 $450 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{年}$ 的装置,经对照、粗略折算,建设 $86.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{年}$ 产能需投资 5 446 万元。以上分析说明,按照 2010 年物价标准,建设和田河气田氦气分离、液化装置的费用约为 2 亿元或更少。

4.2 在全国开展氦气资源系统调查

氦气作为一种战略资源,由于其在国防军工和高科技产业发展中具有不可替代的作用,在特殊国际形势下,我国氦气进口可能受到明显制约和影响。为保障特殊国际形势下国防安全及国家重大科研试验任务顺利开展,建议尽快论证建设“塔里木盆地氦气战略储备基地”的可行性。目前,塔西南地区已经展现了整体含氦、富氦的轮廓,塔北和塔中也显示出整体含氦、局部富氦的前景,这将为建设“塔里木盆地氦气战略储备基地”提供充分的物质基础。

建议在全国各大含油气盆地或含氦地区开展氦气资源系统调查与评价,将氦气资源评价融入到日常油气勘探开发过程中,建立严格、规范的含氦样品取样流程和标准,加强天然气组分中氦气的检测、分析。

4.3 加强氦气成藏理论研究

我国氦气资源形成条件、赋存机理、富集规律研究薄弱,总体规模不清,难于科学决策。建议通过开展和田河气田、威远气田等典型含氦气田解剖,加强氦气成因机理、聚集控制因素及富集规律研究,明确氦气资源成藏主控因素,并在全国推广,为含氦天然气的综合勘探利用、为我国氦气资源安全做出贡献。

致谢:感谢塔里木油田公司雷志云、袁征、刘敬东、袁逸军和中国石油勘探开发研究院李洪辉在样品采集上给予的支持和帮助。感谢匿名审稿专家和编委成员对本文提出的宝贵意见!

References

- Cao, J., Liu, C. L., Ma, Y. S., et al., 2016. Geochemical Characteristics and Genesis of Shale Gas for Carboniferous Marine Continental Transitional Facies Coal Measure Strata in Eastern Qaidam Basin. *Earth Science Frontiers*, 23(5): 158–166 (in Chinese with English abstract).
- Cao, Z. X., Che, Y., Li, J. L., et al., 2001. Accumulation Analysis on a Helium-Enriched Gas Reservoir in Huagou Area, the Jiyang Depression. *Petroleum Geology & Experiment*, 23(4): 395–399 (in Chinese with English abstract).
- Chang, X. H., Song, K., 1997. Analysis of Reservoir-Forming Mechanism of High-He Pool in the Carboniferous of Xiaohaizi Formation of Bashitou Structure. *Natural Gas Industry*, 17(2): 18–20 (in Chinese with English abstract).
- Dai, J. X., 2003. Pool-Forming Periods and Gas Sources of Weiyuan Gasfield. *Petroleum Geology & Experiment*, 25(5): 473–480 (in Chinese with English abstract).
- Dai, J. X., Dai, C. S., Song, Y., et al., 1994. Geochemical Character, Carbon and Helium Isotopic Compositions of Natural Gas from Hot Springs of Some Areas of China. *Science in China (Series B)*, 24(4): 426–433 (in Chinese).
- Dai, J. X., Ni, Y. Y., Qin, S. F., et al., 2017. Geochemical Characteristics of He and CO_2 from the Ordos (Cratonic) and Bohai Bay (Rift) Basins in China. *Chemical Geology*, 469: 192–213. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.02.011>
- Dai, J. X., Pei, X. G., Qi, H. F., 1992. *Natural Gas Geology in China (Vol 1)*. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Dai, J. X., Song, Y., Dai, C. S., et al., 1995. *Inorganic Origin Gas and Its Forming Conditions in Eastern China*. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Deng, S. L., 1995. He Measurement and Its Application in Oil and Gas Exploration in Northern Part of Tarim Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 22(5): 30–34 (in Chinese with English abstract).
- Du, J. G., Liu, W. H., 1991. Isotopic Geochemistry of Helium and Argon in Natural Gas in Sanshui Basin. *Natural Gas Geoscience*, 2(6): 283–285 (in Chinese).
- Feng, W. F., 1989. Analysis of Economic Benefit of Extracting Helium from Weiyuan Natural Gas. *Natural Gas Industry*, 9(3): 69–71 (in Chinese with English abstract).
- Feng, Z. H., Huo, Q. L., Wang, X., 2001. A Study of Helium Reservoir Formation Characteristic in the North Part of Songliao Basin. *Natural Gas Industry*, 21(5): 27–30 (in Chinese with English abstract).
- Gu, Z. D., Zhai, X. F., Jiang, X. F., et al., 2013. Geochemical Characteristics and Tectonic Environment of Basal Granite in Weiyuan Structure, Sichuan Basin. *Earth Science*, 38(S1): 31–42 (in Chinese with English abstract).

- Guo, N. F., You, X. Z., Xu, J., 1999. Geological Character of Xiqiao Helium-Bearing Gas Field and Prospecting of Helium-Bearing Natural Gas in North Jiangsu Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 26(5): 24—26 (in Chinese with English abstract).
- Hamak, J. E., 2017. Mineral Commodity Summaries 2017, Helium. United States Geological Survey, Washington D.C., 78—79.
- Hu, A. P., Zhou, Q. H., 2006. The Largest Gas Field in the World—North-South Pars Gas Field. *Natural Gas Geoscience*, 17(6): 753—759 (in Chinese with English abstract).
- Huang, F. T., 1999. Oil Gas & Water Geochemistry in Song Liao Basin. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Li, Y. H., Lu, J. C., Li, J. C., et al., 2011. Distribution of the Helium-Rich Wells and Helium Derivation in Weihe Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(S1): 47—53 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. H., Wang, X. Y., Han, W., 2016. Mode of Occurrence of Helium in Weihe Basin, Shaanxi Province and Its Significance. *Geological Bulletin of China*, 35(2-3): 372—378 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q. Y., Dai, J. X., Jin, Z. J., et al., 2009. Geochemistry and Genesis of Natural Gas in the Foreland and Platform of the Tarim Basin. *Acta Geologica Sinica*, 83(1): 107—114 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q. Y., Jin, Z. J., Chen, J. F., et al., 2012. Origin of Nitrogen Molecules in Natural Gas and Implications for the High Risk of N₂ Exploration in Tarim Basin, NW China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 81: 112—121. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2011.12.013>
- Liu, Q. Y., Liu, W. H., Xu, Y. C., et al., 2007. Geochemistry of Natural Gas and Crude Computation of Gas-Generated Contribution for Various Source Rocks in Sulige Gas Field, Ordos Basin. *Natural Gas Geoscience*, 18(5): 697—702 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q. Y., Zhu, D. Y., Jin, Z. J., et al., 2017. Effects of Deep CO₂ on Petroleum and Thermal Alteration; The Case of the Huangqiao Oil and Gas Field. *Chemical Geology*, 469: 214—229. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.06.031>
- Lu, J. C., Wei, X. Y., Li, Y. H., et al., 2005. Preliminary Study about Genesis and Pool Formation Conditions of Rich-Helium Type Natural Gas. *Northwestern Geology*, 38(3): 82—86 (in Chinese with English abstract).
- Ni, C. H., Zhou, X. J., Wang, G. S., et al., 2010. Geochemical Characteristics and Genesis of the Natural Gas in Fu County Area, Ordos Basin. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 25(5): 20—24 (in Chinese with English abstract).
- Ni, Y. Y., Dai, J. X., Tao, S. Z., et al., 2014. Helium Signatures of Gases from the Sichuan Basin, China. *Organic Geochemistry*, 74: 33—43. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2014.03.007>
- Shangguan, Z. G., Du, J. K., Zang, W., et al., 1998. Modern Hot Spring Geochemistry at the Tanlu Fault and Jiaoliao Block in Eastern China. *Science China Earth Sciences*, 41(1): 87—94.
- Shangguan, Z. G., Wu, C. Z., 2008. Geochemical Features of Magmatic Gases in the Regions of Dormant Volcanoes in China. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2638—2646 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Chen, J. F., Wang, T. G., et al., 2006. Gas Source Rocks and Gas Genetic Type in Shuangcheng-Taipingchuan Area of Songliao Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 27(3): 16—21 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Zhang, H., Lin, D. C., 2002. Exploration Prospect of CO₂ Gas Reservoir Contained Helium in Wuerxun Depression, Hailar Basin. *Natural Gas Industry*, 22(4): 109—111 (in Chinese).
- Wang, M., Lu, S. F., Wang, W. G., et al., 2017. Gas Migration and Accumulation Modelling in Volcanic Reservoirs, Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin. *Earth Science*, 42(3): 397—409 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.030>
- Wang, X. B., Chen, J. F., Li, Z. S., et al., 2016. Rare Gases Geochemical Characteristics and Gas Source Correlation for Dabei Gas Field in Kuche Depression, Tarim Basin. *Energy Exploration & Exploitation*, 34(1): 113—128. <https://doi.org/10.1177/0144598715623673>
- Wang, X. B., Wei, G. Q., Li, J., et al., 2018. Geochemical Characteristics and Origins of Noble Gases of the Kela 2 Gas Field in the Tarim Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 89: 155—163. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.02.013>
- Wang, Z. M., Wang, Q. H., Zhao, M. J., et al., 2008. Characteristics, Genesis and Accumulation History of Natural Gas in Hetianhe Gasfield, Tarim Basin, China. *Science China Earth Sciences*, 51(S1): 84—95. <https://doi.org/10.1007/s11430-008-5010-4>
- Wei, G. Q., Wang, D. L., Wang, X. B., et al., 2014. Characteristics of Noble Gases in the Large Gaoshiti-Moxi Gas Field in Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 41(5): 585—590. [https://doi.org/10.1016/s1876-3804\(14\)60069-0](https://doi.org/10.1016/s1876-3804(14)60069-0)
- Wei, Y. X., Xu, D. L., Zhou, W. X., et al., 2018. 3.00—2.93 Ga Metamorphic Events Found in the Middle Archaean Granite Complex in Huangling Area, the Core of Yangtze Craton. *Earth Science*, 43(7): 2309—2312 (in Chinese). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.234>

- Wu, Z. T., Liu, X. W., Li, X. F., et al., 2017. The Application of Noble Gas Isotope in Gas-Source Correlation of Yuanba Reservoir, Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 28 (7): 1072—1077 (in Chinese with English abstract).
- Xie, H. W., Chen, X. W., Zhu, M., et al., 2017. Deformation Characteristics, Tectonic Evolution and Their Control on Deep Petroleum Accumulation of Mazhatage Fault Belt in Tarim Basin. *Earth Science*, 42(9): 1578—1589 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.504>
- Xu, S., Nakai, S., Wakita, H., et al., 1995. Helium Isotope Compositions in Sedimentary Basins in China. *Applied Geochemistry*, 10 (6): 643—656. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(95\)00033-x](https://doi.org/10.1016/0883-2927(95)00033-x)
- Xu, S., Zheng, G. D., Wang, X. B., et al., 2014. Helium and Carbon Isotope Variations in Liaodong Peninsula, NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 90: 149—156. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.04.019>
- Xu, S., Zheng, G. D., Zheng, J. J., et al., 2017. Mantle-Derived Helium in Foreland Basins in Xinjiang, Northwest China. *Tectonophysics*, 694: 319—331. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.11.015>
- Xu, Y. C., Fu, J. M., Zheng, J. J., 2000. Origin of Natural Gas and Geosciences of Large and Medium Gas Fields. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Xu, Y. C., Shen, P., Li, Y. C., 1989. The Oldest Gas Pool of China-Weiyuan Sinian Gas Pool, Sichuan Province. *Acta Sedimentologica Sinica*, 7(4): 3—13 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y. C., Shen, P., Liu, W. H., et al., 1998. Geochemistry of Rare Gases in Natural Gases. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Xue, H. F., Zhu, X. G., Wang, R. S., et al., 2004. The Discovery and Significance of Rich Helium Natural Gas Resource in Xi'an Geothermic Field. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 34(6): 751—754 (in Chinese with English abstract).
- Yang, C., Tao, S. Z., Hou, L. H., et al., 2014. Accumulative Effect of Helium Isotope in Gas Volcanic Reservoirs in Songliao Basin. *Natural Gas Geoscience*, 25 (1): 109—115 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Q. X., Shi, Z., Wang, D. G., et al., 2013. Analysis on Helium Enrichment Characteristics and Reservoir Forming Conditions in Northwest Tarim Basin. *Northwestern Geology*, 46 (4): 215—222 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Y., 2010. Origin of Natural Gas and Natural Gas Accumulation from Middle-Shallow Layer in South Songzhan (Dissertation). Daqing Petroleum Institute, Daqing (in Chinese with English abstract).
- Zhang, F. L., Sun, Q. B., Wang, X. Y., et al., 2012. Evaluation of Water Soluble Helium Resources in Weihe Basin. *Journal of Geomechanics*, 18(2): 195—202 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. L., Sun, Q. G., Liu, Y. Y., et al., 2014. Global Market of Helium and Suggestion for Helium Supply Security of China. *Low Temperature and Specialty Gases*, 32 (3): 1—5 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W., Li, Y. H., Wang, L., et al., 2018. The Analysis of Helium Accumulation Conditions and Prediction of Helium Resource in Weihe Basin. *Natural Gas Geoscience*, 29(2): 236—244 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. P., Li, Y. H., Lu, J. C., et al., 2016. The Discovery and Origin of Helium-Rich Gas on the Northern Margin of the Qaidam Basin. *Geological Bulletin of China*, 35 (2—3): 364—371 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. S., 1992. Helium in Natural Gas in Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 3(4): 1—8 (in Chinese).
- Zhao, H. X., Zhang, Y., Li, C. L., 2012. Analysis of Supply and Price System for Global Helium Gas. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 10(6): 91—96 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, M. J., 2002. Special Source of the Natural Gases of the Hotan River Gas Field and the Origin of Its Non-Hydrocarbon Gases. *Geological Review*, 48(5): 480—486 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, L. P., Feng, Z. J., Xu, S. G., et al., 1996. CO₂ Gas Pools from the Earth Interior in Jiyang Depression. *Chinese Science Bulletin*, 41(8): 663—666.
- Zhou, X. Y., Yang, H. J., Li, Y., et al., 2006. Cases of Discovery and Exploration of Marine Fields in China (Part 7): Hotanhe Gas Field in Tarim Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 11(3): 55—62 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X. J., Chen, J. F., He, L. W., et al., 2017. Geochemical Characteristics and Source Correlation of Hydrocarbons in the Well Luosi 2 of Maigaiti Slope, Tarim Basin, China. *Natural Gas Geoscience*, 28(4): 566—574 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹军, 刘成林, 马寅生, 等, 2016. 柴达木盆地东部石炭系海陆过渡相煤系页岩气地球化学特征及成因. *地学前缘*, 23 (5): 158—166.
- 曹忠祥, 车燕, 李军亮, 等, 2001. 济阳坳陷花沟地区高含 He 气藏成藏分析. *石油实验地质*, 23(4): 395—399.
- 常兴浩, 宋凯, 1997. 巴什托构造石炭系小海子组高氦气藏成藏机理浅析. *天然气工业*, 17(2): 18—20.
- 戴金星, 2003. 威远气田成藏期及气源. *石油实验地质*, 25(5): 473—480.

- 戴金星,戴春森,宋岩,等,1994.中国一些地区温泉中天然气的地球化学特征及碳、氮同位素组成.中国科学(B辑),24(4):426-433.
- 戴金星,裴锡古,戚厚发,1992.中国天然气地质学(卷一).北京:石油工业出版社.
- 戴金星,宋岩,戴春森,等,1995.中国东部无机成因气及其气藏形成条件.北京:科学出版社.
- 邓树立,1995.氦气测量及其在塔里木盆地北部油气勘探中的应用.石油勘探与开发,22(5):30-34.
- 杜建国,刘文汇,1991.三水盆地天然气中的氦和氩同位素地球化学研究.天然气地球科学,2(6):283-285.
- 封万芳,1989.威远天然气提氦的经济效益分析.天然气工业,9(3):69-71.
- 冯子辉,霍秋立,王雪,2001.松辽盆地北部氦气成藏特征研究.天然气工业,21(5):27-30.
- 谷志东,翟秀芬,江兴福,等,2013.四川盆地威远构造基底花岗岩地球化学特征及其构造环境.地球科学,38(S1):31-42.
- 郭念发,尤孝忠,徐俊,1999.苏北盆地溪桥含氦天然气地质特征及含氦天然气勘探前景.石油勘探与开发,26(5):24-26.
- 胡安平,周庆华,2006.世界上最大的天然气田——北方—南帕斯气田.天然气地球科学,17(6):753-759.
- 黄福堂,1999.松辽盆地油气水地球化学.北京:石油工业出版社.
- 李玉宏,卢进才,李金超,等,2011.渭河盆地富氦天然气井分布特征与氦气成因.吉林大学学报(地球科学版),41(S1):47-53.
- 李玉宏,王行运,韩伟,2016.陕西渭河盆地氦气资源赋存状态及其意义.地质通报,35(2-3):372-378.
- 刘全有,戴金星,金之钧,等,2009.塔里木盆地前陆区和台盆区天然气的地球化学特征及成因.地质学报,83(1):107-114.
- 刘全有,刘文汇,徐永昌,等,2007.苏里格气田天然气运移和气源分析.天然气地球科学,18(5):697-702.
- 卢进才,魏仙祥,李玉宏,等,2005.汾渭盆地富氦天然气成因及成藏条件初探.西北地质,38(3):82-86.
- 倪春华,周小进,王果寿,等,2010.鄂尔多斯盆地富县地区天然气地球化学特征及其成因.西安石油大学学报(自然科学版),25(5):20-24.
- 上官志冠,武成智,2008.中国休眠火山区岩浆来源气体地球化学特征.岩石学报,24(11):2638-2646.
- 王杰,陈践发,王铁冠,等,2006.松辽盆地双城—太平川地区天然气成因类型及气源.石油学报,27(3):16-21.
- 王江,张宏,林东成,2002.海拉尔盆地乌尔逊含氦 CO₂ 气藏勘探前景.天然气工业,22(4):109-111.
- 王民,卢双舫,王文广,等,2017.火山岩储层天然气运聚成藏模拟:以徐家围子断陷深层为例.地球科学,42(3):397-409.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.030>
- 魏运许,徐大良,周文孝,等,2018.扬子克拉通核部黄陵地区中太古代花岗岩杂岩中发现 3.00~2.93 Ga 变质事件.地球科学,43(7):2309-2312.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.234>
- 佺宗涛,刘兴旺,李孝甫,等,2017.稀有气体同位素在四川盆地元坝气藏气源对比中的应用.天然气地球科学,28(7):1072-1077.
- 谢会文,陈新伟,朱民,等,2017.塔里木盆地玛扎塔格断裂带变形特征、演化及对深层油气成藏的控制.地球科学,42(9):1578-1589.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.504>
- 徐永昌,傅家谟,郑建京,2000.天然气成因及大中型气田形成的地学基础.北京:科学出版社.
- 徐永昌,沈平,李玉成,1989.中国最古老的气藏——四川威远震旦纪气藏.沉积学报,7(4):3-13.
- 徐永昌,沈平,刘文汇,等,1998.天然气中稀有气体地球化学.北京:科学出版社.
- 薛华锋,朱兴国,王润三,等,2004.西安地热田伴生富氦天然气资源的发现及意义.西北大学学报(自然科学版),34(6):751-754.
- 杨春,陶士振,侯连华,等,2014.松辽盆地火山岩储层天然气藏 He 同位素组成累积效应.天然气地球科学,25(1):109-115.
- 余琪祥,史政,王登高,等,2013.塔里木盆地西北部氦气富集特征与成藏条件分析.西北地质,46(4):215-222.
- 于勇,2010.松辽盆地宋站南地区中浅层天然气来源与成藏条件(硕士学位论文).大庆:大庆石油学院.
- 张福礼,孙启邦,王行运,等,2012.渭河盆地水溶氦气资源评价.地质力学学报,18(2):195-202.
- 张亮亮,孙庆国,刘岩云,等,2014.氦气全球市场及我国氦气安全保障的建议.低温与特气,32(3):1-5.
- 张文,李玉宏,王利,等,2018.渭河盆地氦气成藏条件分析及资源量预测.天然气地球科学,29(2):236-244.
- 张云鹏,李玉宏,卢进才,等,2016.柴达木盆地北缘富氦天然气的发现——兼议成藏地质条件.地质通报,35(2-3):364-371.
- 张子枢,1992.四川盆地天然气中的氦.天然气地球科学,3(4):1-8.
- 赵荟鑫,张雁,李超良,2012.全球氦气供应和价格体系分析.化学推进剂与高分子材料,10(6):91-96.
- 赵孟军,2002.塔里木盆地和田河气田天然气的特殊来源及非烃组分的成因.地质评论,48(5):480-486.
- 周新源,杨海军,李勇,等,2006.中国海相油气田勘探实例之七塔里木盆地和田河气田的勘探与发现.海相油气地质,11(3):55-62.
- 朱心健,陈践发,贺礼文,等,2017.塔里木盆地麦盖提斜坡罗斯2井油气地球化学特征及油气源分析.天然气地球科学,28(4):566-574.