

DOI: 10.12401/j.nwg.2022042

## 东北地区氦气成藏条件与资源前景分析

张健<sup>1</sup>, 张海华<sup>1,2,\*</sup>, 贺君玲<sup>3</sup>, 卞雄飞<sup>1</sup>, 张德军<sup>1</sup>, 陈树旺<sup>1</sup>, 孙雷<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 2. 中国科学院壳幔物质与环境重点实验室, 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026; 3. 中国石油吉林油田分公司勘探部, 吉林 松原 138000)

**摘要:** 氦气作为重要的稀有战略资源越来越受到关注和重视。东北地区氦气资源调查研究程度较低, 资源状况不清, 富集规律不明。为了认识东北地区氦气资源前景, 本文通过对东北地区主要盆地氦气资源调查研究进展与成果进行系统的梳理、分析, 结合对松辽、铁法等盆地天然气田含氦情况的调查研究, 总结了东北地区氦气富集成藏地质条件。研究认为, 东北地区氦气资源主要分布在松辽盆地、海拉尔盆地、辽河盆地、铁法盆地等重点盆地, 氦气载体类型主要有烃类、二氧化碳和地层水等, 氦气成因类型为壳-幔混合型; 东北地区广泛发育的印支期和燕山期花岗岩提供了丰富的氦气来源, 深大断裂的发育为氦气的运移聚集提供了必要的通道, 良好的保存条件有利于氦气的富集与成藏。

**关键词:** 资源前景; 氦气; 分布特征; 成因分析; 成藏条件; 松辽盆地; 东北地区

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)01-0117-12

### Analysis of Helium Accumulation Conditions and Resource Prospect in Northeast China

ZHANG Jian<sup>1</sup>, ZHANG Haihua<sup>1,2,\*</sup>, HE Junling<sup>3</sup>, BIAN Xiongfei<sup>1</sup>, ZHANG Dejun<sup>1</sup>, CHEN Shuwang<sup>1</sup>, SUN Lei<sup>1</sup>

(1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, Liaoning, China; 2. CAS Key Laboratory of Crust-Mantle Materials and Environments, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China; 3. China National Petroleum Corporation Jilin Oilfield Company, Songyuan 138000, Jilin, China)

**Abstract:** As an important and rare strategic resource, helium has attracted more and more attention. Helium resources are abundant in Northeast China, but the degree of investigation is low, the resource status is unclear, and the enrichment is unknown. Based on the systematical analysis of the existing progress and achievements of helium resources in the main basins of Northeast China, combined with the investigation and research of helium content in natural gas fields in Songliao and Tiefa basin, this paper summarizes the geological conditions of helium accumulation in Northeast China and analyzes the prospects of helium resources. It is considered that the helium resources in Northeast China are mainly distributed in Songliao basin, Hailaer basin, Liaohe basin and Tiefa basin. The main types of helium carrier gas are hydrocarbons, carbon dioxide and water-soluble gas. The main genetic type of helium resources is crust-mantle mixed type, which is dominated by crust source. The widely developed Indosinian and Yanshanian granites in Northeast China provide abundant helium sources, and the development of deep faults provides the necessary channels for the migration and accumulation of helium.

收稿日期: 2022-09-28; 修回日期: 2022-11-22; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 中国地质调查局项目“东北地区重要盆地多能源资源地质调查”(DD20221664)资助。

作者简介: 张健(1980-), 男, 正高级工程师, 硕士, 主要从事油气基础地质调查研究。E-mail: 48487885@qq.com。

\* 通讯作者: 张海华(1986-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事岩石学、大地构造学研究。E-mail: zhanghaihua311@163.com。

The good preservation conditions are conducive to the enrichment and accumulation of helium, and the prospect of helium exploration in Northeast China is promising.

**Keywords:** resource prospect; Helium; distribution characteristics; cause analysis; accumulation conditions; Songliao basin; Northeast China

近年来,氦气作为重要的稀有战略资源受到了前所未有的关注和重视,国内氦气调查、研究工作迅速展开,形成了新一轮的“氦气热”(李玉宏等, 2022a, 2022b)。氦气具有独特的理化性质,在航天航空、国防、医学、核工业、低温超导、深海潜水等高科技领域具有广泛的应用,因而具有重要的工业价值,被称为天然气中的“黄金气体”(Anderson, 2018; 李玉宏等, 2018)。当前调查与研究显示,氦气资源全球分布不均,美国等国家在全球氦气供应有绝对的话语权,中国氦气匮乏,氦气的提纯成本较高,自产氦气只能满足必须保障用户所需,绝大部分氦气依赖于进口(张亮亮等, 2014)。

近年来随着国际环境深刻复杂的变化,氦气垄断国家对于中国有明确的氦气禁运政策(张哲等, 2022),俄乌冲突进一步加剧全球氦气供应短缺,中国所面临的氦气资源安全形势非常严峻。在此背景下中国的诸多学者加强了对国内氦气资源状况、分布及成藏特征的研究(李玉宏等, 2022b),特别是在西北地区渭河盆地(李玉宏等, 2011; 张文等, 2018)、柴达木盆地(张云鹏等, 2016; 杨振宁等, 2018; 张晓宝等, 2020)、塔里木盆地(陶小晚等, 2019)、鄂尔多斯盆地(刘超等, 2021; 彭威龙等, 2022)、华北地区晋中盆地(李济远等, 2022)、西南地区四川盆地(秦胜飞等, 2022a, 2022b; 陈新军等, 2022)等均发现了富氦天然气藏或水溶气藏,并对氦气成因及成藏条件进行了有益的探讨。与之相比,东北地区的氦气资源

研究虽起步较早,但由于未受到足够的重视,仅在松辽盆地北部开展过氦气分布、成藏控制因素和勘探前景的初步研究(冯子辉等, 2001),整体上东北地区氦气资源调查及研究程度较低,成因及富集成藏规律认识不足,资源家底不清。笔者在对东北地区重要盆地氦气资源调查研究的基础上,梳理了东北地区氦气资源分布特征,探讨了氦气成因及富集成藏条件,讨论了东北地区氦气资源前景,为东北地区进一步的氦气工作部署和氦气资源研究提供依据和基础资料。

## 1 天然气样品测试分析

本次研究所采集的气体均来自常规天然气和煤层气生产井。在松辽盆地南部天然气开发区长岭气田采集气样 8 件、德惠气田采集气样 13 件、英台气田采集气样 7 件、伏龙泉气田采集气样 4 件、王府气田采集气样 6 件,在铁法盆地煤层气开发气田采集气样 14 件,总计 50 余口井的天然气样品 52 件,开展了天然气组分、氦气含量和氦气同位素测试分析。氦气含量和同位素测试分析在北京核工业地质研究院重点实验室采用 Nobleless SFT 型稀有气体质谱仪完成,天然气组分测试分析在东北矿产资源监督检测中心采用岛津 2010PLUS 型气相色谱仪完成,分析测试结果见表 1。此外,笔者还收集了松辽盆地北部、海拉尔盆地、辽河盆地等多个氦气含量数据用于综合研究

表 1 研究区天然气组分、氦气含量及同位素特征表

Tab. 1 Natural gas composition, helium content and isotope characteristics in the study area

样品号	研究区(代号)	He( $10^{-6}$ )	$^3\text{He}/^4\text{He}$ ( $10^{-6}$ )	R/Ra	甲烷 (%)	乙烷 (%)	丙烷 (%)	异丁烷 (%)	正丁烷 (%)	异戊烷 (%)	正戊烷 (%)	CO <sub>2</sub> (%)
22HQ01		78.27	0.424 7	0.303 3	94.11	0.7	0.04	—	—	—	—	0.33
22HQ02		523.63	3.183 8	2.274 2	70.88	1.16	0.09	—	0.01	—	—	20.41
22HQ03		509.02	3.073 7	2.195 5	67.49	1.12	0.04	—	0.01	—	—	22.52
22HQ04	长岭工区(CL)	430.40	3.051 9	2.179 9	64.68	1.07	0.04	0.01	—	—	—	24.01
22HQ05		431.28	2.376 3	1.697 3	62.18	1.08	0.04	—	0.01	0.01	—	27.86
22HQ06		525.69	3.347 6	2.391 1	64.83	1.07	0.04	—	—	—	—	24.03
22HQ07		286.50	3.176 0	2.268 6	56.4	0.92	0.03	—	0.01	—	—	32.62
22HQ08		604.10	3.178 2	2.270 1	83.86	1.5	0.06	—	0.01	—	—	6.18

续表 1

样品号	研究区(代号)	He( $10^{-6}$ )	$^3\text{He}/^4\text{He}$ ( $10^{-6}$ )	R/Ra	甲烷 (%)	乙烷 (%)	丙烷 (%)	异丁烷 (%)	正丁烷 (%)	异戊烷 (%)	正戊烷 (%)	CO <sub>2</sub> (%)
22HQ09		144.47	1.054 5	0.753 2	85.42	6.75	1.29	0.24	0.17	0.06	0.03	0.61
22HQ10		152.22	1.078 0	0.770 0	85.53	8.13	1.95	0.36	0.3	0.11	0.06	0.54
22HQ11		144.36	1.064 7	0.760 5	82.51	8.7	2.2	0.41	0.32	0.1	0.05	0.55
22HQ12		162.17	0.952 0	0.680 0	84.8	8.39	2.65	0.54	0.41	0.14	0.07	0.96
22HQ13		10.26	1.646 1	1.175 8	84.66	6.16	1.65	0.24	0.25	0.08	0.04	1.28
22HQ14		6.20	1.212 9	0.866 3	85.41	2.09	0.23	0.02	0.02	0.01	0	8.68
22HQ15	德惠工区(DH)	166.75	0.292 8	0.209 1	88.34	4.77	1.29	0.23	0.21	0.08	0.03	1.37
22HQ16		148.45	1.275 0	0.910 7	83.64	8.21	2.01	0.36	0.29	0.1	0.04	0.41
22HQ17		172.13	0.467 5	0.334 0	85.34	7.98	2.26	0.39	0.4	0.15	0.08	—
22HQ18		196.95	0.838 9	0.599 2	68.9	5.38	1.77	0.29	0.35	0.12	0.07	—
22HQ19		236.64	1.876 0	1.340 0	60.98	5.51	2.16	0.5	0.49	0.21	0.08	0.52
22HQ20		192.57	0.446 0	0.318 6	80	8.99	3.08	0.59	0.66	0.23	0.14	—
22HQ21		20.19	0.684 3	0.488 8	84.08	4.29	1.27	0.25	0.19	0.08	0.02	0.13
22HQ22		16.34	1.832 6	1.309 0	—	—	—	—	—	—	—	—
22HQ23		264.07	1.792 0	1.280 0	—	—	—	—	—	—	—	—
22HQ24		265.13	1.948 8	1.392 0	—	—	—	—	—	—	—	0.04
22HQ25	英台工区(YT)	108.91	0.474 6	0.339 0	—	—	—	—	—	—	—	0.28
22HQ26		126.05	0.471 8	0.337 0	—	—	—	—	—	—	—	0.26
22HQ27		240.42	1.849 4	1.321 0	—	—	—	—	—	—	—	0.84
22HQ28		314.11	2.119 6	1.514 0	—	—	—	—	—	—	—	9.41
22HQ29		22.30	1.122 0	0.801 4	89.59	1.07	0.27	0.09	0.06	0.03	0.02	2.09
22HQ30	伏龙泉工区(FLQ)	554.74	0.330 1	0.235 8	61.63	0.11	0.02	0.01	—	—	—	—
22HQ31		497.43	0.061 5	0.043 9	89.4	3.5	1.1	0.21	0.21	0.05	0.04	—
22HQ32		360.00	0.322 0	0.230 0	83.09	4.44	1.37	0.27	0.32	0.09	0.08	0.15
22HQ33		238.60	1.834 0	1.310 0	—	—	—	—	—	—	—	0.02
22HQ34		119.40	0.912 8	0.652 0	—	—	—	—	—	—	—	0.03
22HQ35	王府工区(WF)	326.03	0.420 0	0.300 0	—	—	—	—	—	—	—	0.02
22HQ36		10.90	1.681 4	1.201 0	—	—	—	—	—	—	—	0.04
22HQ37		224.30	1.048 6	0.749 0	—	—	—	—	—	—	—	0.41
22HQ38		243.48	2.394 0	1.710 0	—	—	—	—	—	—	—	0.18
22HQ39		338.42	0.639 8	0.457 0	83.73	0.45	—	—	—	—	—	—
22HQ40		91.44	0.719 6	0.514 0	91.23	0.52	—	—	—	—	—	—
22HQ41		200.95	0.502 6	0.359 0	84.49	0.62	—	—	—	—	—	—
22HQ42		199.50	0.490 0	0.350 0	92.47	0.61	—	—	—	—	—	—
22HQ43		219.36	0.508 2	0.363 0	88.13	0.43	—	0.01	—	—	—	—
22HQ44		920.10	0.481 6	0.344 0	93.71	0.61	—	—	—	—	—	—
22HQ45	铁法盆地(TF)	1 062.18	0.473 2	0.338 0	95.08	0.36	—	—	—	—	—	—
22HQ46		207.46	0.477 4	0.341 0	91.35	0.51	0.01	—	—	—	—	—
22HQ47		149.68	0.562 8	0.402 0	88.91	0.72	—	—	—	—	—	—
22HQ48		135.51	0.506 8	0.362 0	—	—	—	—	—	—	—	—
22HQ49		236.71	0.579 6	0.414 0	81.05	0.5	—	—	—	—	—	—
22HQ50		468.67	6.190 8	4.422 0	93.25	0.38	0.01	—	—	—	—	—
22HQ51		199.63	0.450 3	0.321 7	89.83	0.6	0.01	0.01	—	—	—	—
22HQ52		276.72	0.459 2	0.328 0	91.74	0.51	—	—	—	—	—	—

分析。

## 2 氦气资源分布特征

世界上目前还没有发现纯的氦气藏,氦气一般多与天然气、二氧化碳等伴生,再者以水溶气的形式溶解在水中。绝大多数天然气藏中氦气的含量低于0.05%,一般称为贫氦气藏,而氦气含量大于0.1%的天然称称之为富氦天然气藏(徐永昌等,1996a,1996b;张明升等,2014;陈践发等,2021)。东北地区氦气分

布较广泛(图1),在松辽、海拉尔、辽河、铁法等盆地或地区都发现了具有工业价值的氦气资源。

### 2.1 松辽盆地

松辽盆地是中国大型中生代陆相沉积盆地,也是世界上最大的典型陆相含油气沉积盆地之一,为中国重要的能源资源产地,具有丰富的烃类气、二氧化碳、氦气、地热伴生气等天然气资源,为氦气资源富集提供了良好的载体条件。

#### 2.1.1 松辽盆地北部

松辽盆地北部氦气资源调查程度较高,王天昊等

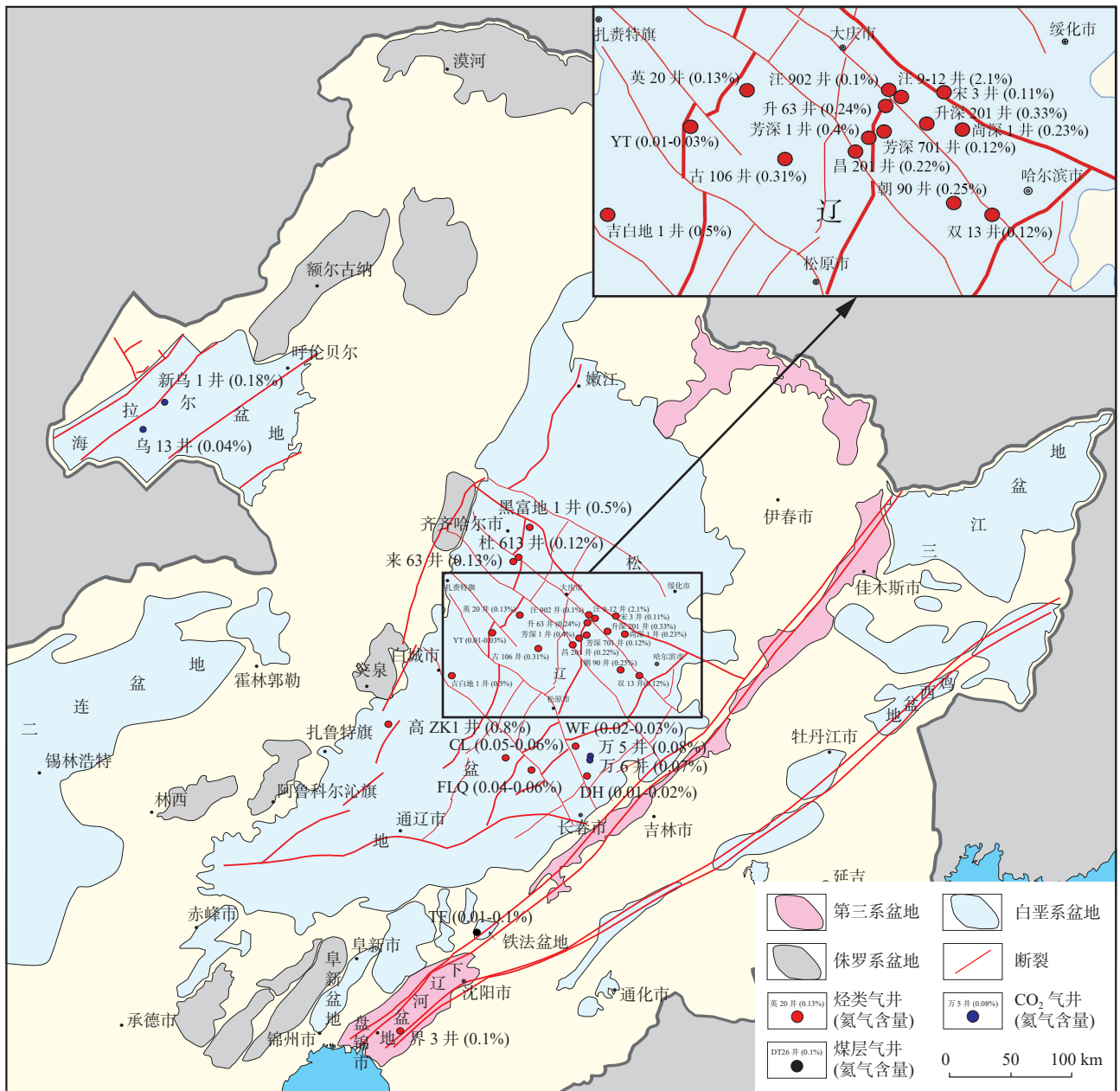


图1 东北地区氦气异常井分布图

Fig. 1 Distribution map of wells containing helium gas in Northeast China

(2020)对360个天然气样品进行了含氦分析,大部分地区氦气含量低于0.05%,少部分区块氦气含量为0.05%~0.08%,部分井氦气资源含量达到了0.1%以上。虽然本次分析样品数量较大,但并未提供高含氦气井产出层位及分布信息。冯子辉等(2001)对松辽盆地北部天然气氦含量进行了统计,有30多口井天然气含氦量大于0.1%,其含量一般为0.102%~0.404%,最高达2.104%;气藏的埋深一般为589.6~3630 m,与盆地内天然气主要产出深度相一致,由上至下,氦气资源含量呈增大的趋势。黄福堂、王杰等对松辽盆地北部氦气富集区进行了研究,主要分布在朝阳沟-长春岭地区、明水地区、汪家屯-宋站-羊草地区、江桥地区、英20井区,氦气含量大多为0.01%~0.1%(黄福堂等,2000),其中五站、太平庄地区11口井氦气含量为0.1%~0.2%(王杰等,2006)。此外,松辽盆地北部五大连池、拜泉等地区地热伴生气中也发现了含氦气异常显示。

#### 2.1.2 松辽盆地南部

本次在松辽盆地南部5个常规天然气开发气田中共采集天然气样品38件开展含氦气量筛查,其中长岭气田8件天然气样品中大部分样品氦气含量为0.04%~0.06%,伏龙泉气田4件样品中大部分样品氦气含量为0.04%~0.06%,王府气田6件样品中大部分样品氦气含量为0.02%~0.03%,英台气田7件样品中大部分样品氦气含量为0.01%~0.03%,德惠气田13件样品中大部分样品氦气含量为0.01%~0.02%。总体来看本次采集的松辽盆地南部气田氦气含量大多低于0.05%,但所采集井大部分为高产天然气井,氦气总体资源量仍然可观。盆地南部万金塔二氧化碳气田氦气含量较高,万5和万6井等二氧化碳气井中含氦量可达0.07%~0.08%(徐永昌等,1996a,1996b)。陈新军对松辽盆地南部氦气资源量进行了研究,发现多口氦气含量高达0.111%~0.209%的天然气井,一般为烃类或二氧化碳的伴生气,估算氦气资源量约在1亿m<sup>3</sup>以上(陈新军,2021)。在松辽盆地西部斜坡区中国地质调查局沈阳地质调查中心实施的3口地质调查井在水溶气中发现了氦气显示,其中高ZK1井氦含量为0.8%,吉白地1井氦含量为0.5%,黑富地1井氦含量为0.5%(陈树旺等,2021)。总体来看,松辽盆地具有丰富的氦气资源,多个天然气生产井中氦气含量可达0.05%以上,盆地北部氦气含量高于南部,勘探前景好,但缺乏系统的调查研究,导致盆地整体资

源量不清,值得深入调查研究。

#### 2.2 海拉尔盆地

海拉尔盆地是在古生代碰撞造山带之上发展起来的中新生代陆相盆地。海拉尔盆地氦气资源主要是作为二氧化碳气田的伴生气存在,海拉尔盆地氦气主要分布在乌尔逊断陷苏仁诺尔和巴彦塔拉构造中,其中苏仁诺尔构造带氦含量较高,而巴彦塔拉构造带氦含量较低(王江等,2002)。在乌尔逊地区的11口二氧化碳气井中均有氦气发现,氦气含量为0.003%~0.198%。位于苏仁诺尔构造带的新乌1井,其氦气含量可达0.17%~0.18%;而位于巴彦塔拉构造带的乌13井氦气含量则仅为0.018%~0.04%(王平等,2003)。海拉尔盆地氦气资源研究程度相对较薄弱,但其具有形成深部含氦气藏的有利地质背景,勘探前景广阔。

#### 2.3 铁法盆地

铁法盆地位于华北北缘隆起带的东部,依通-舒兰断裂带的西侧,是在前震旦纪基底上发育的断陷盆地(黄华州等,2021)。关于铁法盆地氦气资源情况前人未有报道,铁法盆地主要为煤层气开发盆地,煤层主要为早白垩世阜新组。本次在铁法盆地共采集煤层气开发井样品14件开展含氦气量筛查。其中,2件样品氦气含量接近和大于0.1%,10件样品氦气含量为0.01%~0.05%,显示铁法盆地煤层气也可以作为氦气的载体气,为氦气勘探提供了新的调查方向。

#### 2.4 辽河盆地

辽河盆地是在晚古生代古隆起背景上发育而来的新生代裂谷盆地,天然气资源丰富,成因多样,深层天然气资源前景广阔(陈振岩等,1997)。徐永昌等对辽河盆地氦气资源成因进行了研究,提出盆地东部凹陷界3井中天然气含氦气量达0.1%,氦气中约50%为幔源来源,这与该井靠近郯庐断裂带密切相关(徐永昌等,1996a,1996b)。辽河盆地氦气资源研究程度相对较低,急需开展进一步的筛查工作。

### 3 氦气成因、成藏条件及勘探方向

#### 3.1 成因分析

氦气来源主要有壳源和幔源2种,在氦的同位素中,<sup>3</sup>He是在元素合成时所形成的核素,即为地球形成过程中所捕获的原始氦,<sup>4</sup>He是地球中U和Th等放射性元素衰变产生的核素,常用氦同位素比值(<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He)

来判断氮气的成因(李玉宏等, 2018, 2022a, 2022b)。大气中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的值为 $1.4\times 10^{-6}$ , 壳源中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的值为 $2\times 10^{-6}$ (Mamyrin et al., 1984), 幔源中为 $1.1\times 10^{-6}$ (Kaneoka et al., 1985)。样品 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的值( $R$ )除以大气中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的值( $R_a$ )一般用来表示样品的氮同位素特征(秦胜飞等, 2022a, 2022b)。也可以用 $R/R_a$ 比值来研判幔源氮的比例,  $R/R_a$ 的值越大, 幔源氮所占的比重越大。通过计算, 当 $R/R_a > 3.94$ 时, 天然气中来自幔源的氮所占的比重大于50%; 当 $R/R_a > 1$ 时, 幔源氮的份额大于12%; 当 $R/R_a > 0.1$ 时, 来自幔源的氮所占比重大于1.1%。而当 $R/R_a < 0.1$ 时, 通常认为天然气中的氮气基本为地壳来源(秦胜飞等, 2022a, 2022b)。

本次研究结果显示: 松辽盆地南部氮气样品的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $0.06\times 10^{-6}\sim 3.35\times 10^{-6}$ , 平均值为 $1.41\times 10^{-6}$ ;  $R/R_a$ 值为 $0.04\sim 2.39$ , 平均值为1.01, 表明样品有较多的幔源氮的混入, 幔源氮的混入量在12%~50%(图2)。松辽盆地北部有30多口井发现了工业氮气藏,  $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $2.88\times 10^{-7}\sim 4.21\times 10^{-6}$ , 幔源氮含量占比可达38%(冯子辉等, 2001)。盆地南部地区万金塔二氧化碳气田中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为4.50~5.14, 幔源氮含量高达64%(徐永昌等, 2000)。铁法盆地氮气样品 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $0.45\times 10^{-6}\sim 6.19\times 10^{-6}$ , 平均值为 $0.99\times 10^{-6}$ ,  $R/R_a$ 值为 $0.37\sim 4.42$ , 平均值为0.71, 幔源氮的输入量小于12%或在其左右(图2)。海拉尔盆地乌尔逊构造带二氧化碳气藏中含有氮气,  $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $1.68\times 10^{-6}\sim 2.08\times 10^{-6}$ ,  $R/R_a$ 值为1.20~1.49, 其中 $^3\text{He}$ 的含量普遍较高, 说明海拉尔盆地二氧化碳气藏中有大量的幔源氮气的加入(王江等, 2002; 王平等, 2003), 幔源氮气的输入量占比应大于12%。辽河盆地天然气中发现的氮气, 其 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $5.46\times 10^{-6}$ (徐

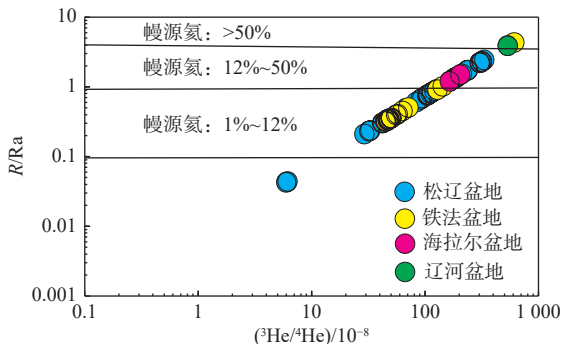


图2 东北地区主要盆地氮同位素分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of helium isotopes in main basins in Northeast China

永昌等, 1996a, 1996b), 表明氮气总量中幔源氮的贡献达到50%或以上(图3)。

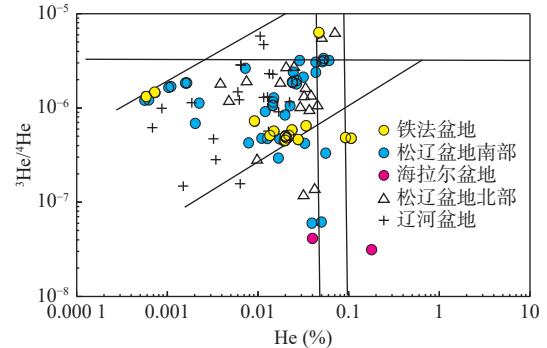


图3 东北地区 $^3\text{He}/^4\text{He}$ -He(%)关系图

(据徐永昌等, 1996a, 1996b 修改)

Fig. 3 The relationship of  $^3\text{He}/^4\text{He}$ -He(%) in Northeast China (Modified according to Xu Yongchang et al., 1996)

此外, 研究发现东北地区大部分盆地氮的浓度与 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的值之间呈现正相关关系(图3), 显示天然气中的氮气浓度与幔源氮气的加入有关; 东北地区氮气藏中有较多的幔源氮混入, 氮气成因类型为壳-幔复合型, 氮气藏普遍为由壳源氮和幔源氮所组成的复合气藏。

### 3.2 成藏条件研究

大部分氮气资源与天然气伴生, 在其成藏过程中一般同天然气类似, 一直处于不断补给和不断散失的动态平衡状态。由于氮的分子量较小, 而且渗透性极强, 比其他气体更容易散失, 即使存在于良好的天然气藏圈闭内的氮气也非常容易通过微孔隙进行散失, 因此氮气藏的形成除了有利的储集空间和圈闭条件外, 还需要有不断的氮气补给, 即发育有效的氮源岩, 有良好的盖层保护, 同时满足补给量大于散失量的条件, 而且发育有能够断穿基底和地壳或断至上地幔的深大断裂也尤为重要, 可以作为沟通深部氮气源向上运移通道(冯子辉等, 2001; 李玉宏等, 2018; 顾延景等, 2022)。

#### 3.2.1 富铀钍花岗岩供源

前人的研究表明, U、Th 广泛赋存于岩石中, 盆地基底、岩浆岩、沉积地层都可成为潜在的氮源岩, 但多数地质体都是贫氮的源岩, 一般都需要巨大的岩石规模和漫长的地质历史时间来产生和积累氮气(董敏等, 2017; 张文等, 2018; 李玉宏等, 2022b; 张乔等, 2022)。从中国四川威远、塔里木盆地等富氮气田来看, 氮气田下部均有巨大、古老的花岗岩体, 构成了氮

气资源的有效源岩,特别是与富 U、Th 大陆地壳重熔相关的 S 型和 A 型花岗岩等(李玉宏等, 2022b)。

壳源氦气的生成量与其源岩中铀、钍含量(质量分数)及其形成年龄有关,即铀、钍含量越高,氦源岩形成时代越老,其生成的氦气量就越多(李玉宏等, 2018)。Th、U 等放射性元素主要来自于相对古老花岗岩和变质岩系等。侵入岩中铀的含量随酸性成分的增加而增加,基性和超基性岩铀含量相对较低,酸性岩铀含量较高,即在花岗岩中铀含量较高(李玉宏等, 2017)。变质岩中铀、钍含量取决于原岩成分及其中的铀含量、变质程度以及交代作用的带进量和带出量。前人研究认为,印支期和燕山期为主的富含 Th、U 等放射性元素的二长花岗岩或黑云母花岗岩系列为中国壳源氦的重要气源岩(李玉宏等, 2018)。

东北地区出露巨量的显生宙花岗岩,构成巨大的花岗岩省。通过前人大量的年代学分析,东北地区花岗岩时空格架已基本建立,按照与东北地区块体构造演化的关系,花岗岩形成分为寒武纪—奥陶纪、晚石炭世—二叠纪、晚三叠世—中侏罗世和早白垩世 4 个主要阶段,其中以晚三叠世—中侏罗世、即印支期和燕山期花岗岩出露面积最广,影响范围也最大(Wu et al., 2011)。张海华等在松辽盆地北部取得了侵入岩—闪长玢岩的年龄为(245.5±1.9)Ma,时代为中三叠世早期(张海华等, 2021);候贺晟等在松辽盆地中央凹陷区科学钻探井松科 2 井获得安山岩的年龄为(242.6±0.77)Ma(候贺晟等, 2018);余星等在松辽盆地徐家围子断陷区取得了 252~237 Ma 火山岩的年龄(余星等, 2008),裴福萍等在松辽盆地南部获得了 218~236 Ma、254 Ma 的火山岩年龄(裴福萍等, 2008);陈树旺等针对松辽盆地西斜坡区地质调查井火山岩样品进行同位素测年分析,获得的年龄介于 224.7~234.0 Ma 间,时代为晚三叠世(陈树旺等, 2019)。以上研究成果均表明,印支期和燕山期侵入岩在松辽盆地及周边都是广泛发育的,而且具有一定的规模(图 4),推断印支期和燕山期侵入岩为东北地区氦气资源的形成提供了良好的氦源岩条件。

### 3.2.2 深大断裂作用

东北地区深大断裂发育(图 1),深断裂的发育不仅控制了盆地的形成和演化,同时也可以成为油气、氦气运移和岩浆活动的重要通道,势必对油气、氦气及火山岩、岩浆岩等岩体的分布起着重要作用,这些断裂主要包括德尔布干深断裂,控制着海拉尔盆地、

漠河盆地等的形成与演化;嫩江—八里罕断裂,控制着松辽盆地西缘中生代断陷的分布;孙吴—双辽深断裂,控制着松辽盆地中部中生代断陷分布;四平—哈尔滨深断裂,控制着松辽盆地东缘中生代断陷分布;依兰—伊通深断裂,控制着铁法盆地、伊通断陷、方正断陷等中生代断陷盆地;敦化—密山深断裂,控制着鸡西盆地、敦化盆地等中、新生代断陷盆地的展布。前人研究表明,松辽盆地主要发育多条深大断裂带(郭占谦, 2003; 钟鑫, 2017),从天然气中氦气含量测试结果可以看出,达到氦气工业标准的钻井主要集中在深大断裂的附近,在深大断裂的交汇处更加密集(钟鑫, 2017),因此深大断裂带和断层是深部氦气资源向上运移的主要通道,也是形成氦气藏的主要控制因素之一。海拉尔盆地富二氧化碳和含氦的气井都分布在德尔布干断裂带附近。德尔布干形成于古生代早期,为深的切壳断裂(王江等, 2002),是深部无机成因二氧化碳气、氦气成藏的主要运移通道。辽河盆地天然气中幔源氦占比较大,而含氦的天然气井正处于郯庐断裂带内(徐永昌等, 1996a),高幔源氦的加入意味着氦气成藏与郯庐断裂密切相关。铁法盆地受南北向的铁岭—开源—舒兰断裂,北北东向的老河口—珠尔山断裂控制,从目前研究来看,煤层气中氦气的富集主要受深大断裂的影响,深部地幔或侵入岩体形成的氦气经深大断裂运移至煤层气藏中聚集、储存。因此,东北地区深大断裂附近的含煤层气盆地均具有较好的氦气勘探前景。

东北地区的松辽盆地、海拉尔盆地、辽河盆地等是在陆壳基底上发育而来的中生代拉张型断陷—拗陷含油气盆地。中生代—新生代,由于太平洋板块向欧亚板块的持续俯冲,使陆壳沿北北东向产生破裂带,上地幔沿地壳减薄处和断裂带发生隆升,形成深大断裂带,同时也形成了一系列的断陷型盆地,逐渐演化为大型拗陷盆地(李德生, 1982; 秦胜飞等, 2022b),富含幔源氦的地幔流体沿着切穿地壳深达地幔的断裂参与与油气成藏过程中,在一些天然气藏中形成了壳幔混合成因的富氦气藏。因此认为,氦气的富集成藏依赖断裂的沟通作用,断裂和深大断裂越发育,且发育规模越大的地区,找到高丰度工业氦气藏的前景就越大。

### 3.2.3 保存条件良好

氦气通常为天然气及二氧化碳气藏的伴生气,其保存条件与天然气相似,需要有良好的盖层条件。松

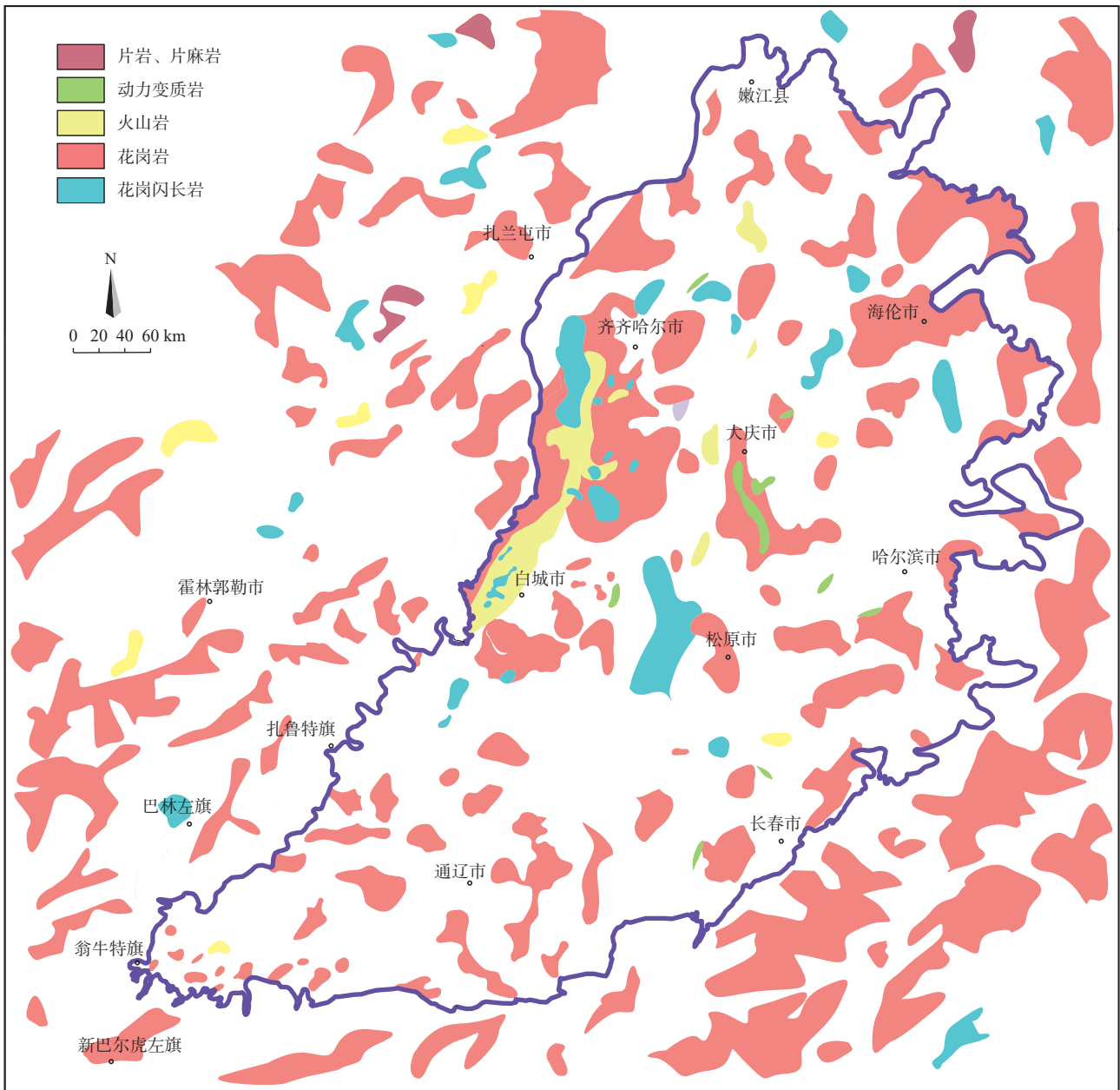


图4 松辽盆地及周边花岗岩分布特征图

Fig. 4 Distribution characteristics of granites in Songliao basin and its surrounding areas

辽盆地发现的氦气层主要受三套区域盖层的控制,分别是嫩江组一、二段泥岩,青山口组一段泥岩以及泉头组一、二段泥岩(高瑞祺等, 1997; 冯子辉等, 2001),盆地内白垩系浅湖-深湖相沉积发育,沉积了厚层甚至巨厚层的暗色泥岩。泥岩的孔隙度和渗透率都不发育,其封盖性较好,为氦气的保存提供了良好的封盖条件。海拉尔乌尔逊断陷含氦二氧化碳气藏上部同样发育有厚层的泥岩,且岩石致密,封盖性良好,和储集层构成了良好的储盖关系(王江等, 2002),该区自下而上发育3套盖层,分别为南屯组一段、南屯组二

段和大磨拐河组一段泥岩盖层。

由以上研究可知,东北地区氦气的保存条件良好,储层之上覆盖有巨厚的泥岩,有利于氦气藏的保存。尤其是白垩系上部大范围的湖泛沉积,形成了分布面积广泛、厚度巨大的泥页岩,构成了较好的区域盖层,为东北地区氦气藏的保存提供了较有利的条件。

### 3.3 资源勘探方向

从东北地区已发现的主要氦气富集情况来看,可根据载体气特征将其分为4种类型,分别为与常规烃类气伴生的氦气藏、与二氧化碳气伴生的氦气藏、与



煤层气伴生的氦气藏、与地热水溶气伴生的氦气。目前东北地区对氦气资源状况总体关注度不够,使得东北地区氦气资源勘探程度较低、成藏理论研究薄弱,资源潜力分析不足,资源家底不清,亟需开展以下氦气调查研究工作:

(1)加强与常规烃类气伴生的氦气资源的调查。开展松辽盆地等现有大中型天然气田氦气含量筛查,这些已有气田天然气资源体量大,具有规模效应,由于正在生产,富氦气藏可直接利用,形成产能;不具有经济效益的低含氦气田,也可通过BOG提氦(秦胜飞等, 2021),推进低含氦天然气有效利用。

(2)加强与二氧化碳气伴生的氦气资源的调查。由于氦气与二氧化碳具有相似的成藏背景,二者具有伴生相关关系,东北地区海拉尔、松辽等盆地等二氧化碳气田发育,开展二氧化碳气田含氦量筛查,进行提氦,可作为富氦烃类天然气藏的有益补充。

(3)加强与煤层气伴生的氦气资源的研究。东北地区海拉尔盆地、阜新盆地、鸡西盆地、铁法盆地等盆地煤层气资源丰富且正在开发利用,关于煤层气中含氦情况的研究,国内外报道较少,本次针对铁法盆地、阜新盆地煤层气中氦含量的研究,显示了煤层气也具有较高的氦气资源勘探前景,可作为氦气的有效来源。

(4)加强与水溶气伴生的氦气资源的探索。水溶气是渭河盆地氦气的主要赋存形式,东北地区包括五大连池、拜泉地区、长白山地区、阜新地区等均存在大量的地热伴生气,对于东北地区地热气含氦情况罕有报道,但相关内部资料显示地热气中存在氦气异常,因此,东北地区水溶气含氦情况不容忽视。

(5)加强对深大断裂附近含天然气盆地或凹陷氦气资源的探查。东北地区已发现的大部分氦气藏均发育在深大断裂附近,深大断裂对于氦气的富集成藏起到关键控制作用,因此,天然气井的筛查应重点选择靠近深大断裂或深大断裂的交汇处,以期取得更好的发现。

## 4 结论

(1)东北地区富氦气藏主要分布在松辽、海拉尔、辽河及铁法等主要盆地中。氦气成因类型为壳-幔混合型,氦气藏是由壳源氦和幔源氦所组成的复合成藏。

(2)东北地区各盆地周缘及基底广泛发育的印支期和燕山期花岗岩为氦气的形成提供了丰富的源岩基础,切穿基底的深大断裂为氦气的运移聚集提供了必要的通道,良好的保存条件为氦气富集提供了有利基础。

(3)东北地区具备较好的氦气成藏地质条件,且资源较丰富,具有良好的资源勘探前景,但是大量的氦气资源被作为天然气的尾气消耗而未被利用。因此,应加强与常规烃类气、二氧化碳气、煤层气及地热水溶气等类型氦气资源的调查与研究,充分认识东北地区氦气的资源价值,摸清东北地区氦气资源家底,探索先进的技术工艺对氦气进行勘探开发与提纯,保障氦气资源安全。

致谢:感谢吉林油田公司宋鹏、李禹、王海龙,原东北煤田地质局107勘探队秦建义,铁法煤层气公司谷旭在样品采集过程中给与的支持与帮助,感谢北京核工业地质研究院李军杰在样品测试过程中给与的帮助;感谢审稿专家和编委成员对本文提出的宝贵意见!

## 参考文献(References):

- 陈践发,刘凯旋,董勃伟,等.天然气中氦资源研究现状及我国氦资源前景[J].*天然气地球科学*, 2021, 32(10): 1436-1449.
- CHEN Jianfa, LIU Kaixuan, DONG Qingwei, et al. Re-search Status of Helium Resources in Natural Gas and Prospects of Helium Resources in China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(10): 1436-1449.
- 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, 04: 84-88.
- CHEN Xinjun. Analysis of resource characteristics and exploitation foreground of typical helium rich areas-A case study of sinopec's oil and gas mining right area[J]. *China's land and resource economy*, 2021, 04: 84-88.
- 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/OL].*天然气地球科学*, 2022.
- CHEN Xinjun, CHEN Gang, BIAN Ruikang, et al. The helium resource potential and genesis mechanism in Fuling Shale Gas Field, Sichuan Basin[J/OL]. *Natural Gas Geoscience*. 2022.
- 陈树旺,许光,杨建国,等.松辽盆地及外围油气资源基础地质调查——“十三五”阶段进展与未来工作展望[J].*地质与*

- 资源, 2021, 30(3): 221-231+248.
- CHEN Shuwang, XU Guang, YANG Jianguo, et al. Foundational geological survey for oil and gas resources in Songliao Basin and its periphery areas: Progress and prospect[J]. *Geology and Resources*, 2021, 30(3): 221-231+248.
- 陈树旺, 张健, 郑月娟, 等. 松辽盆地西部斜坡区油气地质调查进展与发现[J]. *中国地质调查*, 2019, 6(1): 1-9.
- CHEN Shuwang, ZHANG Jian, ZHENG Yuejuan, et al. Progresses and discoveries of geological survey on oil and gas resources-related to the Upper paleozoic in the western slope of Songliao Basin[J]. *Geological Survey of China*, 2019, 6(1): 1-9.
- 陈振岩, 余炳俊, 郑治宇, 等. 辽河盆地多源天然气复合成因[J]. *沉积学报*, 1997, 6(2): 58-62.
- CHEN Zhenyan, YU Bingjun, ZHENG Zhiyu, et al. The compound or-igin of polygenic natural gases of the Liaohe Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997, 6(2): 58-62.
- 董敏, 王宗秀, 董会, 等. 关中盆地花岗岩石英脉流体包裹体与氦气成藏特征研究[J]. *西北地质*, 2017, 50(3): 222-230.
- DONG Min, WANG Zongxiu, DONG Hui, et al. Fluid Inclusions Characteristics of Quartz Vein in Granite and Helium Accumulation in Guanzhong Basin, Shaanxi Province[J]. *Northwestern Geology*, 2017, 50(3): 222-230.
- 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.
- FENG Zihui, HUO Qiuli, WANG Xue. A study of helium reservoir formation characteristic in the north part of Songliao Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2001, 21(5): 27-30.
- 郭占谦. 石油天然气地质论文集[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 97-109.
- 高瑞祺. 松辽盆地油气田形成条件与分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- 顾延景, 张保涛, 李孝军, 等. 济阳拗陷花沟地区氦气成藏控制因素探讨—以花 501 井为例[J]. *西北地质*, 2022, 55(3): 257-266.
- GU Yanjing, ZHANG Baotao, LI Xiaojun, et al. Discussion on Helium Resource Accumulation Mechanism in Huagou Area of Jiyang Depression: Taking Well Hua 501 as an Example[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(3): 257-266.
- 黄福堂, 黄清华, 齐景顺, 等. 松辽及外围盆地多种资源勘探与综合利用的探讨[J]. *国土资源科技管理*, 2000, 2(17): 1-6.
- HUANG Futang, HUANG Qinghua, QI Jingshun, et al. A Talk on Exploration and Comprehensive Utilization of Resources in Songliao and Its Neighbouring Basins[J]. *Scientific and Technological Management of Land and Resources*, 2000, 2(17): 1-6.
- 候贺晨, 王成善, 张交东, 等. 松辽盆地大陆深部科学钻探地球科学研究进展[J]. *中国地质*, 2018, 45(4): 641-657.
- HOU Hesheng, WANG Chengshan, ZHANG Jiaodong, et al. Deep continental scientific drilling engineering in Songliao Basin: Resource discovery and progress in earth science research[J]. *Geology in China*, 2018, 45(4): 641-657.
- 黄华州, 桑树勋, 毕彩芹, 等. 煤层群煤系多套含气系统特征及其合采效果: 以铁法盆地阜新组为例[J]. *沉积学报*, 2021, 39(3): 645-655.
- HUANG Huazhou, SANG Shuxun, BI Caiqin, et al. Characteristics of multi-gas-bearing systems within coal seam groups and the effect of commingled production: A case study on Fuxin Formation, Cretaceous, Tiefsa Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(3): 645-655.
- 李玉宏, 卢进才, 李金超, 等. 渭河盆地富氦天然气井分布特征与氦气成因[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2011, 41(S1): 47-53.
- LI Yuhong, LU Jincai, LI Jinchao, et al. Distribution of the Helium-Rich Wells and Helium Derivation in Weihe Basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2011, 41(S1): 47-53.
- 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.
- LI Yuhong, ZHANG Wen, WANG Li, et al. Several issues in the accumulation of crust-derived helium and the accumulation model[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2017, 37(4): 565-572.
- 李玉宏, 周俊林, 张文. 渭河盆地氦气成藏条件及资源前景[M]. 北京: 地质出版社, 2018.
- 李玉宏, 李济远, 周俊林, 等. 氦气资源评价相关问题认识与进展[J]. *地球科学与环境学报*, 2022a, 44(3): 363-373.
- LI Yuhong, LI Jiyuan, ZHOU Junlin, et al. Research progress and new views on evaluation of helium resources[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2022a, 44(3): 363-373.
- 李玉宏, 李济远, 周俊林, 等. 国内外氦气资源勘探开发现状及其对中国的启示[J]. *西北地质*, 2022b, 55(3): 233-240.
- LI Yuhong, LI Jiyuan, ZHOU Junlin, et al. Exploration and development status of world helium resources and its implications for China[J]. *Northwestern Geology*, 2022b, 55(3): 233-240.
- 李德生. 中国含油气盆地的构造类型[J]. *石油学报*, 1982, 3(3): 1-12.
- LI Desheng. Tectonic types of oil and gas basins in China[J]. *Acta Petroli Sinica*, 1982, 3(3): 1-12.

- 刘超, 孙蓓蓓, 曾凡桂, 等. 鄂尔多斯盆地东缘石西区块含氦天然气的发现及成因初探[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(4): 1280–1287.
- LIU Chao, SUN Beilei, ZENG Fangui, et al. Discovery and origin of helium-rich gas on the Shixi area, eastern margin of the Ordos Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(4): 1280–1287.
- 李济远, 李玉宏, 胡少华, 等. “山西式”氦气成藏模式及其意义[J]. *西安科技大学学报*, 2022, 42(3): 529–536.
- LI Jiyuan, LI Yuhong, HU Shaohua, et al. “Shanxi-type” helium accumulation model and its essentiality[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2022, 42(3): 529–536.
- 裴福萍, 许文良, 杨德彬, 等. 松辽盆地南部中生代火山岩: 锆石 U-Pb 年代学及其对基底性质的制约[J]. *地球科学*, 2008, 33(05): 603–617.
- PEI Fuping, XU Wenling, YANG Debin, et al. Mesozoic volcanic rocks in the Southern Songliao Basin: Zircon U-Pb ages and their constraints on the nature of Basin basement[J]. *Earth Science*, 2008, 33(05): 603–617.
- 彭威龙, 刘全有, 张英, 等. 中国首个特大致密砂岩型(烃类)富氦气田—鄂尔多斯盆地东胜气田特征[J]. *中国科学:地球科学*, 2022, 52(6): 1078–1085.
- PENG Weilong, LIU Quanyou, ZHANG Ying, et al. The first extra-large helium-rich gas field identified in a tight sandstone of the Dongsheng Gas Field, Ordos Basin, China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, 52(6): 1078–1085.
- 秦胜飞, 李济远. 世界氦气供需现状及发展趋势[J]. *石油知识*, 2021, (05): 44–45.
- QIN Shengfei, LI Jiyuan. World helium supply and demand status and trends[J]. *Petroleum Knowledge*, 2021, (05): 44–45.
- 秦胜飞, 李济远, 王佳美, 等. 中国含油气盆地富氦天然气藏氦气富集模式[J]. *天然气工业*, 2022a, 42(7): 125–134.
- QIN Shengfei, LI Jiyuan, WANG Jiamei, et al. Helium enrichment model of helium-rich gas reservoirs in petroliferous basins in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2022a, 42(7): 125–134.
- 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——古老地层水脱氮富集[J]. *天然气地球科学*, 2022b, 33(8): 1203–1217.
- QIN Shengfei, LI Jiyuan, LIANG Chuanguo, et al. Helium enrichment mechanism of helium rich gas reservoirs in central and western China: Degassing and accumulation from old formation water[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022b, 33(8): 1203–1217.
- 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.
- TAO Xiaowan, LI Jianzhong, ZHAO Libin, et al. Helium resources and discovery of first supergiant helium reserve in China: Hetianhe gas field[J]. *Earth Science*, 2019, 44(3): 1024–1041.
- 王江, 张宏, 林东成. 海拉尔盆地乌尔逊含氦 CO<sub>2</sub> 气藏勘探前景[J]. *天然气工业*, 2002, 22(4): 109–111.
- WANG Jiang, ZHANG Hong, LIN Dongcheng. Exploration prospects of Urxun helium-bearing CO<sub>2</sub> gas reservoir in Hailar Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2002, 22(4): 109–111.
- 王平在, 李明生, 王江. 海拉尔盆地乌尔逊含氦二氧化碳气藏石油地质特征及勘探前景[J]. *特种油气藏*, 2003, 10(6): 9–12.
- WANG Pingzai, LI Mingsheng, WANG Jiang. Petroleum geology and exploration potential of Wuerxun helium-bearing CO<sub>2</sub> gas reservoir in Hailar Basin[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2003, 10(6): 9–12.
- 王杰, 陈践发, 王铁冠, 等. 松辽盆地双城—太平川地区天然气成因类型及气源[J]. *石油学报*, 2006, 27(3): 16–21.
- WANG Jie, CHEN Jianfa, WANG Tieguan, et al. Gas source rocks and gas genetic type in Shuangcheng-Taipingchuan area of Songliao Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(3): 16–21.
- 王天昊, 吕雪川, 高肖汉, 等. 松辽盆地天然气中氦气的检测与提纯方法[J]. *辽宁石油化工大学学报*, 2020, 40(5): 18–21.
- WANG Tianhao, LUXuechuan, GAO Xiaohan, et al. Detection and purification of Helium in natural gas of Songliao Basin[J]. *Journal of Liaoning Shihua University*, 2020, 40(5): 18–21.
- 徐永昌, 沈平, 陶明信, 等. 东部油气区天然气中幔源挥发份的地球化学—I. 氦资源的新类型: 沉积壳层幔源氦的工业储集[J]. *中国科学(D辑)*, 1996a, 26(1): 1–8.
- XU Yongchang, SHEN Ping, TAO Mingxin, et al. Geo-chemistry of mantle-derived volatiles in natural gas from oil and gas regions, Eastern China: I A new type of helium: industrial storage of mantle-derived helium in sedimentary crust[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 1996a, 26(1): 1–8.
- 徐永昌, 沈平, 刘文汇, 等. 东部油气区天然气中幔源挥发份的地球化学—II. 幔源挥发份中的氦、氩及碳化合物[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 1996b, 26(2): 187–192.
- XU Yongchang, SHEN Ping, LIU Wenhui, et al. Geochemistry of mantle-derived volatiles from natural gas in eastern oil and gas-region—II. Helium, argon and carbon compounds in mantle-derived volatiles[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 1996b, 26(2): 187–192.
- 徐永昌, 傅家谟, 郑建京. 天然气成因及大中型气田形成的地学

- 基础[M].北京:科学出版社,2000.
- XU Yongchang, FU Jiamo, ZHENG Jianjing. Origin of natural gas and geosciences of large and medium gas fields [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- 余星,肖俊,陈汉林,等.松辽盆地基底显生宙岩浆热事件:来自营城组火山岩捕获锆石的 SHRIMP 定年证据[J].岩石学报,2008,24(05):1123-1130.
- YU Xing, XIAO Jun, CHEN Hanlin, et al. Phanerozoic magmatic events in the basement of Songliao basin: SHRIMP dating of capture zircons from Yingcheng formation volcanic rocks[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(05): 1123-1130.
- 杨振宁,李永红,刘文进,等.柴达木盆地北缘全吉山地区氦气形成地质条件及资源远景分析[J].中国煤炭地质,2018,30(6):64-70.
- YANG Zhenning, LI Yonghong, LIU Wenjin, et al. Geological conditions of helium formation and resource prospect analysis in Quanjishan area, northern Qaidam Basin[J]. Coal Geology of China, 2018, 30(6): 64-70.
- 钟鑫.松辽盆地北部氦气分布特征及控制因素[J].地质调查与研究,2017,40(4):300-305.
- ZHONG Xin. Distribution characteristics and control factors of helium gas in northern Songliao Basin[J]. Geological survey and research, 2017, 40(4): 300-305.
- 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.
- ZHANG Liangliang, SUN Qingguo, LIU Yanyun, et al. Global market of helium and suggestion for helium supply security of China[J]. Low Temperature and Specialty Gases, 2014, 32(3): 1-5.
- 张明升,张金功,张建坤,等.氦气成藏研究进展[J].地下水,2014,36(3):189-191.
- ZHANG Mingsheng, ZHANG Jingong, ZHANG Jiankun, et al. Research progress on helium accumulation[J]. Ground Water, 2014, 36(3): 189-191.
- 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(S1):364-371.
- ZHANG Yunpeng, LI Yuhong, LU Jincan, et al. The discovery and origin of helium-rich gas on the northern margin of the Qaidam Basin[J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(S1): 364-371.
- 张文,李玉宏,王利,等.渭河盆地氦气成藏条件分析及资源量预测[J].天然气地球科学,2018,29(2):236-244.
- ZHANG Wen, LI Yuhong, WANG Li, et al. The analysis of helium accumulation conditions and prediction of helium resource in Weihe Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(2): 236-244.
- 张晓宝,周飞,曹占元,等.柴达木盆地东坪氦工业气田发现及氦气来源和勘探前景[J].天然气地球科学,2020,31(11):1585-1592.
- ZHANG Xiaobao, ZHOU Fei, CAO Zhanyuan, et al. Finding of the Dongping economic Helium gas field in the Qaidam Basin, and Helium source and exploration prospect[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(11): 1585-1592.
- 张海华,张健,陈树旺,等.松辽盆地北部三叠纪重要火山-岩浆事件——对晚古生代地层时限的约束[J].地质与资源,2021,30(6):249-256.
- ZHANG Haihua, ZHANG Jian, CHEN Shuwang, et al. Significant Triassic volcanic-magmatic event in the northern Songliao basin: constraints on the Late Paleozoic Stratigraphic Timing[J]. Geology and Resources, 2021, 30(6): 249-256.
- 张哲,王春燕,王秋晨,等.浅谈中国氦气供应链技术壁垒与发展方向[J].油气与新能源,2022,34(02):14-19.
- ZHANG Zhe, WANG Chunyan, WANG Qiuchen, et al. Barriers and Development Directions of Helium Supply Chain in China[J]. Petroleum and New Energy, 2022, 34(02): 14-19.
- 张乔,周俊林,李玉宏,等.渭河盆地南缘花岗岩中生代氦元素(U、Th)赋存状态及制约因素研究——以华山复式岩体为例[J].西北地质,2022,55(3):241-256.
- ZHANG Qiao, ZHOU Junlin, LI Yuhong, et al. The Occurrence State and Restraint Factors of Helium-produced Elements (U, Th) in the Granites from the Southern Margin of Weihe Basin: Evidence from Huashan Complex[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 241-256.
- Anderson S T. Economics, helium, and the U. S. federal helium reserve: Summary and outlook[J]. Natural Resources Research, 2018, 27(4): 455-477.
- Kaneoka I, Takakka N. Noble-gas state[J]. Chemical Geology (Isotope Geoscience section), 1985, 52: 75-95.
- Mamyrin B A, Tolstikhin I N. Helium isotopes in nature[M]. Amsterdam, Elsevier, 1984, 175-179.
- Wu Fuyuan, Sun Deyou, Ge Wenchun, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 41: 1-30.