https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.020



基于聚类统计的含氦天然气分类与成藏分析:以四川 盆地为例

罗胜元^{1,2,3},蒋 恕^{3,4*},张保民^{1,2,3},陈 林^{1,2,3}

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心,湖北武汉 430205

2. 南方复杂构造区页岩油气成藏理论与工程技术创新中心,湖北武汉 430205

3. 南方复杂构造区页岩气研究中心,湖北武汉 430205

4. 中国地质大学(武汉)新能源学院和构造与油气资源教育部重点实验室,湖北武汉 430074

摘 要:四川盆地油气资源丰富,多年勘探开发积累了大量的气体组分资料,为氦气研究提供了良好的基础条件.盆地内多层 系、多区域天然气中伴生的氦气含量明显不同,气体组分存在差异,烃类与伴生氦气之间的关系尚不清晰.基于四川盆地油气 勘探获得的230组天然气组分数据,对氦气含量以及天然气伴生的CH₄、N₂和CO₂含量进行Q型聚类分析,结合地质背景对氦 气分布规律进行了研究,提出了氦气资源勘探对策.主要得出以下认识:(1)四川盆地烃类伴生氦气主要可划分出3类,第 I 类 为低He低N₂低CO₂高 CH₄烃类气藏;第 II 类为富 He高 N₂中 CO₂中 CH₄烃类气藏;第 II 类低He 低 N₂高 CO₂低 CH₄烃类气藏. (2)第 I 类含氦天然气藏中气体组分均为单峰,He 含量低(平均0.033 9%),且与 N₂含量相关性差;第 II 类富氦天然气藏中非 烃组分呈多峰分布,He 含量高(平均0.158%),且与 N₂含量呈极强正相关(*r*=0.837,*P*<0.01),与 CO₂含量呈强正相关(*r*= 0.662,*P*<0.01).(3) I 类氦气藏包括页岩气藏、古油藏原位裂解的超压气藏,捕获外来氦气含量低,高强度生气也稀释氦气的 浓度,II 类富氦气藏在烃类运移过程中有水溶气脱溶等外源 He、N₂补充.(4)具有异常高压的天然气藏或页岩气藏,以及高含 硫化氢、高含重烃气藏均对He 成藏不利;而地层水长距离流动路径上的继承性穹窿圈闭、或与地下水多期"交流"的古老储层 可能有外源 He 的补充,是富氦气藏的勘探目标.本研究针对烃类伴生氦气组分建立的聚类分析方法,可为氦气地质特征研究 提供新思路.

关键词:四川盆地;氦气;聚类分析;耦合关系;二次运移;地层水;石油地质. **中图分类号:** P593;P628 **文章编号:** 1000-2383(2025)06-2179-20 **收稿日期:**2024-12-12

Classification and Analysis of Helium-Bearing Natural Gas Based on Clustering Statistics: A Case Study of Sichuan Basin

Luo Shengyuan^{1,2,3}, Jiang Shu^{3,4*}, Zhang Baomin^{1,2,3}, Chen Lin^{1,2,3}

1. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, China

2. Technology Innovation Center for Shale Oil & Gas Accumulation Theory and Engineering in Southern Complex Structural Area, China Geological Survey, Wuhan 430205, China

引用格式:罗胜元,蒋恕,张保民,陈林,2025.基于聚类统计的含氦天然气分类与成藏分析:以四川盆地为例.地球科学,50(6):2179-2198.

Citation: Luo Shengyuan, Jiang Shu, Zhang Baomin, Chen Lin, 2025. Classification and Analysis of Helium-Bearing Natural Gas Based on Clustering Statistics: A Case Study of Sichuan Basin. *Earth Science*, 50(6): 2179–2198.

基金项目:中国地质调查项目"洞庭盆地及周缘页岩油气调查评价"(No.DD20243464);国家自然科学基金项目(Nos.42130803,42172038);武汉 地质调查中心青年人才计划项目(No.QL2022-09)联合资助.

作者简介:罗胜元(1986-),男,高级工程师,博士,从事页岩气、油气地质调查与研究工作.ORCID:0000-0002-4325-4436.E-mail: loshyv@ 163.com

^{*}通讯作者:蒋恕,ORCID:0000-0002-6272-7649. E-mail: jiangsu@cug. edu. cn

3. Southern Complex Structure Area of Shale Gas Research Center, Wuhan 430205, China

4. School of Sustainable Energy, Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources Ministry of Education, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

Abstract: The Sichuan basin is rich in oil and gas resources, and many years of exploration and development have accumulated a large amount of gas composition information, which provides good basic conditions for helium research. Helium content associated with natural gas from multiple strata and regions varies significantly. However, the relationship between hydrocarbons and associated helium is unclear. Based on the statistics of natural gas components obtained from oil and gas exploration in the Sichuan basin, it innovatively uses cluster analysis method to conduct Q-type cluster research on the He content and the content of associated gases CH₄, N₂, and CO₂ in natural gas. The study analyzes the content of various types of helium, geological background, distribution pattern, and migration characteristics, then discusses the exploration and development strategies for helium resources. The main findings are as follows. (1) The helium associated with hydrocarbons in the Sichuan basin can be mainly divided into three types, Type I is characterized by low He, low N_2 , low CO_2 and high CH_4 hydrocarbon gas reservoirs, Type II is characterized by He-rich, high N₂, medium CO₂, medium CH₄ hydrocarbon gas reservoirs, and Type III is characterized by low He, low N₂, high CO₂ and low CH₄ hydrocarbon gas reservoirs. (2) Gas components of type I are shown as single peaks, with an average He content of 0.0339% and a poor correlation with the N₂ content. Non-hydrocarbon components of type II gases show a multiple-peak distribution, with a high He content (average of 0.158%) and a strong positive correlation with the N₂ content (r=0.837, P<0.01), the CO₂ content (r=0.662, P<0.01), respectively. (3) Helium reservoirs of type I are composited of shale gas reservoirs and overpressured gas reservoirs from in situ fracking of paleo-oil reservoirs. Low level of exotict helium and dilution from high-intensity gas generation are both responsible for the low helium content in type I gases. Helium-rich reservoirs of type II are recharged with water-soluble helium and nitrogen during hydrocarbon migration. (4) Natural gas or shale gas with abnormally high pressures, heavy hydrocarbon gas, as well as gas with high hydrogen sulfide content, are not favorable for helium accumulation. Successional anticline traps on long-distance flow paths of strata water, and the ancient resevoirs with multiple periods of interaction with stratum fluids, are the targets for helium exploration. The method of cluster analysis established for hydrocarbon-associated helium components can provide new ideas to study the geological characteristics of helium before obtaining a large amount of gas component information.

Key words: Sichuan basin; helium; cluster analysis; coupling relationship; secondary migration; stratum water; petroleum geology.

氦气是一种工业用途广泛的稀有气体,当前从 天然气伴生气中分离提纯氦气是工业化获取氦的 主要途径(陈践发等,2021;陶士振等,2024).天然气 田中氦气广泛且弥散分布,氦气含量和成因来源存 在一定差异.氦有³He和⁴He两种稳定同位素,其 中³He为元素合成时形成的原始核素,⁴He主要是放 射性U、Th元素自发衰变的产物(Ballentine and Burnard,2002)(亦称放射性来源).天然气藏中的氦 气有大气源、幔源和壳源3种主要来源:(1)大气中 氦主要由大洋中脊的火山喷发、岩浆脱气和岩石风 化释放出来的,³He/⁴He氦同位素比值(Ra)为1.4× 10⁻⁶(Ozima and Podosek, 2001);(2)地幔物质中U、 Th含量低,放射性成因的⁴He很少,基本保持了地 球形成时原始氦特征,幔源氦的³He/⁴He值为1.1× 10^{-5} , $R/Ra=5\sim50$ (R 为样品中³He/⁴He 比值) (Fisher, 1986); (3) 陆壳富含U、Th元素, 衰变产 生 ⁴He 大量富集, ³He/⁴He 值为(2~10)×10⁻⁸, R/Ra=0.013~0.021(Prinzhofer et al., 2010). 氦同 位素组成还与地质构造背景有密切关系:稳定构造 区以地壳成因的⁴He为主,而新生代火山岩和伸展 拉张构造区,由于地幔熔融、岩浆活动源源不断地 将幔源中挥发性组分运移输送到盆地流体系统中, 以幔源³He为主(Ballentine *et al.*,2005).

氦由U、Th元素自发衰变产生,由于衰变周期 长,生氦速率低,地下流体及天然气藏中氦气浓度 很低,自身不能单独成藏(朱东亚等,2024).氦气聚 集需寄生载体气,其勘探依赖天然气兼探,故氦气 与共伴生气体(CH4、CO2、N2和H2)的耦合关系研 究,是探究其成藏规律的重要手段.N2和He含量常 呈显著正相关,表明两者脱气、捕获过程发生在同 一时期(Brown,2019;秦胜飞等,2023a).然而部分 地区气井中N2和He含量并无相关性,例如在鄂尔 多斯盆地(Dai et al.,2017;陈践发等,2021),二者之 间的耦合关系有待进一步研究.氦气分类是以氦气 组分含量为基础,选择能够代表区域特征的地质参 数,将氦气藏划分为不同级别的一个基础性问题.

目前天然气伴生氦气分类方法有多种:(1)单要素 法,工业上依据氦气组分含量分为特富氦(氦气体 积含量大于 0.5%)、富氦(0.1%~0.5%)、含氦 (0.05%~0.1%)、贫氦(0.01%~0.05%)、特贫氦(小 于 0.01%) 气田 (Dai et al., 2017), 或依据氦气储量 大小分为特大型(氦气储量大于100×10⁶m³)、大型 $(50 \times 10^{6} \sim 100 \times 10^{6} \text{ m}^{3})$ 、中型 $(25 \times 10^{6} \sim 50 \times$ 10⁶ m³)、小型(5×10⁶~25×10⁶ m³)、特小型(小于 5×10⁶ m³) 气田(Boreham *et al.*, 2018). 该分类方法 操作简单,但仅考虑氦气含量,局限性大.(2)考虑氦 气与烃类气体相伴产出,综合CH₄,N₂,CO₂和He的 相对含量,划分为富氦烃类气藏、富氦二氧化碳气 藏和富氦氮气藏.(3)依据同位素的差异,划分为幔 源的³He,以及壳源的⁴He气藏(Ballentine and Burnard,2002);或综合考虑氦气和烃类的多源特点,划 分壳源同源型、壳源异源型和壳幔复合型3类 (Wang et al., 2020, 2023; 尤兵等, 2023). 由于氦气 产出层系众多,天然气藏类型多样,加之共伴生组 分中烃类、氮气和二氧化碳含量变化大,上述氦气 分类方法多为工作经验总结,缺乏定性表征指标, 适用性有限.

为了全面、准确地对烃类伴生氦气进行分类, 同时考虑氦气勘探的实用性,笔者基于统计学方 法,对四川盆地成熟油气探区已获得的大量天然气 伴生氦气组分数据进行研究,利用聚类分析将具有 相似气体组分的样品聚为同一簇,以分析氦气与伴 生气体的关联与差异.研究分类后的含氦天然气藏 特征,结合典型氦气藏解剖,以期为氦气成藏地质 理论、天然气伴生氦气的勘探提供有效支撑.

1 四川盆地氦气分布概况

四川盆地位于中国西南部,地跨四川、重庆等 地,属于上扬子板块,是在克拉通基础上发育的大 型叠合盆地(图1),盆内工业规模油气层系众多,产 能巨大.在氦气研究体系中,四川盆地具有独特而 重要的地位,威远气田是最早实现氦气商业化利用 的气田,多年勘探积累了大量的气体组分资料,多 区、多层系见不同程度的氦气显示,为深入研究氦 气分布规律提供了宝贵的基础研究资料.本文气体 组分数据均来源于已发表文献,共统计202口井(附 表1),包括四川盆地涪陵、长宁、威远等地区页岩气 藏,以及高石梯、磨溪、元坝和普光天然气藏.总体 上,四川盆地含氦天然气藏具有分布广泛、层位众 多的特点,按照烃源岩由古至新分类,氦气含量统 计如下.



图1 四川盆地构造单元分区及气田分布平面图(据帅燕华等,2023修改)

Fig.1 Distribution of tectonic units and gas fields in the Sichuan basin (modified by Shuai et al., 2023)

(1)筇竹寺组下寒武统(C_1q)海相页岩,分布于 整个盆地,川南和川北地区页岩厚度 200~300 m, 生气强度(50~100)×10⁸ m³/km²,天然气资源量 $1.91×10^{12}$ m³.是威远气藏和高石梯一磨溪气藏的 主要烃源岩(吴伟等,2016).页岩U、Th含量较高, 平均丰度为(38~92)×10⁻⁶和(6.02~10.2)×10⁻⁶. 盆地南部威远气田中氦含量较高,为0.098%~ 0.342%,平均0.2175%(图2),氦气主要富集层位 为震旦系灯影组和寒武系龙王庙组.高石梯一磨溪 气藏的氦丰度相对低,介于0.0200%~0.0891%, 平均为0.0503%,主要富集在震旦系灯影组中.

(2)下志留统龙马溪组(S₁*l*)海相页岩,分布在 盆地东南部,厚度 0~100 m,天然气资源量 4.96× 10¹² m³,生气强度(10~60)×10⁸ m³/km²,U、Th平均 丰度分别为 18.83×10⁻⁶和 15.69×10⁻⁶.形成涪陵、 威远一长宁页岩气田,以及川东地区剑南、卧龙河 等天然气藏(Dai et al., 2008, 2014; Yi et al., 2019). 威远地区五峰组一龙马溪组页岩气中氦含量稍高, 范围在0.0228%~0.1286%,彭水地区该层系氦含 量为0.0986%~0.1010%;涪陵、长宁地区龙马溪 组页岩气中氦丰度低,范围为0.0187%~0.1253%, 平均为0.03%~0.04%.川东地区龙马溪页岩生成 的常规气中氦含量与威远一长宁相似,范围为 0.0063%~0.1500%,平均0.0364%.

(3)上二叠统龙潭组(P₂l)海相一陆相页岩,主 要分布在盆地东北部,形成了普光、元坝和龙岗气 藏(Wu et al., 2013).天然气资源量2.0×10¹² m³,生 气强度(10~50)×10⁸ m³/km²,U、Th丰度范围为 (3.0~16.4)×10⁻⁶和(1.06~15.6)×10⁻⁶.元坝和普 光气藏的氦含量低,介于0.0056%~0.0400%,平





Fig.2 Histogram of frequency distribution of He contents associated with hydrocarbons in different formations in the Sichuan basin (a) and correlation of major genes in natural gas with helium abundance diagrams (b-d)

均为0.0146%.

(4)上三叠统须家河组(T_sx)陆相煤系,分布在 盆地西部和中部,是区域煤成气的主要源岩(印峰 等,2013;帅燕华等,2023),厚度10~1500 m,致密 气资源量4.85×10¹² m³,生烃强度(5~70)×10⁸ m³/ km².川中、川西煤成气中氦含量为0.0037%~ 0.0469%,平均为0.026%.参考前人研究成果,含氦 天然气定义为氦气丰度超过0.05%,威远、高石梯一 磨溪以及龙马溪组部分产层均超过了0.05%的标 准.分层系上,He含量与CH₄、CO₂相关性差,与N₂ 具有一定正相关性(图2).

四川盆地天然气中氦组分的³He/⁴He值非常低,范围为0.002~0.050 Ra,平均为0.015 Ra(n=113)(图 2a).平面上川东、川中地区天然气中 R/Ra 平均值分别为0.013、0.014,川西侏罗系天然气的 R/Ra值为0.015(n=7),川南震旦系天然气的 R/ Ra值为0.025(n=3).纵向上,不同层系天然气的 R/Ra值差异不大(图 2a),氦气均为壳源成因,天然 气样本中 R/Ra值与氦含量之间无相关性.

2 气体组分聚类分析方法

聚类分析是一种统计分析技术,作为无监督学 习最为广泛的方法,将研究对象分到不同的类或簇 中构成相对同质群组.烃类伴生氦气划分目的是找 到天然气的全局分布模式,以及气体组分之间的相 互关系,使同一类的数据尽可能相似,不同类数据 尽可能不同.基于聚类算法的烃类伴生氦气划分不 仅具有更高精度、更简便操作和更短时间,同时也 能避免主观因素的影响.

参考四川盆地已发表的含氦气体组分数据(附 表1),每口井气体数据包括CH4、CO2、N2、He组分 含量的4个变量,以及气田、储层、烃源岩、R/Ra等 协变量,每组数据相当于对不同构造带(气田)、不 同层系气体样本的测量,或对同一气体样本的多次 测量.采用多样本Q型聚类方法,首先将待分析的n 个样本视为一类,共有n类;然后计算两类距离平方 的平均数,用以表征每两类之间的相似系数(或类 间距离),将距离最小的两类合并为一个新类,得到 n-1类;再按照同样的计算方法重复以上过程,直至 所有样本都合并为同一类为止.由于天然气中多组 分气体存在伴生、竞争关系,故采用组间连接的层 系聚类法,在气体组分样品合并过程中,利用烃源 岩/储层协变量作为个案标注的依据,绘制树状图 表征气体之间的具体联结关系.气体组分含量中 CH4、He的数量级有较大差异,可能导致对类间距 离的计算产生大的影响,因此需要在聚类之前对参 数进行归一化处理.本次处理采用Zscore方法,处 理后每个变量均标准化到0~1区间范围内,以消除 组分间数量级的差异.每组参数的变换完全独立, 采用变换后的数据进行后续计算.

3 含氦烃类气藏聚类结果

本次统计了230组天然气伴生氦气气体组分数 据,在IBM SPSS Statistics 23 软件中进行聚类分 析,获得的树状图图谱如图3所示,聚类数目依据组 内误差平方和的变化趋势确定.结果显示,四川盆 地天然气伴生He组分可分为4类,其中 I 类样品数 量143个,Ⅲ类69个,Ⅲ类16个,Ⅳ类2个.第Ⅳ类 样本数量少且烃类组分偏低,经分析为异常项,不 作为主要分析对象.对前3类含氦气藏的气体组分 进行分析,统计每类样本中CH4、CO2、N2和He的组 分含量相关性和分布概率如图4和图6所示.对聚 类后的每一类样本进行 Pearson 双变量相关性分析 (图5),构建相似性矩阵以评估变量之间密切程度. 相关性系数r的取值范围为[-1,1],一般认为相关 性数值大于 0.6, 即说明两个变量之间存在相关关 系,数值越大,相关关系越强.图5中还表征了相关 性系数的显著性水平(P值),依据分类结果对显著 相关的参数(P<0.01或0.05)进行分析,每类气体 详细描述如下.

3.1 第 I 类低 He低 N₂低 CO₂高 CH₄烃类气藏

第 I 类氦气藏包括涪陵一长宁地区志留系页 岩气藏,川东地区以下志留统为烃源岩的剑南、卧 龙河、相国寺、沙罐坪、大池干等气田,川中地区合 川、元坝气田;川西地区邛西、新场气田(附表1),此 外还包括磨溪一高石梯地区寒武系、资阳震旦系灯 影组(占统计数量的60%).I 类气藏规模大,其中合 川气田、长宁页岩气田、元坝气田储量范围为 (1500~2000)×10⁸ m³,磨溪龙王庙组、高石梯灯影 组,以及涪陵页岩气田储量范围为(3000~4500)× 10⁸ m³.气藏流体压力上,I 类氦气藏伴生的天然气 多发育异常高压,如元坝气田上三叠统一侏罗系地 层压力系数为1.3~2.2,川西新场气田须家河组压 力系数约为1.4~1.8,磨溪龙王庙组压力系数达 1.5~1.7.按气藏来源区分,I 类中58%来自志留系 烃源岩(*n*=83),20%来自三叠系(*n*=29),约有

					0	5	10	15	20	25
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$ \begin{array}{ccccccc} T_{3}x - T_{3}x & 220 \\ T_{3}x - T_{3}x & 214 \\ - T_{3}x - T_{3}x & 216 \\ - T_{3}x - T_{3}x & 215 \\ - S_{1}/-T_{1}j & 138 \\ - T_{3}x - T_{3}x & 215 \\ - S_{1}/-T_{1}j & 138 \\ - T_{3}x - T_{3}x & 195 \\ - T_{3}x - T_{3}x & 195 \\ - T_{3}x - T_{3}x & 226 \\ - T_{3}x - T_{3}x & 229 \\ - T_{3}x - T_{3}x & 222 \\ - P_{2}/-T_{3}x & 83 \\ - T_{3}x - T_{3}x & 222 \\ - P_{2}/-T_{3}x & 94 \\ - T_{3}x - T_{3}x & 190 \\ - T_{3}x - T_{3}x & 193 \\ - T_{3}x - T_{3}x & 193 \\ - T_{3}x - T_{3}x & 191 \\ - T_{3}x - T_{3}x & 230 \\ - C_{1}q - P_{1}m & 12 \\ \end{array} $	$\begin{array}{c} {\rm S}_{1}l-{\rm C}_{2}h & 16\\ {\rm S}_{1}l-{\rm C}_{2}h & 15\\ {\rm P}_{2}l-{\rm T}_{3}x & 88\\ {\rm C}_{1}q-{\rm C}_{1}l & 5\\ {\rm C}_{1}q-{\rm C}_{1}l & 5\\ {\rm S}_{1}l-{\rm C}_{2}h & 15\\ {\rm C}_{1}q-{\rm P}_{1}m & 2\\ {\rm C}_{1}q-{\rm Z}_{2}d & 4\\ {\rm S}_{1}l-{\rm C}_{2}h & 14\\ {\rm C}_{1}q-{\rm Z}_{2}d & 5\\ {\rm S}_{1}l-{\rm C}_{2}h & 15\\ {\rm C}_{1}q-{\rm Z}_{2}d & 6\\ {\rm S}_{1}l-{\rm C}_{2}h & 15\\ {\rm C}_{1}q-{\rm Z}_{2}d & 6\\ {\rm S}_{1}l-{\rm P}_{2}ch & 14\\ {\rm C}_{1}q-{\rm Z}_{2}d & 4\\ {\rm C}_{1}q-{\rm Z}_{2}d & 4\\ {\rm P}_{2}l-{\rm T}_{3}x & 7\\ \end{array}$	1 7 3 - 3 8 - 2 - 3 3 - 0 - 4 - 7 7 7 7	I 类				
$\mathbf{e}_1 q - \mathbf{Z}_2 d$ 3 - $\mathbf{P}_2 l - \mathbf{T}_3 x$ 90					_					
$ \begin{array}{cccccccc} P_2 l - P_3 ch & 65 \\ S_1 l - P_2 ch & 145 \\ T_3 x - T_3 x & 188 \\ T_3 x - T_3 x & 188 \\ P_2 l - P_3 ch & 188 \\ P_3 x - T_3 x & 208 \\ P_3 x - T_3 x & 205 \\ P_3 x - T_3 x & 210 \\ T_3 x - T_3 x & 209 \\ T_3 x - T_3 x & 210 \\ T_3 x - T_3 x & 204 \\ T_3 x - T_3 x & 211 \\ T_3 x - T_3 x & 211 \\ \end{array} $	$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$\begin{array}{c} \varepsilon_{1}q^{-}Z_{2}d & 22\\ \varepsilon_{1}q^{-}\varepsilon_{1}l & 5a\\ \varepsilon_{1}q^{-}Z_{2}d & 22\\ \varepsilon_{1}q^{-}Z_{2}d & 22\\ \varepsilon_{1}q^{-}C_{1}l & 5\\ \varepsilon_{1}q^{-}Z_{2}d & 12\\ \varepsilon_{1}q^{-}Z_{2}d & 12\\ \varepsilon_{1}q^{-}Z_{2}d & 12\\ \varepsilon_{1}q^{-}Z_{2}d & 4e\\ \end{array}$	$\begin{bmatrix} 2 \\ 4 \\ - \\ 5 \\ - \\ - \\ - \\ - \\ - \\ 3 \\ - \\ 3 \\ - \\ 3 \\ - \\ 3 \\ - \\ -$	 II 类				
$ \begin{array}{cccc} P_2l - T_1 f & 72 \\ P_2l - P_2 ch & 77 \\ P_2l - P_2 ch & 68 \\ P_2l - P_2 ch & 69 \end{array} \begin{array}{c} P_2l - T_1 f & 73 \\ P_2l - T_1 f & 75 \\ P_2l - T_1 f & 74 \\ P_2l - T_1 f & 78 \end{array} $	$\begin{bmatrix} P_2 l^- T_1 f & 66 \\ P_2 l^- T_1 f & 70 \\ P_2 l^- T_1 f & 62 \\ P_2 l^- T_1 f & 71 \end{bmatrix}$	$ \begin{array}{c} P_{2}l - T_{1}f & 63 \\ P_{2}l - T_{1}f & 67 \\ P_{2}l - T_{1}f & 64 \\ T_{3}x - T_{3}x & 202 \end{array} $			_	III 类				
$T_3 x - T_3 x \ 187 - P_2 l - T_1 f_1 \ 76 - P_2 l - T_2 f_2 \ 76 - P_2 l - T_2 f_1 \ 76 - P_2 h - P$					_	IV类				

图 3 气体组分聚类谱系图

Fig.3 Cluster analysis results of gas components

数据对为气体组分编号(详见附表1),其中S₁/-C₂h 152代表第152组数据,烃源岩层为志留系龙马溪组(S₁l),储层为石炭系黄龙组(C₂h)

12%来自二叠系(n=17),仅有10%来自寒武系烃 源岩(n=14).该类为低He低N₂低CO₂高CH₄烃类 气藏,气体组分概率均为单峰(图6),其中CH₄含量 为81.87%~99.45%,平均96.24%;CO₂含量为 0.01%~6.43%,平均0.89%;N₂含量为0.01%~ 6.49%,平均0.95%;He含量0.0037%~0.1500%, 平均为0.0339%(n=143).氦同位素比值R/Ra为 0.002~0.050,平均为0.0143(n=95),具有典型壳 源氦特征.

3.2 第Ⅱ类富He高N₂中CO₂中CH₄烃类气藏

第 II 类氦气藏包括威远震旦系灯影组全部、威远寒武系大部(84%)、资阳震旦系灯影组(50%)、 安岳气田三叠系须家河组(85%)、广安气田三叠系 (100%)和蓬莱气田三叠系(80%).另有统计数量占 比较少的磨溪寒武系、合川三叠系、元坝三叠系气 藏.II 类气藏规模较小,且均为常压,威远、资阳气田 储量约400×10⁸ m³,压力系数为1.10~1.30;安岳、 广安、蓬莱气田气田储量规模约(1200~1900)× 10⁸ m³,三叠系储层压力系数为1.08~1.21.按照气



Fig.4 Correlation diagrams of gas components after cluster analysis

体来源区分,67% 气藏来自寒武系烃源岩,28% 来 自三叠系,少量来自二叠系.该类为富He高N₂中 CO₂中 CH₄ 烃类 气藏,CH₄含量为80.71%~ 90.71%,平均86.27%.非烃组分概率呈明显的多峰 分布,其中CO₂含量为0.01%~7.84%,两个峰值分 别为2%和6%(图6b);N₂含量为0.39%~11.88%, 以8%为主峰,其次为2%(图6c);He含量 0.007%~0.342%,平均0.158%(n=69),其分布存 在0.04%、0.2%、0.26%、0.32%等多个峰(图6d), R/Ra为0.0011~0.0410,平均为0.0191(n=16).

3.3 第Ⅲ类低 He 低 N₂高 CO₂低 CH₄烃类气藏

第Ⅲ类主要是普光气田的15个常规天然气样 本,为低He低N₂高CO₂低CH₄烃类气藏,烃类来源 于二叠系龙潭组煤系地层.天然气储量约为4100× 10^8 m³,气藏压力系数为0.96~1.18,为常压构造一 岩 性 气藏.甲烷含量为66.68%~78.83%,平均 74.22%; N₂含量为0.09%~3.50%,平均0.98%; CO₂含量为1.31%~16.31%,平均9.24%,两个峰值 分别为2%和10%,且以10%为主峰(图6).川北普 光气藏氦含量较低,范围为0.0056%~0.0284%, 平均为0.0141%.

3.4 第Ⅳ类含He异常烃类气藏

第Ⅳ类为异常项,为低He低CH₄高CO₂气藏, 或低He低CH₄高N₂气藏,包括普光(1个)、安岳(1 个).其特点是甲烷含量偏低,为50%~60%,CO₂或 N₂含量异常高(20%~35%),该类样本数量少且烃 类组分偏低,可能与不正确的取样有关,后续将不 再分析.

4 分析

4.1 第 I 类氦气藏特征与解剖

第 I 类氦气藏中 He 含量低,四川盆地下志留 统龙马溪组页岩气中 He 为 0.018 7%~0.049 9%, 平均 0.040 4%.以龙马溪组富铀一富有机质页岩为 烃源岩、石炭系一三叠系碳酸盐岩为储层的天然气 藏,如川东剑南、大池干、卧龙河气田等,氦含量为 0.006 3%~0.150 0%,平均 0.036 4%. I 类氦气藏中 He、N₂、CO₂、CH₄组分概率均为单峰,明显具有单幕

分类		CH_4	CO_2	H_2s	N_2	He			
I 类	CH_4								
	CO ₂	-0.328**							
	H_2s	-0.2	0.284	1					
	N_2	-0.379**	0.167*	-0.236					
	Не	0.053	-0.062		0.448**	1			
Ⅱ类	CH_4								
	CO ₂								
	H_2s	-0.34	0.609**						
	N ₂	0.126	0.574**	-0.487*					
	Не	0.123	0.662**	-0.341	0.837**	1			
Ⅲ类	CH_4								
	CO2	-0.357							
	H_2s	-0.385	-0.102	1					
	N ₂	-0.544*	-0.484	0.46					
	Не	-0.544*	-0.279	0.331	0.646**	1			
无相关 弱相关 中等相关 强相关 极强相关									

0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0 图 5 聚类分析后 3类气体组分的 Pearson 相关系数矩阵 Fig.5 Pearson correlation coefficient matrix between gas components after cluster analysis

P值.**在0.01级别(双尾)上显著相关;*在0.05级别(双尾)上显著 相关

(主幕)成藏特征.He 与 N₂相关性弱(r = 0.448, P < 0.01)(图 4c),与 CO₂、H₂s等无相关性(r < 0.1)(图 4d、图 5).

涪陵页岩气为伴生Ⅰ类氦气藏,He含量 0.031%~0.047%,平均0.039%.志留系龙马溪组页 岩有机碳含量高,且富含放射性铀钍元素,是良好 的烃源岩和氦源岩(聂海宽等,2023; Wu et al., 2023a). 龙马溪组页岩气为干酪根热裂解气与液态 烃二次裂解气的混合,且以液态烃裂解气为主(Dai et al., 2014), 在形成大量轻烃同时铀钍在半衰期内 也产生大量的氦.早成岩阶段生成的He随泥岩压 实排液而散失,现今He主要为页岩气生成之后捕 获,具有单峰特征.晚期高强度生烃也会稀释氦的 浓度(Wang et al., 2020;陈新军等, 2023),致使该类 气藏中He含量低,不利于氦气富集.I类氦气藏中 He与N₂相关性弱,可能由多种原因导致.首先,氦 和氮可能拥有共同的源岩,但两者控制因素不同. 氦来自烃源岩中U、Th衰变,受元素半衰期的控制. 氮气来自有机质热转化以及含氮化合物的分解 (Wang et al., 2014;秦胜飞等, 2023b),受地层温度 的制约,有机质中蛋白质受热分解产生的氨,易与 伊利石等黏土矿物结合形成铵盐(固铵伊利石),并 在较高温度下分解释放氮气,因此N₂含量随烃源岩 热成熟度增大而迅速增加.其次CO₂、N₂和CH₄的分 子大小相似(直径分别为0.33 nm、0.34 nm 和0.38 nm),而氦分子体积最小(直径0.26 nm),具有最强 的渗透性和扩散性,He与N₂的扩散速率存在差异. 气藏总体上为封闭系统,与相邻储层的流体交流不 畅,无外源氦、氮的补充.

四川盆地以寒武系筇竹寺组页岩为烃源岩的 油气资源极为丰富、类型多样,川中高石梯一磨溪 地区是安岳气田的主体,以其规模巨大、古老超深 等特点,吸引了诸多学者的研究.高石梯一磨溪寒 武系龙王庙组储层中氦含量一般为0.04%,聚类显 示为 I 类氦气藏,氦与烃类气体、氮气均无相关性.

安岳气田为古隆起上发育的构造一岩性复合 型气藏(图7), 经源岩为筇竹寺组页岩, 储层为龙王 庙组溶孔型砂屑白云岩,在高部位整体含气,低部 位仍然具有极高的含气量且水层不发育,区内仅磨 溪203井、磨溪204井区两个岩性气藏底部有滞留 水(杨跃明等,2019).龙王庙组储层发育异常高压, 现今压力系数1.53~1.67,气藏纵横向都有很好的 封存条件.安岳气田磨溪区块寒武系天然气为 [类 氦气藏(图8),具有主幕成藏特征,早期地层水中溶 解的He随流体伴生运移至龙王庙组碳酸盐岩溶孔 储层中,晚期经历了侏罗纪一晚白垩世持续埋深, 聚集型古油藏原位裂解为天然气和沥青,产生异常 高压保留至今(李剑等,2017;邓宾等,2024).气藏与 相邻储层内流体交流不畅,无外源氦、氮的补充.高 强度的原油裂解气稀释了氦的浓度,现今氦气含量 0.021%~0.064%,平均为0.04%(附表1编号51~ 59).原油高温裂解可能伴随含氮化合物的分解生成 N₂,故氦与氮的相关性差.

4.2 第Ⅱ类氦气藏特征与解剖

第 II 类氦气藏最显著的特点是存在若干个 He 高峰值(0.2%、0.26%和0.32%)(图 6e),N₂含量的 两个峰值分别为 2%和8%(图 6c).前人研究认为, 天然气中N₂可用来示踪油气运移,N₂以游离气相运 移的距离越远含量越富集,沿天然气运移方向N₂含 量逐渐增加(傅宁等,2005).由于烃源岩在成熟一高 成熟阶段生成的N₂的含量通常低于 3%(王鹏等, 2014;李朋朋等,2024),推测第 II 类含氦天然气藏 中的N₂除了有烃源岩裂解生成,均值8%的高氮峰







图7 震旦系灯影组天然气差异聚集与He特征

Fig.7 Characteristics of natural gas and He accumulation in the Dengying Formation of the Sinian

根据罗冰等(2015)和刘树根等(2015)有修改



Fig.8 Correlation diagram of gas components after cluster analysis in the Weiyuan-Gaomo area

值还有外部运移氮气的贡献.

氦与氮共生(耦合)关系明显, Pearson相关分析 显示,He含量与N₂含量呈极强正相关(r = 0.837, P < 0.01)(图 4c),与 CO₂含量呈强正相关(r = 0.662, P < 0.01)(图 4d). 此外, CO₂含量与H₂s和N₂ 呈中等相关至强相关(r分别为0.609、0.574,P< 0.01)(图5).众多学者的研究表明, N₂与He具有协 同或者相似的溶解趋势,在沉积岩中均通过含水孔 隙空间运移,二者运移可以被烃类置换,脱气成游 离气相(Brown, 2019; Cheng et al., 2023; 秦胜飞等, 2023a),导致部分气藏中He与N₂含量的正相关特 性.如美国的Hugoton-Panhandle气田是世界上最 大的氦气田,He含量在气水界面处最高(Brown, 2019). 渭河盆地是水溶氦气藏的典型, 地热水井伴 生的天然气中氦气含量大于1%的有31口、最高达 9.226% (Zhang et al., 2019). 这有力的证明了地下 水参与氦气的聚集,氦在进入烃类气体之前主要赋 存于地层水中并随之运移.非烃气体中CO。同样可 示踪天然气运移,主要是其亲水特性,同时其分子 量大、密度高、运移速率慢(刘文汇,2025),因此沿 天然气运移方向 CO₂含量会逐渐降低(傅宁等, 2005).加之碳酸盐岩矿物溶解可产生CO₂,导致尽 管He与CO₂含量有一定正相关,但是拟合的相关系 数较之He-N₂关系是明显降低的.

Ⅱ 类氦气藏中 He 同样为壳源成因,可来自沉 积型氦源(富铀钍页岩、铀矿)及盆地基地、花岗岩 类,He 与 N₂含量变化是烃类与地层水溶气相互作 用的产物.在数亿年的生氦过程中,古老的孔隙水 积累了溶解氦,通过水饱和岩石扩散和在水动力作 用下运移到天然气藏中(Milkov *et al.*,2020;李朋朋 等,2024).这也是页岩气(I类氦气藏为主)中He含 量普遍低于同一地区常规天然气藏(II类氦气藏为 主)的根本原因.

4.2.1 川中威远一资阳一高磨构造Ⅱ类氦气藏 威远地区位于四川盆地东南部,在盆内乐山一龙女 寺隆起带上发育一个巨型穹窿构造,探明了威远-资阳-磨溪-广安灯影组系列气藏.威远构造在震 旦系油气藏形成之后,于喜马拉雅期经历了强烈的 隆升(刘树根等,2015;梁霄等,2016),从威远→磨 溪→广安构造,系列气藏圈闭溢出点的海拔逐渐降 低(图7),威远气田为该区灯影组构造最高点,抬升 幅度近4000m,震旦系顶面与高磨地区落差达 500 m.系列构造中灯影组天然气和地层水化学成 分相似,地层均为常压.该区碳酸盐岩储层中氦含 量高达0.342%, He 与N₂含量具有相关性, 为Ⅱ类 氦气藏.该区氦气藏同处于大型的加里东期龙女寺 古隆起上、地层沉积演化相似,烃类气体均产自寒 武系烃源岩,均为聚集型液态烃裂解气(吴伟等, 2016;李剑等,2017),但氦气含量差异较大,对比研 究可揭示Ⅱ类氦气藏的形成特点.

威远构造灯影组天然气属 II 类氦气藏,He含量 为0.15%~0.342%,平均0.231%.受晚期构造控制, 威远构造内灯影组天然气存在沿顶部不整合面的 大范围长距离运移,水溶气在隆升过程中脱溶成藏 (刘树根等 2015;帅燕华等,2023).现今威远气田是 一个具有统一边、底水的构造气藏,闭合高度达 895 m,构造最高点处气藏充满度仅为25%,气藏具 有统一的地层压力系统.氦气含量平面分布与构造 等值线分布规律存在一定的耦合性,He含量在构造 高部位最高,一般大于0.2%(Wei117井氦气体积分 数高达0.404%,Wei106井为0.315%,Wei30井为 0.342%),向气藏边缘处逐渐递减(威基井氦体积分 数为0.12%).前人根据威远气田天然气干燥系数刻 画地下流体的流动,沿着运移方向单井中氦气含量 有增加趋势(刘凯旋等,2022),表明威远构造震旦 系气藏(II类氦气藏)中氦随着地下流体发生了二 次运移,烃类气体沿途与地下水相互作用大,从而 捕获了较多脱溶出的He和N₂,并在后期进入背斜 高部位减压脱溶聚集成藏.

资阳震旦系灯影组气藏是 I 类和 II 类氦气共存的实例.资阳气藏位于威远构造北斜坡,南部与威远气田相接,同为筇竹寺组页岩生成的油裂解天然气.聚类显示,资阳气田既有 I 类氦气藏,如资1、资3、资7井(附表1编号45、47、50);也有 II 类氦气藏,如资2、资5、资6井(附表1编号46、48、49). I 类氦气藏位于斜坡低部位,气体相对较湿,甲烷含量很高,氦气含量低,氦气含量为0.01%~0.04%. II 类氦气藏均为圈闭边缘的非工业产能井(资5井、资6井),位于斜坡高部位,甲烷含量低,为82%~88%; N_2 含量为4.17%~11.88%; He含量高,介于0.20%~0.32%.

与威远水溶气脱溶成藏不同,资阳为残留的气 顶气(邓宾等,2024).喜马拉雅构造运动之前,两地 区是一个较完整的资阳一威远古圈闭,高点位于资 阳地区,威远处于南部斜坡带.喜马拉雅期,两处的 构造高点随隆升发生了迁移,威远构造由-6000m 抬升至现今-2400m后形成独立圈闭;资阳构造抬 升幅度小,由-6000m抬升至现今-4000m(罗冰 等,2015),此背景下的圈闭条件发生变化,现今不 具备统一圈闭,仅在低部位的资1、3井区残存小型 圈闭,其余为局部高点(图9),含气区气/水界面高 低不一,呈台阶式分布,整体上气藏表现为多系统、 分散性特征,气田以产水为主、产少量天然气(秦胜 飞等,2023b).由于构造变动及沉积剥蚀不均衡,叠 加多旋回水动力场,造成资阳地区油气成藏复杂化. 资阳气田为隆升调整残留气藏,其Ⅰ类氦气藏在隆 升过程中由于圈闭溢出点变化而散失,但残留气藏 并没有与区域流体的广泛"交流、改造",依然保留 早期气体组成.资阳气田 II 类氦气藏则在隆升过程 中再次运移、聚集形成,与地下流体"交流"几率大 (图8),捕获的水溶氦气含量多,最终形成富He高 N₂的 [[类氦气藏.

4.2.2 安岳三叠系Ⅱ类氦气藏 第Ⅱ类氦气藏还 包括安岳气田三叠系须家河组(85%)、广安气田三 叠系(100%)和川中蓬莱气田三叠系(80%),为典 型的湿气气藏,甲烷含量82.57%~87.28%,平均 86%;C₂+以上重烃含量高,为3.41%~16.52%,平 均可达 12%. 天然气还含少量氮气(0.01%~ 2.75%)和二氧化碳(0.03%~1.50%)等非烃气体, He 含量低, He 含量为 0.019%~0.039%, 平均 0.032%.川中安岳地区须家河组发育大面积含气的 低孔渗致密砂岩气藏,天然气来自须家河组煤成气 (李剑等,2017; Wu et al., 2023b). 烃源岩-储层大 面积层状交替叠置,烃源岩为须四一须五段煤系地 层,储层为须二段低孔低渗的长石岩屑砂岩,安岳 须家河组二段油气近距离成藏,在构造高、低位置 均分布有气层或水层(图10),气藏分散,并无统一 气水界面,在斜坡低部位气水分异明显,普遍存在 可动水层.须家河组底部以泥页岩、灰白色砂岩与 下伏中三叠统雷口坡组碳酸盐岩呈不整合接触,雷 口坡组顶部发育区域不整合面,岩溶孔隙发育,连 通性好且横向延伸远.前人通过研究气藏轻烃组成 认为,川中地区须家河组天然气中芳烃含量偏低, 指示气藏以游离气相充注为主,水溶气起补充作 用,且局部地区经历了后期水洗(谢增业等,2007). 安岳地区位于继承性隆起的平缓单斜带上,紧邻生 烃中心,须家河组致密砂岩储层中油气近距离聚集 成藏,但侵蚀不整合面为含He流体侧向运移提供 了通道.现今须家河组地层水矿化度高,多在150~ 280 g/L,存在大量钡离子,不含硫酸根离子.高矿化 度地层水多为下伏地层水沿断裂、不整合面、高渗 地层运移形成,地层孔隙度越高,地层水矿化度越 高,含盐量也越高(李伟等,2009).高矿化度地层水 中溶解He含量低,加之气藏距离深部氦源岩较远, 从水中能够捕获的氦量偏低难以形成富氦气藏.

4.3 第Ⅲ类氦气藏特征与解剖

第Ⅲ类氦气藏为高含硫化氢低He的烃类气 藏,特点是H₂s和CO₂等酸性气体含量高,H₂s含量 在7.56%~15.73%之间,平均为13.82%;CO₂含量 平均为9.24%.He含量在0.0056%~0.0284%之 间,平均为0.0141%.气体组分中He、N₂、CH₄均为 单峰,仅CO₂含量存在两个峰值.天然气组分中CH₄





图5 用于风险 贝阳地色月彩出入然【什工数【刀甲及入然【成颗竹曲

Fig.9 Distribution of helium associated with natural gas in the Dengying Formation in the Weiyuan-Ziyang area of Sichuan basin





Fig.10 Schematic diagram of helium accumulation in the Triassic in Anyue area

含量平均为74.22%,几乎没有重烃.He含量较低且 与 N_2 含量呈强正相关(r = 0.646,P < 0.01)(表1, 图11c),具有II类氦气藏特点.根据气体组分相关 性推测,III类氦气藏为第II类氦气藏经历后期改造 形成.

川东北普光气田为富含H₂s的氦气藏,油气来 源于二叠系龙潭组暗色泥岩,经断层运移至三叠系 长兴一飞仙关组鲕滩溶孔白云岩储层中,现今为原 油裂解气和煤成气混合来源的构造一岩性复合型 气藏.气藏于燕山中期(J₃-K₁)形成,在燕山晚期一 喜山期(K₂-Q)经历了调整改造、次生干气藏形成等 变化.

普光气田中CO₂组分存在双峰且以10%为主, 表明有CO₂的后期补给,与晚期阶段发生的热化学 硫酸盐还原作用(thermochemical sulfate reduction, 简称TSR)有关.油藏在深埋高温作用下,烃类与地 层中硫酸盐类在MgSO₄接触离子对的催化驱动下, 发生TSR反应生成富含H₂s、CO₂等酸性气体 (Huang *et al.*,2010;刘全有等,2014),同时还伴随 着酸性流体对储层强烈的溶蚀次生改造,发育大量 孔洞.

气体组分中He、N₂组分概率均为单峰,同样具 有主幕成藏的特点,各井H₂s和CO₂含量相近,反映 气藏内部连通性较好,流体以侧向运移为主(杜春 国等,2009).测井解释、产气井的水气比显示,普光 气田主体气藏的气一水过渡带处于边部,中高部位



Fig.11 Schematic diagram of helium in the Puguang gas field (a) and correlation diagram of gas component (b,c)

气井不受水体影响.同时嘉陵江组四段一雷口坡组 二段膏岩、膏质白云岩分布稳定,构成优质盖层(图 11a),晚期原油热裂解形成的天然气未遭受散失. 天然气藏早期捕获氦之后,经历TSR改造并持续至 今(刘文汇等,2010),导致CH₄与酸性气体(CO₂和 H₂s)含量呈负相关(图11b).另一方面,碳酸盐岩溶 解形成地层卤水(吴双等,2024),产生的离子使地 层水矿化度增加,盐度升高,氦气溶解度降低.

5 讨论

虽然 Danabalan et al.(2022)提出从氦气源岩、 氦气生成、早期释放、二次运移、聚集保存等成藏必 要条件开展氦气勘探的策略(Danabalan et al., 2022),在油气勘探基础上,氦气勘探针对性强,如 利用重力异常、强磁异常探测花岗岩一变质岩等深 部隐伏氦源岩的分布(Zhang et al.,2020);根据岩体 形成年龄、U-Th放射性元素含量和半衰期计算He 生成速率(Ballentine and Burnard, 2002; Zhang et al.,2019);考虑不同矿物的氦气封闭温度确定初 次运移的地温条件(李平等,2023);利用通量理论 依据He停留时间和地层渗透性估算氦气保存潜力 (Cheng et al.,2021; Zhang et al.,2021; Wang et al., 2022);利用多级气、水和油平衡模型分析稀有气体 元素和同位素特征,解释地下开放或封闭流体系统 对He-Ne-Ar 与 N₂的分馏情况(Halford et al., 2022).但由于对氦气富集规律认识程度有限,当前 依然沿用常规油气勘探理论和方法,在勘探天然气 同时顺带寻找氦气,寄希望于富油气区发现富氦气 藏,对于烃类伴生氦气的勘探不利.

依据聚类分析,不利的氦气藏类型包括:(1)超 压天然气田,如安岳寒武系大气田,早期运移聚集 的He气藏经历了晚期原油裂解高强度生气;(2)页 岩气藏,如涪陵志留系龙马溪组页岩气藏中He,经 历了早期成岩压实含He流体散失,中期页岩U、Th 衰变生He重新积累,晚期强生烃He稀释等过程; (3)富C₂+重烃气藏,如安岳气田和广安气田三叠 系须家河组,气藏具有流体黏度高,不易流动的特 点,距离深部氦源岩较远,捕获水溶氦含量低,难以 形成富氦气藏.Ⅱ类氦气藏中平均He含量较高,其 特点是:位于基底隆起区,储层时代较老,有外源 He、N₂补充,是现实可行的勘探目标.

5.1 氦气运移成藏与地层水

由于氦气"弱源气"的特点,其生成、释放受衰 变时间和温度的控制,不存在集中生气高峰,难以 垂向扩散形成富氦天然气藏.故需要通过构造活动 或断裂,将深部弥散分布的He聚集起来,这一过程 中氦气运移至关重要.He和N。可以自由气相向上 运移,或以水溶相运移,并在浅处随盐度、温压变化 时脱溶成游离气相.当含有溶解态He和N2的地下 水接触CH4、CO2等气体时,He和N2会优先、同步从 地下水中脱溶进入游离气相,并随之运移成藏(Barry et al., 2017; Halford et al., 2022). 氦气的含量取决 于水溶氦浓度、地下水含量以及烃类气体的比例. 水溶氦浓度数据对于评估存储和运移效率至关重 要,Weiss(1970)利用He、N2、Ne和Ar等气体在地 层水中的溶解度实验数据,建立了气体的Bunsen溶 解系数随温度T、地层水盐度S的定量关系(Weiss, 1970)(图12a),其中气体Bunsen溶解系数定义为在 1标准大气压压力下、溶解在1cm³纯水或盐水中的 气体体积,A、B均为常数.结果显示,稀有气体的溶 解度高度依赖于温度,随着温度增长,He、N2、Ne和 Ar的溶解度均表现出先减小后增大的趋势,并且在 水中的溶解度随原子量的增加而显著增大(图 8a). Smith and Kennedv(1983)测试了在0℃~65℃温 度、1标准大气压压力条件下,Ar在淡水和NaCl盐 水中的溶解度.结果表明,随着盐度增加,Ar的溶解 度显著降低,在卤水(25%,质量百分含量)中的溶 解度为淡水中的 0.14~0.25(图 12b). 依据质量效 应,推测小分子量的He在地层水中的溶解度同样 随盐度增大而减小,高盐度地下水中He溶解度低, 烃类气体大规模生成之前的早期阶段,沉积层压实 排液,由于盐度增大而出溶为游离态的He随气体 膨胀会迅速散失,难以保存至晚期烃类气体大规模 生成阶段.水溶相的氦遵循亨利溶解度定律,氦的 低溶解度和低体积分数特性决定了氦趋向于从水 溶态转变为游离气态,并最终绝大部分进入气藏 (Ballentine and Burnard, 2002;李玉宏等, 2017;陈祥 瑞等,2023).在页岩气大量生成阶段,地层水含量减 少,水溶氦浓度因盐度升高而不断降低,He脱溶为 游离气态进入烃类气藏,加之烃类气体大量生成, 最终导致页岩气中He含量较低.

5.2 构造活动与古水文地质条件

四川盆地 II 类氦气藏多位于继承背斜和穹状 圈闭中,氦气富集与天然气二次运移过程中捕获水 溶氦密切相关.天然气以不整合面横向迁移或与断 层沟通运移,二次运移距离越长,可能形成富He高 N₂的 II 类氦气藏.而磨溪寒武系超压天然气田以及 涪陵志留系页岩气田在内的 I 类氦气藏的封闭性 高,含He流体二次运移距离较短甚至不发生二次 运移,天然气与地下流体相互作用弱,从而捕获的 外来氦含量低.富氦气藏通常需要二次迁移(即横





向迁移),与地下水"交流"才能形成(Danabalan et al.,2022;秦胜飞等,2022;朱东亚等,2024).储层 年龄越老,经历构造改期次越多,地下水多期"交 流"的概率越大,氦气含量越高,这一特点在四川盆 地乐山-龙女寺古隆起一带尤为常见.川中古隆起 灯影组天然气藏中地层水活跃还有其他证据:(1) 过成熟阶段地层水参与了氢交换反应,造成甲烷中 碳同位素值增大而氢同位素值却异常降低(吴伟 等,2016).(2)稀有气体²⁰Ne含量可以反映地下水对 气藏的影响,威远地区灯影组天然气中²⁰Ne含量为 17×10⁻⁹~30×10⁻⁹,整体高于同区龙马溪组页岩气 的7×10⁻⁹~14×10⁻⁹(秦胜飞等,2024),灯影组天 然气藏地下水更为活跃.而安岳气田的²⁰Ne与⁴He 之间相关性差,指示其水动力对氦气的运聚作用整 体较弱.

依据Ⅱ类氦气藏中He含量的3个峰(图6e),可 以推测该类氦气藏与地下流体的大规模"交流"至 少有3期,对应油气的多期运移成藏或之后的非烃 流体(地层水)活动,Ⅲ类氦气藏中He为多期次聚 集成藏.这种流体活动常需具备区域构造背景,全 盆地规模的大幅度构造隆升为溶解氦的地下水向 上运移提供动力.古水文地质条件是控制氦气藏形 成的重要因素,水动力场影响地下流体运移、聚散 和空间分布.在盆地沉降阶段以沉积水为主体,在 盆地上升剥蚀阶段以大气淋滤水为主体.在油气运 移成藏同期或之后的水文地质阶段是氦气运移成 藏的有利时机,地下水流作为氦气载体和驱动力, 携带溶解态He向低势区转移,并在圈闭中分异、聚 集成藏.由于水文地质阶段与区域构造活动密切相 关,故氦气藏的分布还受断裂的影响,一方面基底 断裂与深部氦源沟通,为深部氦气向浅部运移提供 通道;另一方面活动期断裂也是流体快速运移、调 整分配的重要通道.

5.3 氦气勘探评价策略

根据氦气富集与天然气成藏差异,提出氦气的 勘探策略如下:(1)具有异常高压的天然气藏或页 岩气藏,含有高硫化氢含量,以及富C₂+重烃的气 藏均对He富集均不利.(2)有外源He补充的Ⅱ类氦 气藏是勘探目标,需综合考虑烃类与地下水交流萃 取的CH₄-He-N₂系统.储层时代越老,与地下水多



图 13 四川盆地 He 气藏类型分布平面图(a)、不同气田探明储量(b)、气田 He 含量及类型分布(c)和不同储层中 He 气藏类型占 比图(d)

Fig.13 The type distribution of helium reservoirs in the Sichuan basin (a), proven reserves (b), He content and types (c), and percentage of helium gas in different gas fields (d) 期"交流"的概率越大,越有利于氦气的捕获与聚集. (3)在天然气沿古老地层经长距离运移形成的气藏 区寻找氦气,全盆地规模的构造活动(如喜山运 动),除了造成油气向构造高部位运移外,更显著的 是引起地层水的长距离流动,处于油气运移路径上 构造高部位的圈闭是氦气宜居带(Goldilocks zone, 天文学上指距离恒星一定距离、能够保存液态水的 星际宜居带),有利于捕获溶解在古老地层水中的 氦.(4)氦气勘探区应聚焦以古老地层为基底,或易 与古老地层沟通的油气勘探层系,富含放射性元素 U、Th的氦气源岩对氦气富集同样至关重要.

氦气勘探及评价需综合考虑天然气的储量、氦 气丰度、氦气藏类型(聂海宽等,2023),不同气田、 储层中He气藏类型占比如图13所示.四川盆地 II 类氦气藏主要分布在川中古隆起周缘,以下寒武统 泥页岩为烃源岩,储层时代为奥陶系一震旦系,氦 气平均含量大于0.15%. 深大断裂对氦气的局部富 集有明显影响,如威远、资阳、高磨、合川、广安等Ⅱ 类氦气藏东临 NE 向华鉴山深大断裂、南侧为威远 基底断裂,内部发育多条大规模直立断层与基底相 连,震旦一奥陶系地层位于深部断裂交会带,为氦 气向上运移提供了通道.此外紧邻齐岳山、龙泉山 等区域断裂也分布有少量Ⅱ类氦气藏,烃源岩时代 多为二叠系,储层为二叠一三叠系,氦气含量稍低. 天然气伴生氦气开发还涉及提氦技术,根据分类结 果, I 类天然气资源潜力大但氦气品位低, 如涪陵 页岩气田和安岳龙王庙气田,绝大多数低于氦气含 量边界品位0.05%, 宜采用BOG提氦技术提取 LNG 尾气中 He, 以形成有效产能. II 类氦气藏的伴 生氦气资源品位较高,威远、资阳等气田可在开采 过程中实施液化天然气直接提氦工程,经济价值预 计十分可观.

6 结论

在地层水从深层运移到浅层的过程中,地层水 对天然气既起到了载体作用又起到过滤作用.N₂与 He同样以地下水作为载体运移,在稀溶液中溶解系 数随温度、盐度变化的趋势一致,运移过程常发生 烃类置换,脱气成藏.天然气成因、地层水以及运移 混合效应,是控制四川盆地天然气藏中He含量、He 与N₂关系的关键因素.采用聚类分析的数理统计方 法,依据天然气组分差异可以有效划分四川盆地含 氦天然气藏的种类.总结实例认为, I 类和 II 类氮 气藏的区别在于,天然气形成后是否有外源He的补充. I 类低He低N₂低CO₂高CH₄烃类气藏包括页 岩气藏、古油藏原位裂解的超压气藏,氦气形成后 保存条件优越,与流体交流作用弱,同时高强度生 气也稀释氦气的浓度,导致氦与烃类气体、氮气均 无相关性. II 类气藏形成后,有明显的外源He补充. 四川盆地 II 类氦气藏主要包括威远震旦系一寒武 系、资阳震旦系灯影组等,He含量存在若干个高峰 值,并且与 N₂呈强正相关,氦气藏形成与烃类气体 和地下水多期交流萃取的CH₄-He-N₂系统密切相 关,目前发现的富He气藏多位于基底隆起的继承 性背斜和穹窿圈闭中,这些古隆起区有利于地层水 的长距离流动,或多期运移,是氦气藏勘探的重要 目标.

附表见地球科学官网 https://doi.org/10.3799/ dqkx.2025.020

致谢:两位匿名评审专家和主编提出的宝贵意 见和建议对论文质量提高起了重要作用,深表谢意.

References

- Ballentine, C.J., Burnard, P.G., 2002. Production, Release and Transport of Noble Gases in the Continental Crust. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 47(1):481-538. https://doi.org/10.2138/rmg.2002.47.12
- Ballentine, C.J., Marty, B., Sherwood Lollar, B., et al., 2005. Neon Isotopes Constrain Convection and Volatile Origin in the Earth's Mantle. *Nature*, 433:33-38. https://doi. org/10.1038/nature03182
- Barry, P.H., Lawson, M., Meurer, W.P., et al., 2017. Determining Fluid Migration and Isolation Times in Multiphase Crustal Domains Using Noble Gases. *Geology*, 45 (9):775-778.https://doi.org/10.1130/g38900.1
- Boreham, C.J., Edwards, D.S., Poreda, R.J., et al., 2018.Helium in the Australian Liquefied Natural Gas Economy. *The APPEA Journal*, 58(1): 209. https://doi.org/ 10.1071/aj17049
- Brown, A., 2019. Origin of Helium and Nitrogen in the Panhandle-Hugoton Field of Texas, Oklahoma, and Kansas, United States. AAPG Bulletin, 103(2): 369– 403.https://doi.org/10.1306/07111817343
- Chen, J.F., Liu, K.X., Dong, Q.W., et al., 2021.Research Status of Helium Resources in Natural Gas and Prospects of Helium Resources in China. *Natural Gas Geoscience*, 32 (10):1436-1449(in Chinese with English abstract).
- Chen, X.J., Chen, G., Bian, R.K., et al., 2023. The Helium Resource Potential and Genesis Mechanism in Fuling Shale

Gas Field, Sichuan Basin.*Natural Gas Geoscience*, 34(3): 469-476(in Chinese with English abstract).

- Chen, X. R., Wang, Y. P., He, Z. H., et al., 2023. Solubility Models of CH₄, CO₂ and Noble Gases and Their Geological Applications. *Natural Gas Geoscience*, 34(4): 707-718(in Chinese with English abstract).
- Cheng, A.R., Sherwood Lollar, B., Gluyas, J.G., et al., 2023. Primary N₂-He Gas Field Formation in Intracratonic Sedimentary Basins. *Nature*, 615(7950): 94-99. https:// doi.org/10.1038/s41586-022-05659-0
- Cheng, A.R., Sherwood Lollar, B., Warr, O., et al., 2021.Determining the Role of Diffusion and Basement Flux in Controlling ⁴He Distribution in Sedimentary Basin Fluids. *Earth and Planetary Science Letters*, 574: 117175. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.117175
- Dai, J.X., Ni, Y.Y., Qin, S.F., et al., 2017.Geochemical Characteristics of He and CO₂ from the Ordos (Cratonic) and Bohaibay (Rift) Basins in China. *Chemical Geology*, 469: 192-213. https://doi.org/10.1016/j. chem-geo.2017.02.011
- Dai, J.X., Zou, C.N., Liao, S.M., et al., 2014. Geochemistry of the Extremely High Thermal Maturity Longmaxi Shale Gas, Southern Sichuan Basin. Organic Geochemistry, 74: 3-12. https://doi. org/10.1016/j. orggeochem.2014.01.018
- Dai, J.X., Zou, C.N., Zhang, S.C., et al., 2008. Discrimination of Abiogenic and Biogenic Alkane Gases. Science in China (Series D), 51(12): 1737-1749. https://doi.org/ 10.1007/s11430-008-0133-1
- Danabalan, D., Gluyas, J.G., MacPherson, C.G., et al., 2022. The Principles of Helium Exploration. *Petroleum Geosci*ence, 28(2): 2021-2029. https://doi.org/10.1144/petgeo2021-029
- Deng, B., Liu, S.G., Yao, G.S., et al., 2024. Distribution Pattern and Main Controlling Factors of Paleozoic Giant and Medium Sized Gas Fields of the Sichuan Super Gas Basin in Southwest China. *Natural Gas Industry*, 44(7): 54-76(in Chinese with English abstract).
- Du, C.G., Hao, F., Zou, H.Y., et al., 2009. Process and Mechanism for Oil and Gas Accumulation, Adjustment and Reconstruction in Puguang Gas Field, Northeast Sichuan Basin, China. Science in China (Series D), 39(12):1721–1731(in Chinese).
- Fisher, D.E., 1986.Rare Gas Abundances in MORB.*Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50(12):2531-2541.https:// doi.org/10.1016/0016-7037(86)90208-5
- Fu, N., Li, Y.C., Liu, D., et al., 2005. Geochemical Character-

istics of Natural Gas Migration in Pinghu Gas Field, East
China Sea. *Petroleum Exploration and Development*, 32
(5):34-37(in Chinese with English abstract).

- Halford, D.T., Karolytė, R., Barry, P.H., et al., 2022. High Helium Reservoirs in the Four Corners Area of the Colorado Plateau, USA. *Chemical Geology*, 596:120790. https: //doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.120790
- Huang, S.J., Huang, K.K., Tong, H.P., et al., 2010.Origin of CO₂ in Natural Gas from the Triassic Feixianguan Formation of Northeast Sichuan Basin.*Science China: Earth Sciences*, 53(5): 642-648. https://doi. org/10.1007/ s11430-010-0046-7
- Li, J., Li, Z. S., Wang, X. B., et al., 2017. New Indexes and Charts for Genesis Identification of Multiple Natural Gases. *Petroleum Exploration and Development*, 44(4): 503-512(in Chinese with English abstract).
- Li, P., Ma, X.X., Zhang, M.Z., et al., 2023.Research Progress on Diffusion Process and Controlling Factors of Helium in Minerals. *Natural Gas Geoscience*, 34(4):697-706(in Chinese with English abstract).
- Li, P.P., Liu, Q.Y., Zhu, D.Y., et al., 2024. Distributions and Accumulation Mechanisms of Helium in Petroliferous Basins. *Scientia Sinica (Terrae)*, 54(10): 3195-3218(in Chinese).
- Li, W., Yang, J.L., Jiang, J.W., et al., 2009. Origin of Upper Triassic Formation Water in Middle Sichuan Basin and Its Natural Gas Significance. *Petroleum Exploration and Development*, 36(4): 428-435(in Chinese with English abstract).
- Li, Y.H., Zhang, W., Wang, L., et al., 2017. Henry's Law and Accumulation of Crust-Derived Helium: A Case from Weihe Basin, China. *Natural Gas Geoscience*, 28(4): 495-501(in Chinese with English abstract).
- Liang, X., Liu, S.G., Xia, M., et al., 2016. Characteristics and Geological Significance of Gas Chimney of the Sinian Dengying Formation in the Weiyuan Structure, Sichuan Basin. Oil & Gas Geology, 37(5): 702-712(in Chinese with English abstract).
- Liu, K.X., Chen, J.F., Fu, R., et al., 2022. Discussion on Distribution Law and Controlling Factors of Helium-Rich Natural Gas in Weiyuan Gas Field. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 46(4): 12-21(in Chinese with English abstract).
- Liu, Q.Y., Jin, Z.J., Wu, X.Q., et al., 2014. Genetic Origin of Sulfate Compounds in H₂S Bearing Gas Reservoirs of Sichuan Basin, China. *Natural Gas Geoscience*, 25(1): 33-38(in Chinese with English abstract).

- Liu, S.G., Sun, W., Zhao, Y.H., et al., 2015.Differential Accumulation and Distribution of Natural Gas and Their Main Controlling Factors in the Upper Sinian Dengying Fm., Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 35(1): 10-23(in Chinese with English abstract).
- Liu, W.H., 2025. Molecular Dynamics Simulation: The Key to Reveal the Enrichment Mechanisms of Helium. *Scientia Sinica* (*Terrae*), 55(2):660-661(in Chinese with English abstract).
- Liu, W.H., Teng, G.R., Gao, B., et al., 2010. H₂S Formation and Enrichment Mechanism in Medium to Large Scale Natural Gas Fields (Reservoirs) in Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 37(5): 513-522(in Chinese with English abstract).
- Luo, B., Luo, W. J., Wang, W. Z., et al., 2015. Formation Mechanism of the Sinian Natural Gas Reservoir in the Leshan-Longnvsi Paleo-Uplift, Sichuan Basin. Natural Gas Geoscience, 26(3):444-455(in Chinese with English abstract).
- Milkov, A. V., Faiz, M., Etiope, G., 2020. Geochemistry of Shale Gases from around the World: Composition, Origins, Isotope Reversals and Rollovers, and Implications for the Exploration of Shale Plays. Organic Geochemistry, 143: 103997. https://doi. org/10.1016/j. orggeochem.2020.103997
- Nie, H.K., Liu, Q.Y., Dang, W., et al., 2023. Enrichment Mechanism and Resource Potential of Shale-Type Helium:A Case Study of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Sichuan Basin. Scientia Sinica (Terrae), 53(6): 1285-1294(in Chinese).
- Ozima, M., Podosek, F. A., 2001. Noble Gas Geochemistry. Cambridge University Press, Cambridge, 178-180. https://doi.org/10.1017/cbo9780511545986
- Prinzhofer, A., Dos Santos Neto, E.V., Battani, A., 2010. Coupled Use of Carbon Isotopes and Noble Gas Isotopes in the Potiguar Basin (Brazil): Fluids Migration and Mantle Influence. *Marine and Petroleum Geology*, 27(6):1273-1284.https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2010.03.004
- Qin, S.F., Li, J.Y., Liang, C.G., et al., 2022. Helium Enrichment Mechanism of Helium Rich Gas Reservoirs in Central and Western China: Degassing and Accumulation from Old Formation Water. *Natural Gas Geoscience*, 33 (8):1203-1217(in Chinese with English abstract).
- Qin, S.F., Tao, G., Luo, X., et al., 2023a. Difference between Helium Enrichment and Natural Gas Accumulation and Misunderstandings in Helium Exploration. *Natural Gas Industry*, 43(12): 138-151(in Chinese with English ab-

stract).

- Qin, S.F., Zhou, G.X., Li, J.Y., et al., 2023b. The Coupling Effect of Helium and Nitrogen Enrichment and Its Significance. *Natural Gas Geoscience*, 34(11): 1981-1992(in Chinese with English abstract).
- Qin, S. F., Dou, L. R., Tao, G., et al., 2024. Helium Enrichment Theory and Exploration Ideas for Helium - Rich Gas Reservoirs. *Petroleum Exploration and Development*, 51(5): 1160-1174(in Chinese with English abstract).
- Shuai, Y. H., Li, J., Tian, X. W., et al., 2023. Accumulation Mechanisms of Sinian to Triassic Gas Reservoirs in the Central and Western Sichuan Basin and Their Significance for Oil and Gas Prospecting. Acta Geologica Sinica, 97(5):1526-1543(in Chinese with English abstract).
- Smith, S. P., Kennedy, B. M., 1983. The Solubility of Noble Gases in Water and in NaCl Brine. Geochimica et Cosmochimica Acta, 47(3):503-515.https://doi.org/10.1016/ 0016-7037(83)90273-9
- Tao, S.Z., Wu, Y.P., Tao, X.W., et al., 2024. Helium: Accumulation Model, Resource Exploration and Evaluation, and Integrative Evaluation of the Entire Industrial Chain. *Earth Science Frontiers*, 31(1):351-367(in Chinese with English abstract).
- Wang, P., Shen, Z. M., Liu, S. B., et al., 2014. Geochemical Characteristics of Nonhydrocarbon in Natural Gas in West Sichuan Depression and Its Implications. *Natural* Gas Geoscience, 25(3): 394-401 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X.F., Liu, Q.Y., Liu, W.H., et al., 2023. Helium Accumulation in Natural Gas Systems in Chinese Sedimentary Basins. *Marine and Petroleum Geology*, 150:106155. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2023.106155
- Wang, X.F., Liu, W.H., Li, X.B., et al., 2020.Radiogenic Helium Concentration and Isotope Variations in Crustal Gas Pools from Sichuan Basin, China. *Applied Geochemistry*, 117: 104586. https://doi. org/10.1016/j. apgeochem.2020.104586
- Wang, X.F., Liu, W.H., Li, X.B., et al., 2022. Application of Noble Gas Geochemistry to the Quantitative Study of the Accumulation and Expulsion of Lower Paleozoic Shale Gas in Southern China. *Applied Geochemistry*, 146: 105446. https://doi. org/10.1016/j. apgeochem.2022.105446
- Weiss, R.F., 1970. Helium Isotope Effect in Solution in Water and Seawater. Science, 168(3928): 247-248. https://doi. org/10.1126/science.168.3928.247

- Wu, W., Cheng, P., Liu, S. Y., et al., 2023a. Gas-in-Place (GIP) Variation and Main Controlling Factors for the Deep Wufeng-Longmaxi Shales in the Luzhou Area of the Southern Sichuan Basin, China. Journal of Earth Science, 34(4): 1002-1011. https://doi. org/10.1007/ s12583-021-1593-x
- Wu, Z.J., Li, T.F., Ji, S., et al., 2023b.Gas Generation from Coal and Coal-Measure Mudstone Source Rocks of the Xujiahe Formation in the Western Sichuan Depression, Sichuan Basin. Journal of Earth Science, 34(4): 1012– 1025.https://doi.org/10.1007/s12583-022-1627-z
- Wu, S., Wang, J., Zhang, C.G., et al., 2024.Genesis and Distribution Law of Rich Lithium-Potassium Brine in the Lower Triassic of Puguang Area. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 31(1):96-105(in Chinese with English abstract).
- Wu, W., Luo, B., Luo, W.J., et al., 2016. Further Discussion about the Origin of Natural Gas in the Sinian of Central Sichuan Paleo-Uplift, Sichuan Basin, China. Natural Gas Geoscience, 27(8): 1447-1453(in Chinese with English abstract).
- Wu, X. Q., Dai, J. X., Liao, F. R., et al., 2013. Origin and Source of CO₂ in Natural Gas from the Eastern Sichuan Basin. Science China Earth Sciences, 56(8):1308–1317. https://doi.org/10.1007/s11430-013-4601-x
- Xie, Z. Y., Yang, W., Hu, G. Y., et al., 2007. Light Hydrocarbon Compositions of Natural Gases and Their Application in Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 18(5): 720-725(in Chinese with English abstract).
- Yang, Y.M., Yang, Y., Yang, G., et al., 2019.Gas Accumulation Conditions and Key Exploration & Development Technologies of Sinian and Cambrian Gas Reservoirs in Anyue Gas Field. Acta Petrolei Sinica, 40(4):493-508 (in Chinese with English abstract).
- Yi, J.Z., Bao, H.Y., Zheng, A.W., et al., 2019. Main Factors Controlling Marine Shale Gas Enrichment and High -Yield Wells in South China: A Case Study of the Fuling Shale Gas Field. *Marine and Petroleum Geology*, 103: 114-125. https://doi. org/10.1016/j. marpetgeo.2019.01.024
- Yin, F., Liu, R.B., Wang, W., et al., 2013.Geochemical Characters of the Tight Sandstone Gas from Xujiahe Formation in Yuanba Gas Field and Its Gas Source. Natural Gas Geoscience, 24(3):621-627(in Chinese with English abstract).
- You, B., Chen, J.F., Xiao, H., et al., 2023. Accumulation Models and Key Conditions of Crustal-Derived Helium-Rich Gas Reservoirs. *Natural Gas Geoscience*, 34(4):672-683

(in Chinese with English abstract).

- Zhang, L.Y., Wu, K.L., Chen, Z.X., et al., 2021.Gas Storage and Transport in Porous Media:From Shale Gas to Helium-3.*Planetary and Space Science*, 204:105283.https:// doi.org/10.1016/j.pss.2021.105283
- Zhang, W., Li, Y. H., Zhao, F. H., et al., 2019. Using Noble Gases to Trace Groundwater Evolution and Assess Helium Accumulation in Weihe Basin, Central China. Geochimica et Cosmochimica Acta, 251:229-246.https://doi. org/10.1016/j.gca.2019.02.024
- Zhang, W., Li, Y.H., Zhao, F.H., et al., 2020.Granite is an Effective Helium Source Rock: Insights from the Helium Generation and Release Characteristics in Granites from the North Qinling Orogen, China. Acta Geologica Sinica (English Edition), 94(1): 114–125. https://doi.org/10.1111/1755-6724.14397
- Zhu, D.Y., Liu, Q.Y., Li, P.P., et al., 2024. Configuration Relationship of Source and Reservoir and Enrichment Mechanism of Helium-Rich Gas Reservoirs. Acta Geologica Sinica, 98(11): 3182-3201(in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 陈践发,刘凯旋,董勍伟,等,2021.天然气中氦资源研究现状 及我国氦资源前景.天然气地球科学,32(10):1436-1449.
- 陈新军,陈刚,边瑞康,等,2023.四川盆地涪陵页岩气田氦气 资源潜力与成因机理.天然气地球科学,34(3): 469-476.
- 陈祥瑞,王云鹏,何志华,等,2023.CH₄、CO₂与稀有气体溶解 度的估算模型及其地质应用.天然气地球科学,34(4): 707-718.
- 邓宾,刘树根,姚根顺,等,2024.四川超级含气盆地古生界大 中型气田分布规律及其主控因素.天然气工业,44(7): 54-76.
- 杜春国,郝芳,邹华耀,等,2009.川东北地区普光气田油气运 聚和调整、改造机理与过程.中国科学(D辑),39(12): 1721-1731.
- 傅宁,李友川,刘东,等,2005.东海平湖气田天然气运移地球 化学特征.石油勘探与开发,32(5):34-37.
- 李剑,李志生,王晓波,等,2017.多元天然气成因判识新指标 及图版.石油勘探与开发,44(4):503-512.
- 李朋朋,刘全有,朱东亚,等,2024.含油气盆地氦气分布特征 与成藏机制.中国科学:地球科学,54(10):3195-3218.
- 李平,马向贤,张明震,等,2023.矿物中氦的扩散过程及控制 因素研究进展.天然气地球科学,34(4):697-706.
- 李伟,杨金利,姜均伟,等,2009.四川盆地中部上三叠统地层 水成因与天然气地质意义.石油勘探与开发,36(4):

428 - 435.

- 李玉宏,张文,王利,等,2017.亨利定律与壳源氦气弱源成 藏:以渭河盆地为例.天然气地球科学,28(4):495-501.
- 梁霄,刘树根,夏铭,等,2016.四川盆地威远构造震旦系灯影 组气烟囱特征及其地质意义.石油与天然气地质,37 (5):702-712.
- 刘凯旋,陈践发,付烧,等,2022.威远气田富氦天然气分布规 律及控制因素探讨.中国石油大学学报(自然科学版), 46(4):12-21.
- 刘全有,金之钧,吴小奇,等,2014.四川盆地含H₂S天然气中 硫化物成因探讨.天然气地球科学,25(1):33-38..
- 刘树根,孙玮,赵异华,等,2015.四川盆地震旦系灯影组天然 气的差异聚集分布及其主控因素.天然气工业,35(1): 10-23.
- 刘文汇,2025.分子动力学模拟计算是揭示氦富集机制的关 键.中国科学:地球科学,55(2):660-661.
- 刘文汇, 腾格尔, 高波, 等, 2010. 四川盆地大中型天然气田 (藏)中H₂S形成及富集机制.石油勘探与开发, 37(5): 513-522.
- 罗冰,罗文军,王文之,等,2015.四川盆地乐山:龙女寺古隆 起震旦系气藏形成机制.天然气地球科学,26(3): 444-455.
- 聂海宽,刘全有,党伟,等,2023.页岩型氦气富集机理与资源 潜力:以四川盆地五峰组一龙马溪组为例.中国科学:地 球科学,53(6):1285-1294.
- 秦胜飞,窦立荣,陶刚,等,2024.氦气富集理论及富氦资源勘 探思路.石油勘探与开发,51(5):1160-1174.
- 秦胜飞,李济远,梁传国,等,2022.中国中西部富氦气藏氦气 富集机理:古老地层水脱氦富集.天然气地球科学,33

(8):1203-1217.

- 秦胜飞,陶刚,罗鑫,等,2023a.氦气富集与天然气成藏差异、 勘探误区.天然气工业,43(12):138-151.
- 秦胜飞,周国晓,李济远,等,2023b.氦气与氮气富集耦合作 用及其重要意义.天然气地球科学,34(11):1981-1992.
- 帅燕华,李剑,田兴旺,等,2023.四川盆地川中一川西震旦 系一三叠系天然气成藏分析及勘探意义.地质学报,97 (5):1526-1543.
- 陶士振,吴义平,陶小晚,等,2024.氦气地质理论认识、资源 勘查评价与全产业链一体化评价关键技术.地学前缘, 31(1):351-367.
- 王鹏, 沈忠民, 刘四兵, 等, 2014. 川西坳陷天然气中非烃气地 球化学特征及应用. 天然气地球科学, 25(3):394-401.
- 吴双,王峻,张春光,等,2024.普光地区下三叠统富锂钾卤水 成因与分布规律.断块油气田,31(1):96-105.
- 吴伟,罗冰,罗文军,等,2016.再论四川盆地川中古隆起震旦 系天然气成因.天然气地球科学,27(8):1447-1453.
- 谢增业,杨威,胡国艺,等,2007.四川盆地天然气轻烃组成特 征及其应用.天然气地球科学,18(5):720-725.
- 杨跃明,杨雨,杨光,等,2019.安岳气田震旦系、寒武系气藏 成藏条件及勘探开发关键技术.石油学报,40(4): 493-508.
- 印峰,刘若冰,王威,等,2013.四川盆地元坝气田须家河组致 密砂岩气地球化学特征及气源分析.天然气地球科学, 24(3):621-627.
- 尤兵,陈践发,肖洪,等,2023.壳源富氦天然气藏成藏模式及 关键条件.天然气地球科学,34(4):672-683.
- 朱东亚,刘全有,李朋朋,等,2024.富氦气藏源储关系及富集 机理.地质学报,98(11):3182-3201.