

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, 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, 武汉, 430205

3) 南方复杂构造区页岩气研究中心, 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, 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份资料, 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。本文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三类, 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 III 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份均为单峰, He 含量低 (平均 0.0339%), 且与 N₂ 含量相关性差; 第 II 类富氦天然气藏中非烃组份呈多峰分布, 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

中图分类号: P593; 628+.1

收稿日期: 2024-12-12

Classification and analysis of helium-bearing natural gas based on clustering statistics: A case study of the Sichuan Basin

Luo Sheng-yuan^{1,2,3}, Jiang Shu^{3,4}, Zhang Bao-min^{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 and Gas Accumulation Theory and Engineering in Southern Complex

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”(DD20243464)、国家自然科学基金项目(42130803, 42172038)及武汉地质调查中心青年人才计划项目(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。Email: loshyv@163.com, ORCID: 0000-0002-4325-4436.

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

Structural Area, China Geological Survey, Wuhan Hubei 430205, China;

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

4. China University of Geosciences, 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, Iwe innovatively use 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: (i) The helium associated with hydrocarbons in the Sichuan Basin can be mainly divided into three types, Type I is characterized by low He, low N₂, low CO₂ and high CH₄ 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. (ii) 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. (iii) 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. (iv) 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.

Keywords: Sichuan Basin; Helium; Cluster analysis; Coupling relationship; Secondary migration; Stratum water

Foundation items: This work was financially supported by the China Geology Survey Project (Grant No. DD20243464), the National Natural Science Fund of China (NSFC) (Grant No. 42130803 and No. 42172038), the Young Talent Project of Wuhan Geological Survey Centre (Grant No. QL2022-09).

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, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 氦同位素比值 (R_a) 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 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 1.1×10^{-5} , $R/R_a=5\sim 50$ (R 为样品中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值) (Fisher, 1986); ③陆壳富含 U、Th 元素, 衰变产生 ^4He 大量富集, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $(2\sim 10)\times 10^{-8}$, $R/R_a=0.013\sim 0.021$ (Prinzhofer and Battani, 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 (CH_4 、 O_2 、 N_2 和 H_2) 的耦合关系研究, 是探究其成藏规律的重要手段。 N_2 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, 2023)。然而部分地区气井中 N_2 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, 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份含量为基础, 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, 工业上依据氦气组份含量分为特富氦 (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 百万方)、大型 (50~100 百万方)、中型 (25~50 百万方)、小型 (5~25 百万方)、特小型 (小于 5 百万方) 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 CH_4 、 N_2 、 CO_2 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(Liu et al., 2023)。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三类(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份数据进行研究, 利用聚类分析将具有相似气体组份的样品聚为同一簇, 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, 以期对氦气成藏地质理论、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份资料，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。本文气体组份数据均来源于已发表文献，共统计202口井（附表），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：

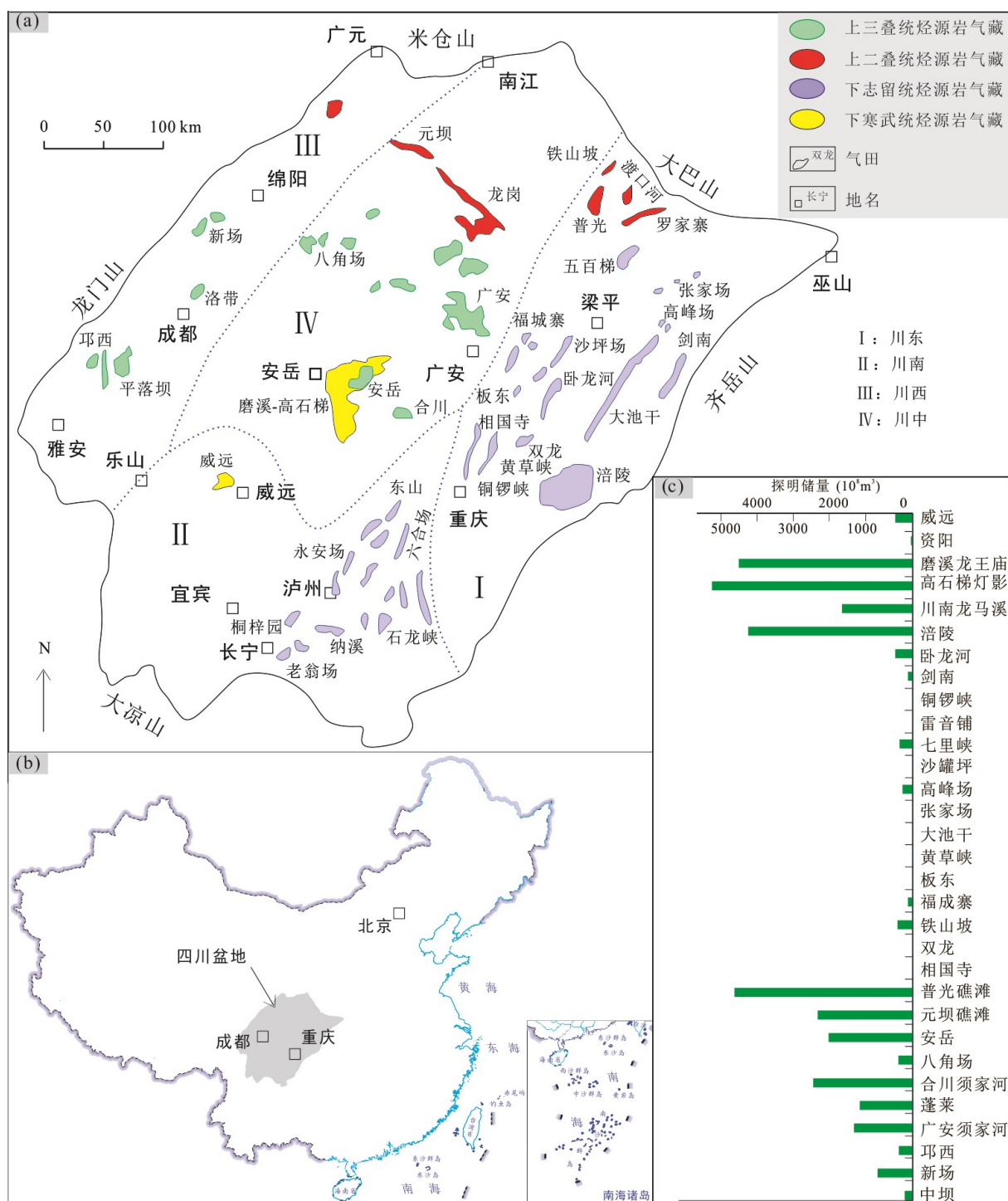


图 1 四川盆地构造单元分区及气田分布平面图 (a-b), 以及探明储量概况 (c), 据(帅燕华等, 2023)修改

Fig.1 Distribution of tectonic units and gas fields in the Sichuan Basin, as well as an overview of gas field explored reserves

(1) 筇竹寺组下寒武统 ($\in_{1q}$) 海相页岩, 分布于整个盆地, 川南和川北地区页岩厚度 200~300m, 生气强度 $(50\sim100) \times 10^8 \text{m}^3/\text{km}^2$, 天然气资源量 $1.91 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。是威远气藏和高石梯-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 $(38\sim92) \text{ppm}$ 和 $(6.02\sim10.2) \text{ppm}$ 。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-磨溪气藏的氦丰度相对低，在 0.02%~0.0891%之间，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(S_{1l})海相页岩，分布在盆地东南部，厚度 0~100m，天然气资源量 $4.96 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，生气强度 $(10 \sim 60) \times 10^8 \text{m}^3/\text{km}^2$ ，U、Th 平均丰度分别为 18.83ppm 和 15.69ppm。形成涪陵、威远-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., 2014; Yi et al., 2019)。威远地区五峰组-龙马溪组页岩气中氦含量稍高，范围在 0.0228%~0.1286%之间，彭水地区该层系氦含量为 0.0986%~0.101%；涪陵、长宁地区龙马溪组页岩气中氦丰度低，范围在 0.0187%~0.1253%之间，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-长宁相似，范围为 0.0063%~0.15%，平均 0.0364%。

(3)上二叠统龙潭组(P_2l)海相-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 $2.0 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，生气强度 $(10 \sim 50) \times 10^8 \text{m}^3/\text{km}^2$ ，U、Th 丰度范围为 (3.0~16.4) ppm 和 (1.06~15.6) ppm。元坝和普光气藏的氦含量低，在 0.0056%~0.04%之间，平均为 0.0146%。

(4)上三叠统须家河组(T_{3x})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 $4.85 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，生烃强度 $(5 \sim 70) \times 10^8 \text{m}^3/\text{km}^2$ 。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—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 CH_4 、 CO_2 相关性差，与 N_2 具有一定正相关性（图 2）。

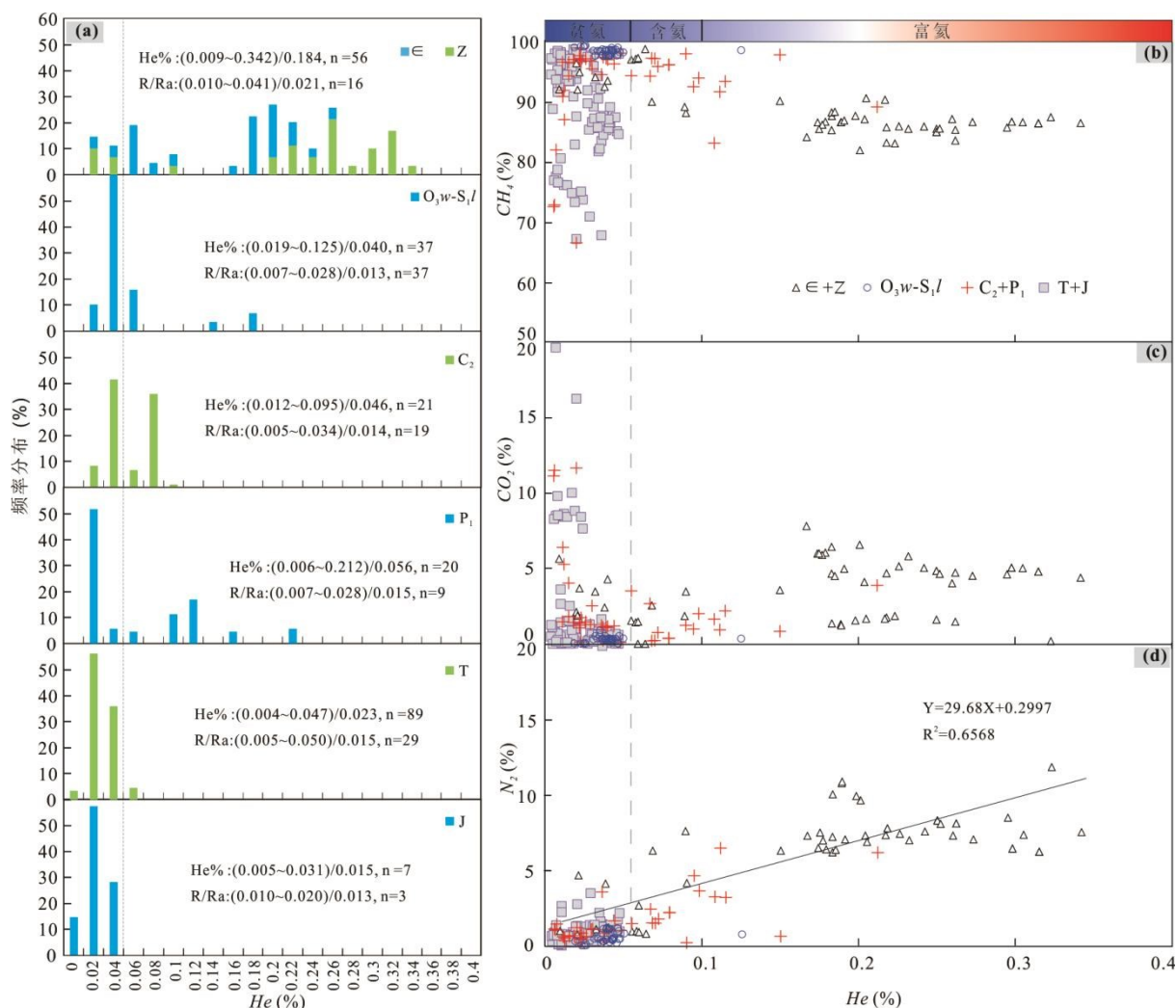


图2 四川盆地不同层系烃类伴生 He 含量频率分布直方图 (a), 天然气中主要气体与氦气丰度相关图 (b-d)

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

四川盆地天然气中氦组分的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值非常低, 范围为 0.002~0.05 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、气体组份聚类分析方法

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份数据（附表），每口井气体数据包括 CH₄、CO₂、N₂、He 组份含量的 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，故采用组间联接的层系聚类法，在气体组份样品合并过程中，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。由于气体组分含量中 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，以消除组份间数量级的差异。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、含氢烃类气藏聚类结果

本次统计了 230 组天然气伴生氦气气体组份数据，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 组份可分为四类，其中 I 类样品数量 143 个，II 类 69 个，III 类 16 个，IV 类 2 个。第 IV 类样本数量少且烃类组份偏低，经分析为异常项，不作为主要分析对象。对前三类含氦气藏的气体组份进行分析，统计每类样本中 CH₄、CO₂、N₂ 和 He 的组份含量相关性和分布概率如图 4、图 5 所示。对聚类后的每一类样本进行 Pearson 双变量相关性分析（表 1），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。表 1 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：

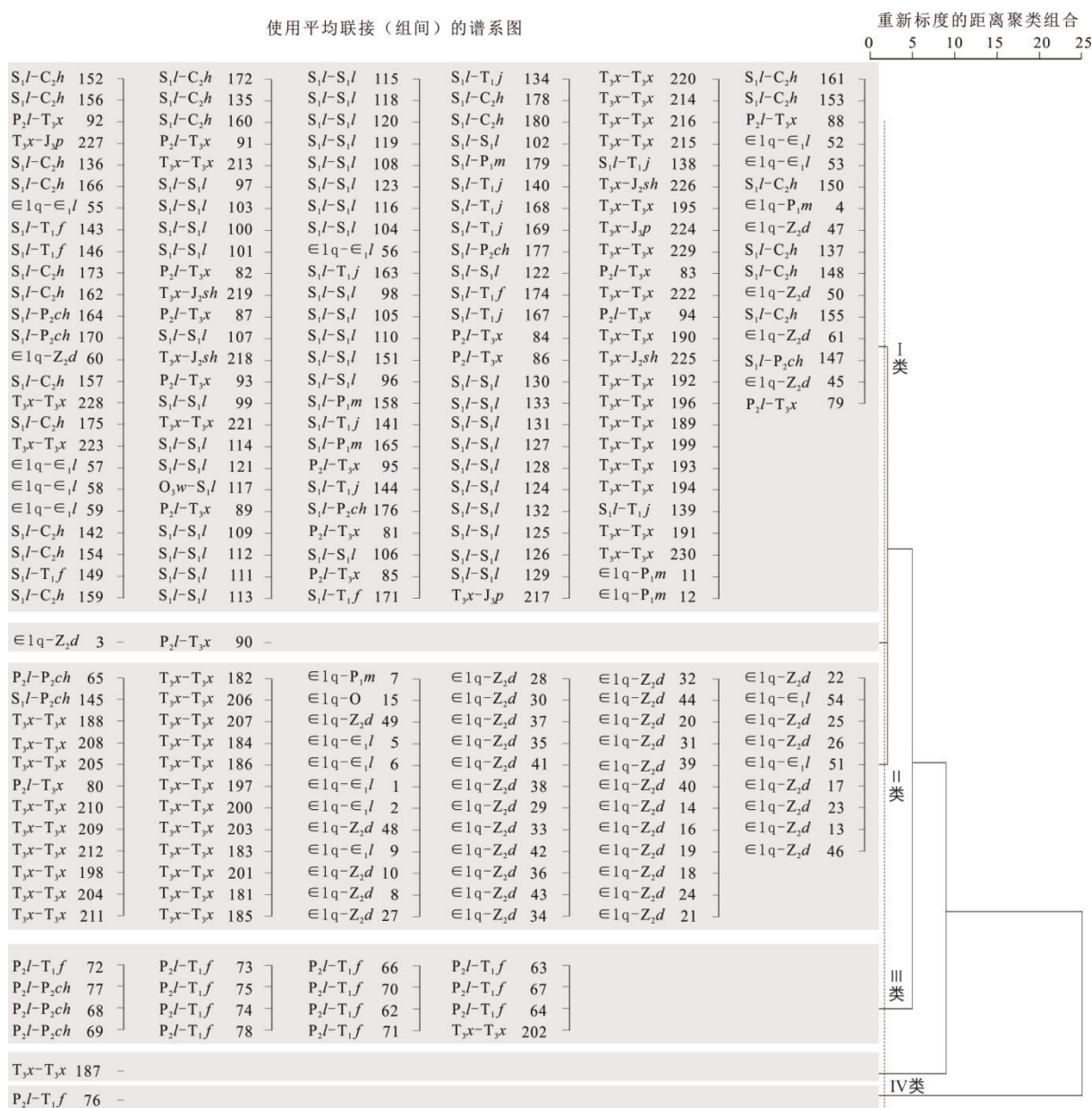


图3 气体组份聚类谱系图，数据对为气体组份编号（详见附表），其中 S₁l-C₂h 152 代表第 152 组数据，烃源岩层为志留系龙马溪组（S₁l），储层为石炭系黄龙组（C₂h）

Fig.3 Cluster analysis results of gas components

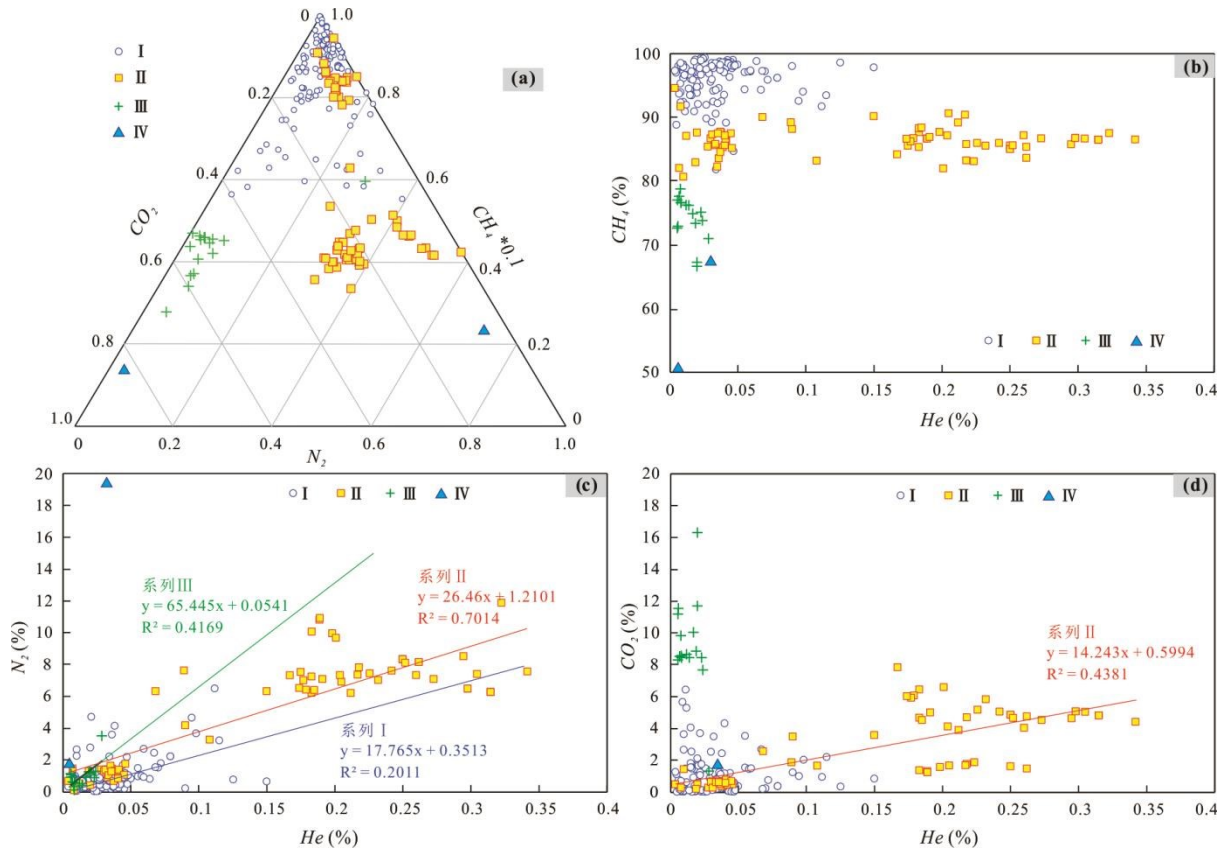


图 4 聚类分析后四类气体组份相关关系图

Fig. 4 Correlation diagram of gas components after cluster analysis

3.1 第 I 类低 He 低 N_2 低 CO_2 高 CH_4 烃类气藏

第 I 类氦气藏包括涪陵-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），此外还包括磨溪-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 $(1500 \sim 2000) \times 10^8 m^3$ ，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 $(3000 \sim 4500) \times 10^8 m^3$ 。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-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%来自于志留系烃源岩($n=83$)，20%来自三叠系($n=29$)，约有 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 N_2 低 CO_2 高 CH_4 烃类气藏，气体组份概率均为单峰(图 5)，其中 CH_4 含量为 81.87%~99.45%，平均 96.24%； CO_2 含量为 0.01%~6.43%，平均 0.89%； N_2 含量为 0.01%~6.49%，平均 0.95%；He 含量 0.0037%~0.15%，平均为 0.0339% ($n=143$)。氦同位素比值 R/R_a 为 0.002~0.05，平均为 0.0143 ($n=95$)，具有典型壳源氦特征。

表 1 聚类分析后三类气体组份的 Pearson 相关系数矩阵

Table 1 Pearson correlation coefficient Matrix between gas components after cluster analysis

分类		CH ₄	CO ₂	H ₂ S	N ₂	He
I 类	CH ₄	1				
	CO ₂	-0.328**	1			
	H ₂ S	-0.2	0.284	1		
	N ₂	-0.379**	0.167*	-0.236	1	
	He	0.053	-0.062	-0.068	0.448**	1
II 类	CH ₄	1				
	CO ₂	-0.011	1			
	H ₂ S	-0.34	0.609**	1		
	N ₂	0.126	0.574**	-0.487*	1	
	He	0.123	0.662**	-0.341	0.837**	1
III 类	CH ₄	1				
	CO ₂	-0.357	1			
	H ₂ S	-0.385	-0.102	1		
	N ₂	-0.544*	-0.484	0.46	1	
	He	-0.544*	-0.279	0.331	0.646**	1

1 极强相关

0.9

0.8

0.7 强相关

0.6

0.5 中等相关

0.4

0.3 弱相关

0.2

0.1 无相关

0

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

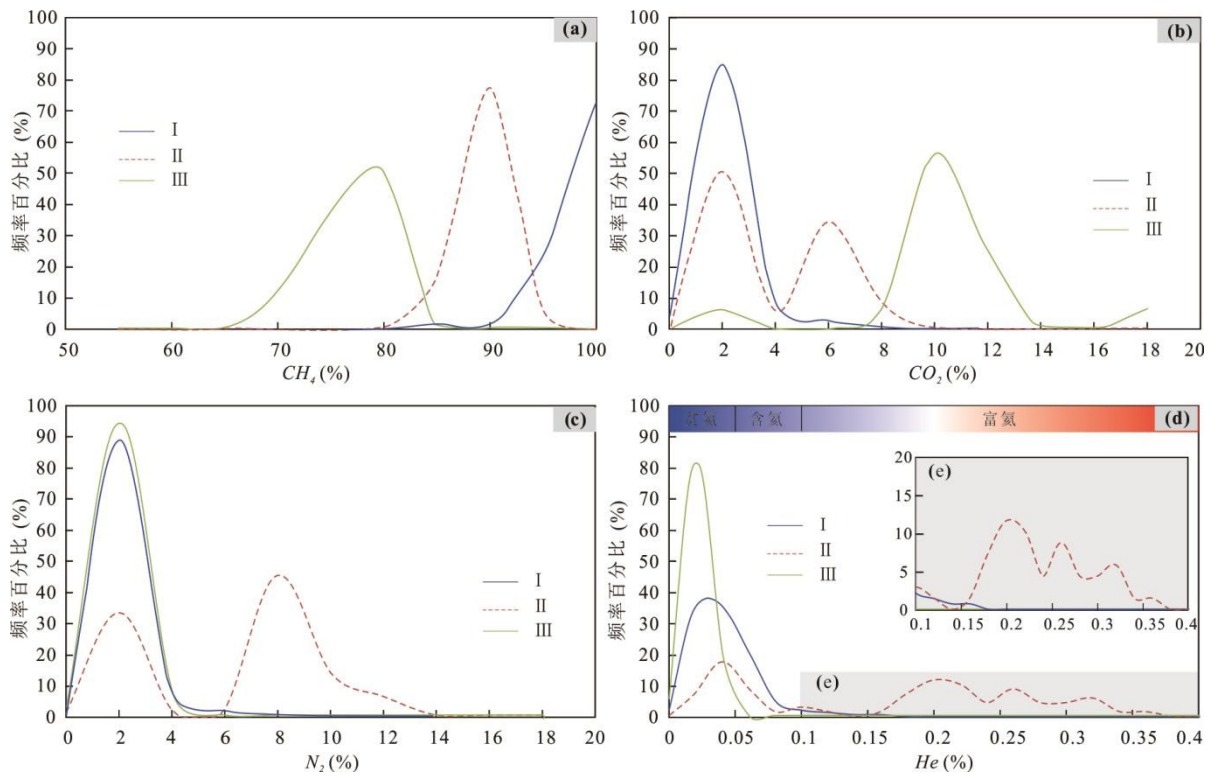


图 5 聚类分析获得的三类天然气组份分布频率图

Fig. 5 Frequency diagrams of the three types of natural gas components obtained by cluster analysis

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 $400 \times 10^8 \text{m}^3$ ，压力系数为 1.10~1.30；安岳、广安、蓬莱气田气田储量规模约 $(1200 \sim 1900) \times 10^8 \text{m}^3$ ，三叠系储层压力系数为 1.08~1.21。按照气体来源区分，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%。非烃组份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 5b）；N₂ 含量为 0.39%~11.88%，以 8%为主峰，其次为 2%（图 5c）；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 5d），R/Ra 为 0.0011~0.041，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 $4100 \times 10^8 \text{m}^3$ ，气藏压力系数为 0.96~1.18，为常压构造-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 5）。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，约为 50%~60%，CO₂ 或 N₂ 含量异常高（20%~35%），该类样本数量少且烃类组份偏低，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，四川盆地志留统龙马溪组页岩气中 He 为 0.0187%~0.0499%，平均 0.0404%。以龙马溪组富铀-富有机质页岩为烃源岩、石炭系-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 0.0063%~0.15%，平均 0.0364%。Ⅰ类氦气藏中 He、N₂、CO₂、CH₄ 组份概率均为单峰，明显具有单幕（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（ $r < 0.1$ ）（表 1、图 4d）。

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)。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(秦胜飞等, 2023)，受地层温度的制约，有机质中蛋白质受热分解产生的氮，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 含量随烃源岩岩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。第三，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-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-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。

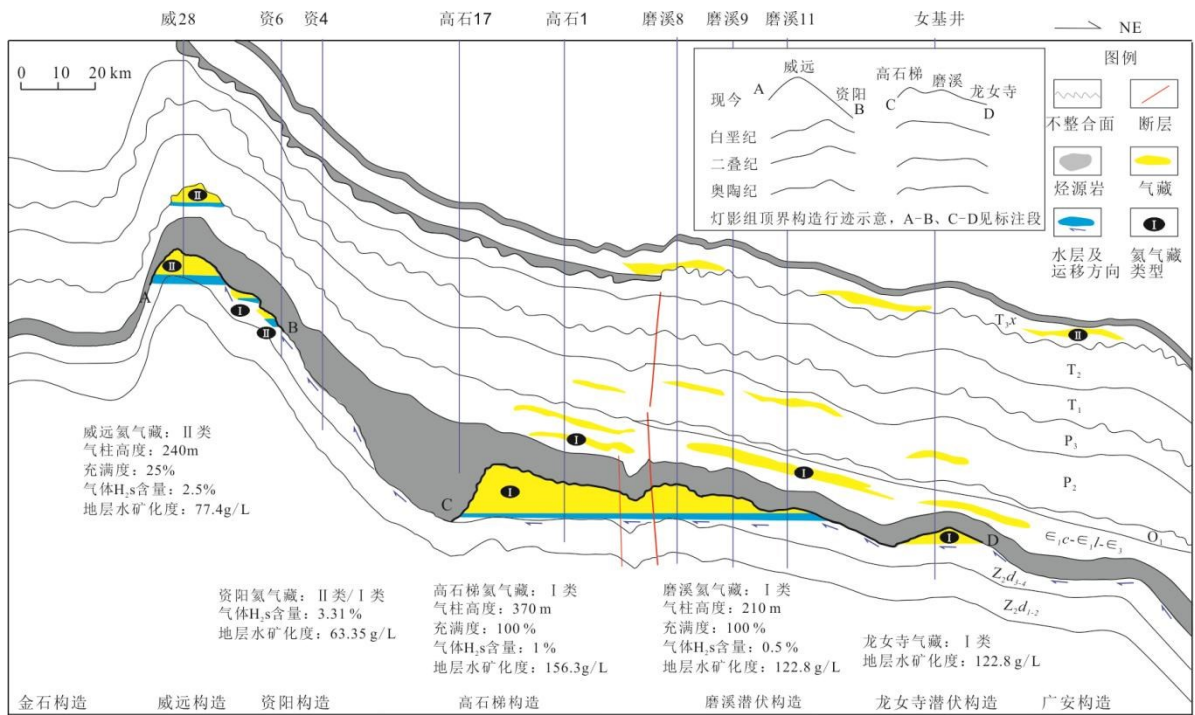


图 6 震旦系灯影组天然气差异聚集与 He 特征图，参考(罗冰等, 2015; 刘树根等, 2015)，有修改

Fig. 6 Characteristics of natural gas and He accumulation in the Dengying Formation of the Sinian

安岳气田为古隆起上发育的构造-岩性复合型气藏（图 6），烃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 I 类氦气藏 (图 7), 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-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% (附表编号 51-59)。原油高温裂解可能伴随含氮化合物的分解生成 N_2 , 故氦与氮的相关性差。

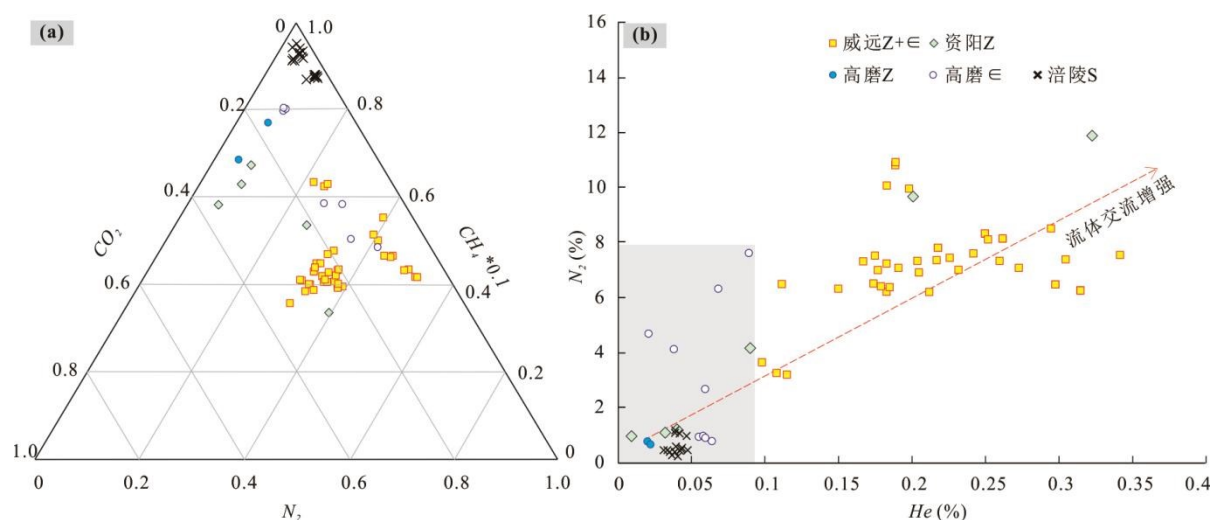


图 7 川中威远-高磨地区不同类型氦气藏气体组分相关对比图

Fig. 7 Correlation diagram of gas components after cluster analysis in the Wei Yuan-Zi Yang area

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 5e), N_2 含量的两个峰值分别为 2%和 8% (图 5c)。前人研究认为, 天然气中 N_2 可用来说踪油气运移, N_2 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 N_2 含量逐渐增加(傅宁等, 2005)。由于烃源岩在成熟-高成熟阶段生成的 N_2 的含量通常低于 3%(王鹏等, 2014; 李朋朋等, 2024), 推测第 II 类含氮天然气藏中的 N_2 除了有烃源岩裂解生成, 均值 8%的高氮峰值还有外部运移氮气的贡献。

氮与氦共生 (耦合) 关系明显, Pearson 相关分析显示, He 含量与 N_2 含量呈极强正相关 ($r = 0.837$, $P < 0.01$) (图 4c), 与 CO_2 含量呈强正相关 ($r = 0.662$, $P < 0.01$) (图 4d)。此外, CO_2 含量与 H_2S 和 N_2 呈中等相关至强相关 (r 分别为 0.609、0.574, $P < 0.01$) (表 1)。众多学者的研究表明, N_2 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; 秦胜飞等, 2023; Cheng et al., 2023), 导致部分气藏中 He 与 N_2 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氮气的聚集，氮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_2 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 CO_2 含量会逐渐降低(傅宁等, 2005)。加之碳酸盐岩矿物溶解可产生 CO_2 ，导致尽管 He 与 CO_2 含量有一定正相关，但是拟合的相关系数较之 He~ N_2 关系是明显降低的。

II 类氮气藏中 He 同样为壳源成因，可来自沉积型氮源（富铀钍页岩、铀矿）及盆地基地、花岗岩类，He 与 N_2 含量变化是烃类与地层水溶气相互作用的产物。在数亿年的生氮过程中，古老的孔隙水积累了溶解氮，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 类氮气藏为主）中 He 含量普遍低于同一地区常规天然气藏（II 类氮气藏为主）的根本原因。

(1) 川中威远-资阳-高磨构造 II 类氮气藏

威远地区位于四川盆地东南部，在盆内乐山-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 6），威远气田为该区灯影组构造最高点，抬升幅度近 4000 m，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氮含量高达 0.342%，He 与 N_2 含量具有相关性，为 II 类氮气藏。该区氮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)，但氮气含量差异较大，对比研究可揭示 II 类氮气藏的形成特点。

威远构造灯影组天然气属 II 类氮气藏，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。氮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 井氮气体积分数高达 0.404%，Wei106 井为 0.315%，Wei30 井为 0.342%），向气藏边缘处逐渐递减（威基井氮体积分数为 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氮气含量有增加趋势(刘凯旋等, 2022)，表明威远构造震旦系气藏（II 类氮气藏）中氮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 N_2 ，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 类氮气共存的实例。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 类氮气藏，如资 1、资 3、资 7 井（附表编号 45、47、50）；也有 II 类氮气藏，如资 2、资 5、资 6 井（编号 46、48、49）。I 类氮气藏位于斜坡低部位，气体相对较湿，甲烷含量很高，氮气含量低，氮气含量为 0.01%~0.04%。II 类氮气藏均为

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，约为 82%~88%，N₂ 含量约为 4.17%~11.88%，He 含量高，在 0.2%~0.32%之间。

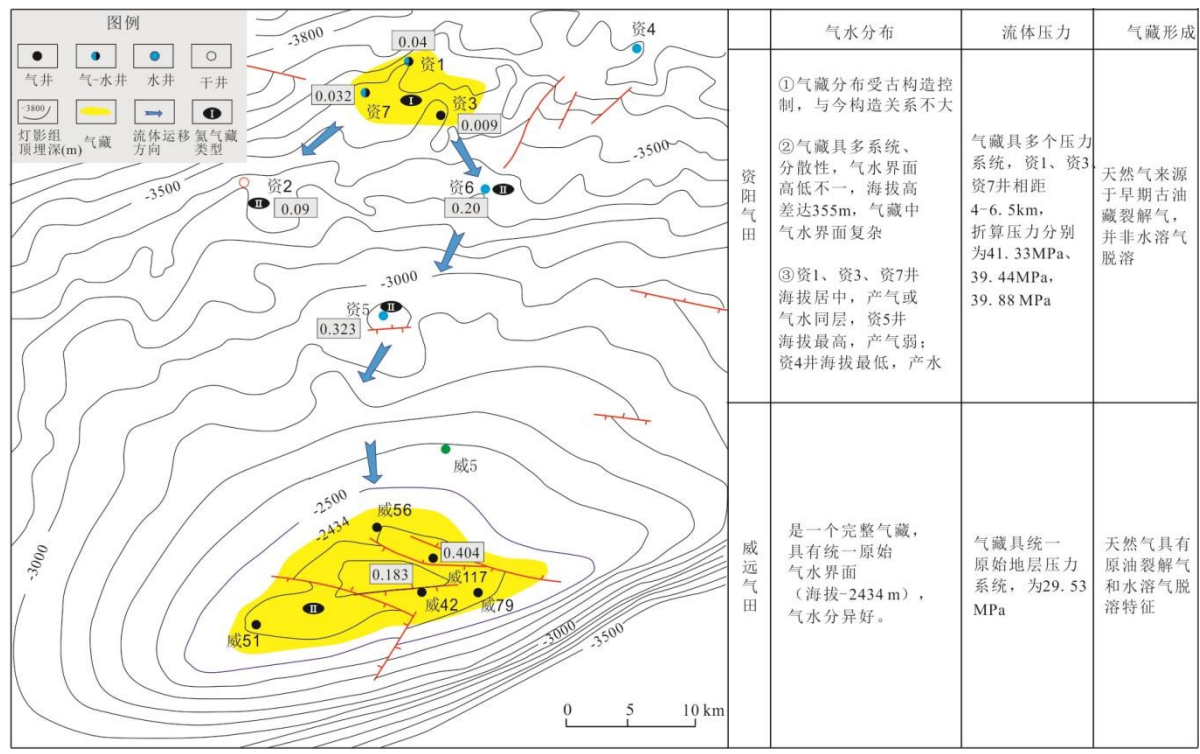


图 8 川中威远-资阳地区灯影组天然气伴生氦气分布及天然气成藏特征

Fig. 8 Distribution of helium associated with natural gas in the Dengying Formation in the Wei Yuan-Zi Yang area of Sichuan Basin

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-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-6000 m 抬升至现今-2400 m 后形成独立圈闭；资阳构造抬升幅度小，由-6000 m 抬升至现今-4000 m(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 8），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, 2023)。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 7），捕获的水溶氦气含量多，最终形成富 He 高 N₂ 的 II 类氦气藏。

(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)。烃源岩-储层大面积层状交替叠置, 烃源岩为须四-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 9), 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 g / L~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, 加之气藏距离深部氢源岩较远, 从水中能够捕获的氦量偏低难以形成富

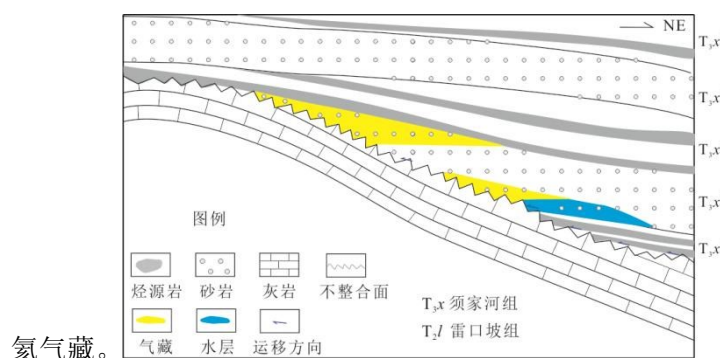


图 9 安岳地区三叠系氦气成藏示意图

Fig. 9 Schematic diagram of helium accumulation in the Triassic formation in Anyue area

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 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 含量平均为 74.22%, 几乎没有重烃。He 含量较低且与 N₂ 含量呈强正相关 ($r = 0.646$, $P < 0.01$) (表 1, 图 10c), 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-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-岩性复合型气藏。气藏于燕山中期 (J₃-K₁) 形成, 在燕山晚期-喜山期 (K₂-Q) 经历了调整改造、次生干气藏形成等变化。

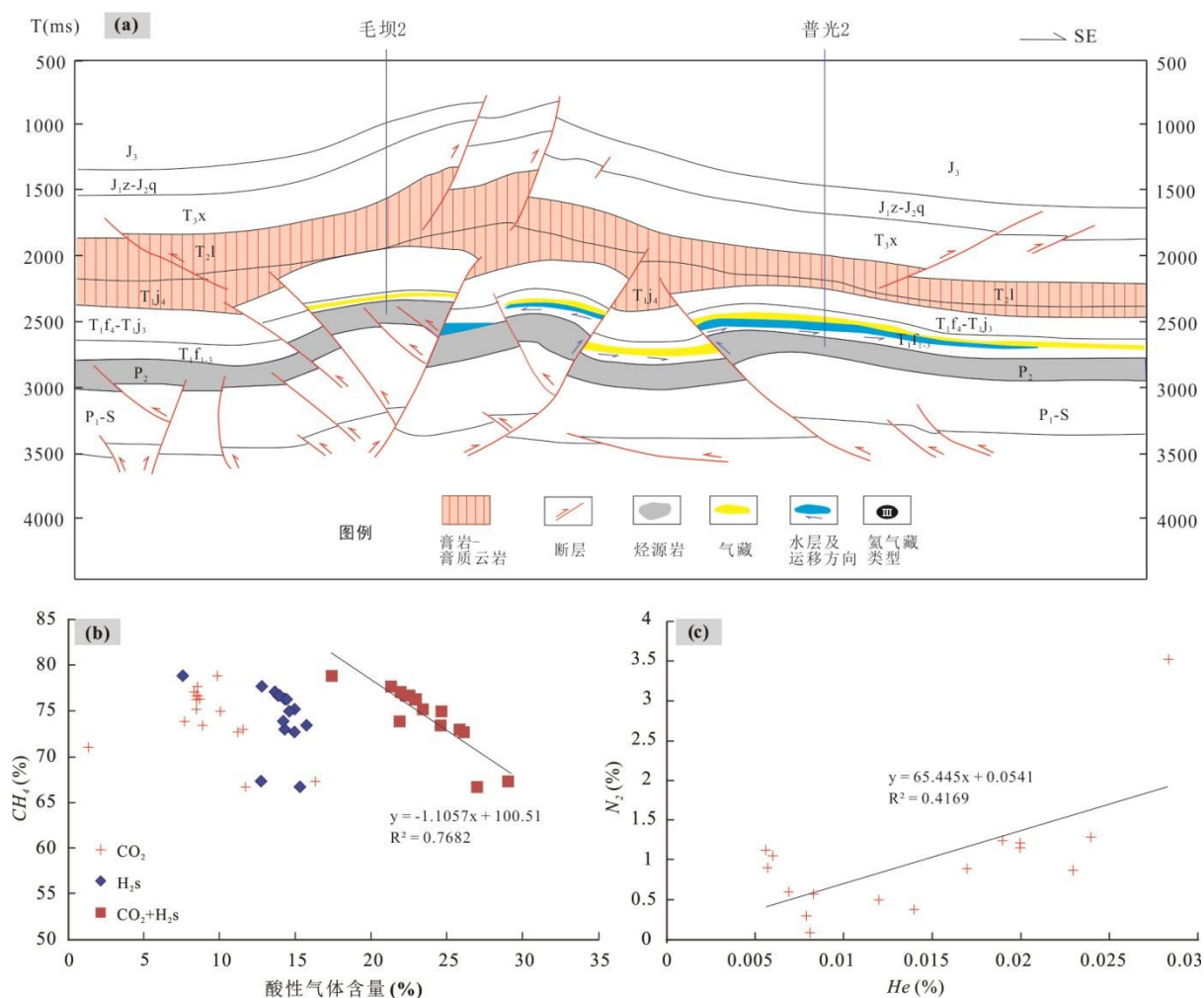


图 10 普光气田氦气成藏示意图 (a) 及气体组份相关系图 (b-c)

Fig.10 Schematic diagram of helium in the Puguang gas field (a) and correlation diagram of gas component (b-c)

普光气田中 CO₂ 组份存在双峰且以 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 组份概率均为单峰, 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-水过渡带处于边部, 中高部位气井不受水体影响。同时嘉陵江组四段—雷口坡组二段膏岩、膏质白云岩分布稳定, 构成优质盖层 (图 10a), 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 10b)。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-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(Zhang et al., 2021; Cheng 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, 气藏具有流体粘度高, 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 N₂ 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 11a), 其中气体 Bunsen 溶解系数定义为在 1 atm 压力下、溶解在 1 cm³ 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 7a)。Smith and Kennedy (1983) 测试了在 0℃~65℃温度、1 atm 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 wt %) 中的溶解度约为淡

水中的 0.14~0.25（图 11b）。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(李玉宏等, 2017; Ballentine and Burnard, 2002; 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。

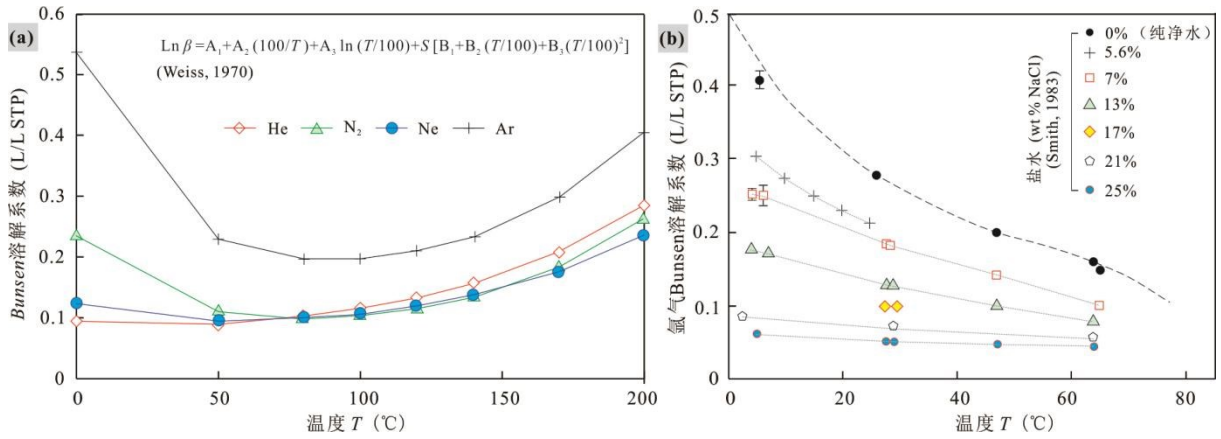


图 11 气体溶解度随温度 T 和盐度 S 变化：(a) 不同气体溶解系数随温度变化，公式拟合参考(Weiss, 1970)；(b) Ar 溶解系数随温度 T 和盐度 S 变化

Fig. 11 Variation of gas solubility with temperature and salinity

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它证据：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 17-30ppb，整体高于同区龙马溪组页岩气的 7-14ppb (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 5e），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，II 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力时机，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 C_2+ 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 CH_4 -He- N_2 系统。储层时代越老，与地下水多期“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¹（Goldilocks zone），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 12 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-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 向华蓥山深大断裂、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~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-三叠系，氦气含量稍低。天然气伴生氦气开发还涉及到提氦技术，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。

¹ 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

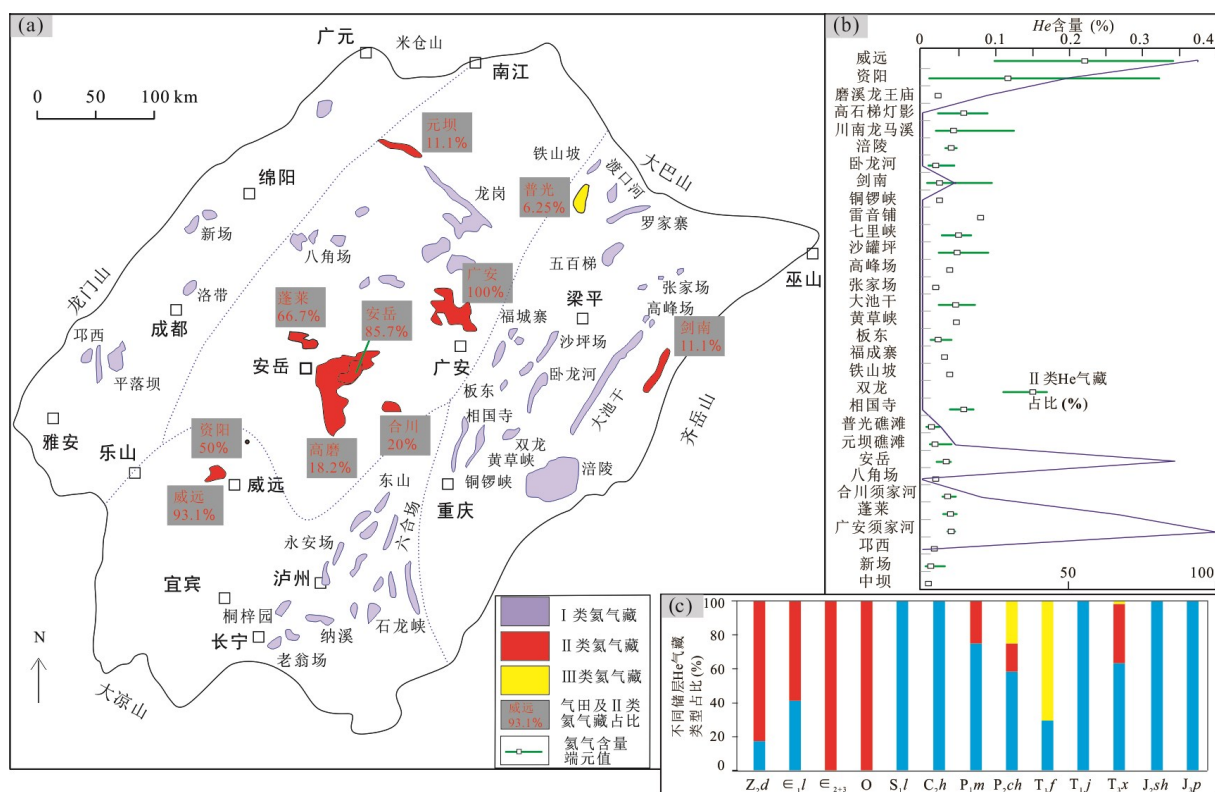


图 12 四川盆地 He 气藏类型分布平面图 (a)，气田 He 含量及类型分布 (b)，不同储层中 He 气藏类型占比图 (c)

Fig. 12 The type distribution of helium reservoirs in the Sichuan Basin and percentage of helium gas in different gas fields

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 类氦气藏的区别在于，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-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。

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。

附表：四川盆地含氦气田气体组分数据

序号	区域	单井	产气层	烃源岩	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	H ₂ s (%)	N ₂ (%)	He (%)	R/Ra	数据来源	类别
1	威远（川南）	Wei42	∈ _{1l}	∈ _{1q}	87.73	1.36		10.07	0.1831		Wang et al., 2020	2
2	威远（川南）	Wei72-2	∈ _{1l}	∈ _{1q}	87.78	1.56		9.96	0.1982			2
3	威远（川南）	Wei46-1	Z _{2d}	∈ _{1q}	83.16	1.86	0.1		0.2234			2_1
4	威远（川南）	Wei5-1	P _{1m}	∈ _{1q}	91.78	0.94		6.49	0.1116			1
5	威远（川南）	Wei36-1	∈ _{1l}	∈ _{1q}	86.7	1.32		10.81	0.1889			2
6	威远（川南）	Wei71-2	∈ _{1l}	∈ _{1q}	86.71	1.24		10.92	0.1891			2
7	威远（川南）	Wei5	P _{1m}	∈ _{1q}	83.25	1.65	0.1	3.26	0.108	0.022		2
8	威远（川南）	Wei2	Z _{2d}	∈ _{1q}	85.63	1.62	0.1	8.33	0.25	0.021		2
9	威远（川南）	Wei23	∈ _{1l}	∈ _{1q}	83.69	1.47		8.14	0.262	0.021		2
10	威远（川南）	Wei27	Z _{2d}	∈ _{1q}	83.28	1.76	0.1	7.81	0.218			2
11	威远（川南）	Wei83	P _{1m}	∈ _{1q}	93.51	2.2		3.21	0.115		梁霄等, 2016	1
12	威远（川南）	Weiyang36	P _{1m}	∈ _{1q}	94.08	2.02		3.65	0.098			1
13	威远（川南）	Wei43	P _{1m}	∈ _{1q}	89.26	3.89		6.2	0.212			2
14	威远（川南）	Wei079	O	∈ _{1q}	85.58	6.02	0.54	7.52	0.175			2
15	威远（川南）	Weiham1	O	∈ _{1q}	84.23	7.84		7.32	0.167			2
16	威远（川南）	Wei005	∈ ₂₊₃	∈ _{1q}	85.39	6.45	0.61	7.24	0.183			2
17	威远（川南）	Wei026	∈ ₂₊₃	∈ _{1q}	88.35	4.67	0.44	6.21	0.183			2
18	威远（川南）	Wei052	∈ ₂₊₃	∈ _{1q}	86.79	6.07	0.41	6.41	0.179			2
19	威远（川南）	Weiham10	∈ ₂₊₃	∈ _{1q}	85.6	5.83		7.01	0.232			2
20	威远（川南）	Wei093	∈ ₂₊₃	∈ _{1q}	86.98	5	0.62	7.08	0.191			2
21	威远（川南）	Wei089	∈ ₂₊₃	∈ _{1q}	86.3	5.92	0.1	7	0.177			2
22	威远（川南）	Wei088	∈ ₂₊₃	∈ _{1q}	90.25	3.58	0.24	6.32	0.15			2
23	威远（川南）	Weiham1	∈ ₂₊₃	∈ _{1q}	88.45	4.52		6.38	0.185			2
24	威远（川南）	Weiham1	∈ _{1l}	∈ _{1q}	86.68	6.02		6.51	0.174			2
25	威远（川南）	Weiham101	∈ _{1l}	∈ _{1q}	90.45	1.68		7.36	0.217			2
26	威远（川南）	Weiham101	∈ _{1l}	∈ _{1q}	90.71	1.67		6.91	0.205			2
27	威远（川南）	Wei93	Z _{2d}	∈ _{1q}	86.03	5.17		7.44	0.226			2
28	威远（川南）	Wei93	Z _{2d}	∈ _{1q}	86.02	5.05		7.6	0.242			2
29	威远（川南）	Wei93	Z _{2d}	∈ _{1q}	85.82	4.63		8.51	0.295			2
30	威远（川南）	Wei2	Z _{2d}	∈ _{1q}	85.07	4.86	1.31	8.33	0.25		戴鸿鸣等, 1999	2
31	威远（川南）	Wei27	Z _{2d}	∈ _{1q}	86.7	5.04	1.36	7.39	0.305			2
32	威远（川南）	Wei30	Z _{2d}	∈ _{1q}	87.21	4.12	1	7.33	0.204			2
33	威远（川南）	Wei100	Z _{2d}	∈ _{1q}	86.8	5.07	1.18	6.47	0.298			2
34	威远（川南）	Wei106	Z _{2d}	∈ _{1q}	86.54	4.82	1.32	6.26	0.315		Ni et al., 2014	2
35	威远（川南）	Wei23	Z _{2d}	∈ _{1q}	85.44	4.75		8.14	0.262	0.041		2
36	威远（川南）	Wei106	Z _{2d}	∈ _{1q}	86.54	4.82		6.26	0.315	0.013		2
37	威远（川南）	Wei12	Z _{2d}	∈ _{1q}	85.07	4.86		8.33	0.25	0.021		2

38	威远（川南）	Wei27	Z_2d	$\in_1q$	85.85	4.7		7.81	0.218			2
39	威远（川南）	Wei30	Z_2d	$\in_1q$	86.57	4.4		7.55	0.342			2
40	威远（川南）	Wei39	Z_2d	$\in_1q$	86.74	4.53		7.08	0.273			2
41	威远（川南）	Wei46	Z_2d	$\in_1q$	85.66	4.66		8.11	0.252			2
42	威远（川南）	Wei100	Z_2d	$\in_1q$	86.8	5.07		6.47	0.298			2
43	威远（川南）	Wei106	Z_2d	$\in_1q$	86.54	4.82		6.26	0.315			2
44	威远（川南）	Wei28	Z_2d	$\in_1q$	87.25	4.04	0.97	7.33	0.26		徐永昌等, 1989	2
45	资阳（川南）	Zi1	Z_2d	$\in_1q$	93.59	4.31	0.76	1.22	0.04		戴鸿鸣等, 1999	1
46	资阳（川南）	Zi2	Z_2d	$\in_1q$	88.23	3.49		4.17	0.09			2
47	资阳（川南）	Zi3	Z_2d	$\in_1q$	92.2	5.66	0.83	0.97	0.009			1
48	资阳（川南）	Zi5	Z_2d	$\in_1q$	87.57	0.01		11.88	0.323			2
49	资阳（川南）	Zi6	Z_2d	$\in_1q$	82.05	6.59	1.37	9.67	0.201			2
50	资阳（川南）	Zi7	Z_2d	$\in_1q$	94.22	3.49	0.91	1.1	0.032			1
51	高石梯-磨溪（川中）	GS11-D2	$\in_1l$	$\in_1q$	89.27	1.86	0.1	7.62	0.0891	0.013	Wang et al., 2020	2
52	高石梯-磨溪（川中）	GS12-D4	$\in_1l$	$\in_1q$	92.14	1.89	0.1	4.69	0.0207	0.027		1
53	高石梯-磨溪（川中）	GS18-D4	$\in_1l$	$\in_1q$	92.6	2.43		4.13	0.038	0.018		1
54	高石梯-磨溪（川中）	MX18-D2	$\in_1l$	$\in_1q$	90.11	2.56	0.1	6.32	0.0682	0.028		2
55	高石梯-磨溪（川中）	MX8	$\in_1l$	$\in_1q$	97.25	0	0.85	2.68	0.0593	0.022		1
56	高石梯-磨溪（川中）	MX39	$\in_1l$	$\in_1q$	98.89	0	1.2	0.79	0.0639	0.03		1
57	高石梯-磨溪（川中）	MX201	$\in_1l$	$\in_1q$	97.15	1.54		0.95	0.055	0.011		1
58	高石梯-磨溪（川中）	MX9	$\in_1l$	$\in_1q$	97.25	1.44	0.17	0.98	0.0579	0.01		1
59	高石梯-磨溪（川中）	MX10	$\in_1l$	$\in_1q$	97.4	1.48	0.17	0.91	0.0594	0.012		1
60	高石梯-磨溪（川中）	GS3	Z_2d	$\in_1q$	96.54	2.12	1.65	0.78	0.02	0.037		1
61	高石梯-磨溪（川中）	GS19	Z_2d	$\in_1q$	95.01	3.7	0.2	0.67	0.022	0.016		1
62	普光（川东）	PG7-1	T_1f	P_2l	76.66	8.45	13.85	0.57	0.0083			3
63	普光（川东）	PG7-2	T_1f	P_2l	77.66	8.52	12.79	0.6	0.0069			3
64	普光（川东）	PG7-C1	T_1f	P_2l	78.83	9.83	7.56	0.3	0.0079			3
65	普光（川东）	PG8	P_2ch	P_2l	82.12		6.89	1.44	0.007			2
66	普光（川东）	PG9	T_1f	P_2l	76.28	8.66	14.3	0.5	0.012			3
67	普光（川东）	PG9	T_1f	P_2l	77.06	8.3	13.65	0.9	0.0057			3
68	普光（川东）	PG9	P_2ch	P_2l	72.96	11.54	14.29	1.05	0.006			3
69	普光（川东）	PG9	P_2ch	P_2l	72.67	11.18	14.94	1.12	0.0056			3
70	普光（川东）	PG101	T_1f	P_2l	76.24	8.45	14.43	0.38	0.014			3
71	普光（川东）	PG10	T_1f	P_2l	76.69	8.56	13.96	0.09	0.0081			3
72	普光（川东）	MB4	T_1f	P_2l	67.31	16.31	12.73	1.15	0.02			3_1
73	普光（川东）	MB6	T_1f	P_2l	73.85	7.67	14.2	1.28	0.024			3
74	普光（川东）	MB6	T_1f3	P_2l	75.17	8.45	14.96	0.87	0.023			3
75	普光（川东）	DW1	T_1f	P_2l	73.42	8.86	15.73	1.24	0.019			3
76	普光（川东）	DW1	T_1f	P_2l	50.01	32.26		1.36	0.0065			4
77	普光（川东）	DW1	P_2ch	P_2l	66.68	11.7	15.3	1.21	0.02			3_1

78	普光（川东）	DW2	T_{1f}	P_2l	74.95	10.04	14.6	0.89	0.017			3
79	元坝（川中）	YB2	T_{3x}	P_2l	92.46	3.63		2.64	0.01		印峰等, 2013	1
80	元坝（川中）	YB2	T_{3x}	P_2l	87.67	0.49		0.39	0.02			2
81	元坝（川中）	YB2	T_{3x}	P_2l	98.07	0.29		0.48	0.01			1
82	元坝（川中）	YB3	T_{3x}	P_2l	97.94	0.1		0.02	0.01			1
83	元坝（川中）	YB3	T_{3x}	P_2l	95.56	0.59		1.12	0.02			1
84	元坝（川中）	YB4	T_{3x}	P_2l	97.46	0.35		0.68	0.01			1
85	元坝（川中）	YB4	T_{3x}	P_2l	97.86	0.53		0.53	0.04			1
86	元坝（川中）	YB6	T_{3x}	P_2l	97.34	0.5		0.78	0.01			1
87	元坝（川中）	YB11	T_{3x}	P_2l	98.35	0		0.27	0.01			1
88	元坝（川中）	YB22	T_{3x}	P_2l	93.88	0.23		2.76	0.02			1
89	元坝（川中）	YB22	T_{3x}	P_2l	98.21	0.67		0.36	0.02			1
90	元坝（川中）	YB27	T_{3x}	P_2l	80.71	1.43			0.01			2_1
91	元坝（川中）	YL1	T_{3x}	P_2l	96.82	0.85		0.86	0.02			1
92	元坝（川中）	YL2	T_{3x}	P_2l	96.35	0		2.24	0.01			1
93	元坝（川中）	YL3	T_{3x}	P_2l	98.39	0.29		0.25	0.02			1
94	元坝（川中）	YL4	T_{3x}	P_2l	94.83	0.42		1.31	0.02			1
95	元坝（川中）	YL6	T_{3x}	P_2l	97.71	0.64		0.31	0.02			1
96	元坝（川中）	YL7	T_{3x}	P_2l	98.08	1.01		0.3	0.02			1
97	川南龙马溪	Wei202	S_1l	S_1l	99.27	0.02		0.01	0.0228	0.019	Dai et al., 2014	1
98	川南龙马溪	N201-H1	S_1l	S_1l	99.12	0.04		0.3	0.0187	0.016		1
99	川南龙马溪	Ning211	S_1l	S_1l	98.53	0.91		0.17	0.0353	0.013		1
100	川南龙马溪	Zhao104	S_1l	S_1l	99.25	0.07		0.15	0.0253	0.014		1
101	川南龙马溪	YSL1-1H	S_1l	S_1l	99.45	0.01		0.03	0.0258	0.011		1
102	川南龙马溪	W201	S_1l	S_1l	98.32	0.36		0.81	0.0499	0.025	Cao et al., 2018	1
103	川南龙马溪	W202	S_1l	S_1l	99.27	0.02		0.01	0.0246	0.019		1
104	川南龙马溪	W201-H1	S_1l	S_1l	98.67	0.34		0.75	0.1253	0.022		1
105	川南龙马溪	NH2-7	S_1l	S_1l	99.1	0.03		0.44	0.0465	0.007		1
106	川南龙马溪	NH3-2	S_1l	S_1l	97.94	0.36		0.29	0.0368	0.008		1
107	川南龙马溪	NH3-3	S_1l	S_1l	98.23	0.07		0.36	0.0425	0.021		1
108	川南龙马溪	NJ3-4	S_1l	S_1l	98.7	0.24		0.39	0.0426	0.009		1
109	川南龙马溪	NH3-5	S_1l	S_1l	98.76	0.35		0.18	0.0451	0.028		1
110	川南龙马溪	N2-1-H1	S_1l	S_1l	99.04	0.32		0.44	0.0425	0.009		1
111	涪陵（川东）	JY1HF	S_1l	S_1l	98.81	0.25		0.28	0.0367	0.01	Wang et al., 2020	1
112	涪陵（川东）	JY2HF	S_1l	S_1l	98.75	0.38		0.24	0.0407	0.011		1
113	涪陵（川东）	JY3HF	S_1l	S_1l	98.51	0.31		0.55	0.0435	0.011		1
114	涪陵（川东）	JY4HF	S_1l	S_1l	98.45	0.56		0.4	0.0352	0.012		1
115	涪陵（川东）	JY6	S_1l	S_1l	98.51	0.3		0.6	0.0393	0.011		1
116	涪陵（川东）	JY7	S_1l	S_1l	98.66	0.22		0.5	0.0429	0.012		1
117	涪陵（川东）	JY8	O_{3w}	S_1l	98.37	0.51		0.46	0.0474	0.012		1
118	涪陵（川东）	JY23	S_1l	S_1l	98.59	0.3		0.46	0.0309	0.01		1

119	涪陵（川东）	JY27	S_1l	S_1l	98.56	0.34		0.46	0.0335	0.01		1
120	涪陵（川东）	JY42	S_1l	S_1l	98.61	0.33		0.44	0.0421	0.011		1
121	涪陵（川东）	JY12	S_1l	S_1l	98.44	0.51		0.4	0.0385	0.012		1
122	涪陵（川东）	JY12-3HF	S_1l	S_1l	97.95	0		0.98	0.0466	0.011		1
123	涪陵（川东）	JY1HF	S_1l	S_1l	98.7	0.24		0.4	0.0386	0.011		1
124	涪陵（川东）	T1	S_1l	S_1l	97.8	0.26		1.09	0.0387	0.013		1
125	涪陵（川东）	T2	S_1l	S_1l	97.82	0.29		1.07	0.0419	0.011		1
126	涪陵（川东）	T3	S_1l	S_1l	97.71	0.26		1.19	0.0388	0.014		1
127	涪陵（川东）	T4	S_1l	S_1l	97.77	0.25		1.14	0.0389	0.012		1
128	涪陵（川东）	T5	S_1l	S_1l	97.78	0.25		1.15	0.0458	0.011		1
129	涪陵（川东）	T6	S_1l	S_1l	97.76	0.52		0.97	0.0321	0.007		1
130	涪陵（川东）	T7	S_1l	S_1l	97.75	0.32		1.12	0.0368	0.012		1
131	涪陵（川东）	T8	S_1l	S_1l	97.72	0.32		1.12	0.0405	0.01		1
132	涪陵（川东）	T9	S_1l	S_1l	97.79	0.28		1.1	0.0401	0.011		1
133	涪陵（川东）	T10	S_1l	S_1l	97.74	0.31		1.11	0.0409	0.011		1
134	卧龙河（川东）	W3	T_1j	S_1l	97.96	0.34		0.74	0.009	0.014	Ni et al., 2014	1
135	卧龙河（川东）	W88	C_2h	S_1l	97.02	1.38		0.86	0.022	0.012		1
136	卧龙河（川东）	W120	C_2h	S_1l	96.4	1.19		1.65	0.044	0.01		1
137	卧龙河（川东）	W127	C_2h	S_1l	92.02	5.29		0.32	0.012			1
138	卧龙河（川东）	Wo5	T_1j	S_1l	93.97	0.29		0.76	0.008	0.01	Dai et al., 2008	1
139	卧龙河（川东）	Wo14	T_1j	S_1l	92.4	0.46		0.78	0.008	0		1
140	卧龙河（川东）	Wo17	T_1j	S_1l	98.3	0.03		0.63	0.01	0.04		1
141	卧龙河（川东）	Wo50	T_1j	S_1l	97.82	0.88		0.25	0.029	0.02		1
142	卧龙河（川东）	Wo58	C_2h	S_1l	97.13	1.44		0.66	0.018	0.01		1
143	剑南（川东）	JN10	T_1f	S_1l	96.19	2.66	0.25	0.64	0.01		Wang et al., 2020	1
144	剑南（川东）	J31	T_1j	S_1l	98.12	0.77		0.76	0.0063			1
145	剑南（川东）	J44-1	P_2ch	S_1l	87.15		3.21	0.51	0.0122			2
146	剑南（川东）	JP1	T_1f	S_1l	96.07	2.54	0.35	0.75	0.0157			1
147	剑南（川东）	JP2	P_2ch	S_1l	94.42	4.05	0.65	0.61	0.015			1
148	剑南（川东）	J43	P_2ch	S_1l	90.98	6.43	1.71	0.61	0.0113			1
149	剑南（川东）	J68	T_1f	S_1l	97.15	1.66	0.23	0.71	0.0207			1
150	剑南（川东）	J32-1	C_2h	S_1l	92.63	1		4.65	0.0947			1
151	铜锣峡（川东）	Tong4	P_2ch	S_1l	99	0.13		0.49	0.023	0.026	Ni et al., 2014	1
152	雷音铺（川东）	Lei11	C_2h	S_1l	96.26	0.37		2.21	0.079	0.017		1
153	七里峡（川东）	QL7	C_2h	S_1l	94.37	2.68		2.43	0.067	0.009		1
154	七里峡（川东）	QL13	C_2h	S_1l	97.25	1.48		0.63	0.026	0.017		1
155	七里峡（川东）	QL24	C_2h	S_1l	94.44	3.52		1.47	0.055	0.024		1
156	雷音铺（川东）	Lei11	C_2h	S_1l	96.26	0.37		2.21	0.079	0.017		1
157	沙罐坪（川东）	Guan2	C_2h	S_1l	97.29	1.24		0.22	0.022	0.02		1
158	沙罐坪（川东）	Guan4	P_1m	S_1l	98.09	1.24		0.2	0.09	0.028		1
159	沙罐坪（川东）	Guan10	C_2h	S_1l	96.92	1.29		1.07	0.029	0.011	Wu et al.,	1

160	高峰场（川东）	Feng6	C_2h	S_1l	97.32	1.09		1.08	0.039	0.006	Ni et al.,	1
161	高峰场（川东）	TD1	C_2h	S_1l	94.63	1.24		3.58	0.036	0.015	2014	1
162	张家场（川东）	Zhang2	C_2h	S_1l	96.75	1.75		0.83	0.023	0.009	Wu et al., 2013	1
163	张家场（川东）	Zhang9	T_{1j}	S_1l	98.81	0.04		0.71	0.018	0.007		1
164	张家场（川东）	Zhang23	P_2ch	S_1l	96.7	1.82		0.66	0.015	0.007		1
165	大池干（川东）	Chi4	P_{1m}	S_1l	97.78	1.07		0.43	0.022	0.008		1
166	大池干（川东）	Chi18	C_2h	S_1l	95.97	0.75		1.78	0.072	0.008		1
167	大池干（川东）	Chi26	T_{1j}	S_1l	98.54	0.05		1.09	0.043	0.002		1
168	黄草峡（川东）	Cao5	T_{1j}	S_1l	98.15	0.02		0.88	0.045	0.011		1
169	黄草峡（川东）	Cao1	T_{1j}	S_1l	98.08	0.02		0.96	0.047	0.01	Ni et al.,	1
170	板东（川东）	Ban4	P_2ch	S_1l	96.72	1.47		0.6	0.011	0.011	Wu et al., 2013	1
171	板东（川东）	Ban5	T_{1f}	S_1l	97.8	0.61		0.69	0.012	0.01		1
172	板东（川东）	Ban16	C_2h	S_1l	97.1	1.17		1.02	0.04	0.018		1
173	福成寨（川东）	Cheng13	C_2h	S_1l	95.63	2.53		1.12	0.03	0.005		1
174	福成寨（川东）	Cheng16	T_{1f}	S_1l	98.09	0.24		1.23	0.031	0.004		1
175	铁山坡（川东北）	Tie4	C_2h	S_1l	97.51	1.11		0.31	0.037	0.034		1
176	双龙（川东）	Shuang15	P_2ch	S_1l	97.91	0.84		0.63	0.15	0.011		1
177	相国寺（川东）	Xiang6	P_2ch	S_1l	98.19	0.11		1.02	0.048	0.011		1
178	相国寺（川东）	Xiang14	C_2h	S_1l	97.28	0.23		1.5	0.07	0.016		1
179	相国寺（川东）	Xiang15	P_{1m}	S_1l	98.28	0.22		0.84	0.037	0.014		1
180	相国寺（川东）	Xiang18	C_2h	S_1l	97.34	0.2		1.52	0.068	0.014		1
181	安岳（川中）	Y151	T_{3x}	T_{3x}	83.61	0.64		1.43	0.036		Wang et al., 2020	2
182	安岳（川中）	Y101-7	T_{3x}	T_{3x}	85.67	0.58	0.1	0.82	0.033			2
183	安岳（川中）	Y101	T_{3x}	T_{3x}	81.87	0.82		2.19	0.034			1
184	安岳（川中）	Yue118	T_{3x}	T_{3x}	85.47	0.28		1.38	0.028	0.014	Ni et al., 2014	2
185	安岳（川中）	Yue106	T_{3x}	T_{3x}	82.99	0.2		1.28	0.019	0.015		2
186	安岳（川中）	Yue101-1	T_{3x}	T_{3x}	85.36	0.38		1.24	0.039	0.014		2
187	安岳（川中）	Yue121	T_{3x}	T_{3x}	67.89	1.65		19.94	0.036	0.012		4
188	安岳（川中）	Yue101-9	T_{3x}	T_{3x}	86.75	0.63		1.27	0.03	0.011		2
189	八角场（川中）	Jiao57	T_{3x}	T_{3x}	90.99	0.41		0.25	0.018	0.016		1
190	合川（川中）	HC106	T_{3x}	T_{3x}	89.28	0.21		0.39	0.031	0.013		1
191	合川（川中）	HC109	T_{3x}	T_{3x}	92.54	0.15		0.31	0.032	0.013		1
192	合川（川中）	HC001-2	T_{3x}	T_{3x}	89.87	0.16		0.41	0.027	0.012		1
193	合川（川中）	HC125-15-X2	T_{3x}	T_{3x}	92.26	0.21		0.71	0.0353		Wang et al., 2020	1
194	合川（川中）	HC125	T_{3x}	T_{3x}	92.02	0.18		0.7	0.027	0.01		1
195	合川（川中）	HC125-13-H1	T_{3x}	T_{3x}	94.36	0.23		0.64	0.0338			1
196	合川（川中）	HC001-18-X2	T_{3x}	T_{3x}	89.22	0.45		1.33	0.0414	0.017		1
197	合川（川中）	HC001-21-X2	T_{3x}	T_{3x}	85.24	0.48		1.74	0.0458	0.018		2
198	合川（川中）	HC001-21-X3	T_{3x}	T_{3x}	87.36	0.28		1.36	0.0313			2
199	合川（川中）	HC001-13-X2	T_{3x}	T_{3x}	90.64	0.2		0.7	0.0339			1
200	蓬莱（川中）	PL107	T_{3x}	T_{3x}	84.62	0.61		1.29	0.0372	0.018		2

201	蓬萊（川中）	PL002-3-X1	T _{3x}	T _{3x}	82.31	0.67		1.62	0.0349			2
202	蓬萊（川中）	PL113	T _{3x}	T _{3x}	71.03	1.31		3.5	0.0284			3
203	蓬萊（川中）	PL11	T _{3x}	T _{3x}	84.75	0.6		2.17	0.0469			1
204	蓬萊（川中）	PL4	T _{3x}	T _{3x}	87.68	0.37		1.3	0.0378			2
205	蓬萊（川中）	PL116	T _{3x}	T _{3x}	86.49	0.46		1.09	0.0416			2
206	广安（川中）	GA002-21	T _{3x}	T _{3x}	85.88	0.61		1.03	0.0336			2
207	广安（川中）	GA002-X70	T _{3x}	T _{3x}	85.68	0.64		1.29	0.0405			2
208	广安（川中）	GA002-33	T _{3x}	T _{3x}	86.67	0.78		1.37	0.041			2
209	广安（川中）	G51	T _{3x}	T _{3x}	87.52	0.68		1.05	0.0449	0.016		2
210	广安（川中）	GA002-32	T _{3x}	T _{3x}	87.79	0.5		0.66	0.0372			2
211	广安（川中）	GA002-X36	T _{3x}	T _{3x}	87.2	0.58		0.81	0.0405			2
212	广安（川中）	GA2	T _{3x}	T _{3x}	87.52	0.61		1.26	0.0356	0.019		2
213	邛西（川西）	QX6	T _{3x}	T _{3x}	95.95	0.92		0.21	0.017			1
214	邛西（川西）	QX10	T _{3x}	T _{3x}	93.57	1.55		0.23	0.016		Ni et al., 2014	1
215	邛西（川西）	QX13	T _{3x}	T _{3x}	93.49	1.47		0.25	0.016			1
216	邛西（川西）	QX3	T _{3x}	T _{3x}	93.57	1.55		0.23	0.015			1
217	新场（川西）	CX134	J _{3p}	T _{3x}	97.61	0.02		0.85	0.027	0.01		1
218	新场（川西）	CX129	J _{2sh}	T _{3x}	98.24	0.02		0.09	0.008	0.01		1
219	新场（川西）	CX152	J _{2sh}	T _{3x}	97.95	0.06		0.13	0.01	0.02	Fan, 2000	1
220	新场（川西）	CX96	T _{3x}	T _{3x}	97.26	0.01		0.28	0.016	0.05		1
221	新场（川西）	CH127	T _{3x}	T _{3x}	98.58	0.7		0.1	0.008	0.01		1
222	新场（川西）	CM602	T _{3x}	T _{3x}	95.37	0.09		0.69	0.0079			1
223	新场（川西）	CH127	T _{3x}	T _{3x}	97.09	1.11		0.45	0.0046			1
224	新场（川西）	HP1	J _{3p}	T _{3x}	94.59	0.1		0.64	0.014			1
225	新场（川西）	CX455	J _{2sh}	T _{3x}	88.89	0.01		0.71	0.0049		Wang et al., 2020	1
226	新场（川西）	CX152	J _{2sh}	T _{3x}	93.77	0.15		0.69	0.007			1
227	新场（川西）	CX260	J _{3p}	T _{3x}	96.03	0.13		1.39	0.031			1
228	新场（川西）	X856	T _{3x}	T _{3x}	97.37	1.26		0.3	0.0039			1
229	新场（川西）	X882	T _{3x}	T _{3x}	94.64	0.49		0.65	0.0037			1
230	中坝（川西）	Zhong31	T _{3x}	T _{3x}	91.74	0.27		0.08	0.008	0.018	Dai et al., 2008	1

参考文献

- 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 L., et al., 2005. Neon Isotopes Constrain Convection and Volatile Origin in the Earth's Mantle. *Nature*, 433(7021): 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., Edwards, D., Poreda, R., et al., 2018. Helium in the Australian Liquefied Natural Gas Economy. *The APPEA Journal*,

58(1): 209-237. <https://doi.org/10.1071/AJ17049>

- Brown, A.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>
- Cao, C.H., Zhang, M.J., Tang, Q.Y., et al., 2018. Noble Gas Isotopic Variations and Geological Implication of Longmaxi Shale Gas in Sichuan Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 89: 38-46. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.01.022>
- 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., Sherwood Lollar, B., Gluyas, J.G., Ballentine, C.J., 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., 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, H.M., Wang, S.Y., Wang, H.Q., et al., 1999. Formation Characteristics of Natural Gas Reservoirs and Favorable Exploration Areas in Sinian Cambrian Petroleum System of Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 26(5): 16-21(in Chinese with English abstract).
- 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.chemgeo.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. *Sci China Earth Sci*, 51: 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 Geoscience*, 28(2): 21-29. <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. *Sci China Earth Sci*, 52(9): 1400-1411(in Chinese with English abstract).
- Fan, R., 2000. Origin and Migration of Natural Gases in Central Area of Western Sichuan Depression-Evidence for Carbon Isotope Geochemistry. *Progress in Natural Science*, 1(10): 47-53.
- Fisher, D.E., 1986. Rare Gas Abundances in MORB. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50(12): 2531-2541. DOI: 10.1016/0016-7037(86)90208-5
- Fu, N., Li, Y.C., Liu, D., et al., 2005. Geochemical Characteristics 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. *Sci China Earth Sci*, 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. *Science China Earth Sciences*, 67(10): 3143–3168(in Chinese with English abstract).
- 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, K.X., Chen, J.F., Fu, R., et al., 2023. Distribution Characteristics and Controlling Factors of Helium-rich Gas Reservoirs. *Gas Science and Engineering*, 110: 204885. (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. *Science China Earth Sciences*, 68(2): 643-645(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: 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2020.103997>
- 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>
- 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. *Science China Earth Sciences*, 66(6): 1279-1288(in Chinese with English abstract).
- Ozima, M., Podosek, F.A., 2001. Noble Gas Geochemistry. *Cambridge University Press*, Cambridge, 178-180.

<https://doi.org/10.1017/CBO9780511545986>

- Prinzhofer, A., Neto, E.V.D.S., Battani, A., 2010. Coupled Use of Carbon Isotopes and Noble Gas Isotopes in the Potiguar Basin (Brazil): Fluids Migration and Mantle Influence. *Marine & 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 abstract).
- Qin, S.F., Zhou, G.X., Li, J.Y., et al., 2023. 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](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., 2014. Geochemical Characteristics of Nonhydrocarbon in Natural Gas in West Sichuan Depression and its Implications. *Natural Gas Geoscience*, 25(3): 394-401. <https://doi.org/10.11764/j.issn.1672-1926.2014.03.0394>
- 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, 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., Dai, J., Liao, F., Huang, S., 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).

- 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).
- Yang, Y.M., Yang, Y., Yang, G., 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*, 94: 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).

附中文参考文献

- 陈践发, 刘凯旋, 董勃伟, 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.
- 戴鸿鸣, 王顺玉, 王海清, 等, 1999. 四川盆地寒武系一震旦系含气系统成藏特征及利勘探区块. *石油勘探与开发*, 26(5): 16-21.
- 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:地球科学*, 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, 付娆, 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-龙马溪组为例. 中国科学:地球科学, 53(6): 1285-1294.
- 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.
- 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.
- 帅燕华, 李剑, 田兴旺, 等, 2023. 四川盆地川中-川西震旦系-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.
- 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.
- 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.