



移动阅读

苑九涛, 张文锦, 宋泽章, 等. 超深层海相页岩型氦源岩特征与生氦潜力[J]. 煤田地质与勘探, 2026, 54(3): 56–68. doi: 10.12363/issn.1001-1986.25.08.0584

YUAN Jiutao, ZHANG Wenjin, SONG Zezhang, et al. Characteristics and helium generation potential of ultra-deep marine shales as helium source rocks[J]. Coal Geology & Exploration, 2026, 54(3): 56–68. doi: 10.12363/issn.1001-1986.25.08.0584

超深层海相页岩型氦源岩特征与生氦潜力

苑九涛^{1,2}, 张文锦³, 宋泽章^{1,2,*}, 田兴旺³, 罗情勇^{1,2}, 金世贵^{1,2}, 王树龙^{1,2}, 吴镁嘉^{1,2},
王 丽³, 陈洪斌³, 高嘉玮^{1,2}, Mikhail SPASENNYKH⁴, Tagir KARAMOV⁴

1. 中国石油大学(北京) 油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249; 3. 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 四川 成都 610051; 4. Center for Petroleum Science and Engineering, Skolkovo Institute of Science and Technology, Russia Moscow 121205

摘要: 【目的】规模有效的氦源岩是富氦气田的物质基础。四川盆地威远地区灯影组富氦气藏存在前震旦系基底花岗岩和寒武系筇竹寺组页岩等氦源岩; 相较于基底花岗岩, 筇竹寺组页岩型氦源岩的富 U、Th 矿物赋存特征及生氦潜力研究仍旧薄弱。【方法】以四川盆地威远地区筇竹寺组页岩为研究对象, 综合场发射扫描电镜观察、能谱及微量元素分析对筇竹寺组页岩型氦源岩特征和生氦潜力进行研究。【结果和结论】(1) 研究区筇竹寺组页岩 U 元素显著富集, 而 Th 元素丰度较低。(2) U、Th 赋存主要受控于氧化还原环境。筇竹寺组页岩沉积环境为强还原环境, 在此条件下, U 以还原沉淀、吸附和络合的形式赋存于有机质、黏土矿物(蒙脱石、绿泥石)、含磷矿物及含铁矿物(菱铁矿)中; Th 主要以类质同象的形式赋存于独居石和锆石等稳定矿物中。(3) 筇竹寺组页岩的生氦强度平均为 $2.41 \times 10^{-21} \text{ m}^3/(\text{kg} \cdot \text{a})$, 高于前震旦系基底花岗岩 [$1.82 \times 10^{-21} \text{ m}^3/(\text{kg} \cdot \text{a})$]。筇竹寺组页岩生烃强度大, 为 $(20 \sim 200) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$, 巨量烃类气强烈地“稀释”氦气, 导致页岩气藏中氦丰度较低(体积分数为 0.018%), 削弱了对灯影组天然气藏的供氦效率。相比之下, 规模巨大的基底花岗岩通过“溶解-脱溶、断层输导”对灯影组气藏有效供氦, 形成了以花岗岩为主、页岩为辅的“双源”供氦模式。

关键词: 氦源岩; 筇竹寺组页岩; 富 U、Th 矿物; 生氦潜力; 威远地区

中图分类号: P618.13 文献标志码: A 文章编号: 1001-1986(2026)03-0056-13

Characteristics and helium generation potential of ultra-deep marine shales as helium source rocks

YUAN Jiutao^{1,2}, ZHANG Wenjin³, SONG Zezhang^{1,2,*}, TIAN Xingwang³, LUO Qingyong^{1,2}, JIN Shigui^{1,2},
WANG Shulong^{1,2}, WU Meijia^{1,2}, WANG Li³, CHEN Hongbin³, GAO Jiawei^{1,2},
Mikhail SPASENNYKH⁴, Tagir KARAMOV⁴

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;
2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, Southwest Oil & Gasfield Company, PetroChina, Chengdu 610051, China; 4. Center for Petroleum Science and Engineering, Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow 121205, Russia

Abstract: [Objective] Large-scale, effective helium source rocks serve as a material basis for the formation of a helium-rich gas field. In the Weiyuan area, Sichuan Basin, the helium-rich gas reservoirs within the Dengying Formation exhibit helium source rocks consisting of the pre-Sinian basement granites and the shales of the Cambrian Qiongzhusi Forma-

收稿日期: 2025-08-03 接收日期: 2026-01-25

基金项目: 国家科技重大专项课题(2025ZD1010602); 国家自然科学基金项目(42272161); 中国石油大学(北京)“学科前沿交叉探索专项”课题(2462024XKQY001); 中国石油大学(北京)青年拔尖人才基金项目(2462023BJRC023)

第一作者: 苑九涛, 2000 年生, 男, 河北邢台人, 硕士研究生, 研究方向为(超)深层天然气成藏机理研究。E-mail: yuancup@sina.com

*通信作者: 宋泽章, 1988 年生, 男, 福建宁德人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事(超)深层油气及其伴生资源成藏、储层微米级孔隙结构表征研究。E-mail: songzz@cup.edu.cn

© Editorial Office of Coal Geology & Exploration. OA under CC BY-NC-ND

tion. Compared to the basement granites, studies on the shales of the Qiongzhusi Formation remain limited, including those on the occurrence characteristics of uranium (U)- and thorium (Th)-rich minerals and helium generation potential. [Methods] This study investigated the shales of the Qiongzhusi Formation, Weiyuan area, Sichuan Basin. By integrating field emission scanning electron microscopy (FE-SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), and trace element analysis, this study examined the characteristics and helium generation potential of shales as helium source rocks in the Qiongzhusi Formation. [Results and Conclusions] The shales of the Qiongzhusi Formation in the study area exhibit significant U enrichment but a low Th abundance. The occurrence forms of U and Th are primarily governed by redox conditions. The shales of the Qiongzhusi Formation were deposited in a highly reducing environment. Under such a sedimentary setting, U primarily occurs within organic matter, clay minerals (e.g., montmorillonite and chlorite), phosphorus-bearing minerals, and iron-bearing minerals (siderite) through the processes of reduction-precipitation, adsorption, and complexation. In contrast, Th predominantly occurs within stable minerals such as monazites and zircons via isomorphous substitution. The shales of the Qiongzhusi Formation show an average helium generation intensity of $2.41 \times 10^{-21} \text{ m}^3/(\text{kg} \cdot \text{a})$, higher than that of the pre-Sinian basement granites ($1.82 \times 10^{-21} \text{ m}^3/(\text{kg} \cdot \text{a})$). However, the shales exhibit a high hydrocarbon generation intensity of approximately $(2 \sim 200) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$. As a result, the enormous volumes of hydrocarbon gases significantly dilute helium, leading to low helium abundance (volumetric fraction: 0.018%) within the shale gas reservoirs and weakening the helium supply efficiency of the shales to the gas reservoirs within the Dengying Formation. In contrast, the extensive-scale basement granites effectively supply helium to the gas reservoirs through dissolution-exsolution and transport along faults. Consequently, a dual-source helium supply pattern consisting of granites predominantly and shales secondarily is formed.

Keywords: helium source rock; shale of the Qiongzhusi Formation; U- and Th-rich minerals; helium generation potential; Weiyuan area

氦气因其独特的物理化学性质,被广泛应用于国防、军工、航空、航天、医疗、精密制造、低温超导、科研实验等几乎所有现代高科技领域^[1-2],是支撑国防安全和高科技产业发展的核心战略资源。全球90%以上的氦气储量主要分布在美国(84.9亿 m^3)、卡塔尔(101亿 m^3)、阿尔及利亚(82亿 m^3)、俄罗斯(68亿 m^3)和加拿大(20亿 m^3)等国家^[3],而中国现已勘探的氦资源量较少,仅有11亿 m^3 ,对外依存度高达87.6%^[4]。壳源氦是指由地壳中U、Th等放射性元素衰变生成的氦气,其源岩主要有岩浆岩(花岗岩、伟晶岩等)、变质岩(片麻岩、花岗片麻岩等)和沉积岩(黑色页岩、铝土岩、煤等)3大类^[5]。氮源岩的生氮能力依赖于U、Th元素含量和衰变生氮时间;U、Th元素含量越高,生氮能力越强。不同类型氮源岩的U、Th元素丰度差异显著,这与其赋存机制密切相关。在岩浆岩和变质岩中,U、Th主要赋存于U、Th独立矿物和类质同象矿物中;而在沉积岩中,则多呈分散吸附形式赋存^[6]。在壳源氮成藏过程中,以分散吸附形式赋存的U、Th缺乏矿物晶格的束缚,其衰变生成的氦气更易于释放至孔隙空间。

规模大且富含放射性元素的氮源岩是富氮气田形成的物质基础^[7]。氮源岩规模越大、U和Th等放射性元素丰度越高、埋藏时间越久且距离圈闭越近,越有利于氦气的聚集与成藏^[8]。富U、Th的基底花岗岩是富氮天然气藏最常见且有效的氮源岩;典型代表包括美国Hugoton-Panhandle气田^[9]、鄂尔多斯盆地东胜气田^[10]、大牛地气田^[11]、四川盆地威远气田^[12]、大探1区块^[13]

等基底花岗岩。受限于U、Th含量和孔隙结构,变质岩生氮量和释氮效率低于花岗岩^[14],不能作为天然气藏的主力氮源岩,如四川盆地安岳气田^[15]基底变质岩。除基底花岗岩和变质岩之外,沉积岩常被认为是潜在氮源岩。富有机质页岩、煤和铝土岩等氮源岩虽生氮潜力高,但受烃类气稀释效应和保存条件制约,独立成藏难度大。例如,鄂尔多斯盆地东缘石炭-二叠系煤层虽具备生氮能力,但非主力氮源岩;富氮气藏的形成仍主要依赖基底花岗岩^[16]。四川盆地金秋气田的例子则表明沉积岩可作为主力氮源岩:须家河组—沙溪庙组U、Th含量较高(U为 $3.10 \mu\text{g/g}$,Th为 $8.86 \mu\text{g/g}$),具较强生氮能力;由于缺乏沟通储层和基底花岗岩的深大断裂,该致密气藏中的氦气来源于中生界沉积岩^[17]。

威远气田是我国最早实现氦气工业开采的富氮天然气田^[8,18]——震旦系富氮天然气藏氦气体积分数为0.218%~0.342%;氦气主要来源于富含U、Th元素的花岗岩基底,同时,寒武系筇竹寺组页岩作为外部氮源岩对富氮气藏的形成具有重要贡献^[12]。

大量研究对不同氮源岩的生氮速率进行了比较,普遍认为页岩具有比花岗岩更高的生氮潜力。秦胜飞等^[19]指出,不同氮源岩生氮速率不同:铝土岩>页岩>花岗岩>泥岩>砂岩>碳酸盐岩;其中,页岩的生氮速率仅次于铝土岩,高于花岗岩和泥岩。朱俊阳等^[14]基于野外露头样品对威远气田筇竹寺组页岩和前震旦系花岗岩的生氮潜力进行对比,同样发现页岩生氮潜力高于花岗岩。

截至目前,威远地区筇竹寺组页岩 U、Th 元素赋存机制尚不明晰,页岩气对威远地区富氦气藏形成的贡献有待阐明。笔者以四川盆地筇竹寺组页岩型氮源岩为研究对象,综合场发射扫描电镜观察、能谱与微量元素分析,探讨 U、Th 元素在页岩中的富集特征及页岩的生氦潜力,阐明筇竹寺组页岩和基底花岗岩对威远气田灯影组富氦天然气藏的贡献。

1 区域地质概况

1.1 研究区位置

四川盆地位于扬子板块西北缘,是在扬子克拉通基础上发育起来的多旋回叠合盆地,面积约为 18 万 km²[20]。晚震旦世—早寒武世,受罗迪尼亚超大陆裂解的影响,四川盆地处于伸展构造背景[21]。受桐湾运动和兴凯地裂运动的影响,震旦系灯影组受到不同程度的抬升和剥蚀,并在长宁—德阳—安岳—绵阳一带形成北深南浅、东陡西缓、近南北向拉张裂陷槽,即德阳—安岳裂陷槽(又称绵阳—长宁裂陷槽)[21-23]。研究区位于德阳—安岳裂陷槽中段,涵盖裂陷槽西侧的威远气田、资阳气田,裂陷槽东侧的安岳大气田和威荣页岩气田,如图 1(a)所示。

四川盆地前震旦系花岗岩侵入时代为新元古代(花岗岩年龄为 794 Ma),成因类型属于 A₂ 型花岗岩[26]。盆地基底主要由岩浆岩和变质岩组成,地层厚度超数千

米[27]。在前震旦花岗岩基底上,发育了震旦系一中三叠统海相碳酸盐岩沉积和上三叠统一第四系陆相碎屑岩沉积。威远地区震旦系—寒武系发育陡山沱组、灯影组灯三段、筇竹寺组和沧浪铺组等多套页岩层。其中,寒武系筇竹寺组是目前我国页岩气勘探开发的重点层位[28-32]。

1.2 筇竹寺组岩性及沉积相

受“海平面上升—裂陷槽伸展”的影响,筇竹寺组岩性分布差异明显,且地层呈现厚度分带特征。麦地坪组—筇竹寺组覆盖在灯影组碳酸盐岩之上,且部分地区麦地坪组缺失。筇竹寺组在裂陷槽内与麦地坪组整合接触,在裂陷槽东、西两侧与灯影组不整合接触。筇竹寺组自下而上划分为第一段和第二段;第一段可进一步划分为 2 个亚段,即第一¹亚段、第一²亚段,如图 1(b)所示。第一¹亚段沉积于大规模海侵阶段:槽内为深水陆棚相,岩性以硅质页岩为主;槽外为浅水陆棚相[24]。第一²亚段沉积期为海退的关键时期,浅水陆棚相逐渐向槽内扩张,岩性以粉砂质页岩为主。第二段沉积期物源持续高强度输入,裂陷槽内外广覆式沉积厚层粉砂质页岩和泥质页岩。受裂陷槽构造格局的影响,初期筇竹寺组沉积差异明显,随着裂陷槽内筇竹寺组页岩沉积厚度加大,差异沉降减弱,形成广覆式沉积[20-21,24]。裂陷槽控制了筇竹寺组沉积厚度南北向差异:由槽北向槽南厚度逐渐减薄[22]。

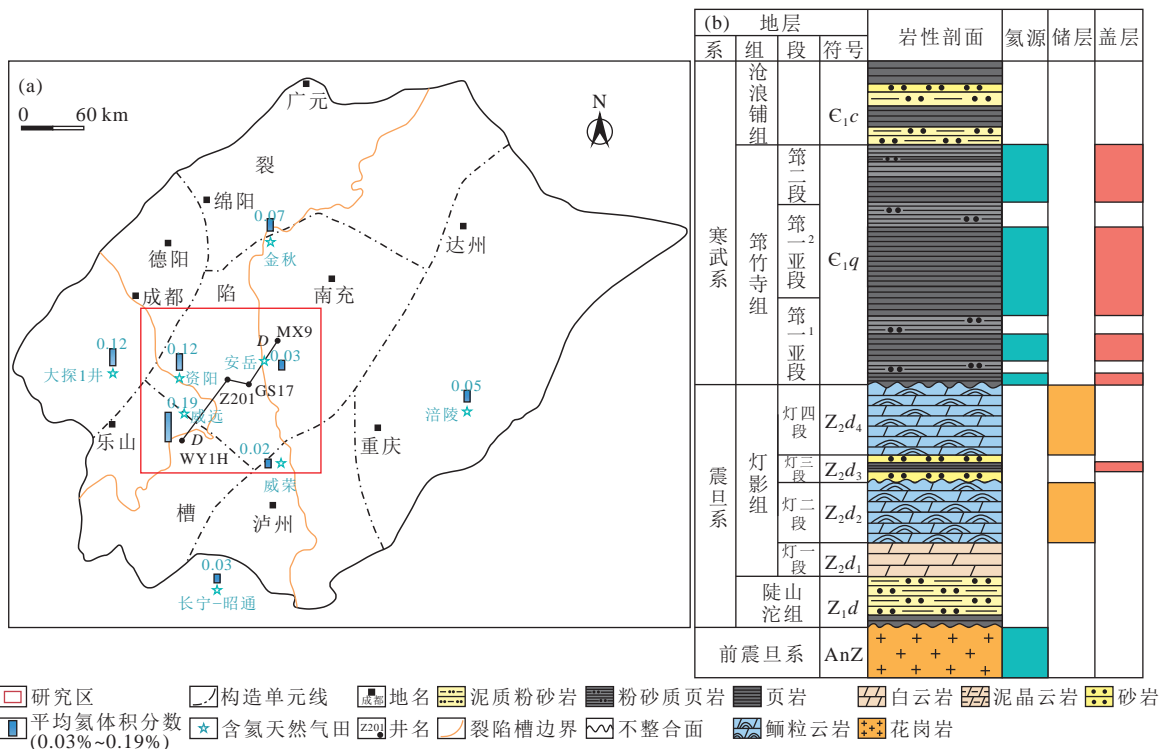


图 1 威远气田富氦气藏位置、采样点位及地层综合柱状图(据文献 [12,24-25], 修改)

Fig.1 Helium-rich gas reservoir locations, sampling point locations, composite stratigraphic column of the Weiyuan gas field (modified after references [12,24-25])

2 样品与实验方法

2.1 样品

本次研究共采集威远地区筇竹寺组一段和二段岩心样品 8 块, 埋深 4 300~4 900 m。将样品破碎后, 挑选具有自然断面的块样, 不进行表面抛光, 对块样的自然断面进行镀金处理后, 用于扫描电镜下富 U、Th 矿物鉴定。同时, 将剩余样品研磨成 0.075 mm 细粉(200 目)用于页岩微量元素分析。

2.2 测试方法

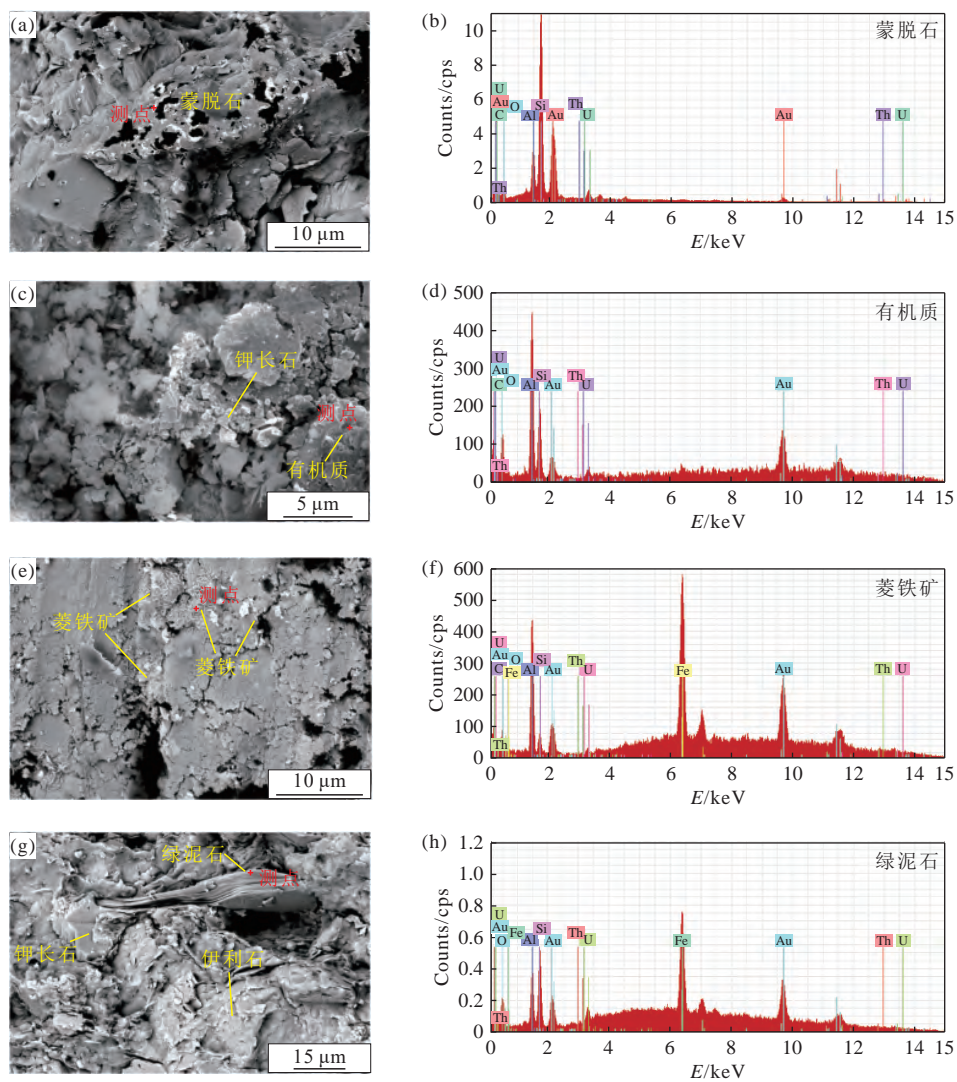
页岩富 U、Th 矿物鉴定在中国石油勘探开发研究院完成, 采用 Quanta 250 FEI 场发射扫描电镜(根据 SY/T 5162—2021《岩石样品扫描电子显微镜分析方法》执行)和 OXFORD X-MAX 20 能谱仪(根据 SY/T 6189—

2018《岩石矿物能谱定量分析方法》执行)进行矿物形态和赋存定性描述及能谱分析(SEM-EDS)。页岩微量元素分析在中国石油西南油田公司勘探开发研究院完成, 采用 NexION 300D 型号等离子体质谱仪(根据 GB/T 14506.30—2010《硅酸盐岩石化学分析方法 第 30 部分: 44 个元素量测定》执行)测定筇竹寺组页岩微量元素含量。

3 筇竹寺组页岩富 U、Th 矿物及其赋存特征

3.1 富 U、Th 矿物

SEM-EDS 分析表明, 威远地区筇竹寺组页岩样品中富含 U 元素的矿物主要有蒙脱石、绿泥石和菱铁矿, 且 U 在有机质中也显著富集(图 2), 磷灰石、金红石、独居石、锆石、黄铁矿等重矿物发育(图 3)。如图 3(a)、



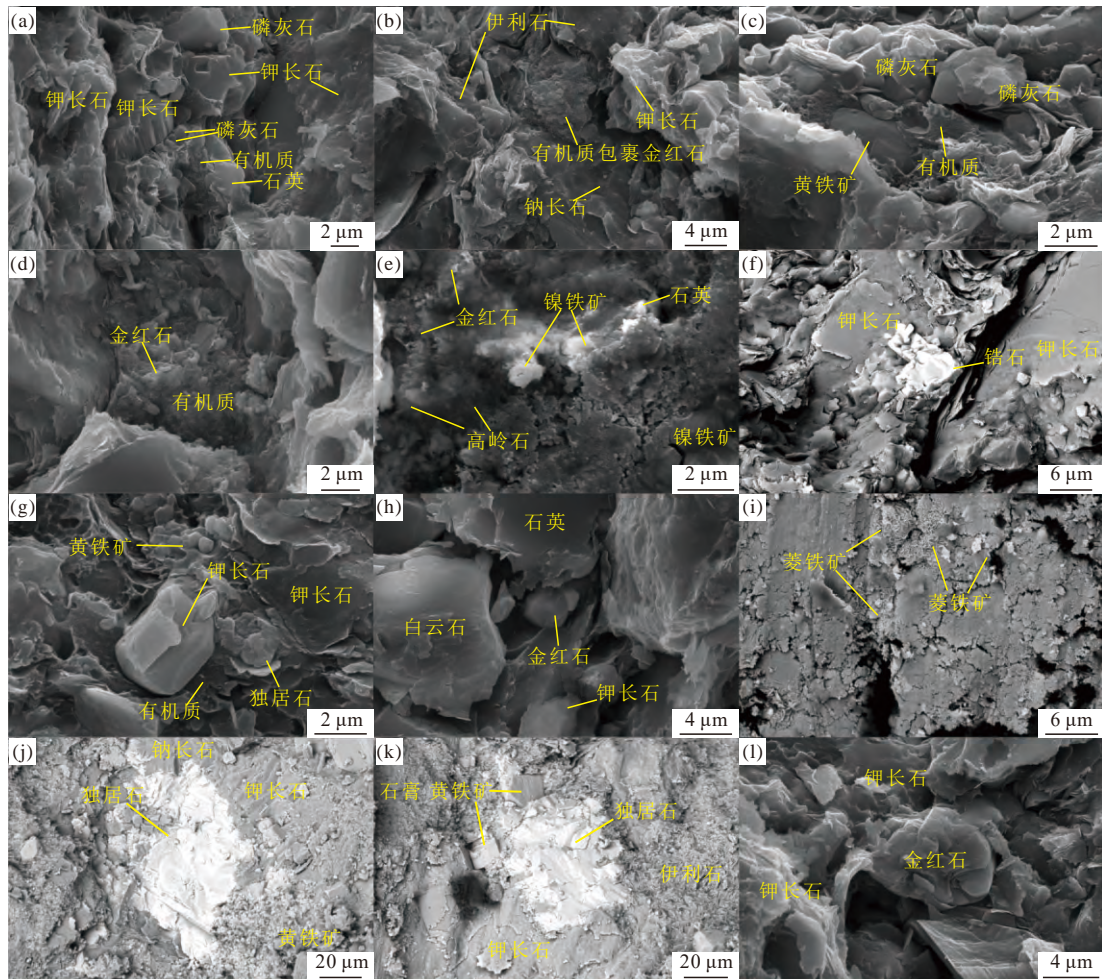
(a)、(b) MX9 井, 4 968.34 m, 蒙脱石发育孔隙, 能谱显示 U 元素峰; (c)、(d) GS17 井, 4 971.96 m, 有机质附着于钾长石表面, 能谱显示明显 C 元素峰和 U 元素峰; (e)、(f) GS17 井, 4 971.96 m, 菱铁矿集合体分布于长石粒间孔中, 能谱显示 Fe 元素峰值较高, U 元素峰明显; (g)、(h) GS17 井, 4 974.94 m, 绿泥石呈层状, 元素组成主要有 Si、Al、O、Fe

图 2 威远气田筇竹寺组富 U、Th 矿物分布特征

Fig.2 Distribution characteristics of U- and Th-rich minerals in the Qiongzhusi Formation, Weiyuan gas field

图 3(c) 所示, 磷灰石形状不规则, 多与有机质共生。金红石表现出 2 种赋存状态: 一种矿物形状不规则, 其表面多附着有机质 [图 3(b)、图 3(d)、图 3(e)], 另一种以自形晶体赋存于石英、长石间的孔隙中 [图 3(h)、图 3(l)]。独居石和锆石在筇竹寺组页岩中较多, 这可能与其沉积

物源有关。独居石的颗粒尺寸介于 4~50 μm , 嵌布于石英、长石等矿物粒间 [图 3(j)、图 3(k)], 部分与有机质紧密接触 [图 3(g)]。锆石以自形晶体形式与钾长石紧密接触, 在镜下呈现出较为明亮的特征 [图 3(f)]。菱铁矿集合体分布于钾长石孔隙中 [图 3(i)]。



(a) Z201 井, 4 590.48 m, 磷灰石呈无规则状, 且与钾长石和有机质紧密接触; (b) Z201 井, 4 590.48 m, 有机质附着于金红石表面; (c) MX9 井, 4 968.34 m, 磷灰石呈团块状, 与黄铁矿粒间孔中充填有机质; (d) WY1H 井, 4 331.83 m, 金红石表面附着有机质; (e) GS17 井, 4 979.4 m, 金红石与高岭石共生, 镍铁矿晶间孔比较发育; (f) MX9 井, 4 968.34 m, 锆石呈长方形, 与钾长石紧密接触; (g) GS17 井, 4 974.94 m, 独居石呈不规则状, 与钾长石、有机质紧密接触; (h) Z201 井, 4 590.4 m, 金红石呈椭圆形, 赋存于石英和白云石之间的孔隙中; (i) GS17 井, 4 971.96 m, 菱铁矿集合体分布于钾长石矿物粒间孔中; (j) Z201 井, 4 865.38 m, 独居石呈菱形, 与钾长石、钠长石和黄铁矿紧密接触; (k) Z201 井, 4 865.38 m, 独居石呈正方形, 与钾长石、黄铁矿、伊利石紧密接触; (l) WY1H 井, 4 331.83 m, 金红石呈椭圆形, 赋存于钾长石之间的孔隙中

图 3 威远气田筇竹寺组富 U、Th 矿物赋存特征(扫描电镜观察)

Fig.3 Scanning electron microscope (SEM) images showing the occurrence characteristics of U- and Th-rich minerals in the Qiongzhusi Formation, Wei yuan gas field

3.2 沉积环境对页岩中 U、Th 元素富集的控制作用

页岩中多种组分均可通过络合、吸附及还原等过程富集环境中的 U、Th 元素, 其富集效率受氧化还原条件、离子浓度和微生物活动等多重因素调控^[33-35]。

3.2.1 氧化还原条件

微量元素 V、Cr、Ni、Co、U、Th 等对沉积水体的氧化还原条件极为敏感, 常用于判别沉积期水体的氧化

还原环境。常用的元素判别指标有 V/Cr、Ni/Co、V/(V+Ni)、U/Th 等^[36](下文用元素符号代替其含量)。当 V/Cr>4.25、V/(V+Ni)>0.60、Ni/Co>7, 指示沉积水体为厌氧还原环境; 当 2.00<V/Cr≤4.25、0.46<V/(V+Ni)≤0.60、5<Ni/Co≤7, 指示沉积水体为贫氧还原环境; 当 V/Cr≤2、V/(V+Ni)≤0.46、Ni/Co≤5, 指示沉积水体为氧化环境^[37]。U 的富集反映沉积环境偏还原, 而 Th 的

含量可用于指示物源输入速率。U/Th 是评价页岩气富集及高产层段的关键指标; $0.75 < U/Th \leq 1.25$ 指示沉积环境为贫氧还原环境, $U/Th > 1.25$ 指示沉积环境为厌氧强还原环境^[38]。

基于微量元素地球化学判别指标,对筇竹寺组页岩的氧化还原环境的判识存在差异(表 1, 图 4, 图 5)。V/Cr 为 1.50~9.64, 平均为 3.68, 指示第一段沉积水体为贫氧—厌氧还原环境, 而第二段沉积水体主要为氧化环境; $V/(V+Ni)$ 为 0.63~0.89, 平均为 0.75, 表明第一段和第二段沉积水体均为贫氧还原环境; Ni/Co 为 3.26~

10.42, 平均为 6.77, 显示筇竹寺组页岩整体沉积于贫氧—厌氧还原环境, 但部分第二段样品微量元素特征显示水体为氧化环境; 此外, 筇竹寺组页岩 U 含量为(8.87~28.37) $\mu\text{g/g}$, 平均为 17.89 $\mu\text{g/g}$, 而 Th 含量较低, 为(3.50~12.12) $\mu\text{g/g}$, 平均为 8.58 $\mu\text{g/g}$ 。U、Th 富集特征指示第一段整体和第二段底部地层主要沉积于强还原环境。这种差异是微量元素对局部水体氧化还原环境的敏感度不同导致的, 反映了沉积水体氧化还原环境的动态变化。综合分析表明, 筇竹寺组页岩主要沉积于贫氧—厌氧还原环境。

表 1 威远地区筇竹寺组页岩微量元素分析结果
Table 1 Trace element analysis results of shales in the Qiongzhusi Formation, Weiyuan area

井号/编号	层位	U	Th	V	Cr	Co	Ni	U/Th	V/Cr	V/(V+Ni)	Ni/Co
Z201	第 ¹ 亚段	24.47	9.78	494.40	106.68	16.10	139.84	2.50	4.63	0.78	8.69
Z201	第 ² 亚段	10.75	3.50	784.50	149.80	11.06	98.02	3.07	5.24	0.89	8.86
MX9	第二段	28.37	7.95	228.50	87.69	17.12	108.60	3.57	2.61	0.68	6.34
GS17-1	第二段	12.19	10.09	167.60	100.31	16.62	90.04	1.21	1.67	0.65	5.42
GS17-2	第二段	8.87	9.45	123.90	82.69	11.56	37.64	0.94	1.50	0.77	3.26
WY1H-1	第 ¹ 亚段	18.01	7.95	973.70	101.03	14.14	147.38	2.26	9.64	0.87	10.42
WY1H-2	第 ¹ 亚段	18.82	7.80	185.00	85.64	16.10	75.62	2.41	2.16	0.71	4.70
WY1H	第 ² 亚段	21.63	12.12	180.80	90.88	16.30	105.22	1.78	1.99	0.63	6.46

注: 元素符号表示元素含量, $\mu\text{g/g}$ 。

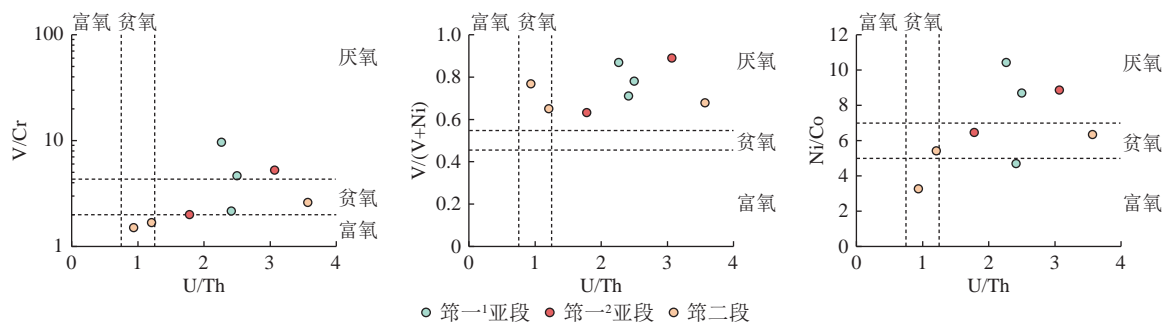


图 4 威远地区筇竹寺组氧化还原环境的微量元素判别指标

Fig. 4 Trace element indicator-based discriminant diagrams of the paleo-redox conditions in the Qiongzhusi Formation, Weiyuan area

3.2.2 还原作用

第¹亚段沉积环境为深水还原环境(图 5)^[22], 沉积速率缓慢, 水体稳定, 有利于有机质积累和 U^{6+} 还原沉淀。同时, 有机质通过吸附水体中的铀酰离子富集 U。第²亚段沉积期物源输入增强^[24], 使得独居石、锆石等稳定重矿物通过风化搬运作用在页岩中沉积。第二段底部强还原环境有利于 U 还原沉淀。

表生环境中, 铀主要以 U^{4+} 和 U^{6+} 两种价态存在, 其中 U^{4+} 溶解度极低, 仅在强酸性环境下 ($\text{pH} < 2$) 可溶, 主要以沉淀的形式存在^[35]; U^{6+} 则以铀酰离子形式与羟基、碳酸根、硫酸根、磷酸根、氯离子、氟离子等阴离子络合, 形成可溶或不可溶的铀酰络合物, 影响 U 的迁移和

沉淀^[39]。还原环境中, U^{6+} 被还原为 U^{4+} 并发生沉淀, 是 U 富集的主要机制之一。该还原过程可通过微生物活动或还原剂(如 H_2 、 CH_4 、 CO 、 H_2S) 实现, 其中 H_2 是最有效的还原剂^[33]。此外, 含铁矿物可以通过 Fe^{2+} 将 U^{6+} 还原为 U^{4+} , 形成独立矿物铀石^[40]。厌氧还原环境下, 微生物可将有机质氧化为 CO_2 , 同时还原 U^{6+} 为 U^{4+} , 促进铀的沉淀^[41]。富有机质页岩在热演化过程中释放 H_2S 、 CH_4 、 H_2 、 NH_3 等还原性气体, 形成还原环境, 增强 U^{6+} 向 U^{4+} 还原的效率^[42]。硫酸盐还原菌等厌氧微生物在油气厌氧氧化过程中, 也协同还原硫酸盐和 U^{6+} ^[43]。

Th 元素作为非活动性元素, 主要以类质同象形式赋存于矿物晶格中, 其中, 含稀土元素的独居石是其理

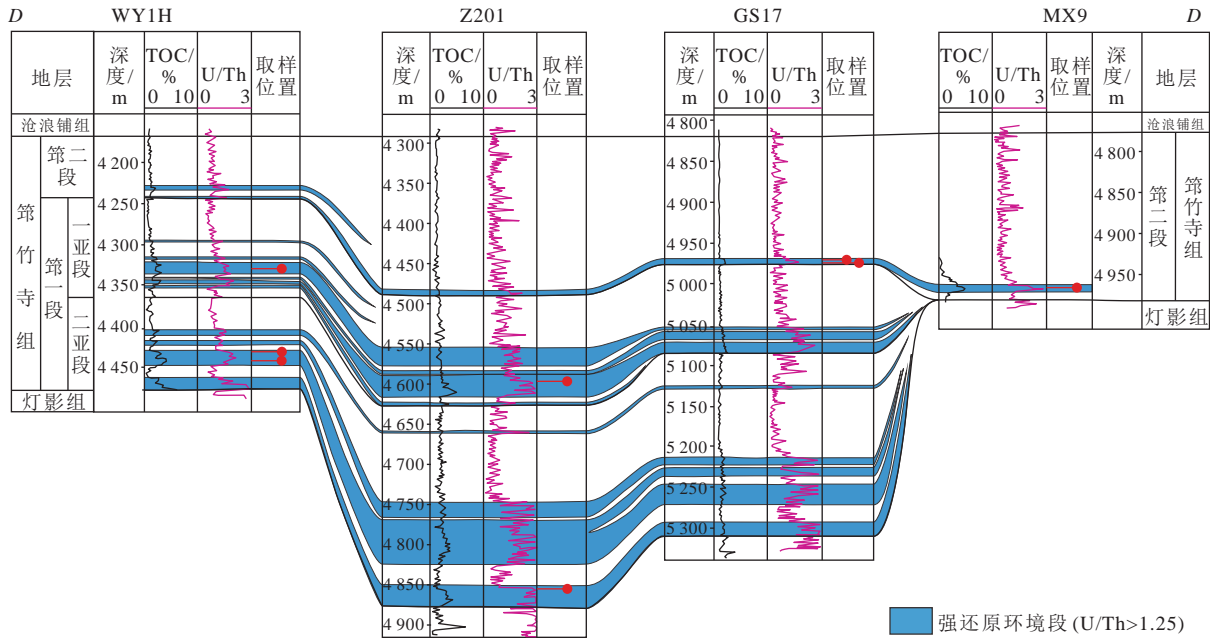


图 5 德阳-安岳裂陷槽中段强还原环境段连井剖面图(据文献 [22], 修改)

Fig.5 Well-correlation section showing highly reducing environment sections in the middle part of the Deyang-Anyue rift trough (modified after reference [22])

想赋存矿物^[34]。图 3 (j)、图 3(k) 的筇竹寺组页岩中独居石和锆石较为常见,且晶型较为完整,表明 Th 主要以类质同象形式固溶于独居石、锆石等稳定矿物晶格,随机风化迁移沉积。因此, Th 富集主要受沉积物源控制。

3.2.3 吸附作用

有机质中的有机化合物(富里酸和腐殖酸)可通过络合反应与铀酰离子形成稳定化学键^[44],从而固定 U。此外,有机质可以通过物理吸附过程固定流体中的 U,吸附效果受流体 pH 的影响,中性条件下,吸附效果最好^[45]。黏土矿物具备极大的表面积,且会在结构表面和颗粒边缘产生负电荷^[46],使其对铀酰离子和 Th 的络合物具有极强的吸附能力。其中,蒙脱石具有更多吸附 U 的位点,吸附能力更强^[42]。含铁矿物不仅可以通过 Fe²⁺离子将 U⁶⁺还原为 U⁴⁺,还可以吸附铀酰离子。赤铁矿、磁铁矿、针铁矿和水铁矿等铁氧化物对铀酰离子有极强的吸附作用,吸附过程受 pH 和碳酸根、碳酸氢根、磷酸盐等影响^[35]。含磷矿物中的磷酸盐容易和铀酰离子发生络合反应,形成高度不溶的磷酸盐络合物,具有比碳酸盐、硅酸盐、硫酸盐等基团更强的固定铀酰离子能力^[42]。同时,磷酸盐可以增强黏土矿物对铀酰离子的吸附作用^[47]。磷酸盐通过在含铁(氢氧)矿物表面与铀酰离子发生络合作用,使难溶的磷酸盐铀酰络合物吸附在含铁(氢氧)矿物表面,提升了含铁(氢氧)矿物固定 U 的能力^[48]。另外,矿物表面发育微型凹坑、孔洞和微裂缝关系密切,会使矿物暴露更多吸附位点,有利于铀酰离子吸附,例如鄂尔多斯盆地中侏罗统-下白垩

统砂岩中黄铁矿和锐钛矿表面蚀变形成的坑洞或微裂缝中吸附铀矿物^[49]。

筇竹寺组页岩中的有机质、黏土矿物(蒙脱石和绿泥石)和菱铁矿是 U 富集的重要载体。值得注意的是,独居石、磷灰石等含磷矿物在筇竹寺组页岩中较为常见(图 3),且磷灰石多与有机质共生,如图 3 (b)、图 3(d)所示。这表明,有机质络合和吸附、黏土矿物吸附、含磷矿物络合、含铁矿物还原和吸附作用等多种作用构成了筇竹寺组页岩中 U 富集的主要途径。除吸附作用外,U 可通过类质同象的形式进入金红石、磷灰石、独居石和锆石等重矿物晶格中。虽然黏土矿物对 Th 的络合物和胶体具有吸附作用,但仅有极少量 Th 会在强酸环境下溶解^[34],导致其在沉积流体中含量非常低。因此,黏土矿物的吸附作用并非富集 Th 的主要机制。

4 页岩型氦源岩生氦强度及氦气含量

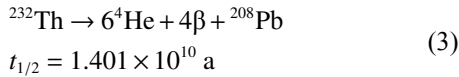
地壳中 He 有两种稳定同位素³He 和⁴He。³He 主要来源于地球形成时捕获的原始氦^[8],地壳中少量³He 由⁶Li 经过衰变反应 [⁶Li(n, α)³H(β⁻)→³He] 产生。地壳中³He/⁴He 为 1.08×10⁻⁸^[50],³He 同位素含量非常低。因此,天然气中氦气的丰度指的是⁴He 的丰度。⁴He 主要由²³⁸U、²³⁵U 和²³²Th 等放射性元素衰变产生,如下。

$$^{238}\text{U} \rightarrow 8^4\text{He} + 6\beta + ^{206}\text{Pb} \quad (1)$$

$$t_{1/2} = 4.468 \times 10^9 \text{ a}$$

$$^{235}\text{U} \rightarrow 7^4\text{He} + 4\beta + ^{207}\text{Pb} \quad (2)$$

$$t_{1/2} = 7.100 \times 10^8 \text{ a}$$



根据 U、Th 元素衰变方程可以计算出单位质量 U 和 Th 每年衰变产生的氦原子数量。C. J. Ballentine 等^[50] 计算出每年每克 U 和 Th 分别产生 3.32×10^{12} 和 7.71×10^{11} 个氦原子，标准状态下氦气体积约为 1.21×10^{-13} 和 $2.89 \times 10^{-14} \text{ m}^3$ ；U 的产氦量约为 Th 的 4.19 倍。因此，单位质量岩石的累积生氦量主要取决于其地层年龄与 U、Th 含量。基于前人建立的地层时间框架，筇竹寺组页岩的沉积时期为(529~521) Ma^[51]，本文采用 529 Ma 作为计算年龄。由于²³⁸U、²³⁵U 和²³²Th 的半衰期极长，在筇竹寺组页岩沉积至今的历史时期内，其因衰变产生的损失量可以忽略不计。因此，现今测得的 U、Th 含量可以近似代表地层初始 U、Th 含量，并用于计算筇竹寺组页岩的累计生氦量^[52]。

$$P_{\text{He}} = 1.21 \times 10^{-13} [\text{U}] + 2.89 \times 10^{-14} [\text{Th}] \quad (4)$$

$$V_{\text{He}} = P_{\text{He}} \times t \quad (5)$$

由式(4)可知，生氮强度取决于 U、Th 含量，不同类型氮源岩的生氮能力差异显著。普遍认为富有机质页岩型氮源岩具有较高的 U、Th 丰度，其单位质量岩石

生氮强度更高(图 6)^[53-54]。威远地区筇竹寺组页岩的生氮强度为 $(1.35 \sim 3.66) \times 10^{-21} \text{ m}^3/(\text{kg} \cdot \text{a})$ ，平均为 $2.41 \times 10^{-21} \text{ m}^3/(\text{kg} \cdot \text{a})$ (表 2)。值得注意的是，威远地区前震旦系基底花岗岩虽然拥有较高的 U、Th 丰度(U 含量为 $7.19 \mu\text{g/g}$ ，Th 含量为 $32.70 \mu\text{g/g}$)^[12]，但其生氮强度 $1.82 \times 10^{-21} \text{ m}^3/(\text{kg} \cdot \text{a})$ ，低于筇竹寺组平均生氮强度(图 6)。此外，筇竹寺组泥页岩氦气体积分数介于 0.009%~0.028%，平均 0.018%(表 2)。

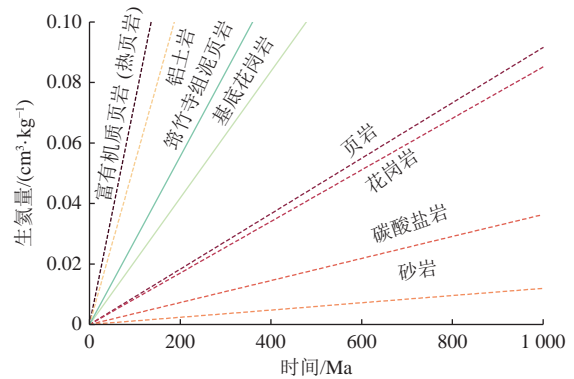


图 6 不同岩石生氮速率(据文献 [53]，修改)

Fig.6 Helium generation rates of various rocks (modified after reference [53])

表 2 威远地区筇竹寺组页岩型氮源岩生氮参数计算结果

Table 2 Calculated helium generation parameters of shales as helium source rocks in the Qiongzhusi Formation, Weiyuan area

井位	层位	含气量/ ($10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	地质年龄/ Ma	[U]/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	[Th]/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	岩石生氮强度/ ($10^{-21} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)	岩石累计 生氮量($10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	氦气 体积分数/%
Z201	第一 ¹ 亚段	7.5 ^[22]	529	10.754	3.503	3.24	0.7	0.010
	第一 ² 亚段		529	24.470	9.781	1.40	1.7	0.023
WY1H	第一 ¹ 亚段	6.5 ^[25]	529	18.008	7.953	3.66	1.3	0.020
	第一 ² 亚段		529	18.822	7.797	1.77	1.3	0.020
MX9	第二段	6.9 ^[22]	529	28.367	7.946	2.41	1.9	0.028
GS17	第二段	8.2 ^[22]	529	12.192	10.09	2.50	0.9	0.011
			529	8.865	9.453	2.97	0.7	0.009

5 四川盆地页岩型氮源岩对氮藏贡献

基于对筇竹寺组页岩型氮源岩 U、Th 赋存特征、生氮强度的综合分析，并结合前人对页岩与花岗岩型氮源岩生、释氮机理的对比认识，深入探讨筇竹寺组页岩对页岩气藏及下伏灯影组常规气藏的氮藏贡献。

5.1 筇竹寺组页岩型氮源岩对页岩气藏的贡献

筇竹寺组页岩中 U、Th 元素的差异富集，特别是高 U 含量(表 1)，是其高生氮强度的物质基础，U 主要以有机质络合、黏土矿物吸附和含铁矿物还原沉淀的形式赋存(图 2、图 3)，缺乏矿物晶体的束缚，其衰变生成的⁴He 更容易散失到孔隙中。虽然 Th 主要赋存于独

居石、锆石等重矿物的晶格中，这些重矿物在地质历史中因辐照损伤发生蜕晶化，从而有利于 He 的释放，但 Th 含量和生氮效率均低于 U，因此 Th 在总生氮量中的贡献占比相对 U 较低。

筇竹寺组页岩生氮强度巨大，为(20~200) 亿 m^3/km^2 ^[36]。根据理想气体分压定律，由于筇竹寺组生成大量烃类气，即使筇竹寺组页岩生成的氦气全部释放，这些微量的氦气也会被巨量的烃类气体强烈稀释，导致氦气在页岩气中的体积分数较低(平均 0.018%)。依据 T/CCGA 90005—2024《氦气储量和资源评价》，含氮天然气藏可依据氦气体积分数划分 4 类：富氮气藏($\geq 0.30\%$)、中氮

气藏(0.10%~0.30%)、低氦气藏(0.03%~0.10%)和贫氦气藏(<0.03%)。筇竹寺组页岩气中氦气体积分数小于0.03%，已属贫氦气藏，强烈的生烃稀释作用是导致筇竹寺组页岩中氦气体积分数低的主要原因。

值得注意的是，威远气田 W201-H1 井筇竹寺组页岩气中检测到了体积分数为 0.14% 的氦气^[55](表 3)，达到中含氦气藏标准，具有商业开发价值。这是由于基底

花岗岩中积累的氦气溶解于古老地层水，通过断层运移至页岩气藏，并与页岩气发生气体交换，氦气几乎可以全部释放到页岩气藏中，形成局部富氦^[55](图 7)。因此，富有机质页岩型氦源岩受限于强烈的生烃稀释作用，通常难以形成富氦页岩气藏。然而，在外部充足氦源供给(如基底花岗岩供氦)的条件下，可通过水溶运移、断层疏导和气体交换在页岩气藏中形成局部氦气富集。

表 3 四川盆地页岩型氦源岩分布统计
Table 3 Statistics of the distributions of shales as helium source rocks in the Sichuan Basin

气田/区块	气藏类型	产气层	氦气体积分数/%	氦源岩	R/R _a	来源
威远气田	常规气	灯影组	0.120~0.404/0.260	前震旦系花岗岩、筇竹寺组页岩		文献[12,55]
	页岩气	筇竹寺组	0.050~0.140/0.109	筇竹寺组页岩	0.020	
涪陵气田	页岩气	五峰组-龙马溪组	0.020 4~0.049 1/0.029 1	五峰组-龙马溪组页岩	0.020	文献[56]
	页岩气	五峰组-龙马溪组	0.034~0.062/0.045	五峰组-龙马溪组页岩	0.004~0.030	文献[57]
安岳气田	常规气	灯二段	0.012~0.089/0.027	基底中-酸性变质岩、筇竹寺组页岩		文献[15]
大探1区块	常规气	灯二段	0.115 6	前震旦系花岗岩、筇竹寺组页岩	0.033	文献[13]
		灯四段	0.100 0~0.126 9/0.113 0		0.032	
长宁	页岩气	五峰组-龙马溪组	0.014 5~0.050 7/0.026 7	五峰组-龙马溪组页岩	0.020	
昭通	页岩气	五峰组-龙马溪组	0.017 3~0.041 4/0.026 6	五峰组-龙马溪组页岩	0.020	文献[58]
威荣	页岩气	五峰组-龙马溪组	0.020 1~0.021 4/0.020 8	五峰组-龙马溪组页岩		

注：0.120~0.404/0.26表示最小~最大值/平均值，其他同；R/R_a表示天然气(³He/⁴He)/大气(³He/⁴He)。

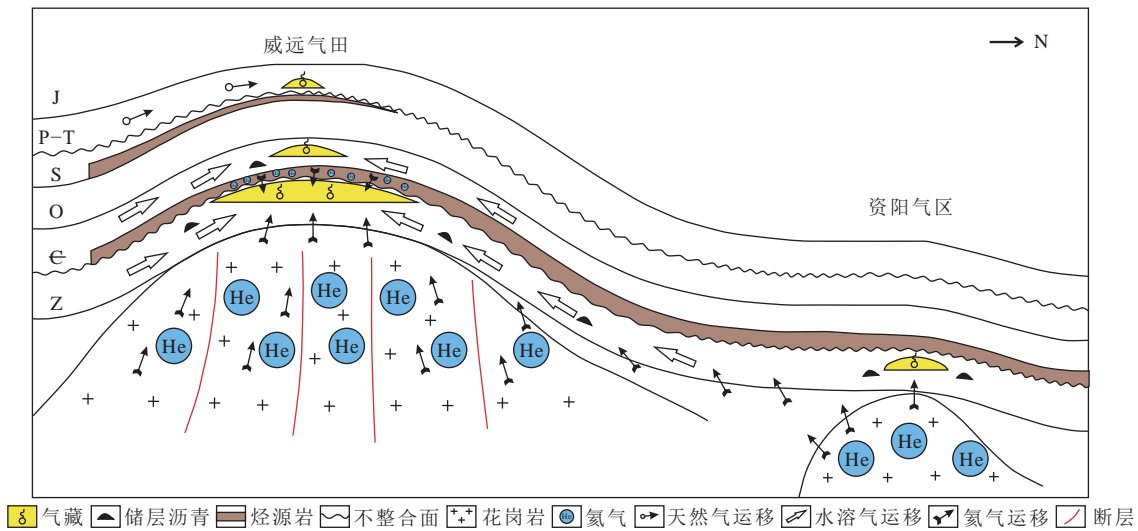


图 7 威远气田氦气富集模式(据文献 [19], 修改)

Fig.7 Schematic diagram showing the helium enrichment pattern in the Weiyuan gas field (modified after reference [19])

5.2 灯影组海相碳酸盐岩富氦气藏的氦气来源

筇竹寺组页岩作为灯影组富氦天然气藏的主要烃源岩，其生成的氦气在理论上应与页岩气一起排出并运移至灯影组聚集成藏(图 7)。前人研究表明，甲烷能抑制氦气在有机质孔和黏土矿物孔隙中的扩散，且甲烷含量越高，作用效果越强^[59-60]。筇竹寺组页岩气中存在大量甲烷，这会极大抑制氦气伴随烃类气从页岩中有效排出。虽然喜马拉雅运动时期强烈的挤压作用造成筇竹

寺组页岩形成一系列的断裂和微裂缝，并促进页岩中氦气的释放，使得排出的天然气中氦气体积分数超过 0.1%^[12]，但筇竹寺组页岩的贡献仍不足以支撑灯影组形成氦气体积分数高达 0.26% 的天然气藏(表 3)。

威远地区广泛发育的前震旦系古老花岗岩规模巨大，埋藏时间久，U、Th 含量高，具有极强的生氦能力，已被证实为优质的氦源岩^[61]。尽管其单位质量生氦强度略低于筇竹寺组页岩，但其宏观规模弥补了这一差距。

与页岩不同,花岗岩中U、Th主要赋存于锆石、独居石等重矿物^[54],这些矿物在长期辐照下产生晶格缺陷,其晶格缺陷促进了⁴He的持续释放。此外,基底花岗岩在构造活动中易于形成应力集中区,发育大型断裂系统,从而为氦气运移和深部地层水循环提供高效运移通道。

威远地区灯影组储层普遍含水,而基底花岗岩中释放的氦气早期通过断层运移至地层水中(图7),形成富氦的深层卤水^[62]。由于后期构造隆升导致储层压力下降,氦气从地层水中脱溶,并富集于灯影组气藏中^[12](图7)。因此,水溶气析出成藏模式最终形成了威远地区灯影组富氦天然气藏。

综上所述,筇竹寺组页岩虽具备极强的生氦能力,却因生烃稀释作用和氦气排出效率极低,导致其对灯影组富氦气藏的贡献有限。相比之下,规模发育的前震旦系基底花岗岩不仅具有较强的生氦能力,其高效的“溶解-脱溶”氦气运移模式,为灯影组气藏氦气(0.26%)富集提供了充足的物质保障,是威远地区灯影组富氦天然气藏的主力氦源岩。

6 结论

(1) 四川盆地威远气田寒武系筇竹寺组页岩中U、Th差异富集明显。U主要以分散吸附形式赋存于有机质、黏土矿物和菱铁矿等载体;而Th元素主要以类质同象形式存在于独居石、锆石等重矿物晶格中。强还原环境条件下,有机质络合和吸附、黏土矿物吸附、含磷矿物络合和含铁矿物还原和吸附作用是U富集的主要途径;Th主要受物源控制,伴随重矿物迁移沉积,极少以胶体或络合物形式被黏土矿物吸附。

(2) 筇竹寺组页岩生氦强度大,为 $2.41 \times 10^{-21} \text{ m}^3/(\text{kg} \cdot \text{a})$,高于基底花岗岩 [$1.82 \times 10^{-21} \text{ m}^3/(\text{kg} \cdot \text{a})$]。由于筇竹寺组页岩生烃强度大,强烈“稀释”作用使得页岩气中氦气平均体积分数仅为0.018%,难以形成富氦页岩气藏。筇竹寺组页岩排出的氦气不足以形成灯影组富氦天然气藏(0.26%)。威远地区基底花岗岩规模巨大,埋藏时间久,生氦能力强,是灯影组富氦气藏的主要氦源。因此,灯影组富氦气藏形成了以基底花岗岩为主、筇竹寺组页岩为辅的“双源”供氦模式。

符号注释:

[U]、[Th]为放射性元素U、Th的含量, $\mu\text{g/g}$; t 为岩石形成时间, a; M 为质量参数, kg; $t_{1/2}$ 为半衰期, a; P_{He} 为生氦强度, $\text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{a})$; V_{He} 为累积生氦量, m^3 。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References)

- [1] 陶士振, 吴义平, 陶小晚, 等. 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[J]. 地学前缘, 2024, 31(1): 351-367.
TAO Shizhen, WU Yiping, TAO Xiaowan, et al. Helium: Accumulation model, resource exploration and evaluation, and integrative evaluation of the entire industrial chain[J]. Earth Science Frontiers, 2024, 31(1): 351-367.
- [2] 李剑, 王晓波, 徐朱松, 等. 中国氦气资源成藏规律与开发前景[J]. 天然气地球科学, 2024, 35(5): 851-868.
LI Jian, WANG Xiaobo, XU Zhusong, et al. Helium resources accumulation regulations and their development prospects in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2024, 35(5): 851-868.
- [3] ANDERSON S T. Economics, helium, and the US federal helium reserve: Summary and outlook[J]. Natural Resources Research, 2018, 27(4): 455-477.
- [4] 周起忠, 闫卫东, 胡容波, 等. 全球氦气供需形势分析与展望[J]. 中国矿业, 2025, 34(2): 493-502.
ZHOU Qizhong, YAN Weidong, HU Rongbo, et al. Analysis and outlook of the global helium supply and demand situation[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(2): 493-502.
- [5] TAO Shizhen, YANG Yiqing, CHEN Yue, et al. Geological conditions, genetic mechanisms and accumulation patterns of helium resources[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(2): 498-518.
- [6] 王晓锋, 赵栋, 张东东, 等. 有效氦源岩类型及氦气释放机理[J]. 天然气地球科学, 2025, 36(3): 381-389.
WANG Xiaofeng, ZHAO Dong, ZHANG Dongdong, et al. Characteristics of effective helium source rocks and releasing mechanism of helium[J]. Natural Gas Geoscience, 2025, 36(3): 381-389.
- [7] 赵栋, 王晓锋, 刘文汇, 等. 壳源富氦天然气藏潜在氦源岩主要特征及有效性分析[J]. 天然气地球科学, 2024, 35(3): 507-517.
ZHAO Dong, WANG Xiaofeng, LIU Wenhui, et al. Main characteristics and effectiveness analysis of potential helium source rock in crustal source helium-rich gas reservoirs[J]. Natural Gas Geoscience, 2024, 35(3): 507-517.
- [8] 李云波, 王成涛, 宋党育, 等. 我国富氦盆地成藏模式对煤系氦气富集和勘探的启示[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(6): 22-47.
LI Yunbo, WANG Chengtao, SONG Dangyu, et al. Implications of helium accumulation models in helium-rich basins in China for the enrichment and exploration of helium in coal measures[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(6): 22-47.
- [9] MARTEL D J, O'NIONS R K, HILTON D R, et al. The role of element distribution in production and release of radiogenic helium: The Carnmenellis Granite, Southwest England[J]. Chemical Geology, 1990, 88(3/4): 207-221.
- [10] 何发岐, 王杰, 赵永强, 等. 鄂尔多斯盆地东胜富氦气田成藏特征及其大地构造背景[J]. 古地理学报, 2022, 24(5): 937-950.
HE Faqi, WANG Jie, ZHAO Yongqiang, et al. Accumulation characteristics of Dongsheng helium-rich gas field in Ordos Basin and its tectonic background[J]. Journal of Palaeogeography, 2022,

- 24(5): 937–950.
- [11] 高宇, 刘全有, 吴小奇, 等. 鄂尔多斯盆地东胜与大牛地气田壳源氦气成藏差异性[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(10): 1790–1800.
- GAO Yu, LIU Quanyou, WU Xiaoqi, et al. Research on the difference of crustal helium accumulation in Dongsheng and Daniudi gas fields, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(10): 1790–1800.
- [12] 刘凯旋, 陈践发, 付晓, 等. 威远气田富氦天然气分布规律及控制因素探讨[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(4): 12–21.
- LIU Kaixuan, CHEN Jianfa, FU Rao, et al. Discussion on distribution law and controlling factors of helium-rich natural gas in Weiyuan gas field[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2022, 46(4): 12–21.
- [13] 刘祥柏, 陶士振, 杨岱林, 等. 四川盆地大探 1 井富氦天然气勘探突破及成藏主控因素[J]. 地学前缘, 2025, 32(5): 258–277.
- LIU Xiangbai, TAO Shizhen, YANG Dailin, et al. Breakthrough in exploration of helium rich natural gas in Well Datan 1 of Sichuan Basin and main control factors for reservoir formation[J]. *Earth Science Frontiers*, 2025, 32(5): 258–277.
- [14] 朱俊阳, 伏美燕, 黄婷婷, 等. 川中古隆起氦气差异富集因素: 以威远气田和安岳气田灯影组为例[J]. 天然气地球科学, 2025, 36(11): 2017–2028.
- ZHU Junyang, FU Meiyan, HUANG Tingting, et al. Origin of differential enrichment of helium in paleouplift based on water-soluble helium calculations: A case study of Dengying Formation in Weiyuan and Anyue gas fields[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2025, 36(11): 2017–2028.
- [15] 陈耿荣, 李靖, 孙东, 等. 四川盆地安岳气田贫氦原因探究[J]. 地学前缘, 2025, 32(5): 278–289.
- CHEN Gengrong, LI Jing, SUN Dong, et al. Cause of helium-poor in Anyue gas field, Sichuan Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2025, 32(5): 278–289.
- [16] 刘祥柏, 陶士振, 杨秀春, 等. 鄂尔多斯盆地东缘煤系富氦资源的发现及其资源潜力与勘探开发对策[J]. 油气与新能源, 2024, 36(4): 38–48.
- LIU Xiangbai, TAO Shizhen, YANG Xiuchun, et al. Discovery of helium-rich resources in coal seams of the eastern margin of Ordos Basin and its resource potential as well as exploration & development strategies[J]. *Petroleum and New Energy*, 2024, 36(4): 38–48.
- [17] 张宝收, 张本健, 汪华, 等. 四川盆地金秋气田: 一个典型以中生界沉积岩为氦源岩的含氦-富氦气田[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 185–199.
- ZHANG Baoshou, ZHANG Benjian, WANG Hua, et al. The Jinqiu gas field in the Sichuan Basin: A typical helium-bearing to helium-rich gas field with the Mesozoic sedimentary rocks as helium source rocks[J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(1): 185–199.
- [18] 何发岐, 王付斌, 王杰, 等. 鄂尔多斯盆地东胜气田氦气分布规律及特大型富氦气田的发现[J]. 石油实验地质, 2022, 44(1): 1–10.
- HE Faqi, WANG Fubin, WANG Jie, et al. Helium distribution of Dongsheng gas field in Ordos Basin and discovery of a super large helium-rich gas field[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2022, 44(1): 1–10.
- [19] 秦胜飞, 窦立荣, 陶刚, 等. 氦气富集理论及富氦资源勘探思路[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(5): 1160–1174.
- QIN Shengfei, DOU Lirong, TAO Gang, et al. Helium enrichment theory and exploration ideas for helium-rich gas reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(5): 1160–1174.
- [20] 吴冬, 邓虎成, 熊亮, 等. 四川盆地及其周缘下寒武统麦地坪组-筇竹寺组层序充填和演化模式[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 764–777.
- WU Dong, DENG Hucheng, XIONG Liang, et al. Sequence filling and evolutionary model of the Lower Cambrian Maidiping-Qiongzhusi Formations in Sichuan Basin and on its periphery[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(3): 764–777.
- [21] 杨雨然, 石学文, 李彦佑, 等. 四川盆地德阳-安岳裂陷槽筇竹寺组古地貌、沉积模式与勘探方向[J]. 中国石油勘探, 2024, 29(6): 67–81.
- YANG Yuran, SHI Xuewen, LI Yanyou, et al. Paleogeomorphology, sedimentary pattern and exploration orientation of Qiongzhusi Formation in Deyang-Anyue rift trough, Sichuan Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2024, 29(6): 67–81.
- [22] 雍锐, 石学文, 罗超, 等. 四川盆地寒武系筇竹寺组页岩气“槽-隆”富集规律及勘探前景[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(6): 1211–1226.
- YONG Rui, SHI Xuewen, LUO Chao, et al. Aulacogen-uplift enrichment pattern and exploration prospect of Cambrian Qiongzhusi Formation shale gas in Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(6): 1211–1226.
- [23] 刘树根, 孙玮, 罗志立, 等. 兴凯地裂运动与四川盆地地下组合油气勘探[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2013, 40(5): 511–520.
- LIU Shugen, SUN Wei, LUO Zhili, et al. Xingkai taphrogenesis and petroleum exploration from Upper Sinian to Cambrian Strata in Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2013, 40(5): 511–520.
- [24] 杨一茗, 石学文, 刘文平, 等. 四川盆地德阳-安岳裂陷槽中段筇竹寺组沉积演化模式与有利相带优选[J]. 天然气地球科学, 2024, 35(12): 2106–2120.
- YANG Yiming, SHI Xuewen, LIU Wenping, et al. Sedimentary evolution model and favorable facies belt selection of the Qiongzhusi Formation in the middle section of the Deyang-Anyue rift in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024, 35(12): 2106–2120.
- [25] 雍锐, 吴建发, 吴伟, 等. 四川盆地寒武系筇竹寺组页岩气勘探发现及其意义[J]. 石油学报, 2024, 45(9): 1309–1323.
- YONG Rui, WU Jianfa, WU Wei, et al. Exploration discovery of shale gas in the Cambrian Qiongzhusi Formation of Sichuan Basin and its significance[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(9): 1309–1323.
- [26] 谷志东, 翟秀芬, 袁苗. 四川盆地基底花岗岩锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及其构造环境[J]. 地质学报, 2015, 89(增刊 1): 296.

- [27] 张健, 杨威, 易海永, 等. 四川盆地前震旦系勘探高含氦天然气的可行性[J]. 天然气工业, 2015, 35(1): 45–52.
ZHANG Jian, YANG Wei, YI Haiyong, et al. Feasibility of high-helium natural gas exploration in the Presinian strata of the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(1): 45–52.
- [28] 郭旭升, 李宇平, 刘若冰, 等. 四川盆地焦石坝地区龙马溪组页岩微观孔隙结构特征及其控制因素[J]. 天然气工业, 2014, 34(6): 9–16.
GUO Xusheng, LI Yuping, LIU Ruobing, et al. Characteristics and controlling factors of micro-pore structures of Longmaxi shale play in the Jiaoshiba area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6): 9–16.
- [29] 李剑, 王晓波, 侯连华, 等. 四川盆地页岩气地球化学特征及资源潜力[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(8): 1093–1106.
LI Jian, WANG Xiaobo, HOU Lianhua, et al. Geochemical characteristics and resource potential of shale gas in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(8): 1093–1106.
- [30] 郭彤楼, 张汉荣. 四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 28–36.
GUO Tonglou, ZHANG Hanrong. Formation and enrichment mode of Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(1): 28–36.
- [31] 董大忠, 高世葵, 黄金亮, 等. 论四川盆地页岩气资源勘探开发前景[J]. 天然气工业, 2014, 34(12): 1–15.
DONG Dazhong, GAO Shikui, HUANG Jinliang, et al. A discussion on the shale gas exploration & development prospect in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(12): 1–15.
- [32] 邹才能, 赵群, 丛连铸, 等. 中国页岩气开发进展、潜力及前景[J]. 天然气工业, 2021, 41(1): 1–14.
ZOU Caineng, ZHAO Qun, CONG Lianzhu, et al. Development progress, potential and prospect of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1): 1–14.
- [33] DARGENT M, TRUCHE L, DUBESSY J, et al. Reduction kinetics of aqueous U (VI) in acidic chloride brines to uraninite by methane, hydrogen or C-graphite under hydrothermal conditions: Implications for the genesis of unconformity-related uranium ore deposits[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2015, 167: 11–26.
- [34] 陈金勇, 范洪海, 孟艳宁, 等. 钍的地球化学性质与资源分布概述[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2022, 36(1): 52–57.
CHEN Jinyong, FAN Honghai, MENG Yanning, et al. Geochemical properties and resource distribution of thorium[J]. Journal of University of South China (Science and Technology), 2022, 36(1): 52–57.
- [35] 王大钊, 冷成彪, 秦朝建, 等. 钍的地球化学性质与成矿作用[J]. 大地构造与成矿学, 2022, 46(2): 282–302.
WANG Dazhao, LENG Chengbiao, QIN Chaojian, et al. Geochemical characteristics and mineralization of uranium[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2022, 46(2): 282–302.
- [36] 张天怡, 黄土鹏, 李贤庆, 等. 四川盆地寒武统筇竹寺组沉积地球化学特征与有机质富集机制[J]. 天然气地球科学, 2024, 35(4): 688–703.
ZHANG Tianyi, HUANG Shipeng, LI Xianqing, et al. Sedimentary geochemical characteristics and organic matter enrichment of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024, 35(4): 688–703.
- [37] 王淑芳, 董大忠, 王玉满, 等. 四川盆地南部志留系龙马溪组富有机质页岩沉积环境的元素地球化学判别指标[J]. 海相油气地质, 2014, 19(3): 27–34.
WANG Shufang, DONG Dazhong, WANG Yuman, et al. Geochemistry evaluation index of redox-sensitive elements for depositional environments of Silurian Longmaxi organic-rich shale in the south of Sichuan Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2014, 19(3): 27–34.
- [38] JONES B, MANNING D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. *Chemical Geology*, 1994, 111(1/2/3/4): 111–129.
- [39] 李延河, 段超, 赵悦, 等. 氧化还原障在热液铀矿成矿中的作用[J]. 地质学报, 2016, 90(2): 201–218.
LI Yanhe, DUAN Chao, ZHAO Yue, et al. The role of oxidizing reducing barrier in mineralization of hydrothermal uranium ore[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(2): 201–218.
- [40] SUZUKI Y, KELLY S D, KEMNER K M, et al. Nanometre-size products of uranium bioreduction[J]. *Nature*, 2002, 419(6903): 134.
- [41] 李茜, 朱光有, 李婷婷, 等. U 同位素分馏行为及其在环境地球科学中的应用研究进展[J]. 地学前缘, 2024, 31(2): 447–471.
LI Xi, ZHU Guangyou, LI Tingting, et al. Uranium isotope fractionation and application of uranium isotopes in environmental geosciences: A review[J]. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31(2): 447–471.
- [42] 朱紫光, 朱光有, 李茜. U 元素在黑色页岩中的富集机理及其对有机质生油气性能的影响[J]. 地学前缘, 2025, 32(2): 290–310.
ZHU Ziguang, ZHU Guangyou, LI Xi. The enrichment mechanism of U element in black shale and its significant influence on the performance of organic matter oil and gas production[J]. *Earth Science Frontiers*, 2025, 32(2): 290–310.
- [43] 蔡春芳, 李宏涛, 李开开, 等. 油气厌氧氧化与铀还原的耦合关系: 以东胜和钱家店铀矿床为例[J]. 石油实验地质, 2008, 30(5): 518–521.
CAI Chunfang, LI Hongtao, LI Kaikai, et al. Anaerobic oxidation of petroleum coupled with reduction of uranium mineralization: Cases from Dongsheng and Qianjiadian uranium deposits[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2008, 30(5): 518–521.
- [44] LENHART J J, CABANISS S E, MACCARTHY P, et al. Uranium (VI) complexation with citric, humic and fulvic acids[J]. *Radiochimica Acta*, 2000, 88(6): 345–353.
- [45] TINNACHER R M, NICO P S, DAVIS J A, et al. Effects of fulvic acid on uranium (VI) sorption kinetics[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(12): 6214–6222.
- [46] BACHMAF S, MERKEL B J. Sorption of uranium (VI) at the clay mineral-water interface[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 63(5): 925–934.
- [47] GRABIAS E, GŁADYSZ-PLASKA A, KSIĄŻEK A, et al. Efficient uranium immobilization on red clay with phosphates[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2014, 12(2): 297–301.
- [48] SINGH A, ULRICH K U, GIAMMAR D E. Impact of phosphate on U (VI) immobilization in the presence of goethite[J]. *Geochim-*

- ica et Cosmochimica Acta, 2010, 74(22): 6324–6343.
- [49] 张字龙, 贺锋, 于阿朋, 等. 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿床中铀矿物赋存空间微观分析[J]. 矿物学报, 2022, 42(6): 815–824.
ZHANG Zilong, HE Feng, YU Apeng, et al. Microanalysis of the occurrence spaces of uranium minerals in sandstone-type uranium deposits in the Ordos Basin[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2022, 42(6): 815–824.
- [50] BALLENTINE C J, BURNARD P G. Production, release and transport of noble gases in the continental crust[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2002, 47(1): 481–538.
- [51] 周杨, 金思丁, 刘岩, 等. 川西南下寒武统筇竹寺组页岩旋回地层层学研究[J]. 沉积学报, 2024, 42(1): 142–157.
ZHOU Yang, JIN Siding, LIU Yan, et al. Cyclostratigraphy research on well-logging of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in southwestern Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2024, 42(1): 142–157.
- [52] 陈燕燕, 温志新, 陶士振, 等. 页岩气和煤层气中氦气富集机理与资源潜力: 以川南页岩气和鄂东缘煤层气为例[J]. 地学前缘, 2025, 32(5): 244–257.
CHEN Yanyan, WEN Zhixin, TAO Shizhen, et al. Enrichment mechanism and resource potential of helium in shale gas and coalbed methane plays: A case study of shale gas in southern Sichuan Basin and coalbed methane in eastern Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2025, 32(5): 244–257.
- [53] BROWN A A. ^{PS}Formation of high helium gases: A guide for explorationists[C]//AAPG Convention. New Orleans: AAPG, 2010: 23–37.
- [54] 蒙炳坤, 周世新, 李靖, 等. 上扬子地区不同类型岩石生氦潜力评价及泥页岩氦气开采条件理论计算[J]. 矿物岩石, 2021, 41(4): 102–113.
MENG Bingkun, ZHOU Shixin, LI Jing, et al. Helium potential evaluation of different types of rocks in the Upper Yangtze region and theoretical calculation of helium recovery conditions for shale in Upper Yangtze region[J]. Mineralogy and Petrology, 2021, 41(4): 102–113.
- [55] 秦胜飞, 李济远, 王佳美, 等. 中国含油气盆地富氦天然气藏氦气富集模式[J]. 天然气工业, 2022, 42(7): 125–134.
QIN Shengfei, LI Jiyuan, WANG Jiamei, et al. Helium enrichment model of helium-rich gas reservoirs in petroliferous basins in China[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(7): 125–134.
- [56] 秦胜飞, 李济远, 梁传国, 等. 中国中西部富氦气藏氦气富集机理: 古老地层水脱氮富集[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(8): 1203–1217.
QIN Shengfei, LI Jiyuan, LIANG Chuanguo, et al. Helium enrichment mechanism of helium rich gas reservoirs in Central and Western China: Degassing and accumulation from old formation water[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(8): 1203–1217.
- [57] 陈新军, 陈刚, 边瑞康, 等. 四川盆地涪陵页岩气田氦气资源潜力与成因机理[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(3): 469–476.
CHEN Xinjun, CHEN Gang, BIAN Ruikang, et al. The helium resource potential and genesis mechanism in Fuling shale gas field, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(3): 469–476.
- [58] 聂海宽, 刘全有, 党伟, 等. 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[J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(6): 1285–1294.
NIE Haikuan, LIU Quanyou, DANG Wei, et al. Enrichment mechanism and resource potential of shale-type helium: A case study of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Sichuan Basin[J]. Science China: Earth Sciences, 2023, 53(6): 1285–1294.
- [59] 彭明云, 黄亮, 李瑞媛, 等. 干酪根纳米孔隙中氦气赋存机理和扩散特征[J]. 天然气地球科学, 2026, 37(1): 152–162.
PENG Mingyun, HUANG Liang, LI Ruiyuan, et al. Helium occurrence mechanisms and diffusion features in kerogen nanopores[J]. Natural Gas Geoscience, 2026, 37(1): 152–162.
- [60] 宋丹丹, 关平, 任嘉豪, 等. 含氦气藏盖层孔喉密封性分子模拟[J]. 天然气地球科学, 2025, 36(12): 2354–2370.
SONG Dandan, GUAN Ping, REN Jiahao, et al. Molecular simulation study on the sealing effect of caprock pore throats on helium[J]. Natural Gas Geoscience, 2025, 36(12): 2354–2370.
- [61] 秦胜飞, 周国晓, 李济远, 等. 氦气与氮气富集耦合作用及其重要意义[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(11): 1981–1992.
QIN Shengfei, ZHOU Guoxiao, LI Jiyuan, et al. The coupling effect of helium and nitrogen enrichment and its significance[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(11): 1981–1992.
- [62] 秦胜飞, 周国晓, 李伟, 等. 四川盆地威远气田水溶气脱气成藏地球化学证据[J]. 天然气工业, 2016, 36(1): 43–51.
QIN Shengfei, ZHOU Guoxiao, LI Wei, et al. Geochemical evidence of water-soluble gas accumulation in the Weiyuan gas field, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(1): 43–51.

(责任编辑 范章群)