

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.278>

Short Survey



中上扬子海相深层页岩气赋存和富集的关键因素是什么？

杨锐, 何治亮, 董田, 侯宇光, 郭小文, 韩元佳, 王芙蓉

中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

我国中上扬子地区海相页岩气资源量巨大, 目前已成功实现中浅层(主体埋深 $<3\,500\text{ m}$)页岩气的规模效益开发(金之钧等, 2016; 马永生等, 2020). 随着中浅层页岩气勘探开发程度的不断提高, 针对这类页岩气田的勘探难度越来越大, 促使页岩气的勘探和开发逐渐向深层(埋深介于 $3\,500\sim 4\,500\text{ m}$)、甚至超深层(埋深 $>4\,500\text{ m}$)的战略转移(马永生等, 2020). 四川盆地及周缘深层富有机质页岩厚度大, 其分布面积是中浅层页岩的 2 倍以上, 仅埋深介于 $3\,500\sim 6\,000\text{ m}$ 的页岩气资源占总资源量的 70% 以上, 展示了深层页岩气良好的资源潜力与勘探前景(何治亮等, 2020; 张金川等, 2021; 聂海宽等, 2022). 可喜的是, 我国近几年在川南威远—泸州、丁山—东溪、荣昌—永川等地部署的多口深层页岩气井已获得工业气流, 实现了深层页岩气勘探开发的战略性突破, 深层页岩气成为我国重要的增储上产领域(郭旭升等, 2020; 马新华等, 2020; 魏祥峰等, 2020; 卢志远等, 2021; 郭彤楼等, 2022). 随着勘探实践的不断深入, 普遍认识到深层页岩具备页岩气富集高产的基本地质条件(郭旭升等, 2020; 卢志远等, 2021; 聂海宽等, 2022), 但是深层页岩埋深更大, 不同深层页岩气井的天然气产出行为和产气量常有较大差异, 甚至存在部分

井产量低且递减很快的问题, 造成部分钻井开发效果不理想. 深层页岩气赋存、富集乃至高产规律均较中浅层更加复杂, 成为制约中上扬子深层页岩气有效勘探与高效开发的瓶颈和难题之一(马永生等, 2020), 是深层页岩气富集规律研究的基础性和前瞻性科学问题, 具有重要的理论和实践意义.

1 核心内容

1.1 深层页岩气赋存特征与控制因素

页岩气属于典型的“自生自储”系统, 其中的天然气主要以游离态储存在页岩基质孔隙—裂缝空间中, 或以吸附态形式赋存在有机质颗粒和黏土矿物表面, 以及少量以溶解态存在于有机质颗粒或残留水中(Curtis, 2002). 针对海相页岩气赋存特征及其主控因素, 前人在中浅层页岩气藏已开展了诸多研究, 取得了重要认识. 研究表明, 页岩气的赋存特征受多种地质因素影响, 如地层埋藏深度(邱楠生等, 2020)、温压条件(邱楠生等, 2020)、有机碳含量(张风昀等, 2017)、干酪根类型(Zhang *et al.*, 2012; Gasparik *et al.*, 2014)、孔隙结构(Yang *et al.*, 2016; Dong *et al.*, 2017)、含水饱和度(Gasparik *et al.*, 2014; 高海涛等, 2025)、顶底板条件(崔哲等, 2020)、构造运动(抬升剥蚀、断裂特征、构

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 42172157; 92255302); 武汉市黄鹤英才青年人才计划.

作者简介: 杨锐(1987—), 男, 博士(后), 教授、博士生导师, 主要从事非常规页岩油气地质相关的科研与教学工作. ORCID: 0000-0002-7864-1727. E-mail: yangyingrui@cug.edu.cn

引用格式: 杨锐, 何治亮, 董田, 侯宇光, 郭小文, 韩元佳, 王芙蓉, 2025. 中上扬子海相深层页岩气赋存和富集的关键因素是什么? 地球科学, 50(12): 5012—5019.

Citation: Yang Rui, He Zhiliang, Dong Tian, Hou Yuguang, Guo Xiaowen, Han Yuanjia, Wang Furong, 2025. What are the Key Factors Controlling the Occurrence and Enrichment of Deep Marine Shale Gas in the Middle–Upper Yangtze Region? *Earth Science*, 50(12): 5012—5019.

造样式与构造改造时间、期次、幅度)(张旭亮等, 2023)等.不同盆地或层系页岩气赋存特征因地质因素多样而呈现差异,如北美典型页岩气藏的吸附气占总含气量的变化范围跨度大(20%~85%)(Curtis, 2002; Jarvie *et al.*, 2007; Hao *et al.*, 2013),我国首个商业化开发的涪陵页岩气田游离气和吸附气占比分别为 57% 和 43%(刘若冰, 2015).因此,针对特定地区研究时,需厘清该地区页岩气赋存关键控制因素.以川东南丁山—东溪地区龙马溪组深层页岩气藏为例,不同地区的主力产气层段页岩在部分地质特征(埋藏深度、地化特征、厚度等)差异不显著,该地区深层页岩气赋存差异主要与页岩气储层的赋存空间大小、含水饱和度高低、断裂发育程度以及构造样式等密切相关.可见,影响中上扬子地区深层页岩气赋存关键在于储集性、孔隙流体性质以及保存特征.

1.2 深层页岩气藏富集的控制因素

与中浅层页岩气藏相比,深层页岩气藏除埋深更大外,还普遍存在页岩地层致密化程度更强、地层温度—压力更高、地层应力差异更大以及有机质石墨化更显著等特征,这决定了深层页岩气富集规律的复杂性.前人针对中浅层页岩气藏的研究,认识到页岩气富集的复杂性和多机理递变特点,提出了包括页岩气“二元富集”理论(郭旭升, 2014)、页岩气“构造型甜点”和“连续型甜点区”富集模式(邹才能等, 2015)、“建造—改造”评价思路(何治亮等, 2017)以及“源盖控藏”的页岩气富集规律(聂海宽等, 2016; 聂海宽等, 2024).与中浅层页岩气藏相比,深层页岩气储层的吸附载体类型多样和气体赋存空间多尺度特性更复杂,导致深层页岩气富集关键因素不清(何治亮等, 2020; 马永生等, 2020; 魏祥峰等, 2020; 卢志远等, 2021).从页岩气生成和富集全过程看,其赋存特征与富集程度受天然气生成、聚集与逸散多过程的综合影响,现今页岩的含气量是页岩气生成—滞留—散失动态平衡的结果.借鉴常规油气的评价思路,页岩气成藏富集可简化为“生、储、运和保”.“生”是指天然气的生成过程,为页岩气富集提供了物质基础;“储”涉及优质页岩的成储机制和页岩气在微纳米孔缝中的储集和赋存机制;“运”指页岩气在页岩层系内部的初次运移(短距离或不运移),控制了页岩气聚集和分布;“保”指页岩气的封闭保存机理(包括宏观的区域盖层和岩性封闭以及微观的水力封闭和自封闭等).在

有足够天然气生成的页岩层系,影响页岩含气量和富集程度的地质因素可分为外部因素(埋藏深度、温压条件、水文地质条件、保存条件(区域盖层、顶部岩性、构造背景与断裂发育程度))和内部因素(页岩有机碳含量、成熟度、矿物组成与结构、孔隙结构、天然裂缝发育程度以及页岩含水饱和度).研究表明,中上扬子中浅层和深层页岩气储层均具有良好的生烃物质基础和储集性,但富集程度差异较大,主要与天然气生成后的运移、逸散、保存条件以及各要素的时空匹配关系密切相关(魏祥峰等, 2020; 刘树根等, 2021; 聂海宽等, 2022; Luo *et al.*, 2024b).

1.3 保存条件和气体运移与深层页岩气富集的关系

燕山期以来的差异构造隆升和剥蚀量恢复结果表明(魏祥峰等, 2017; 何治亮等, 2020; 邱楠生等, 2020),中上扬子地区海相中浅层和深层页岩层系最大古埋深差别不大,均经历了页岩地层的埋藏—受热—生烃—抬升—改造过程(即埋藏阶段的生—储演化和抬升阶段的赋—保演化序列).以四川盆地南部、东南部典型地区龙马溪组深层页岩气藏为例(图 1),现今页岩地层的埋深差异主要受控于后期构造抬升幅度,特别是中晚燕山以来的多期次差异构造隆升过程影响,形成不同埋深的富有机质页岩层系.在燕山—喜山期差异构造隆升—剥蚀作用下,不同地区海相深层页岩的降温、降压速率和页岩气的散失过程差异明显,导致页岩气储层微裂缝开启、储集空间变化和含气量变化,最终控制了海相深层页岩气的富集甜点层段和有利区分布(解习农等, 2017; 邱楠生等, 2020; Luo *et al.*, 2024b).

早期研究认为,页岩气属于“自生、自储、自封闭”,仅认为气体发生了短距离运移或无运移.但大量勘探实践发现,天然气在页岩层系内存在显著的差异聚集(马永生等, 2020; 邱楠生等, 2020; 卢志远等, 2021).页岩气运移与常规油气运移形式差异明显,是多尺度孔缝系统内多种运移形式的耦合叠加,包括吸附表面扩散、克努森扩散、菲克扩散、滑脱渗流以及达西流等(姚军等, 2013).目前针对页岩气运移研究主要采用天然气地球化学指标及其同位素示踪和数值模拟方法(有限元法、离散元法、格子玻尔兹曼法等).天然气中 CH_4 含量随运移距离增加而增加,是有效的气体运移示踪指标(王鹏等,

2015). 另外, 致密页岩储层强吸附能力导致天然气扩散和吸附/解吸过程会发生同位素分馏, 通过同位素分馏模型可定量模拟页岩气运移过程(李文鏢等, 2020). 基于流体动力学方法模拟也显示, 气体总是沿着物性优势通道运移, 顺层面方向上压力梯度越大, 气体运移能力越强, 导致低部位气藏对高部位有侧向运移补给, 例如长宁和焦石坝页岩气藏(王国臻等, 2024). 缪欢等(2024)发现页岩气藏流体势场指示运移方向与气体组分指示方向一致, 说明滞留页岩中的天然气在层系内部(以侧向运移为主)发生明显的运移, 控制了页岩气差异富集. 可见, 控制深层页岩气富集的关键在于“运和保”特征.

1.4 页岩生烃—成储—运移—散失的时空匹配关系与页岩气富集关系

对比中上扬子地区中浅层和深层页岩气富集规律, 两者既有相似又有差异性. 以四川盆地东南部(图 1)和涪陵焦石坝主产区为例(魏祥峰等, 2017; 何治亮等, 2020; 邱楠生等, 2020), 在地层埋藏生—储演化阶段, 中浅层和深层页岩均在中—晚志留世快速沉降, 原生孔隙(碎屑粒间孔隙和黏土矿物粒间孔隙)受上覆地层压实作用快速降低, 在泥盆纪—石炭纪小幅度抬升时处于较浅的埋深状态, 从早泥盆世进入生烃门限后到二叠纪末处于低成熟阶段, 随着地层温度和压力缓慢增加, 发生碳酸盐胶结(方解石为主)、硅质胶结和重结晶作用(生物硅经历了蛋白石 A、蛋白石 CT 和微晶石英三大相态), 形成微晶石英晶间孔隙. 晚二叠世—早三叠世, 地层沉降速率增大、埋深增加, 页岩热演化程度增强, 早三叠世达到生油高峰, 有机质生烃和黏土矿物转化产生的流体与地层中不稳定矿物发生溶蚀作用, 形成溶蚀孔隙改善页岩的储集空间, 同时在生排烃过程有机质开始发育纳米级有机质孔隙. 中—晚侏罗世, 均迅速进入生干气阶段, 有机孔成为页岩主要孔隙类型, 大量气体生成使地层压力快速增加. 中白垩世, 地层埋深大、温度和压力达到峰值, 页岩地层可见多期裂缝脉体, 含气量达到最大(图 1). 燕山期以来, 受多期次差异构造隆升和剥蚀影响, 龙马溪组中浅层和深层页岩均经历了“快—慢—快”三阶段差异降温 and 降压过程. 涪陵地区中浅层页岩的抬升时间稍晚(约 85 Ma)、剥蚀厚度更大(3 500~4 000 m), 而丁山—东溪地区深部地层抬升时间相当或更早(约 100 Ma)、剥蚀厚度相对较小(3 000~3 500 m). 抬升过程中, 地层温度和压

力降低使不同级别裂缝重新开启, 导致页岩总含气量和游离气含量降低. 平面上, 不同地区由于抬升时间、期次、速率和幅度差异, 以及温度、压力、应力等条件的变化, 导致中浅层和深层页岩构造变形强度、物性变化以及微裂缝的形成、开启程度不同, 表现出页岩气差异散失和富集特征. 可见, 除了“运和保”特征会控制深层页岩气富集的关键以外, 页岩生烃—成储—运移—散失的时空匹配关系也对深层页岩气的差异富集产生重要影响.

为此, 针对我国中上扬子地区深层页岩气赋存与富集规律研究, 需要重点攻关以下几个方面: (1) 深层页岩生排烃机理研究, 页岩的生排烃量和滞烃量与页岩自身品质(成烃生物类型、数量、热演化程度)和排烃效率密切相关, 控制了深层页岩的生烃潜力, 是深层页岩气能否富集的先决条件. (2) 深层页岩成储机理研究, 深层页岩普遍经历了深埋、复杂成岩演化和改造过程, 在有机—无机相互作用下不同类型孔隙的形成、演化与有效保存是影响页岩气赋存空间和富集程度的关键因素. (3) 页岩气运移机理和渗流规律研究, 重点关注深层页岩气运移动力(特别是异常高压和浓度梯度)、相态(包括水溶相、游离相等)、方式(包括短距离的置换式运移和活塞式推进等)和通道(多尺度的孔缝系统), 页岩气的运移行为与页岩热演化阶段以及生排烃阶段的孔隙流体类型密切相关, 需要进行综合分析. 此外, 深层页岩的高温高压高应力背景决定了在当前实验室条件下无法实现真实地质条件下的气体吸附和渗流特征刻画, 今后还需要攻关与实际地质条件更接近的页岩气吸附—解吸和多尺度渗流运移规律的研究手段与技术. (4) 页岩气赋存机理, 页岩气的赋存形式主要包括游离气和吸附气, 其中游离气主要与孔隙度、孔径、地层压力以及天然微裂缝发育程度有关, 而影响页岩吸附气含量的因素较多, 包括有机质含量、热演化程度、矿物类型与组成、孔隙结构、岩石润湿性、温压条件以及含水饱和度等, 需要建立多地质因素协同控制的页岩气赋存地质模型, 为页岩气赋存动态演化和定量评价提供依据. (5) 页岩气保存与散失机理, 中上扬子海相深层页岩气藏普遍经历了多期次的抬升改造, 深层页岩构造变形、物性变化以及微裂缝的形成, 造成储层压力逐渐下降, 对页岩气的散失和保存产生重要影响, 因此需要重点关注页岩自身封堵性条件(顶底板、厚度)、构造作用(抬升剥蚀、断裂特征、构造

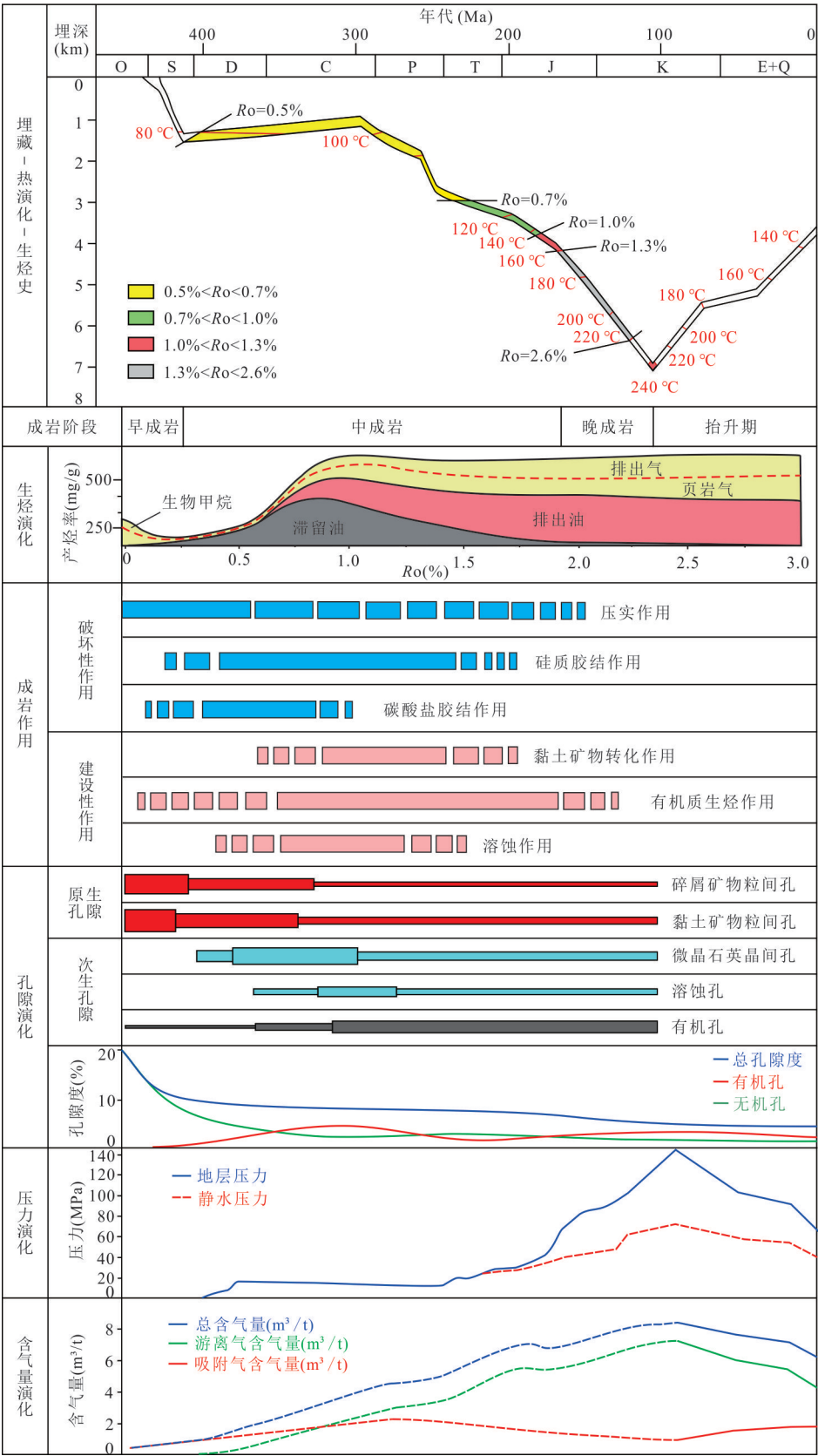


图1 页岩埋藏—生烃—成岩—成储演化与压力和含气量恢复:以川东南典型地区龙马溪组深层页岩气为例

Fig.1 Evolution of shale burial-hydrocarbon generation-diagenesis-reservoir formation and restoration of pressure and gas content: Taking deep shale gas from the Longmaxi Formation in a typical area of Southeast Sichuan as an example

样式与构造改造时间)以及微观自封闭能力(束缚水封闭、毛细管压力封闭等)。(6)深层页岩生烃—成储—运移—散失的时空匹配关系,页岩气富集除了需具备良好的成藏静态地质要素以外,同时也应关注深层页岩气的主生烃期、储层形成演化过程以及构造演化过程中的页岩气保存与散失过程,良好的时空匹配决定了页岩气的富集程度,特别是构造抬升—降温阶段页岩温度场—压力场—流体场演变下的页岩气赋存状态转换与含气量动态演化过程。

2 科学价值

为了尽早实现深层页岩气的革命性发展,深入开展深层页岩气赋存与富集规律研究,主要具有两个方面的科学价值:(1)有利于揭示深层页岩生烃—成岩—成储—赋存机制,特别是阐明构造抬升改造对深层页岩的储集性、赋存状态、保存条件以及含气性的控制作用,建立深层页岩气保存模式,有利于准确估算深层页岩的现今含气量,指导有利区的评价与优选。(2)有利于明确深层页岩埋藏—受热—生烃—抬升—改造全过程与时空匹配关系,为揭示我国南方复杂构造背景下海相深层页岩气差异富集规律提供理论指导,推动非常规页岩气富集机理与地质评价理论的完善和发展,具有重要的科学意义。

3 应用前景

中上扬子地区深层页岩气资源潜力大,发展前景广阔,是未来页岩气勘探开发的重点领域。查明深层页岩气的赋存与富集规律将直接指导我国南方地区海相深层页岩气甜点区和甜点层段的评价与优选,减少部井的盲目性,降低勘探风险与成本,有效指导我国深层乃至超深层页岩气的勘探开发,推动尽早实现深层页岩气规模化发展,直接服务国家能源安全与经济社会发展,因此具有极其广阔的发展空间和应用前景。

References

Cui, Z., Yang, W., Wang, Q. Y., et al., 2020. Sealing Property of Roof and Floor of Wufeng Formation—Longmaxi Formation and Its Influence on Shale Gas Differential Enrichment in Sichuan Basin and Its Surrounding Areas. *Marine Origin Petroleum Geology*, 25(3): 243—252 (in Chinese with English abstract).

Curtis, J. B., 2002. Fractured Shale-Gas Systems. *AAPG Bulletin*, 86(11): 1921—1938. <https://doi.org/10.1306/61eeddbe-173e-11d7-8645000102c1865d>

Dong, T., Harris, N. B., Ayranci, K., et al., 2017. The Impact of Composition on Pore Throat Size and Permeability in High Maturity Shales: Middle and Upper Devonian Horn River Group, Northeastern British Columbia, Canada. *Marine and Petroleum Geology*, 81: 220—236. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.01.011>

Gao, H. T., Cheng, P., Wu, W., et al., 2025. Influences of Pore Water on Shale Nanopore Structures and Their Geological Significance for Deep Shales in the Southern Sichuan Basin. *Geochimica*, 54(2): 234—247 (in Chinese with English abstract).

Gasparik, M., Bertier, P., Gensterblum, Y., et al., 2014. Geological Controls on the Methane Storage Capacity in Organic-Rich Shales. *International Journal of Coal Geology*, 123: 34—51. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2013.06.010>

Guo, T. L., Xiong, L., Lei, W., et al., 2022. Deep Shale Gas Exploration and Development in the Weirong and Yongchuan Areas, South Sichuan Basin: Progress, Challenges and Prospect. *Natural Gas Industry*, 42(8): 45—59 (in Chinese with English abstract).

Guo, X. S., 2014. Rules of Two-Factor Enrichment for Marine Shale Gas in Southern China—Understanding from the Longmaxi Formation Shale Gas in Sichuan Basin and Its Surrounding Area. *Acta Geologica Sinica*, 88(7): 1209—1218 (in Chinese with English abstract).

Guo, X. S., Hu, D. F., Duan, J. B., 2020. Marine Petroleum Exploration in South China. *Petroleum Geology & Experiment*, 42(5): 675—686 (in Chinese with English abstract).

Hao, F., Zou, H. Y., Lu, Y. C., 2013. Mechanisms of Shale Gas Storage: Implications for Shale Gas Exploration in China. *AAPG Bulletin*, 97(8): 1325—1346. <https://doi.org/10.1306/02141312091>

He, Z. L., Hu, Z. Q., Nie, H. K., et al., 2017. Characterization of Shale Gas Enrichment in the Wufeng—Longmaxi Formation in the Sichuan Basin and Its Evaluation of Geological Construction—Transformation Evolution Sequence. *Natural Gas Geoscience*, 28(5): 724—733 (in Chinese with English abstract).

He, Z. L., Nie, H. K., Hu, D. F., et al., 2020. Geological Problems in the Effective Development of Deep Shale Gas: A Case Study of Upper Ordovician Wufeng—Lower Silurian Longmaxi Formations in Sichuan Basin and Its Periphery. *Acta Petrolei Sinica*, 41(4): 379—391 (in

- Chinese with English abstract).
- Jarvie, D. M., Hill, R. J., Ruble, T. E., et al., 2007. Unconventional Shale-Gas Systems: The Mississippian Barnett Shale of North-Central Texas as One Model for Thermogenic Shale-Gas Assessment. *AAPG Bulletin*, 91(4): 475–499. <https://doi.org/10.1306/12190606068>
- Jin, Z. J., Hu, Z. Q., Gao, B., et al., 2016. Controlling Factors on the Enrichment and High Productivity of Shale Gas in the Wufeng-Longmaxi Formations, Southeastern Sichuan Basin. *Earth Science Frontiers*, 23(1): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. B., Lu, S. F., Li, J. Q., et al., 2020. Carbon Isotope Fractionation during Shale Gas Transport: Mechanism, Characterization and Significance. *Scientia Sinica Terrae*, 50(4): 553–569 (in Chinese).
- Liu, R. B., 2015. Typical Features of the First Giant Shale Gas Field in China. *Natural Gas Geoscience*, 26(8): 1488–1498 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. G., Jiao, K., Zhang, J. C., et al., 2021. Research Progress on the Pore Characteristics of Deep Shale Gas Reservoirs: An Example from the Lower Paleozoic Marine Shale in the Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 41(1): 29–41 (in Chinese with English abstract).
- Lu, Z. Y., He, Z. L., Yu, C., et al., 2021. Characteristics of Shale Gas Enrichment in Tectonically Complex Regions: A Case Study of the Wufeng-Longmaxi Formations of Lower Paleozoic in Southeastern Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 42(1): 86–97 (in Chinese with English abstract).
- Luo, T., Guo, X. W., He, Z. L., et al., 2024a. Evolution of Overpressure in the Wufeng-Longmaxi Shale Reservoirs of the Jiaoshiba Area, Sichuan Basin, Southwestern China: Implications for Shale Gas Preservation. *AAPG Bulletin*, 108(10): 1985–2008. <https://doi.org/10.1306/07232422109>
- Luo, T., Guo, X. W., He, Z. L., et al., 2024b. Fluid Evolution and Gas Enrichment in the Wufeng-Longmaxi Shale Reservoirs of the Eastern Sichuan Basin, SW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 259: 105905. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2023.105905>
- Ma, X. H., Xie, J., Yong, R., et al., 2020. Geological Characteristics and High Production Control Factors of Shale Gas Reservoirs in Silurian Longmaxi Formation, Southern Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 47(5): 841–855 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Y. S., Li, M. W., Cai, X. Y., et al., 2020. Mechanisms and Exploitation of Deep Marine Petroleum Accumulations in China: Advances, Technological Bottlenecks and Basic Scientific Problems. *Oil & Gas Geology*, 41(4): 655–672 (in Chinese with English abstract).
- Miao, H., Jiang, Z. X., Wu, J. F., et al., 2024. Migration Evidence and Dynamic Enrichment Model of Shale Gas: Take the Deep Shale Gas in the Southern Sichuan Basin as an Example. *Natural Gas Industry*, 44(5): 29–44 (in Chinese with English abstract).
- Nie, H. K., Jin, Z. J., Bian, R. K., et al., 2016. The “Source-Cap Hydrocarbon-Controlling” Enrichment of Shale Gas in Upper Ordovician Wufeng Formation-Lower Silurian Longmaxi Formation of Sichuan Basin and Its Periphery. *Acta Petrolei Sinica*, 37(5): 557–571 (in Chinese with English abstract).
- Nie, H. K., Li, P., Dang, W., et al., 2022. Enrichment Characteristics and Exploration Directions of Deep Shale Gas of Ordovician-Silurian in the Sichuan Basin and Its Surrounding Areas, China. *Petroleum Exploration and Development*, 49(4): 648–659 (in Chinese with English abstract).
- Nie, H. K., Zhang, J. C., Jin, Z. J., et al., 2024. Enrichment Mechanism of Marine Shale Gas: A Case Study of the Wufeng Formation-Longmaxi Formation in the Sichuan Basin, SW China. *Acta Geologica Sinica*, 98(3): 975–991 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, N. S., Feng, Q. Q., Tenger, B., et al., 2020. Yanshanian-Himalayan Differential Tectono-Thermal Evolution and Shale Gas Preservation in Dingshan Area, Southeastern Sichuan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 41(12): 1610–1622 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. Z., Jiang, Z. X., Zhang, Y. H., et al., 2024. Main Controlling Factors of Shale Gas Migration in the Longmaxi Formation, Changning Area of the Sichuan Basin, China. *Journal of Natural Gas Geoscience*, 35(7): 1223–1235 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P., Liu, S. B., Shen, Z. M., et al., 2015. Mechanism and Effectiveness of Geochemical Index Trace Natural Gas Migration: A Case Study of Jurassic Natural Gas in Western Sichuan Depression. *Natural Gas Geoscience*, 26(6): 1147–1155 (in Chinese with English abstract).
- Wei, X. F., Li, Y. P., Wei, Z. H., et al., 2017. Effects of Preservation Conditions on Enrichment and High Yield of Shale Gas in Sichuan Basin and Its Periphery. *Petroleum Geology & Experiment*, 39(2): 147–153 (in Chinese with English abstract).

- Wei, X. F., Liu, Z. J., Wang, Q., et al., 2020. Analysis and Thinking of the Difference of Wufeng-Longmaxi Shale Gas Enrichment Conditions between Dingshan and Jiaoshiba Areas in Southeastern Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 31(8): 1041–1051 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. N., Hao, F., Lu, Y. C., et al., 2017. Differential Enrichment Mechanism and Key Technology of Shale Gas in Complex Areas of South China. *Earth Science*, 42(7): 1045–1056 (in Chinese with English abstract).
- Yang, R., He, S., Yi, J. Z., et al., 2016. Nano-Scale Pore Structure and Fractal Dimension of Organic-Rich Wufeng-Longmaxi Shale from Jiaoshiba Area, Sichuan Basin: Investigations Using FE-SEM, Gas Adsorption and Helium Pycnometry. *Marine and Petroleum Geology*, 70: 27–45. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.11.019>
- Yao, J., Sun, H., Huang, Z. Q., et al., 2013. Key Mechanical Problems in the Development of Shale Gas Reservoirs. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 43(12): 1527–1547 (in Chinese).
- Zhang, F. Y., Sui, H. G., Yao, J., et al., 2017. Molecular Simulation of Shale Gas Adsorption in Organic Matter. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 47(11): 146–152 (in Chinese).
- Zhang, J. C., Tao, J., Li, Z., et al., 2021. Prospect of Deep Shale Gas Resources in China. *Natural Gas Industry*, 41(1): 15–28 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, T. W., Ellis, G. S., Ruppel, S. C., et al., 2012. Effect of Organic-Matter Type and Thermal Maturity on Methane Adsorption in Shale-Gas Systems. *Organic Geochemistry*, 47: 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2012.03.012>
- Zhang, X. L., Liu, Z. J., Chen, C., et al., 2023. Differences in Preservation Conditions of Deep Shale Gas in High-Steep Complex Tectonic Belt: Taking Qijiang High-Steep Complex Tectonic Belt in Southeast Sichuan as an Example. *Petroleum Geology & Experiment*, 45(6): 1121–1131 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Yang, Z., Zhu, R. K., et al., 2015. Progress in China's Unconventional Oil & Gas Exploration and Development and Theoretical Technologies. *Acta Geologica Sinica*, 89(6): 979–1007 (in Chinese with English abstract).
- 周缘五峰组:龙马溪组页岩气差异富集的影响. 海相油气地质, 25(3): 243–252.
- 高海涛, 程鹏, 吴伟, 等, 2025. 川南地区深层页岩孔隙水对纳米孔隙结构的影响及其地质意义. 地球化学, 54(2): 234–247.
- 郭彤楼, 熊亮, 雷炜, 等, 2022. 四川盆地南部威荣、永川地区深层页岩气勘探开发进展、挑战与思考. 天然气工业, 42(8): 45–59.
- 郭旭升, 2014. 南方海相页岩气“二元富集”规律:四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识. 地质学报, 88(7): 1209–1218.
- 郭旭升, 胡东风, 段金宝, 2020. 中国南方海相油气勘探展望. 石油实验地质, 42(5): 675–686.
- 何治亮, 胡宗全, 聂海宽, 等, 2017. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气富集特征与“建造—改造”评价思路. 天然气地球科学, 28(5): 724–733.
- 何治亮, 聂海宽, 胡东风, 等, 2020. 深层页岩气有效开发中的地质问题:以四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组为例. 石油学报, 41(4): 379–391.
- 金之钧, 胡宗全, 高波, 等, 2016. 川东南地区五峰组—龙马溪组页岩气富集与高产控制因素. 地学前缘, 23(1): 1–10.
- 李文鏢, 卢双舫, 李俊乾, 等, 2020. 页岩气运移过程中的碳同位素分馏:机理、表征及意义. 中国科学:地球科学, 50(4): 553–569.
- 刘若冰, 2015. 中国首个大型页岩气田典型特征. 天然气地球科学, 26(8): 1488–1498.
- 刘树根, 焦堃, 张金川, 等, 2021. 深层页岩气储层孔隙特征研究进展:以四川盆地地下古生界海相页岩层系为例. 天然气工业, 41(1): 29–41.
- 卢志远, 何治亮, 余川, 等, 2021. 复杂构造区页岩气富集特征:以四川盆地东南部丁山地区下古生界五峰组—龙马溪组为例. 石油与天然气地质, 42(1): 86–97.
- 马新华, 谢军, 雍锐, 等, 2020. 四川盆地南部龙马溪组页岩气储集层地质特征及高产控制因素. 石油勘探与开发, 47(5): 841–855.
- 马永生, 黎茂稳, 蔡勋育, 等, 2020. 中国海相深层油气富集机理与勘探开发:研究现状、关键技术瓶颈与基础科学问题. 石油与天然气地质, 41(4): 655–672.
- 缪欢, 姜振学, 吴建发, 等, 2024. 页岩气运移证据及其动态富集模式:以四川盆地南部深层页岩气为例. 天然气工业, 44(5): 29–44.
- 聂海宽, 金之钧, 边瑞康, 等, 2016. 四川盆地及其周缘上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩气“源—盖控藏”富集. 石油学报, 37(5): 557–571.
- 聂海宽, 李沛, 党伟, 等, 2022. 四川盆地及周缘奥陶系—志留系深层页岩气富集特征与勘探方向. 石油勘探与开发, 49(4): 648–659.

中文参考文献

崔哲, 杨威, 王乾右, 等, 2020. 顶底板封闭性对四川盆地及

- 聂海宽, 张金川, 金之钧, 等, 2024. 论海相页岩气富集机理:以四川盆地五峰组—龙马溪组为例. 地质学报, 98(3): 975—991.
- 邱楠生, 冯乾乾, 腾格尔, 等, 2020. 川东南丁山地区燕山期—喜马拉雅期差异构造—热演化与页岩气保存. 石油学报, 41(12): 1610—1622.
- 王国臻, 姜振学, 张原豪, 等, 2024. 四川盆地长宁地区龙马溪组页岩气运移主控因素. 天然气地球科学, 35(7): 1223—1235.
- 王鹏, 刘四兵, 沈忠民, 等, 2015. 地球化学指标示踪天然气运移机理及有效性分析:以川西坳陷侏罗系天然气为例. 天然气地球科学, 26(6): 1147—1155.
- 魏祥峰, 李宇平, 魏志红, 等, 2017. 保存条件对四川盆地及周缘海相页岩气富集高产的影响机制. 石油实验地质, 39(2): 147—153.
- 魏祥峰, 刘珠江, 王强, 等, 2020. 川东南丁山与焦石坝地区五峰组—龙马溪组页岩气富集条件差异分析与思考. 天然气地球科学, 31(8): 1041—1051.
- 解习农, 郝芳, 陆永潮, 等, 2017. 南方复杂地区页岩气差异富集机理及其关键技术. 地球科学, 42(7): 1045—1056.
- 姚军, 孙海, 黄朝琴, 等, 2013. 页岩气藏开发中的关键力学问题. 中国科学: 物理学, 力学, 天文学, 43(12): 1527—1547.
- 张风昀, 隋宏光, 姚军, 等, 2017. 页岩气在有机质中吸附规律的分子模拟研究. 中国科学: 物理学, 力学, 天文学, 47(11): 146—152.
- 张金川, 陶佳, 李振, 等, 2021. 中国深层页岩气资源前景和勘探潜力. 天然气工业, 41(1): 15—28.
- 张旭亮, 刘珠江, 陈超, 等, 2023. 高陡复杂构造带深层页岩气保存条件差异性分析:以川东南綦江高陡复杂构造带为例. 石油实验地质, 45(6): 1121—1131.
- 邹才能, 杨智, 朱如凯, 等, 2015. 中国非常规油气勘探开发与理论技术进展. 地质学报, 89(6): 979—1007.