

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.383



四川盆地震旦—寒武系油气成藏的 Re-Os 年代学约束

沈传波^{1,2}, 葛翔^{1,2,3}, 白秀娟^{1,2}

1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

3. 英国杜伦大学地球科学系, 杜伦 DH13LE

摘要: 四川盆地震旦—寒武系储层具有万亿立方米以上的油气地质储量, 具有广阔的勘探前景. 复杂的地质条件及多期次构造作用限制了对其油气成藏演化过程的精细刻画. 近年来, 流体包裹体⁴⁰Ar/³⁹Ar和烃类Re-Os同位素定年等新技术在油气成藏研究中表现出良好的潜力和广泛的应用前景. 针对四川盆地深部油气成藏演化的定量解析这一问题, 在总结前人对震旦—寒武系油气成藏演化地质分析的基础上, 结合近期对川中威远气田、川西龙门山梁山梁古油藏和川北米仓山古油藏中沥青Re-Os同位素的定年结果, 认为四川盆地震旦—寒武系油气存在~450 Ma、205~162 Ma两期成藏作用, 其中天然气藏形成的关键时期为205~162 Ma. 还指出了Re-Os同位素分析在定量解析油气演化研究中需要解决的关键问题, 并认为烃类的Re-Os同位素定年将会推动我国成藏年代学的发展, 促进诸如四川盆地等复杂地质条件深层油气成藏过程和成藏机理的研究.

关键词: 成藏作用; 古油藏; 沥青; 成藏年代; Re-Os定年; 石油地质.

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2019)03-0713-14

收稿日期: 2018-12-14

Re-Os Geochronology Constraints on the Neoproterozoic-Cambrian Hydrocarbon Accumulation in the Sichuan Basin

Shen Chuanbo^{1,2}, Ge Xiang^{1,2,3}, Bai Xiujuan^{1,2}

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Department of Earth Sciences, Durham University, Durham DH13LE, UK

Abstract: The Neoproterozoic-Cambrian reservoir in the Sichuan Basin, which has stored more than one trillion cubic meters of petroleum, is an important exploration target in China. However, the complex tectonism and accumulation conditions limited the detail analysis of their hydrocarbon evolution. Recently, the isotope dating methods, like ⁴⁰Ar-⁴⁰Ar dating on the hydrocarbon bearing fluid inclusions and the Re-Os dating on the crude oil and bitumen, have shown good potential on constraining the key times of the petroleum system evolutions. Based on the previous understanding on the Neoproterozoic-Cambrian reservoir evolution, and integrating the bitumen Re-Os dating results on the Weiyuan gas field, the Kuangshanliang paleo-reservoir in the West Sichuan Basin and the Micang Shan paleo-reservoir in the North Sichuan Basin, this study indicates that the Neoproterozoic-Cambrian petroleum system experienced oil type reservoir formation during Caledonian (~450 Ma) and both oil

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos.41672140, 41802168); 中石油科技创新基金项目(No.2016D-5007-0103); 湖北省自然科学基金杰出青年基金项目(No.2016CFA055); 中央高校基本业务费专项资金资助项目(Nos.CUG180617, CUGCJ1712); 构造与油气资源教育部重点实验室开放课题(No.TPR-2018-11).

作者简介: 沈传波(1979-), 男, 教授, 博导, 主要从事构造—成藏年代学的研究工作. ORCID: 0000-0001-5641-9714. E-mail: cbshen@cug.edu.cn

引用格式: 沈传波, 葛翔, 白秀娟, 2019. 四川盆地震旦—寒武系油气成藏的 Re-Os 年代学约束. 地球科学, 44(3): 713-726.

and dry gas type reservoir formation during Indosinian-Yanshanian event (ca. 205–162 Ma). In addition, this study also puts forward some key problems related to the Re-Os analysis on accurate constraining petroleum evolution according to our current understanding. In summary, the hydrocarbon Re-Os geochronology is helpful for the development of the petroleum geochronology and could promote the understanding of the evolution and mechanism of the deep buried marine petroleum systems.

Key words: hydrocarbon accumulation; paleo-reservoir; bitumen; hydrocarbon geochronology; Re-Os dating; petroleum geology.

随着全球能源需求的日益增长和油气勘探向“更深、更老、更复杂”领域拓展,进入地球更深处寻找油气已成为未来油气勘探的趋势之一(马永生等, 2011).全球范围内,西伯利亚、非洲、东欧、印度、阿拉伯、澳大利亚等克拉通内,均有中—新元古界至下寒武统油气藏的报道(王铁冠和韩克猷, 2011).1964年,我国四川盆地首先发现了威远震旦系灯影组气田,探明储量达 $400 \times 10^8 \text{ m}^3$,是世界上当时少数几个最古老的天然气田之一(戴金星, 2003).近些年来,四川盆地中部安岳地区震旦系灯影组—下寒武统龙王庙组油气勘探取得了新的重大突破,发现了安岳大气田(邹才能等, 2014).该气田与威远—资阳气田一起形成了国内外较为罕见的古老、高演化天然气大气田(戴金星等, 2000; 戴金星, 2003),地质储量规模达万亿立方米以上(杜金虎等, 2014; 邹才能等, 2014).

经过半个多世纪的油气勘探与实践,对四川盆地震旦—寒武系油气成藏地质条件有了较深刻的认识,总结出“多源供烃、早期聚集、晚期调整、动态成藏”的特点(孙玮, 2008).震旦—寒武系包括泥质岩和碳酸盐岩两类共 5 套潜在烃源岩;新元古代以来,该区经历了加里东、海西、印支、燕山、喜山等多期复杂的构造运动,其中,燕山、喜山构造作用尤其剧烈,使得早期油气藏遭受了强烈的改造(李晋超等, 1998; 金之钧, 2005; 梅廉夫等, 2009).受复杂地质条件及多期构造作用的影响,四川盆地震旦—寒武系深层海相油气成藏演化过程一直困扰着工业界及相关研究领域(邱楠生等, 2018);其核心就是油气成藏过程中烃类生成、运移、聚集等关键时刻的精确厘定,国内称之为成藏年代学(刘文汇等, 2013; 王华健等, 2013).这是油气勘探过程中必须要解决的一个关键问题(姜振学等, 2000; 赵孟军等, 2004; Schaefer, 2005; 蔡李梅等, 2008),也是石油地质研究面临的一个科学难题(Selby and Creaser, 2005; Mark *et al.*, 2010; Yun *et al.*, 2010; Qiu *et al.*, 2011; Georgiev *et al.*, 2016; Liu and Selby, 2017).针对这一问题, Ge *et al.* (2018a, 2018b)对川西矿山梁寒武系古油藏和川北米仓山震旦系古油藏开展了

Re-Os 同位素分析,并尝试性地对灯影组储层石英流体包裹体进行了高精度的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素定年.本文将综合这些成果并结合对前人研究成果的总结分析,从年代学的角度定量揭示四川盆地震旦—寒武系油气成藏的演化过程,同时提出研究过程中发现的一些问题,期望推动我国成藏年代学的发展,促进我国复杂地质条件深层油气成藏过程和成藏机理的研究.

1 区域地质背景

四川盆地位于扬子准地台的西北缘,面积约为 $18 \times 10^4 \text{ km}^2$,是扬子准地台内通过北东及北西向交叉的深断裂活动形成的一个菱形构造沉积盆地(图 1),盆地四周为高山所限(马永生等, 2010; 刘树根等, 2014; Li *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2018).四川盆地为典型叠合盆地,震旦纪以来,先后经历了加里东、海西、印支、燕山和喜山等多期复杂的构造变动.多期构造活动造就了四川盆地具有多层系含油气系统的特征,具体表现为海相和陆相两套地层组合及其含油气层系,其中震旦系至中三叠统为海相碳酸盐岩地层,厚 3 500~6 000 m,上三叠统至今表现为陆相碎屑岩沉积特征,厚 2 500~6 000 m(王修齐等, 2016).震旦—寒武系天然气藏属于下组合油气藏,主要涉及新元古界震旦系至古生界志留系(图 2).地层由老至新发育震旦系陡山沱组泥岩、震旦系灯影组藻云岩、灯影组三段泥岩、下寒武统麦地坪组泥质白云岩、下寒武统筇竹寺组泥页岩 5 套烃源岩,其中下寒武统筇竹寺组泥页岩为动力烃源岩(施春华, 2017).下组合碳酸盐岩储层主要分布在震旦系灯影组,寒武系龙王庙组、洗象池组,奥陶系宝塔组和志留系石牛栏组,目前已有的工业气流主要集中在灯影组和龙王庙组(刘树根等, 2014; Yang *et al.*, 2017).志留系龙马溪组泥岩、下寒武统筇竹寺组泥岩以及灯影组三段泥岩扮演着盖层的作用,对天然气藏起着封闭和保存作用(施春华, 2017).

威远—资阳、川中、川西南地区是四川盆地灯影组天然气勘探程度较高的 3 个地区(图 1).20 世纪

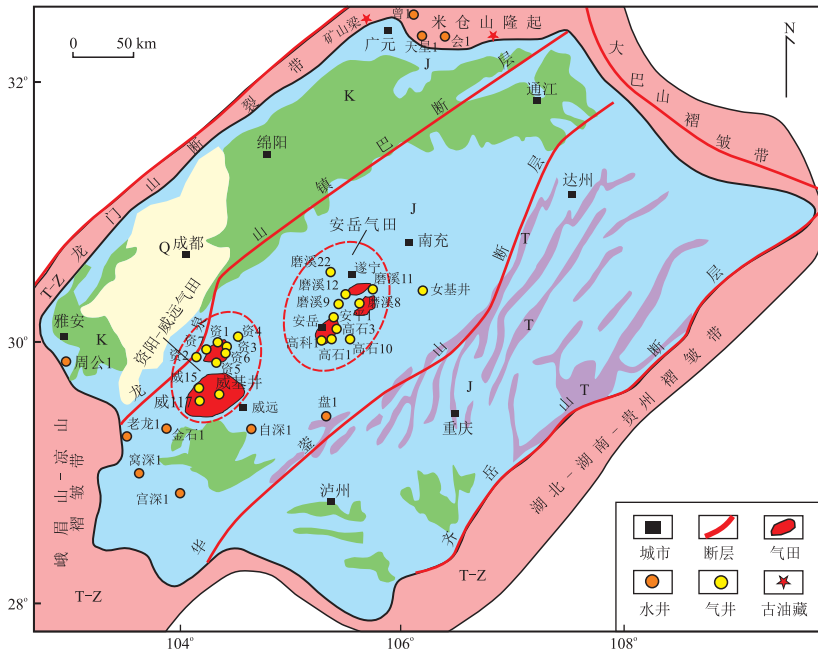


图 1 四川盆地震旦—寒武系天然气藏及研究涉及的古油藏分布示意图

Fig.1 Sketch map of the Sinian-Cambrian natural gas reservoirs and paleo-reservoirs in the Sichuan Basin

据马永生等(2010)和 Li et al.(2015)修改

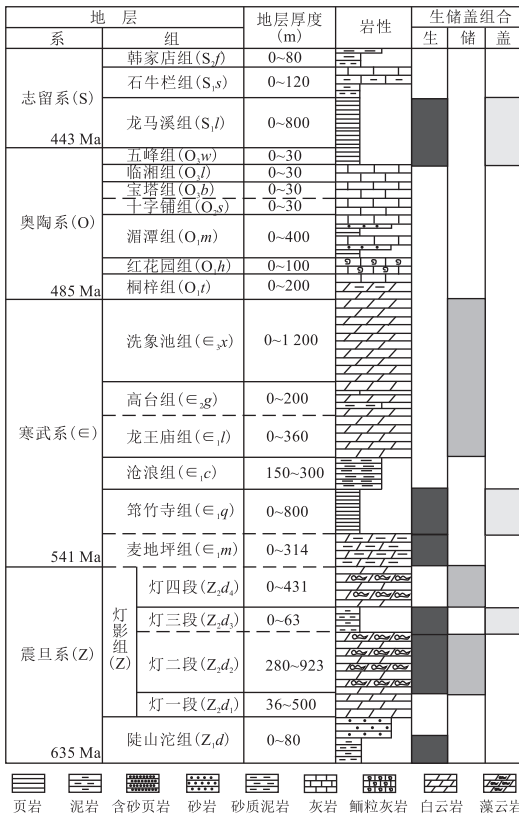


图 2 四川盆地及周缘新元古界震旦系一下古生界综合柱状图

Fig.2 Combined the Sinian-Cambrian stratigraphic sequences in the Sichuan Basin and its peripheral areas

据刘树根等(2014)和施春华(2017)修改

60~70 年代在威远气田地区开展了大规模的勘探与开发工作,建成了我国陆上储量最大的碳酸盐岩整装气田(戴金星,2003;刘树根等,2014).20 世纪 90 年代,在威远背斜北翼的资阳圈闭区钻井 7 口,进一步拓展了震旦系灯影组气藏范围.2011 年 7 月,川中高石梯高石 1 井获日产天然气上百万立方米的高产工业气流,随后在高石 3 井及磨溪构造等震旦系相继钻探获高产工业气流,是四川盆地震旦系继威远气田之后的又一大突破(刘树根等,2014;邹才能等,2014).2012 年,磨溪 8 井下寒武统龙王庙组试油日产气 $107.18 \times 10^4 \text{ m}^3$,标志着龙王庙组气藏的发现;2014 年,安岳气田磨溪区块寒武系龙王庙组新增天然气探明地质储量 $4403.85 \times 10^8 \text{ m}^3$,成为我国单体规模最大的特大型海相碳酸盐岩整装气藏(邹才能等,2014).

2 油气成藏的 Re-Os 年代学方法

20 世纪末期以来,储层伊利石 K-Ar 法(Hamilton et al., 1989;王飞宇等,1997;张有瑜和罗修泉,2011)、钾长石加大边激光显微探针 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法(Mark et al., 2010)、流体包裹体 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法(Liu et al., 2011; Qiu et al., 2011)、沥青 Rb-Sr 及 Pb-Pb 法(Parnell and Swainbank, 1990;涂湘林等,1997;

张景廉等, 1998; Zhu *et al.*, 2001)、原油及沥青 Re-Os 法 (Selby and Creaser, 2005; Selby *et al.*, 2005; Finlay *et al.*, 2011; Ge *et al.*, 2016) 在全球范围内被用来探索油气生成—运聚的绝对时间, 被认为是解决复杂地质条件下油气成藏过程重建的钥匙 (张有瑜和罗修泉, 2011; 蔡长娥等, 2014)。虽然 Re-Os 同位素体系的稳定性依然存在争议, 但 Re 和 Os 同位素表现出亲有机质的特性, 在还原环境下, Re 和 Os 易于被有机质捕获, 并以有机络合物、化学吸附等形式在有机体系 (干酪根、沥青、原油) 中富集并长期稳定存在 (Selby *et al.*, 2007; 沈传波等, 2011, 2015)。

Re-Os 同位素定年基于 ^{187}Re 通过 β 衰变形成 ^{187}Os (半衰期约 44 亿年; Cohen, 2004), Os 同位素组成随时间发生积累。假设 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 元素组成在初始形成时是稳定的, 并且 Re-Os 同位素体系在后期的演化过程中未受干扰, 那么 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 与 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 同位素比值会表现出正相关性, 并且遵循以下等时线年龄公式:

$$\left(\frac{^{187}\text{Os}}{^{188}\text{Os}}\right)_{\text{现今}} = \left(\frac{^{187}\text{Os}}{^{188}\text{Os}}\right)_{\text{初始}} + \left(\frac{^{187}\text{Re}}{^{188}\text{Os}}\right) \times (e^{\lambda t} - 1),$$

其中 λ 是 ^{187}Re 衰变常数 ($1.666 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$; Smoliar *et al.*, 1996), t 为等时线年龄 (Dickin, 2005)。

由于 Re 和 Os 同位素在烃类体系中主要赋存于沥青质中 (Re > 90%, Os > 83%) (Selby *et al.*, 2007), 目前主要是通过沥青质的 Re-Os 同位素特征来反映原油的 Re-Os 同位素信息 (Selby *et al.*, 2005; Finlay *et al.*, 2011; Lillis and Selby, 2013; Cumming *et al.*, 2014)。虽然具有较强的挑战性, 但烃类 Re-Os 同位素定年已经在油气成藏年代学研究中展现出良好的潜力。Re-Os 同位素定年首先应用于加拿大阿尔伯塔盆地油砂的研究, 得到了 ~110 Ma 的等时线年龄, 被创新性地解释为原油生成的时间 (Selby and Creaser, 2005)。后来又应用于英国东北部大西洋边缘盆地原油样品的定年分析, 获得 ~70 Ma 的 Re-Os 等时线年龄, 这一年龄与生排烃法、盆地模拟法和钾长石 Ar-Ar 定年获得的油气大量生成和充注的时间相吻合 (Finlay *et al.*, 2011), 显示了 Re-Os 同位素在原油绝对定年方面的良好前景。近年来, 美国大角盆地 (Bighorn Basin) 原油 Re-Os 同位素分析获得的 ~210 Ma 等时线年龄 (Lillis and Selby, 2013), 进一步验证了 Re-Os 同位素分析在确定油气生成绝对时间方面的重要作用。对于储层沥青, 加拿大 Nunavut Polaris 密西西

比河谷型 (MVT) 铅锌矿中伴生沥青 Re-Os 同位素分析得到一组 $374.2 \pm 8.6 \text{ Ma}$ 的等时线年龄, 这一年龄与闪锌矿 Rb-Sr 定年和古地磁定年数据相呼应, 指示了沥青 Re-Os 同位素定年在确定油气生成时间方面的适用性 (Selby *et al.*, 2005)。针对我国南方麻江—凯里—万山古油藏中不同类型沥青开展的 Re-Os 同位素分析结果显示: 低熟沥青 Re-Os 等时线年龄 (ca. 430 Ma) 指示了早期原油的生成时间, 高成熟度焦沥青 Re-Os 同位素分析得到的 ca. 80 Ma 等时线年龄, 则指示了原油裂解、天然气生成的时间 (Ge *et al.*, 2016)。可见, Re-Os 同位素定年在油气成藏过程中具有广泛的应用前景。

3 震旦—寒武系油气成藏过程分析

3.1 前人关于震旦—寒武系油气成藏的分析

埋藏深、时代老、构造复杂等特点一直制约着四川盆地震旦—寒武系下组合油气藏演化的研究。前人从多个方面对油气成藏过程中烃类的生成、运移、聚集等开展了研究 (表 1)。盆地模拟显示龙门山北缘天井山地区震旦—寒武系烃源岩在早志留世进入生烃门限 (Zhou *et al.*, 2013)。四川盆地内部多口单井 (自深 1 井、威 117 井、资 1 井) 烃源岩成熟度模拟以及单井埋藏史分析结果表明震旦—寒武系烃源岩在晚奥陶—早志留世期间首次进入生油窗 ($R_o = 1.0\%$), 存在早期的生烃作用 (刘树根等, 2009; Yuan *et al.*, 2012)。川北米仓山和川中威远气田震旦系有机流体包裹体分析表明存在多期油气充注事件, 检测到的具有较低均一温度 ($100 \sim 130 \text{ }^\circ\text{C}$) 的流体包裹体被认为与早期原油充注相关, 而较高均一温度 ($> 180 \text{ }^\circ\text{C}$) 的流体包裹体则可能与晚期天然气形成有关 (孙玮, 2008)。对于安岳大气田, 高石梯—磨溪地区探井的震旦系—寒武系天然气组分、同位素、轻烃组成、储层沥青生物标志化合物等分析结果表明该区天然气主要为原油裂解气 (魏国齐等, 2014, 2015; 郑平等, 2014)。储层中不同时期充填的矿物先后关系及其流体包裹体的分析揭示高石梯构造震旦系灯影组油气的成藏演化过程为: 古油藏形成于二叠纪—三叠纪末期; 侏罗纪—晚白垩世古油藏原位裂解形成古气藏; 喜马拉雅期古气藏发生调整改造, 形成资阳—威远气藏和安岳大气藏 (王国芝等, 2014)。汪泽成等 (2014, 2016) 也认为川中古隆起区油气成藏经历了 3 个阶段, 古油藏主要形成于二叠纪—中三叠世, 主要成藏期为中晚三叠世。结合区

表1 四川盆地震旦—寒武系油气藏成藏时间总结

Table 1 Summary of reservoir-forming time of the Sinian-Cambrian reservoirs in Sichuan Basin

研究对象	使用方法	油气生成、充注等成藏时间 (Ma)					参考文献
		500	400	300	200	100	
龙门山造山带北缘天井山地区	盆地模拟	干酪根生油					Zhou <i>et al.</i> (2013)
威远-资阳地区寒武系烃源岩	成熟度模拟单井埋藏史	干酪根生油		干酪根二次生油		干酪根生气	刘树根等(2009) Yuan <i>et al.</i> (2012)
川北和川中震旦系储层	流体包裹体分析	原油充注		天然气充注			孙玮(2008)
高阶梯构造灯影组储层	矿物形成序列流体包裹体分析	古油藏 原油裂解、古气藏					王国芝等(2014)
川中安岳气藏龙王庙组储层	石英-沥青关系石英流体包裹体	干酪根生油			石油-裂解气连续形成		刘伟等(2014)
乐山-龙女寺古隆起灯影组储层	气体组分, $\delta^{13}\text{C}$ 古隆起演化	干酪根生油		干酪根二次生油		原油裂解气及调整	杨跃明等(2016)
川中古隆起龙王庙组储层	区域构造演化流体包裹体分析	干酪根生油		原油充注		天然气充注	汪泽成等(2014,2016) 郝斌等(2017)

域构造演化和流体包裹体测试恢复的安岳气田龙王庙组气藏的成藏历史显示存在志留纪及三叠纪两期油充注和晚三叠世以来的多期天然气充注(Wu *et al.*, 2016; 郝彬等, 2017)。根据四川盆地磨溪构造下寒武统龙王庙组储层中石英与沥青的关系、石英中流体包裹体特征,刘伟等(2014)认为存在志留纪—泥盆纪期间的短暂生油过程以及三叠纪以来快速且连续的石油生成、天然气裂解及气藏形成过程。杨跃明等(2016)认为乐山—龙女寺古隆起震旦系灯影组气藏的形成经历了奥陶纪—志留纪的初次生油阶段和二叠纪—中三叠世的二次生油阶段、晚三叠世开始的古油藏裂解阶段、古新世以来的气藏调整与定型阶段。上述研究显示了四川盆地震旦—寒武系油气藏具有复杂的演化特征,可能存在加里东、印支—燕山多期次、不同烃类相态类型的成藏过程。获取精确的成藏过程年代学数据,弥补研究中缺乏的定量同位素年代学约束,不失为解决争议及促进进一步研究的良好手段。

3.2 震旦—寒武系油气成藏的 Re-Os 年代学

四川盆地除威远和安岳气田外,在川西龙门山、川北米仓山构造带的震旦—寒武系地层中,古油藏沥青和油气苗广泛分布,且含量高、易于采集,是四川盆地震旦—寒武系下组合油气演化研究的重要窗口(黄籍中和冉隆辉, 1989; 代寒松等, 2009)。笔者对龙门山北段矿山梁寒武系长江沟组沥青以及米仓山震旦系灯影组沥青进行了 Re-Os 同位素的分析,获得了一些定量的成藏年代学数据(Ge *et al.*, 2018a, 2018b)。施春华(2017)对威远气田震旦系储层沥青开展的 Re-Os 同位素分析也获得了较好的等时线年龄。这些不同地区的沥青 Re-Os 同位素定年结果

揭示了四川盆地及周缘的震旦—寒武系油气藏总体存在奥陶—志留纪(ca.486~415 Ma)和晚三叠—早侏罗世(205~162 Ma)两期成藏关键时期,并且四川盆地不同区域的成藏期次还存在一定差异,本文将综合这些成果来分析四川盆地震旦—寒武系油气的成藏演化过程。

四川盆地西缘龙门山造山带北段矿山梁地区的沥青和原油显示主要赋存于下寒武统长江沟组海相碎屑岩中,主要以沥青脉体的形式产出,合计发育超过 100 条沥青脉体(代寒松等, 2009),总储量可达 7 000 万桶原油当量(田小彬, 2009)。沥青样品乌黑、质地较软,有明显的油脂光泽,前人测定的沥青反射率 R_0 值约为 0.65%,成熟度较低,属于后期氧化沥青(代寒松等, 2009)。生物标志化合物和碳同位素分析揭示沥青遭受过生物降解作用,来源于缺氧条件下形成的海相有机质,主要来自于震旦纪至寒武纪泥页岩(Wu *et al.*, 2012; Zhou *et al.*, 2013; Ge *et al.*, 2018b)。17 个沥青样品的 Re-Os 同位素分析获得了 486 ± 15 Ma 的等时线年龄和 162 ± 14 Ma、 172.7 ± 8.1 Ma 近似的 Re-Os 等时线年龄(Ge *et al.*, 2018b)。486 ± 15 Ma 的年龄与前人埋藏史分析(Zhou *et al.*, 2013)和烃源岩成熟度演化史分析(刘树根等, 2009; Yuan *et al.*, 2012)所揭示的早期生烃作用的时间相吻合,指示了这一期的油气生成作用。162~172 Ma 的 Re-Os 等时线年龄则与龙门山造山带侏罗纪构造活动及同期的油气生成作用相互响应(图 3)。综合前人的研究和 Re-Os 同位素的分析,龙门山北缘矿山梁古油藏的演化过程可总结为:(1)早古生代期间(~486 Ma),新元古—寒武系地层埋深达到 2 500 m 以上,首次进入生烃门限

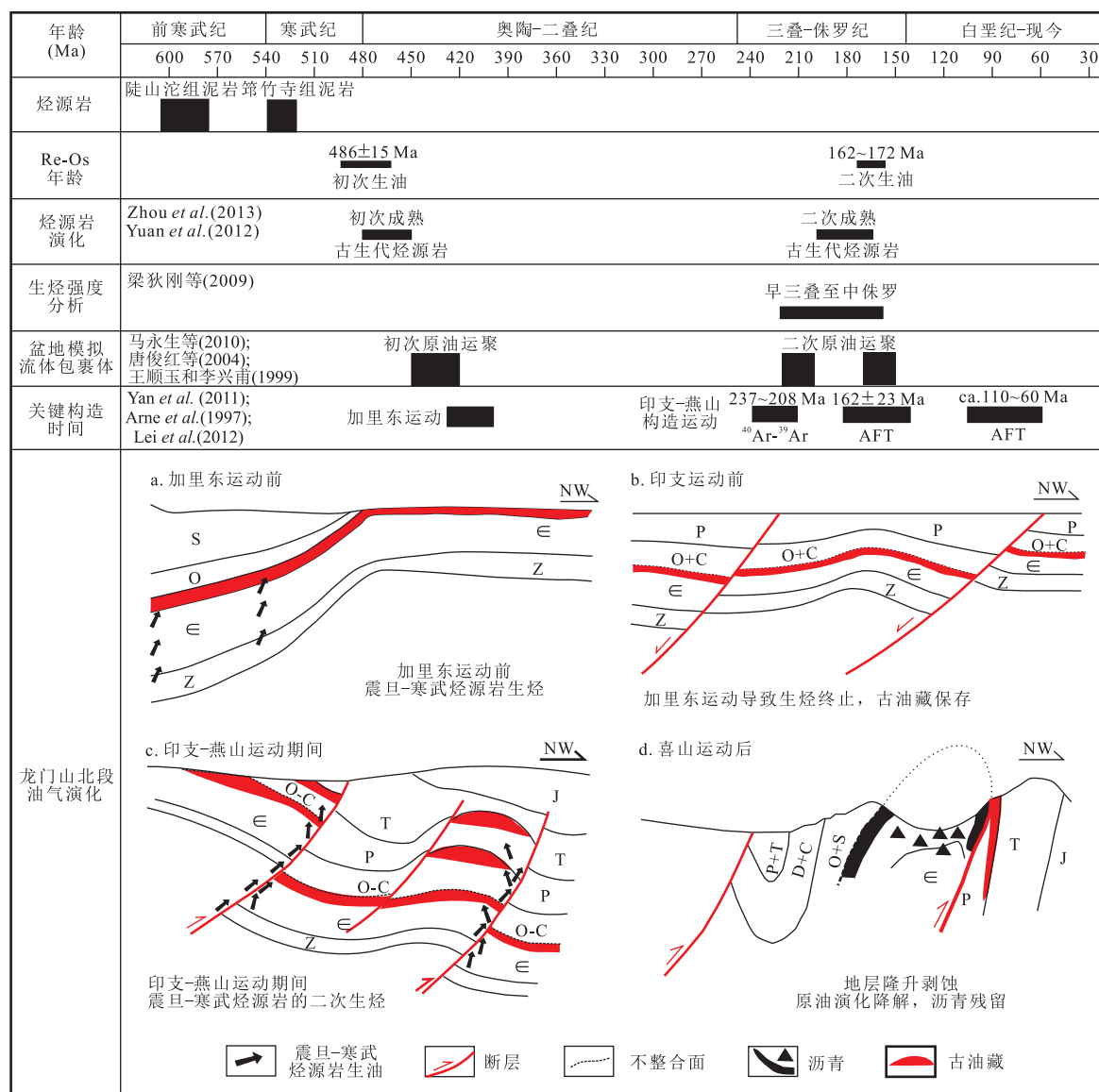


图 3 龙门山北段矿山梁地区油气成藏年代及其演化示意图

Fig.3 Petroleum geochronology and evolution of the Kuangshanliang paleo-reservoir in the northern Longmenshan thrust belt
据 Ge *et al.* (2018b) 修改

(图 3a);但是,紧邻的加里东造山运动(450~400 Ma)导致了该地区的抬升剥蚀,烃源岩停止生烃(图 3b). (2)三叠纪至侏罗纪期间,印支-燕山构造作用导致地层再次深埋至 5 000 m 以下,烃源岩再次生烃(162~172 Ma),控制了第二期的油气成藏作用(图 3c).

四川盆地北缘米仓山隆起周缘新元古灯影组三段和一段内部沥青普遍发育.通过含沥青面积、有效层厚、沥青面孔隙率等参数推测的灯影组中沥青储量可达 125 亿吨,折合原油约 1 500 亿桶(代寒松等, 2009).Ge *et al.* (2018a)对 7 个沥青出露点采集的

样品进行 Re-Os 同位素分析,得到了 3 组误差范围内近似的等时线年龄(205±32 Ma, 184±23 Ma, 173±12 Ma).沥青具有不溶于氯仿、高沥青反射率($R_b = 3.25\% \sim 4.08\%$)、高 T_{max} 值(~540 °C)、镜下无荧光的特征,指示其为原油热裂解形成的焦沥青.原油热裂解作用可能影响并重置原油的 Re-Os 同位素系统(Lillis and Selby, 2013; Ge *et al.*, 2016),焦沥青的 Re-Os 等时线年龄指示天然气生成的时间(Ge *et al.*, 2016).米仓山古油藏焦沥青 Re-Os 同位素分析获得的晚三叠世至中侏罗世的年龄(ca.205~173 Ma),特别是具有相似¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os比

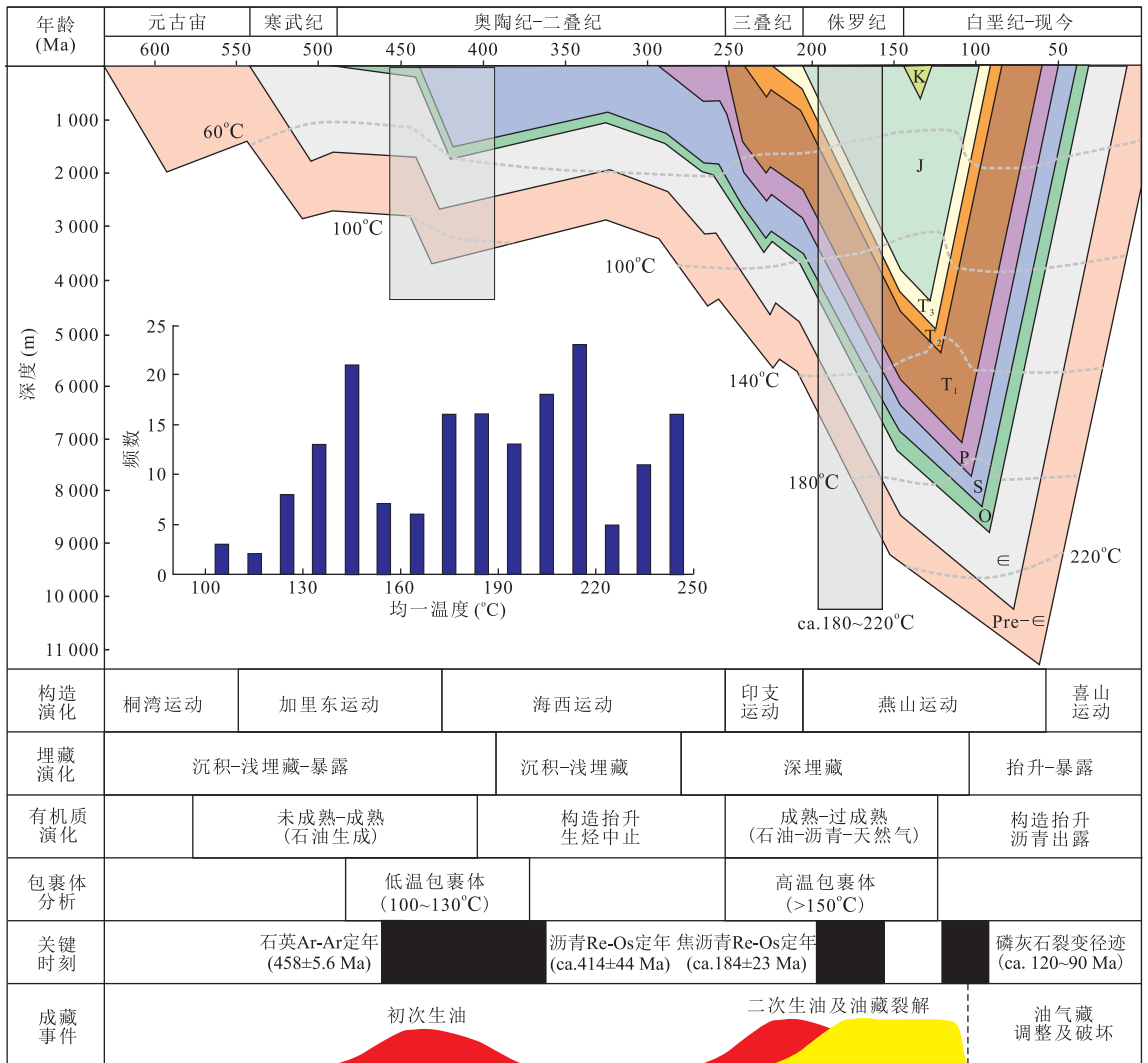


图 4 米仓山震旦系古油藏成藏年代及其演化示意图

Fig.4 Petroleum geochronology and evolution of the Micangshan Sinian paleo-reservoir in the northern Sichuan Basin
据 Ge et al. (2018a)修改

值的 6 个样品获得的 ~184 Ma 的年龄揭示了原油热裂解、天然气生成的时间(图 4, 图 5)。米仓山古油藏与沥青伴生的石英流体包裹体⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素年龄揭示在中奥陶世(458.09±5.59 Ma)存在一期烃类团聚过程(图 4)。资 5 井和资 6 井震旦系灯影组沥青的 Re-Os 同位素分析获得了 414±44 Ma 的等时线年龄(施春华, 2017)。这一年龄在误差范围内与石英流体包裹体⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素年龄结果近于一致(图 5), 表明在奥陶—志留纪时期, 四川盆地北部也存在一期油气成藏作用(图 3)。

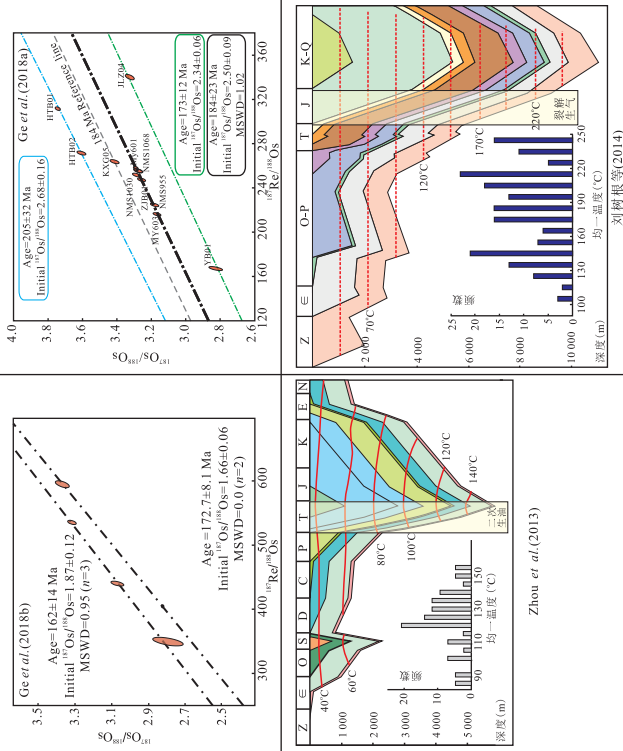
3.3 震旦—寒武系油气成藏演化

对比上述各类研究结果, 笔者发现, 无论是川中威远气田, 还是川西矿山梁和川北米仓山古油藏均揭示了奥陶—志留纪期间(~450 Ma)的第一期油

气成藏作用和三叠—侏罗纪期间(205~162 Ma)的第二期油气成藏作用(图 5)。第一期原油的生成聚集与加里东构造作用具有良好的相关性。加里东早期构造活动(桐湾运动)后, 四川盆地进入相对稳定沉积期, 烃源岩在奥陶—志留纪期间进入生油窗开始生油, 志留纪末的加里东晚期构造运动(广西运动)导致盆地抬升剥蚀, 由于抬升剥蚀的差异, 有的地区强烈剥蚀, 早期成熟的烃源岩停止生烃(李伟等, 2014)。海西—印支构造作用导致四川盆地形成北东向展布的大型隆起与拗陷的构造格局, 受构造位置的影响, 四川盆地内部不同地区三叠系地层沉积厚度存在较大差异, 差异埋藏也导致盆地内部震旦—寒武纪地层中烃类属性的差异。如川西矿山梁古油藏沥青表现出低成熟度的特征, 反映了烃源岩以生

	相似性	差异性
阶段划分	早期油气演化	晚期油气演化
构造演化阶段	加里东时期 (ca. 450 Ma)	印支-燕山时期 (ca. 180 Ma)
研究地区	矿山梁寒武系古油藏+米仓山震旦系古油藏	矿山梁寒武系古油藏
沥青特征	沥青特征差异明显	沥青软, 与油伴生 成熟度低 ($R_o = 0.23\% \sim 0.65\%$)
同位素定年结果揭示的成藏时间	盆地模拟及流体包裹体揭示的成藏时间	米仓山震旦系古油藏 沥青硬脆, 无油伴生 成熟度高 ($R_o > 2.5\%$, $T_{max} > 500\text{ }^\circ\text{C}$)

图5 龙门山古油藏与米仓山古油藏油气演化的相似性与差异性
 Fig.5 Similarities and differences of hydrocarbon evolution between the Kuangshanliang and Micangshan paleo-reservoirs



油为主;而川北米仓山古油藏、威远和安岳气田的沥青则为石油热裂解形成天然气的伴生产物,属于高演化程度的焦沥青。虽然 Re-Os 同位素结果显示川西矿山梁的成藏时间与川北米仓山、威远—安岳等地区近于一致,但成藏意义可能存在差异(图5)。原油及低熟的油质沥青 Re-Os 等时线年龄揭示原油生成的时间(Selby and Creaser, 2005; Finlay *et al.*, 2011),而高演化的焦沥青 Re-Os 同位素年龄则与原油热裂解、天然气的生成有关(Ge *et al.*, 2016)。因此,矿山梁寒武系古油藏沥青获得的 162~173 Ma 的等时线年龄揭示了第二期的原油生成,与晚三叠世后烃源岩再次埋藏二次生烃作用有关(Ge *et al.*, 2018b)。而米仓山、威远和安岳等一直处于沉降的地区,烃源岩持续加热、不断演化,导致了原油的热裂解、天然气的生成。米仓山古油藏~183 Ma 的 Re-Os 等时线年龄指示了这一时期原油的裂解、天然气的生成(Ge *et al.*, 2018a)。

综合上述分析,笔者对四川盆地震旦—寒武系油气藏的形成演化总结如下:(1)盆地周缘及盆内在加里东运动期间,震旦—寒武系烃源岩初次生油,加里东晚期运动引起的抬升剥蚀作用差异导致有的地区生油停滞,有的地区持续生油。(2)印支—燕山期的盆地沉降,导致烃源岩及早期聚集保存了石油的储集层快速埋藏,生油、生气、原油热裂解等作用同时存在,油气相态及演化过程较为复杂。(3)在类似川西矿山梁经历相对较浅埋藏、现今以原油及低熟沥青存在的地区,晚三叠世至侏罗纪期间烃源岩生油成藏聚集占主导作用;而川北米仓山及川中安岳—威远等地区,震旦—寒武纪地层在印支—燕山期快速埋藏,寒武系烃源岩进入生气阶段,早期形成的油藏也发生热裂解作用形成天然气,这一时期也是天然气生成聚集成藏的主要阶段。

4 主要结论与展望

(1)Re-Os 同位素年代学结果定量揭示了四川盆地震旦—寒武系存在奥陶—志留纪期间(~450 Ma)和晚三叠世—侏罗纪期间(205~162 Ma)的两次油气成藏作用。

(2)早期奥陶—志留纪期间的油气生成聚集过程在四川盆地不同地区具有整体性和同一性;晚二叠世以来由于盆地不同地区构造演化的差异导致不同地区沉降的差异,生油、生气、原油热裂解等作用同时存在,油气相态及演化过程复杂,在埋藏作用较

小的地区(如龙门山造山带),烃源岩生油聚集作用占主导;而四川盆地大部分地区(川北米仓山及川中地区),地层在印支—燕山期快速深埋,晚三叠世—侏罗纪是天然气生成聚集的主要时期。

(3)Re-Os 同位素分析应用于原油、沥青等烃类的直接定年,能为油气的成藏演化提供定量的约束,具有广泛的应用前景。但是,相对较大的年龄误差仍然影响着烃类 Re-Os 同位素分析在含油气系统演化中的良好应用。究其原因,现今对 Re、Os 同位素在烃类中富集的内在机制及含油气系统 Re-Os 同位素地质年代示踪的封闭性的相关认识仍然较为缺乏且难以证实,原油生成后的地质事件(生物降解、热硫酸盐还原作用(TSR)、烃类热裂解等)对烃类 Re-Os 同位素系统的影响程度及实质机制仍需要进一步探索。尽快突破上述问题,对于 Re-Os 同位素定年应用于碳酸盐岩和深层—超深层油气复杂成藏演化过程的重建和富集机理的探索,将具有重要的理论及实践意义。

致谢:Re-Os 同位素的研究得到了英国杜伦大学 David Selby 教授的指导与帮助;⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素定年的分析得到了邱华宁教授的帮助;关于四川盆地震旦—寒武系油气成藏的研究,笔者与刘树根、王国芝、梅廉夫、曹剑、朱光有、郑民、侯明才、胡守志、阮小燕等专家学者进行了有益的探讨,在此一并表示感谢。

References

- Arne, D., Worley, B., Wilson, C., et al., 1997. Differential Exhumation in Response to Episodic Thrusting along the Eastern Margin of the Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 280(3-4): 239-256. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(97\)00040-1](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(97)00040-1)
- Cai, C. E., Qiu, N. S., Xu, S. H., et al., 2014. Advances in Re-Os Isotopic Dating in Geochronology of Hydrocarbon Accumulation. *Advances in Earth Science*, 29(12): 1362-1371 (in Chinese with English abstract).
- Cai, L. M., Chen, H. H., Li, Z. Q., et al., 2008. Isotopic Dating Techniques and Their Applications to the Geochronology of Hydrocarbon Migration and Accumulation: An Overview. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 28(4): 18-23 (in Chinese with English abstract).
- Cohen, A. S., 2004. The Rhenium-Osmium Isotope System: Applications to Geochronological and Palaeoenvironmental Problems. *Journal of the Geological Society*, 161(4): 729-734. <https://doi.org/10.1144/0016-764903-084>

- Cumming, V. M., Selby, D., Lillis, P. G., et al., 2014. Re-Os Geochronology and Os Isotope Fingerprinting of Petroleum Sourced from a Type I Lacustrine Kerogen: Insights from the Natural Green River Petroleum System in the Uinta Basin and Hydrous Pyrolysis Experiments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 138: 32 – 56. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.04.016>
- Dai, H. S., Liu, S. G., Sun, W., et al., 2009. Study on Characteristics of Sinian-Silurian Bitumen Outcrops in the Longmenshan-Micangshan Area, Southwest China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 36(6): 687 – 696 (in Chinese with English abstract).
- Dai, J. X., 2003. Pool-Forming Periods and Gas Sources of Weiyuan Gasfield. *Petroleum Geology & Experiment*, 25(5): 473 – 480 (in Chinese with English abstract).
- Dai, J. X., Wang, T. D., Dai, H. M., et al., 2000. Gas Source for Large Gas Fields in China's Carbonate Rock. *Marine Origin Petroleum Geology*, 5(1–2): 12 – 13 (in Chinese with English abstract).
- Dickin, A. P., 2005. Radiogenic Isotope Geology. Cambridge University Press, Cambridge.
- Du, J. H., Zou, C. N., Xu, C. C., et al., 2014. Theoretical and Technical Innovations in Strategic Discovery of a Giant Gas Field in Cambrian Longwangmiao Formation of Central Sichuan Paleo-Uplift, Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 41(3): 268 – 277 (in Chinese with English abstract).
- Finlay, A. J., Selby, D., Osborne, M. J., 2011. Re-Os Geochronology and Fingerprinting of United Kingdom Atlantic Margin Oil: Temporal Implications for Regional Petroleum Systems. *Geology*, 39(5): 475 – 478. <https://doi.org/10.1130/g31781.1>
- Ge, X., Shen, C. B., Selby, D., et al., 2016. Apatite Fission-Track and Re-Os Geochronology of the Xuefeng Uplift, China: Temporal Implications for Dry Gas Associated Hydrocarbon Systems. *Geology*, 44(6): 491 – 494. <https://doi.org/10.1130/g37666.1>
- Ge, X., Shen, C. B., Selby, D., et al., 2018a. Neoproterozoic-Cambrian Petroleum System Evolution of the Micang Shan Uplift, Northern Sichuan Basin, China: Insights from Pyrobitumen Re-Os Geochronology and Apatite Fission-Track Analysis. *AAPG Bulletin*, 102(8): 1429 – 1453. <https://doi.org/10.1306/1107171616617170>
- Ge, X., Shen, C. B., Selby, D., et al., 2018b. Petroleum-Generation Timing and Source in the Northern Longmen Shan Thrust Belt, Southwest China: Implications for Multiple Oil-Generation Episodes and Sources. *AAPG Bulletin*, 102(5): 913 – 938. <https://doi.org/10.1306/0711171623017125>
- Georgiev, S. V., Stein, H. J., Hannah, J. L., et al., 2016. Re-Os Dating of Maltenes and Asphaltenes within Single Samples of Crude Oil. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 179: 53 – 75. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.01.016>
- Hamilton, P. J., Kelley, S., Fallick, A. E., 1989. K-Ar Dating of Illite in Hydrocarbon Reservoirs. *Clay Minerals*, 24(2): 215 – 231. <https://doi.org/10.1180/claymin.1989.024.2.08>
- Hao, B., Zhao, W. Z., Hu, S. Y., et al., 2017. Bitumen Genesis and Hydrocarbon Accumulation History of the Cambrian Longwangmiao Formation in Central Sichuan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 38(8): 863 – 875 (in Chinese with English abstract).
- Huang, J. Z., Ran, L. H., 1989. Bitumen and Oil-Gas Exploration in Sinian “Denying Limestone” in Sichuan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 10(1): 27 – 36 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Z. X., Pang, X. Q., Huang, Z. L., 2000. A Method for Studying the Oil and Gas Migration Stages in Superposed Basin and Its Application. *Petroleum Exploration and Development*, 27(4): 22 – 25 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Z. J., 2005. Particularity of Petroleum Exploration on Marine Carbonate Strata in China Sedimentary Basins. *Earth Science Frontiers*, 12(3): 15 – 22 (in Chinese with English abstract).
- Lei, Y. L., Jia, C. Z., Li, B. L., et al., 2012. Meso-Cenozoic Tectonic Events Recorded by Apatite Fission Track in the Northern Longmen-Micang Mountains Region. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 86(1): 153 – 165. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2012.00618.x>
- Li, C. W., Wen, L., Tao, S. Z., 2015. Characteristics and Enrichment Factors of Supergiant Lower Cambrian Longwangmiao Gas Reservoir in Anyue Gas Field: The Oldest and Largest Single Monoblock Gas Reservoir in China. *Energy Exploration & Exploitation*, 33(6): 827 – 850. <https://doi.org/10.1260/0144-5987.33.6.827>
- Li, J. C., Ma, Y. S., Zhang, D. J., 1998. Some Important Scientific Problems on Petroleum Exploration in Marine Formations of China. *Petroleum Exploration and Development*, 25(5): 1 – 2 (in Chinese with English abstract).
- Li, W., Yi, H. Y., Hu, W. S., et al., 2014. Tectonic Evolution of Caledonian Paleohigh in the Sichuan Basin and Its Relationship with Hydrocarbon Accumulation. *Natural Gas Industry*, 34(3): 8 – 15 (in Chinese with English abstract).
- Liang, D. G., Guo, T. L., Chen, J. P., et al., 2009. Geochemical Characteristics of Four Suits of Regional Marine Source

- Rocks, South China. *Marine Origin Petroleum Geology*, 14(1): 1—15 (in Chinese with English abstract).
- Lillis, P. G., Selby, D., 2013. Evaluation of the Rhenium-Osmium Geochronometer in the Phosphoria Petroleum System, Bighorn Basin of Wyoming and Montana, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 118: 312—330. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.04.021>
- Liu, J. J., Selby, D., 2017. A Matrix-Matched Reference Material for Validating Petroleum Re-Os Measurements. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 42(1): 97—113. <https://doi.org/10.1111/ggr.12193>
- Liu, S. G., Deng, B., Jansa, L., et al., 2018. Multi-Stage Basin Development and Hydrocarbon Accumulations: A Review of the Sichuan Basin at Eastern Margin of the Tibetan Plateau. *Journal of Earth Science*, 29(2): 307—325. <https://doi.org/10.1007/s12583-017-0904-8>
- Liu, S. G., Ma, Y. S., Cai, X. Y., et al., 2009. Characteristic and Accumulation Process of the Natural Gas from Sinian to Lower Paleozoic in Sichuan Basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 36(4): 345—354 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. G., Ma, Y. S., Wang, G. Z., et al., 2014. The Accumulation Process and Mechanism of Combined Natural Gas in the Sichuan Basin. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Liu, W., Wang, G. Z., Liu, S. G., et al., 2014. Characteristics and Geological Significance of Fluid Inclusions in Longwangmiao Formation of Moxi Structure in Central Sichuan, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 41(6): 723—732 (in Chinese with English abstract).
- Liu, W. H., Wang, J., Tao, C., et al., 2013. The Geochronology of Petroleum Accumulation of China Marine Sequence. *Natural Gas Geoscience*, 24(2): 199—209 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. Q., Mei, L. F., Qiu, H. N., et al., 2011. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology Constraints on Hydrocarbon Accumulation and Destruction Periods in the Bankeng Paleo-Reservoir in the Southern Margin of the Middle Yangtze Block. *Chinese Science Bulletin*, 56(26): 2803—2812. <https://doi.org/10.1007/s11434-011-4625-6>
- Ma, Y. S., Cai, X. Y., Zhao, P. R., et al., 2010. Distribution and Further Exploration of the Large-Medium Sized Gas Fields in Sichuan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 31(3): 347—354 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Y. S., Cai, X. Y., Zhao, P. R., 2011. The Research Status and Advances in Porosity Evolution and Diagenesis of Deep Carbonate Reservoir. *Earth Science Frontiers*, 18(4): 181—192 (in Chinese with English abstract).
- Mark, D. F., Parnell, J., Kelley, S. P., et al., 2010. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating of Oil Generation and Migration at Complex Continental Margins. *Geology*, 38(1): 75—78. <https://doi.org/10.1130/g30237.1>
- Mei, L. F., Liu, Z. Q., Tang, J. G., et al., 2009. Tectonic-Pooling Cycles Controlled by Polycyclic Tectonism in the Mesozoic-Palaeozoic Marine Strata of South China. *Oil & Gas Geology*, 30(5): 589—597, 607 (in Chinese with English abstract).
- Parnell, J., Swainbank, I., 1990. Pb-Pb Dating of Hydrocarbon Migration into a Bitumen-Bearing Ore Deposit, North Wales. *Geology*, 18(10): 1028—1030. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1990\)018<1028:ppdohm>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1990)018<1028:ppdohm>2.3.co;2)
- Qiu, H. N., Wu, H. Y., Yun, J. B., et al., 2011. High-Precision $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Age of the Gas Emplacement into the Songliao Basin. *Geology*, 39(5): 451—454. <https://doi.org/10.1130/g31885.1>
- Qiu, N. S., Liu, W., Xu, Q. C., et al., 2018. Temperature-Pressure Field and Hydrocarbon Accumulation in Deep-Ancient Marine Strata. *Earth Science*, 43(10): 3511—3525 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.286>
- Schaefer, B. F., 2005. Geochemistry: When do Rocks Become Oil? *Science*, 308(5726): 1267—1268. <https://doi.org/10.1126/science.1113158>
- Selby, D., Creaser, R. A., 2005. Direct Radiometric Dating of Hydrocarbon Deposits Using Rhenium-Osmium Isotopes. *Science*, 308(5726): 1293—1295. <https://doi.org/10.1126/science.1111081>
- Selby, D., Creaser, R., Dewing, K., et al., 2005. Evaluation of Bitumen as a Re-Os Geochronometer for Hydrocarbon Maturation and Migration: A Test Case from the Polaris MVT Deposit, Canada. *Earth and Planetary Science Letters*, 235(1—2): 1—15. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.02.018>
- Selby, D., Creaser, R. A., Fowler, M. G., 2007. Re-Os Elemental and Isotopic Systematics in Crude Oils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(2): 378—386. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.09.005>
- Shen, C. B., Liu, Z. Y., Xiao, F., et al., 2015. Advancements of the Research on Re-Os Isotope System in Petroleum System. *Advances in Earth Science*, 30(2): 187—195 (in Chinese with English abstract).
- Shen, C. B., Selby, D., Mei, L. F., et al., 2011. Advances in the Study of Re-Os Geochronology and Tracing of Hydrocarbon Generation and Accumulation. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 31(4): 87—93 (in Chinese with

- English abstract).
- Shi, C. H., 2017. Applying Inorganic Geochemical Approaches to Conduct Hydrocarbon Source Correlation under Post-to Over-Mature Conditions: A Case in the Sinian and the Lower Cambrian Gaint Gas Accumulations, Sichuan Basin, Southwestern China (Dissertation). Nanjing University, Nanjing (in Chinese with English abstract).
- Smoliar, M. I., Walker, R. J., Morgan, J. W., 1996. Re-Os Ages of Group IIA, IIIA, IVA, and IVB Iron Meteorites. *Science*, 271 (5252): 1099 — 1102. <https://doi.org/10.1126/science.271.5252.1099>
- Sun, W., 2008. The Research on the Formation Process and Mechanism of Gas Pools in Proterozoic to Low Paleozoic Erathem, Sichuan Basin (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Tang, J. H., Zhang, T. W., Bao, Z. Y., et al., 2004. Study of Organic Inclusions in the Carbonate Reservoir Bed of the Weiyuan Gas Field in the Sichuan Basin. *Geological Review*, 50(2): 210—214 (in Chinese with English abstract).
- Tian, X. B., 2009. Structural Features in the Northern Segment of Longmen Mountains and the Discussion on Its Hydrocarbon Prospects (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Tu, X. L., Zhu, B. Q., Zhang, J. L., et al., 1997. Pb-Sr-Nd Isotope Application in Geochronology and Origin of Petroleum. *Geochimica*, 26(2): 57—67 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F. Y., He, P., Zhang, S. C., et al., 1997. The K-Ar Isotopic Dating of Authigenic Illites and Timing of Hydrocarbon Fluid Emplacement in Sandstone Reservoir. *Geological Review*, 43(5): 540—546 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. Z., Liu, S. G., Liu, W., et al., 2014. Process of Hydrocarbon Accumulation of Sinian Dengying Formation in Gaoshiti Structure, Central Sichuan, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 41(6): 684—693 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H. J., Zhang, S. C., Wang, X. M., et al., 2013. How to Achieve the Precise Dating of Hydrocarbon Accumulation. *Natural Gas Geoscience*, 24(2): 210—217 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. Y., Li, X. F., 1999. Geochemical Characteristics and Gas-Bearing System of Sinian Natural Gas in Weiyuan and Ziyang areas. *Natural Gas Geoscience*, 10(3—4): 63—69 (in Chinese).
- Wang, T. G., Han, K. Y., 2011. On Meso-Neoproterozoic Primary Petroleum Resources. *Acta Petrolei Sinica*, 32(1): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. Q., Xu, H., Song, J. R., et al., 2016. Geologic Characteristics of the Leshan-Longnysi Paleo-High, Sichuan Basin and Their Bearing on Hydrocarbon Accumulation. *Marine Geology Frontiers*, 32(3): 24—32 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. C., Jiang, H., Wang, T. S., et al., 2014. Hydrocarbon Systems and Exploration Potentials of Neoproterozoic in the Upper Yangtze Region. *Natural Gas Industry*, 34(4): 27—36 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. C., Wang, T. S., Wen, L., et al., 2016. Basic Geological Characteristics and Accumulation Conditions of Anyue Giant Gas Field, Sichuan Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 28(2): 45—52 (in Chinese with English abstract).
- Wei, G. Q., Xie, Z. Y., Bai, G. L., et al., 2014. Organic Geochemical Characteristics and Origin of Natural Gas in the Sinian-Lower Paleozoic Reservoirs, Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 34(3): 44—49 (in Chinese with English abstract).
- Wei, G. Q., Xie, Z. Y., Song, J. R., et al., 2015. Features and Origin of Natural Gas in the Sinian-Cambrian of Central Sichuan Paleo-Uplift, Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 42(6): 702—711 (in Chinese with English abstract).
- Wu, J., Liu, S. G., Wang, G. Z., et al., 2016. Multi-Stage Hydrocarbon Accumulation and Formation Pressure Evolution in Sinian Dengying Formation-Cambrian Longwangmiao Formation, Gaoshiti-Moxi Structure, Sichuan Basin. *Journal of Earth Science*, 27(5): 835—845. <https://doi.org/10.1007/s12583-016-0706-4>
- Wu, L. L., Liao, Y. H., Fang, Y. X., et al., 2012. The Study on the Source of the Oil Seeps and Bitumens in the Tianjingshan Structure of the Northern Longmen Mountain Structure of Sichuan Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 37(1): 147—161. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2012.05.011>
- Yan, D. P., Zhou, M. F., Li, S. B., et al., 2011. Structural and Geochronological Constraints on the Mesozoic-Cenozoic Tectonic Evolution of the Longmen Shan Thrust Belt, Eastern Tibetan Plateau. *Tectonics*, 30(6). <https://doi.org/10.1029/2011tc002867>
- Yang, X. F., Tang, H., Wang, X. Z., et al., 2017. Dolomitization by Penesaline Sea Water in Early Cambrian Longwangmiao Formation, Central Sichuan Basin, China. *Journal of Earth Science*, 28(2): 305—314. <https://doi.org/10.1007/s12583-017-0761-5>

- Yang, Y.M., Wen, L., Luo, B., et al., 2016. Hydrocarbon Accumulation of Sinian Natural Gas Reservoirs, Leshan-Longnüsi Paleohigh, Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 43(2): 179–188 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, H.F., Liang, J.J., Gong, D.Y., et al., 2012. Formation and Evolution of Sinian Oil and Gas Pools in Typical Structures, Sichuan Basin, China. *Petroleum Science*, 9(2): 129–140. <https://doi.org/10.1007/s12182-012-0193-x>
- Yun, J.B., Shi, H.S., Zhu, J.Z., et al., 2010. Dating Petroleum Emplacement by Illite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Laser Stepwise Heating. *AAPG Bulletin*, 94(6): 759–771. <https://doi.org/10.1306/10210909102>
- Zhang, J.L., Zhu, B.Q., Zhang, P.Z., et al., 1998. Pb-Sr-Nd Isotopic Systematics of Kerogen and Bitumen in the Tarim Basin and Their Implications for Its Origin and Evolution. *Scientia Geologica Sinica*, 33(3): 310–317 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.Y., Luo, X.Q., 2011. K-Ar Dating of Authigenic Illites and the Hydrocarbon Accumulation History of the Silurian Bituminous Sandstone Reservoirs in the Yingmaili Area, Tarim Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 38(2): 203–210 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, M.J., Song, Y., Pan, W.Q., et al., 2004. The Overall Approach of Hydrocarbon Filling Periods and Process in Sedimentary Basins. *Advance in Earth Sciences*, 19(6): 939–946 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, P., Shi, Y.H., Zou, C.Y., et al., 2014. Natural Gas Sources in the Dengying and Longwangmiao Fms in the Gaoshiti-Maoxi Area, Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 34(3): 50–54 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Q., Xiao, X.M., Tian, H., et al., 2013. Oil Charge History of Bitumens of Differing Maturities in Exhumed Palaeozoic Reservoir Rocks at Tianjingshan, NW Sichuan Basin, Southern China. *Journal of Petroleum Geology*, 36(4): 363–382. <https://doi.org/10.1111/jpg.12561>
- Zhu, B.Q., Zhang, J.L., Tu, X.L., et al., 2001. Pb, Sr, and Nd Isotopic Features in Organic Matter from China and Their Implications for Petroleum Generation and Migration. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(15): 2555–2570. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(01\)00608-1](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(01)00608-1)
- Zou, C.N., Du, J.H., Xu, C.C., et al., 2014. Formation, Distribution, Resource Potential and Discovery of the Sinian-Cambrian Giant Gas Field, Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 41(3): 278–293 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 蔡长娥, 邱楠生, 徐少华, 等, 2014. Re-Os 同位素测年法在油气成藏年代学的研究进展. *地球科学进展*, 29(12): 1362–1371.
- 蔡李梅, 陈红汉, 李兆奇, 等, 2008. 油气成藏过程中的同位素测年方法评述. *沉积与特提斯地质*, 28(4): 18–23.
- 代寒松, 刘树根, 孙玮, 等, 2009. 龙门山—米仓山地区下组合地表沥青特征研究. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 36(6): 687–696.
- 戴金星, 2003. 威远气田成藏期及气源. *石油实验地质*, 25(5): 473–480.
- 戴金星, 王廷栋, 戴鸿鸣, 等, 2000. 中国碳酸盐岩大型气田的气源(摘要). *海相油气地质*, 5(1–2): 12–13.
- 杜金虎, 邹才能, 徐春春, 等, 2014. 川中古隆起龙王庙组特大型气田战略发现与理论技术创新. *石油勘探与开发*, 41(3): 268–277.
- 郝彬, 赵文智, 胡素云, 等, 2017. 川中地区寒武系龙王庙组沥青成因与油气成藏史. *石油学报*, 38(8): 863–875.
- 黄籍中, 冉隆辉, 1989. 四川盆地震旦系灯影灰岩黑色沥青与油气勘探. *石油学报*, 10(1): 27–36.
- 姜振学, 庞雄奇, 黄志龙, 等, 2000. 叠合盆地油气运聚期次研究方法及应用. *石油勘探与开发*, 27(4): 22–25.
- 金之钧, 2005. 中国海相碳酸盐岩层系油气勘探特殊性问题. *地质前缘*, 12(3): 15–22.
- 李晋超, 马永生, 张大江, 等, 1998. 中国海相油气勘探若干重大科学问题. *石油勘探与开发*, 25(5): 1–2.
- 李伟, 易海永, 胡望水, 等, 2014. 四川盆地加里东古隆起构造演化与油气聚集的关系. *天然气工业*, 34(3): 8–15.
- 梁狄刚, 郭彤楼, 陈建平, 等, 2009. 南方四套区域性海相烃源岩的地球化学特征. *海相油气地质*, 14(1): 1–15.
- 刘树根, 马永生, 蔡勋育, 等, 2009. 四川盆地震旦系下古生界天然气成藏过程和特征. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 36(4): 345–354.
- 刘树根, 马永生, 王国芝, 等, 2014. 四川盆地地下组合天然气的成藏过程和机理. 北京: 科学出版社.
- 刘伟, 王国芝, 刘树根, 等, 2014. 川中磨溪构造龙王庙组流体包裹体特征及其地质意义. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 41(6): 723–732.
- 刘文汇, 王杰, 陶成, 等, 2013. 中国海相层系油气成藏年代学. *天然气地球科学*, 24(2): 199–209.
- 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 等, 2010. 四川盆地大中型天然气田分布特征与勘探方向. *石油学报*, 31(3): 347–354.
- 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 2011. 深层、超深层碳酸盐岩油气储层形成机理研究综述. *地质前缘*, 18(4): 181–192.
- 梅廉夫, 刘昭茜, 汤济广, 等, 2009. 南方多旋回构造作用制约下的中、古生界海相油气构造—成藏旋回. *石油与天然气地质*, 30(5): 589–597, 607.
- 邱楠生, 刘雯, 徐秋晨, 等, 2018. 深层—古老海相层系温压场

- 与油气成藏.地球科学,43(10):3511-3525.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.286>
- 沈传波, Selby David, 梅廉夫, 等, 2011. 油气成藏定年的 Re-Os 同位素方法应用研究. 矿物岩石, 31(4): 87-93.
- 沈传波, 刘泽阳, 肖凡, 等, 2015. 石油系统 Re-Os 同位素体系封闭性研究进展. 地球科学进展, 30(2): 187-195.
- 施春华, 2017. 四川盆地震旦系一下寒武统大气藏高演化烃源对比无机地球化学研究(博士学位论文). 南京: 南京大学.
- 孙玮, 2008. 四川盆地元古宇一下古生界天然气藏形成过程和机理研究(博士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 唐俊红, 张同伟, 鲍征宇, 等, 2004. 四川盆地威远气田碳酸盐岩中有机包裹体研究. 地质论评, 50(2): 210-214.
- 田小彬, 2009. 龙门山北段构造特征及油气前景探讨(硕士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 涂湘林, 朱炳泉, 张景廉, 等, 1997. Pb、Sr、Nd 同位素体系在石油定年与成因示踪研究中的应用. 地球化学, 26(2): 57-67.
- 王飞宇, 何萍, 张水昌, 等, 1997. 利用自生伊利石 K-Ar 定年分析烃类进入储集层的时间. 地质论评, 43(5): 540-546.
- 王国芝, 刘树根, 刘伟, 等, 2014. 川中高石梯构造灯影组油气成藏过程. 成都理工大学学报(自然科学版), 41(6): 684-693.
- 王华建, 张水昌, 王晓梅, 等, 2013. 如何实现油气成藏期的精确定年. 天然气地球科学, 24(2): 210-217.
- 王顺玉, 李兴甫, 1999. 威远和资阳震旦系天然气地球化学特征与含气系统研究. 天然气地球科学, 10(34): 63-69.
- 王铁冠, 韩克猷, 2011. 论中一新元古界的原生油气资源. 石油学报, 32(1): 1-7.
- 王修齐, 许红, 宋家荣, 等, 2016. 高石梯—龙王庙大气田发现与四川盆地震旦—寒武系油气地质特征及成藏. 海洋地质前沿, 32(3): 24-32.
- 汪泽成, 姜华, 王铜山, 等, 2014. 上扬子地区新元古界含油气系统与油气勘探潜力. 天然气工业, 34(4): 27-36.
- 汪泽成, 王铜山, 文龙, 等, 2016. 四川盆地安岳特大型气田基本地质特征与形成条件. 中国海上油气, 28(2): 45-52.
- 魏国齐, 谢增业, 白贵林, 等, 2014. 四川盆地震旦系一下古生界天然气地球化学特征及成因判识. 天然气工业, 34(3): 44-49.
- 魏国齐, 谢增业, 宋家荣, 等, 2015. 四川盆地川中古隆起震旦系—寒武系天然气特征及成因. 石油勘探与开发, 42(6): 702-711.
- 杨跃明, 文龙, 罗冰, 等, 2016. 四川盆地乐山—龙女寺古隆起震旦系天然气成藏特征. 石油勘探与开发, 43(2): 179-188.
- 张景廉, 朱炳泉, 张平中, 等, 1998. 塔里木盆地北部沥青、干酪根 Pb-Sr-Nd 同位素体系及成因演化. 地质科学, 33(3): 310-317.
- 张有瑜, 罗修泉, 2011. 英买力沥青砂岩自生伊利石 K-Ar 测年与成藏年代. 石油勘探与开发, 38(2): 203-210.
- 赵孟军, 宋岩, 潘文庆, 等, 2004. 沉积盆地油气成藏期研究及成藏过程综合分析方法. 地球科学进展, 19(6): 939-946.
- 郑平, 施雨华, 邹春艳, 等, 2014. 高石梯—磨溪地区灯影组、龙王庙组天然气气源分析. 天然气工业, 34(3): 50-54.
- 邹才能, 杜金虎, 徐春春, 等, 2014. 四川盆地震旦系—寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现. 石油勘探与开发, 41(3): 278-293.