

四川盆地北缘亢家洞灯影组四段焦沥青 Re-Os 定年与 烃源岩示踪*

沈安江^{1,2} 李杰^{3,4} 龙晓平⁵ 胡安平^{1,2} 刘俊杰^{3,4} 殷启春⁶ 龚赞⁶

SHEN AnJiang^{1,2}, LI Jie^{3,4}, LONG XiaoPing⁵, HU AnPing^{1,2}, LIU JunJie^{3,4}, YIN QiChun⁶ and GONG Zan⁶

1. 中国石油杭州地质研究院, 杭州 310023
2. 中国石油天然气集团有限公司碳酸盐岩储层重点实验室, 杭州 310023
3. 中国科学院广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640
4. 中国科学院深地科学卓越创新中心, 广州 510640
5. 大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系, 西安 710069
6. 中国地质调查局南京地质调查中心, 南京 210016

1. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology (HIPG), Hangzhou 310023, China
2. Key Laboratory of Carbonate Reservoirs, CNPC, Hangzhou 310023, China
3. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China
4. CAS Center for Excellence in Deep Earth Science, Guangzhou 510640, China
5. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China
6. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China

2022-01-25 收稿, 2022-03-17 改回.

Shen AJ, Li J, Long XP, Hu AP, Liu JJ, Yin QC and Gong Z. 2022. Re-Os dating and oil-source correlation of the pyrobitumen in the Member 4, Dengying Formation of the Kangjiaotong paleo-reservoir, northern margin of the Sichuan Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 38(6):1702–1712, doi:10.18654/1000-0569/2022.06.10

Abstract There are pervasive pore-filling bitumen found in the dolomite reservoir of the Member 4, Sinian Dengying Formation. However, the high maturity of the source rocks and bitumen and the complex geological tectonic activities make it difficult to restore the history of hydrocarbon accumulation. In recent years, the Re-Os radioisotope system has been increasingly used for the dating of the oil and gas generation and oil-source correlation. The high-maturity bitumens (R_b of ca. 1.4% ~ 2.5%) from the Member 4, Sinian Dengying Formation in the Kangjiaotong paleo-reservoir, Ningqiang, Shaanxi have defined Re-Os isochron ages of ca. 260Ma, 60 ~ 70Ma and 8 ~ 13Ma. The Re-Os ages of 60 ~ 70Ma and 8 ~ 13Ma may indicate the time of when the Re-Os system was closed at the end of the crude oil being thermally cracked and the pyrobitumen forming process due to the uplift and temperature decrease. The older Re-Os age of about 260Ma is consistent with the general view that the Permian is the main hydrocarbon generation period of the Precambrian and Cambrian source rocks. It shows that besides the thermal cracking of crude oil, the Re-Os age defined by high-maturity bitumen may also indicate the crude oil generation. Meanwhile, at 263Ma, most of the Kangjiaotong bitumens are consistent with the $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ range of the Qiongzhusi Formation source rock samples rather than the lower $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ranges of the Member 3 of the Dengying Formation and the Maidiping Formation. The Qiongzhusi Formation may be the main source rock of the bitumen in the Kangjiaotong paleo-reservoir. These understandings are important for the evaluation of natural gas exploration in the Dengying Formation in the northern margin of the Sichuan Basin.

Key words Kangjiaotong paleo-reservoir; High-maturity bitumen; Re-Os dating; Oil-source correlation

摘要 四川盆地及邻区的震旦系灯影组四段白云岩中普遍存在充填孔洞沥青。然而, 烃源岩和沥青的高成熟度以及复

* 本文受国家重点研发计划项目(2020YFA0714800)和中国石油天然气集团有限公司碳酸盐岩储层重点实验室开放基金(RIPED-HZDZY-2019-JS-694)联合资助。

第一作者简介: 沈安江, 男, 1965年生, 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事碳酸盐岩沉积储集层研究, E-mail: shenaj_hz@petrochina.com.cn

杂的地质构造活动增加了恢复油气成藏史的难度。近年来,Re-Os 放射性同位素体系被越来越多的应用于油气生成期定年和油源对比。陕西北缘元家洞震旦系灯影组四段古油藏中的高成熟度沥青(R_b 约为 1.4%~2.5%)构建了约 260Ma、60~70Ma 和 8~13Ma 的 Re-Os 等时线年龄。其中,60~70Ma 和 8~13Ma 的 Re-Os 年龄可能指示原油在受热裂解形成焦沥青过程末段地层抬升、地温降低、Re-Os 体系封闭的时刻。而较老的约 260Ma 的 Re-Os 年龄与普遍的二叠纪是前寒武系、寒武系烃源岩主生烃期的观点一致,说明在原油热裂解之外,高成熟度沥青的 Re-Os 年龄也有可能指示生油期。同时,在 263Ma 时元家洞大部分沥青与筇竹寺组烃源岩样品的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 范围较为一致,而灯影组三段和麦地坪组烃源岩同时期的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 较低,筇竹寺组可能是元家洞古油藏沥青的主要烃源岩。上述认识对四川盆地北缘灯影组天然气勘探领域评价具有重要的指导意义。

关键词 元家洞古油藏;高成熟度沥青;Re-Os 定年;油源示踪
中图分类号 P597; P618.13

沉积盆地中油气成藏过程和金属矿产的富集成矿一直是国内外研究的热点之一(Wang *et al.*, 2014, 2016, 2021; Corrick *et al.*, 2020; 沈传波等, 2020)。四川盆地北缘发育多套现今处于成熟、过成熟阶段的高有机质丰度烃源岩,具有巨大的油气资源潜力。不过,该地区构造活动强烈,原始沉积盆地经历多期、不同特征的地质事件的叠加改造,构造样式复杂;油气经历多期次聚集、再运移,油气藏分布和形成规律相对复杂;广泛发现的沥青是曾经有过油气运聚成藏过程的证据。复杂的构造、沥青的较高成熟度使盆地模拟、生物标志化合物等建立油气成藏史和进行油源示踪的传统方法的应用受到掣肘。近年来,原油和沥青 Re-Os (Selby and Creaser, 2005; Selby *et al.*, 2005)、伊利石 K(Ar)-Ar (Lee *et al.*, 1985)、锆石和碳酸盐矿物 U-Pb 等同位素定年方法和团簇同位素(Δ_{47})测温方法等(沈安江等, 2021)也被用于油气演化史的研究中来。

自 Selby *et al.* (2005) 最早应用以来,以多个原油或低成熟度沥青的 Re-Os 同位素组成建立等时线的方式对原油生成期和成藏期进行定年的方法已被广泛应用于全球多个含油气盆地(Lillis and Selby, 2013; Cumming *et al.*, 2014; Ge *et al.*, 2016, 2018b, 2020; 王杰等, 2016; Liu *et al.*, 2018; Scarlett *et al.*, 2019; Corrick *et al.*, 2019, 2020; Georgiev *et al.*, 2016, 2019, 2021)。随后的研究发现能够利用焦沥青的 Re-Os 体系建立原油热裂解与焦沥青和干气生成的年龄(Ge *et al.*, 2016, 2018a, 2021; Shi *et al.*, 2020; Su *et al.*, 2020)。Re-Os 研究也常常被用来探讨沥青与铅锌矿、铀矿、锑矿和金矿等无机矿床之间的成因联系(Selby *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2017; 黄少华等, 2018a, b; Ge *et al.*, 2021)。Rooney *et al.* (2012) 和 Cumming *et al.* (2014) 分别对海相和湖相烃源岩进行了热模拟生烃实验中 Re-Os 地球化学行为的研究,证明原油在其生成时会继承烃源岩的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$; 这种继承关系使 Os 同位素组成成为油源对比的工具。Re-Os 定年方法因为其在石油地质学中的应用前景引起了国内相关科研人员的关注(蔡李梅等, 2008; 沈传波等, 2011, 2015, 2019, 2020; 陈玲等, 2012; 刘文汇等, 2013; 王华建等, 2013; 蔡长娥等, 2014; 李真等, 2017; 张涛等, 2017; Li *et al.*, 2021)。

本文拟通过对四川盆地北缘元家洞灯影组四段古油藏高成熟度沥青的 Re-Os 研究来限定该区域的油气成藏史,并对沥青的烃源岩进行示踪。

1 地质背景

震旦系灯影组是四川盆地非常重要的勘探层系,川中古隆起发现了近万亿立方米储量规模的天然气。四川盆地北缘作为后备勘探接替区,灯影组具有与川中古隆起相似的古地貌及沉积环境,但勘探程度相对较低,油气成藏地质过程研究亟待进行。四川盆地北缘发育多套优质烃源岩,多处于成熟、过成熟阶段,且有众多地区发现沥青和油苗,如宁强元家洞和胡家坝、南江杨坝、旺苍正源、南郑梁山和碑坝等地区的震旦系灯影组白云岩中的沥青,广元朝天陈家坝下寒武统沥青,矿山梁构造寒武系和志留系中大型沥青脉和旺苍万家奥陶系沥青等(黄耀宗, 2010)。这些沥青和油苗表明该区曾经有大规模的油气运聚成藏过程,油气勘探潜力值得期待。但早期形成的油气藏可能遭受多次改造,因而分布复杂,成藏史研究困难。同时,由于沥青成熟度普遍较高,生物标志化合物等传统油源对比方法的应用受到了限制。因此,本文拟通过对四川盆地北缘元家洞古油藏高成熟度沥青的 Re-Os 研究来限定该区域的油气成藏史,并对沥青的烃源岩进行示踪。

元家洞古油藏位于陕西北缘,在胡家坝古油藏以西约 30km(图 1),构造上处于具有强烈褶皱-冲断构造特征的宁强前陆逆冲断褶带内。该区是四川盆地东北缘龙门山陆内复合造山带后山带的北东延伸,南邻米仓山东西向穹状背斜隆起带。宁强元家洞的沥青发现于震旦系灯影组四段白云岩的溶蚀孔洞、构造裂隙、微裂隙、层理面及缝合线中(图 2)。该区域构造活动强烈,自灯影组沉积以来,经历了 5 期构造演化阶段(何等发等, 2011, 2020; 孙东, 2011; 姜华等, 2020):①加里东旋回早期,发生桐湾 I 幕和桐湾 II 幕两期构造运动,分别导致灯二段和灯四段的抬升和剥蚀;②加里东旋回中晚期,寒武纪-奥陶纪发生了 3 次超覆沉积与 3 次隆升剥蚀,分别为兴凯运动、郁南运动和都匀运动,志留期末期的广西运动导致古隆起整体抬升剥蚀。③海西期,泥盆

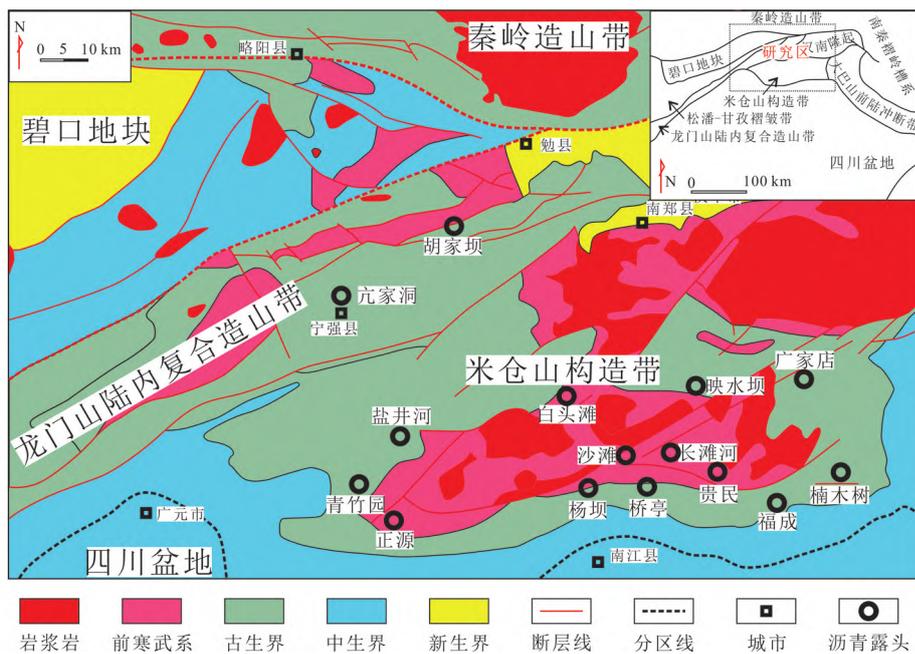


图1 研究区地质图(据孙东, 2011 修改)

Fig. 1 Geological map of the studied area (modified after Sun, 2011)

系-石炭系整体隆升剥蚀,石炭纪末受云南运动影响,进一步遭受剥蚀,二叠纪主体处于沉降沉积期;④印支-燕山期,中-晚三叠世之交的印支中期运动完成了古隆起由海相向陆相沉积的转换;⑤喜马拉雅期构造运动引起强烈褶皱抬升。

2 沥青成熟度及 Re-Os 测试

研究中采用的 14 个带有沥青的白云岩块取自陕西省汉中市宁强县亢家洞古油藏(表 1)。样品一部分磨薄片用于显微观察和沥青反射率测试,一部分在无金属接触下挑选沥青样品用于 Re-Os 测试。

在中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室,使用 3Y-Leica DMR XP 显微光度计测试沥青在油浸(折光率 $n_D^{25} = 1.518$)中的反射率(R_b , Reflectance of bitumen, 沥青成熟度指标),标样为油浸反射率(R_o , Reflectance in oil)分别是 0.904% 和 1.24% 的钇铝石榴石 YAG-08-57 和 NR1149 和 R_o 为 3.11% 的立方氧化锆,测试值取 50 ~ 75 个测量点的平均值。沥青样品的 Re-Os 同位素测试在西北大学大陆动力学国家重点实验室根据同位素稀释-负离子热表面电离质谱法进行(Yin *et al.*, 2017)。将约 0.15g 样品和适量 Re-Os 稀释剂加入卡洛斯管,以逆王水在 220℃ 下加热 48h 溶样。冷却开管,再用四氯化碳萃取 Os 后,用阴离子树脂柱纯化剩下的溶液得 Re。四氯化碳中的 Os 通过 HBr 溶液反萃取、微蒸馏进一步纯化。纯化后的 Re 和 Os 点在 Pt 带上,分别在静态和跳峰模式下用 TIMS 的 Faraday 杯和 SEM 杯接收测量同位素组成。

沥青成熟度和 Re-Os 测试最终结果如表 1。亢家洞古油藏沥青均具有较高成熟度,沥青反射率(R_b)总体在 1.36 ~ 2.46 之间,平均值为 1.79;Re 含量为 $0.2 \times 10^{-9} \sim 522.1 \times 10^{-9}$,Os 含量为 $213 \times 10^{-12} \sim 7455 \times 10^{-12}$,样品 Re 和 Os 含量较高。沥青样品 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 与 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 分别在 5 ~ 1600 和 2.66 ~ 4.33 的范围内,比值范围较大,放射性成因 Os 含量高(Selby *et al.*, 2007)。实验过程中的空白值 Re 为 $6.56 \pm 1.9 (2\sigma)$ pg 和 Os 为 $80 \pm 20 (2\sigma)$ fg, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 为 $0.23 \pm 0.13 (2\sigma)$ 。实验前后时间段实验室空白值 Re 为 $11 \pm 11 (1\text{SD}, n = 11)$ pg 和 Os 为 $190 \pm 80 (1\text{SD}, n = 4)$ fg。

3 讨论

3.1 亢家洞沥青 Re-Os 定年

除广元矿山梁和朝天泥盆系、二叠系的烃源岩处于成熟阶段之外,四川盆地北缘大部分地区的烃源岩都处于过成熟阶段(胡国艺等, 2021)。在宁强的临县南江,王东和王国芝(2011)研究认为在中寒武世-晚寒武世灯一段藻白云岩有机质成熟生油,但油气生成和保存条件差;寒武纪末-奥陶纪,寒武系烃源岩开始第一次生排过程,一直持续到中志留世晚期;随后加里东运动中的抬升可能导致古油藏遭受破坏;地层在二叠纪快速下沉,下寒武统烃源岩进入生烃高峰期,灯影组中第二次聚集来自下寒武统的油气;随着灯影组的继续深埋,液态烃的热裂解贯穿了整个三叠纪,最终转化成焦沥青和干气;地层在侏罗纪继续深埋,至早白垩世抬升持续至今,灯影组及其作为油气运移证据的沥青出露地表(图 3)。

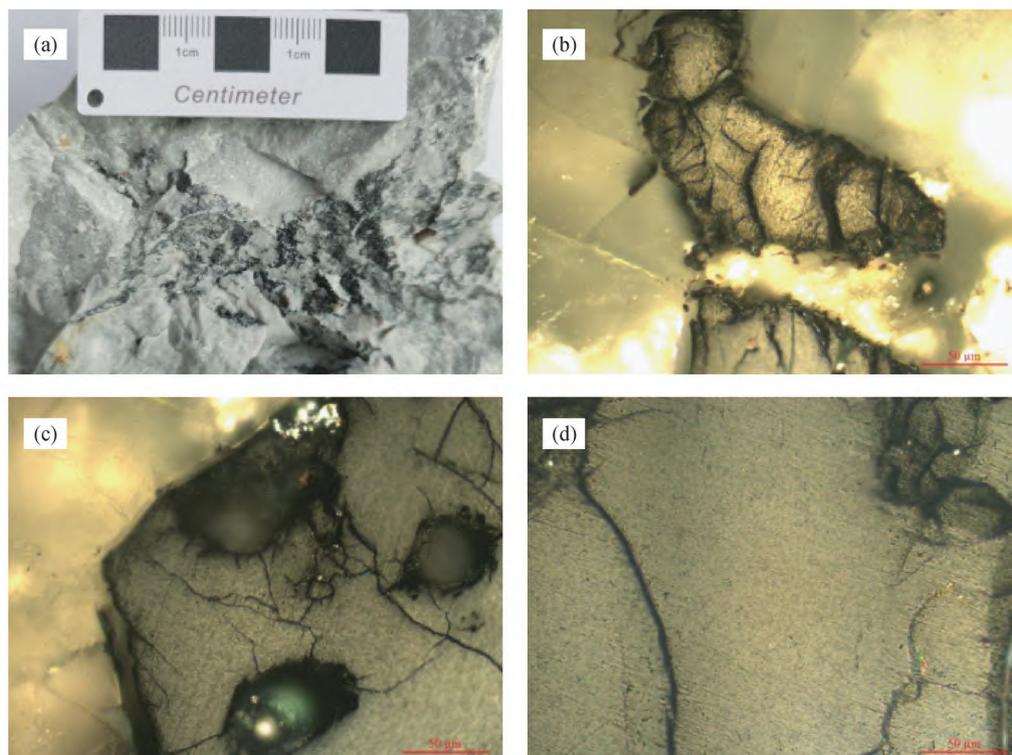


图2 宁强亢家洞古油藏灯影组白云岩储层孔隙沥青赋存形态

(a)肉眼可见大块沥青充填于灯影组四段白云岩孔隙中;(b)灯影组四段“沥青白云岩”样品白云岩孔隙中充填的沥青,沥青反射率(R_b)为1.6%;(c)灯影组四段“灯四云岩11”样品中孔隙中充填的沥青, $R_b = 1.7%$,其孔隙又被后期热液充填方解石;(d)灯影组四段“灯四云岩4”样品中孔隙中充填的大块沥青, $R_b = 1.9%$

Fig. 2 The pore-filling bitumen in the dolomite reservoir of the Dengying Formation, Kangjiadong paleo-reservoir, Ningqiang

(a) visible bitumen filling the vugs and fractures of the Member 4 dolomites of the Dengying Fm.; (b) micrograph of pore-filling bitumen of the “bitumen dolomite” sample from the Member 4, Dengying Fm. with bitumen reflectance (R_b) of 1.6%; (c) micrograph of pore-filling bitumen of the “Deng 4 dolomite 11” sample from the Member 4, Dengying Fm. with bitumen reflectance (R_b) of 1.7%. The pores of the bitumen have also been filled with calcites by later hydrothermal fluids; (d) micrograph of pore-filling bitumen block of the “Deng 4 dolomite 4” sample from the Member 4, Dengying Fm. with bitumen reflectance (R_b) of 1.9%

表1 亢家洞沥青 Re-Os 分析数据

Table 1 The Re-Os data synopsis of the Kangjiadong bitumen

样品号	样品名	R_b	$Re(\times 10^{-9})$	2σ	$Os(\times 10^{-12})$	2σ	$^{187}Re/^{188}Os$	2σ	$^{187}Os/^{188}Os$	2σ	rho	$^{187}Os/^{188}Os(263Ma)$
T210722	灯四云岩 2	1.92	87.4	0.4	2510	5	233	1	3.11	0.01	0.28	2.09
T210723	灯四云岩 3	1.90	148.4	1.2	4986	21	200	2	3.17	0.01	0.18	2.29
T210724	灯四云岩 4	1.89	58.5	0.3	3517	6	120	1	3.89	0.01	0.23	3.37
T210725	灯四云岩 5	1.56	122.0	0.7	2420	25	323	4	2.66	0.03	0.50	1.24
T210726	灯四云岩 6	1.54	50.6	0.4	5382	18	62	1	3.01	0.01	0.12	2.74
T210727	灯四云岩 8	2.46	350.3	2.0	7455	38	350	3	4.33	0.01	0.17	2.79
T210728	灯四云岩 10	1.72	117.8	0.6	4478	22	177	1	3.14	0.01	0.28	2.37
T210729	灯四云岩 11	1.68	145.0	0.7	5012	30	192	1	3.04	0.01	0.26	2.19
T210730	灯四云岩 12	2.09	413.4	1.5	1826	2	1598	6	3.69	0.01	0.37	-3.32
T210731	沥青白云岩灯四	1.76	201.4	0.9	1745	7	751	5	2.82	0.01	0.29	-0.48
T210732	沥青白云岩灯四段	—	136.1	0.7	1544	7	610	4	3.48	0.02	0.39	0.80
T210733	灯四洞中	—	0.21	0.02	269	1	5	1	2.78	0.01	0.02	2.76
T210735	沥青云岩	1.36	522.1	2.0	2587	7	1324	6	2.91	0.01	0.29	-2.91
T210736	沥青白云岩	1.57	131.1	0.5	1591	5	535	3	2.81	0.01	0.31	0.46

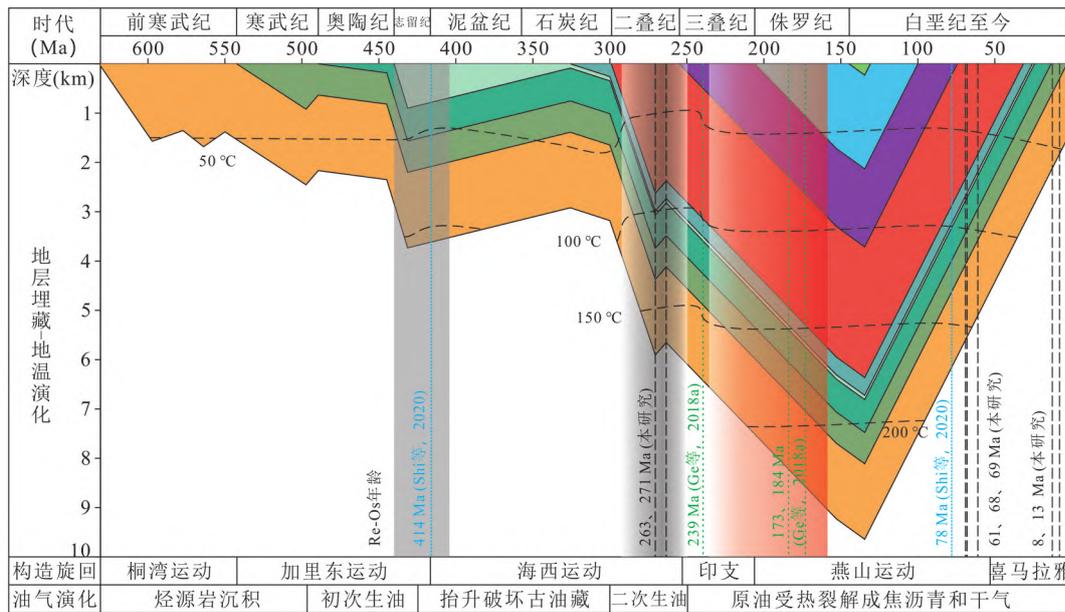


图3 宁强亢家洞古油藏演化史(据郭旭升等,2020;王东和王国芝,2011 修改)

其中,239Ma,184Ma 和 173Ma 的 Re-Os 年引自 Ge *et al.* (2018a);414Ma 和 78Ma 的 Re-Os 年龄引自 Shi *et al.* (2020)

Fig. 3 The schematic evolution history of the Kangjiadong paleo-reservoir, Ningqiang (modified after Guo *et al.*, 2020; Wang and Wang, 2021)

Data sources: The Re-Os ages of 239Ma, 184Ma and 173Ma from Ge *et al.* (2018a); and the Re-Os ages of 414Ma and 78Ma from Shi *et al.* (2020)

郭旭升等(2020)认为宁强胡家坝地区筇竹寺组烃源岩在晚志留世(约420Ma)进入初期生油阶段;志留纪末在加里东运动影响下开始抬升,泥盆纪、石炭纪生油停滞;二叠纪区域整体沉降,在二叠纪末(260~250Ma)筇竹寺组烃源岩进入生油高峰,此时油气侧向运移至灯影组储层中形成古油藏;在中三叠世(247~237Ma)烃源岩有机质演化进入高成熟、生湿气阶段,晚三叠世-早侏罗世(237~174Ma)古油藏中原油裂解;晚白垩世至今(100~0Ma),米仓山隆起构造抬升剥蚀使得古油藏遭到破坏。因此,亢家洞灯影组可能经历过晚志留世、二叠纪末-中三叠世两期油气充注成藏,其油气可能遭受三次改造:晚三叠世-早侏罗世的原油裂解可以形成高成熟度沥青,志留纪末和晚白垩世至今的构造抬升都可能使油气藏遭受轻烃散失、氧化和生物降解等作用形成沥青(图3)。近期,川中古隆起白云石矿物激光原位 U-Pb 同位素精确测年和团簇同位素(Δ_{47})测温方法结果表明灯影组经历了志留纪末(约482~468Ma)的石油聚集、二叠纪末-早三叠世(约250Ma)的石油聚集、燕山-喜马拉雅期(约115Ma和41Ma)天然气聚集三个成藏期(沈安江等,2021)。作为 Re 和 Os 主要载体的沥青质(Selby *et al.*, 2007),其主要的生成阶段应为二叠纪末(260~250Ma)的生油高峰阶段,晚志留世的初期生油和中三叠世及以后的高成熟阶段生成的沥青质量可能较少;可能在抬升过程中发生的轻烃散失和生物降解对沥青质及 Re-Os 体系影响有限,而热裂解可能重置 Re-Os 时钟(Lillis and Selby, 2013; Ge *et al.*, 2016)、氧化可能

导致 Re 和 Os 的流失(Peucker-Ehrenbrink and Hannigan, 2000; Jaffe *et al.*, 2002)。

Re-Os 等时线定年要求各样品在要定年的地质过程中达到 Os 同位素组成($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$)的均一、形成足够大的 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 范围(以使样品的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 随时间增长而显著不同),并且 Re-Os 体系在地质过程结束后保持封闭(Mahdoui *et al.*, 2013)。利用 IsoplotR (Vermeesch, 2018) 建立 Re-Os 等时线,亢家洞样品整体上给出了 $5.7 \pm 16.1\text{Ma}$ 的年龄(图4、表2),但样品点较为分散,该年龄可能不具备地质意义。造成亢家洞沥青样品点整体上未呈现良好的线性说明它们可能并不满足 Re-Os 等时线定年的条件,样品可能不是在同一地质过程中形成、不具有相同的初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 或样品的 Re-Os 体系不封闭。

首先,亢家洞古油藏的沥青可能来源于不同的烃源岩。临近的胡家坝古油藏灯影组四段中部储层沥青的烃源岩可能是灯影三段泥岩,而顶部沥青则可能来自筇竹寺组泥岩(郭旭升等,2020)。不同烃源岩之间的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 范围和演化史有可能不同,原油及沥青因此可能会有不同的初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 。此外,来自不同烃源岩的沥青样品之间可能具有不同的生油、演化历史,即它们可能不是同一事件中形成的。因此,来自不同烃源岩的沥青样品不适宜构造同一条等时线进行定年。具有混合烃源岩的沥青样品则 Re-Os 体系更加复杂,也难以满足 Re-Os 等时线定年的条件。其次,同一套烃源岩多期生成的原油也不满足等时线定年条件,不应该用于构建同

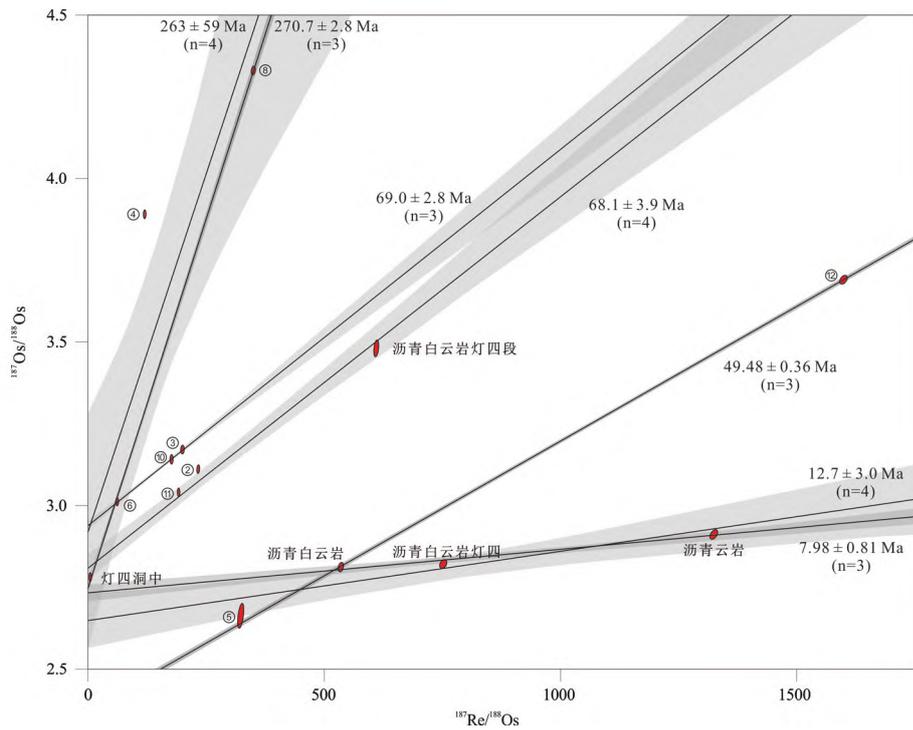


图4 宁强元家洞古油藏沥青样品在¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os-¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 相关图上的分布
样品点较分散,总体上呈3个趋势,其中4个样品限定了约263Ma的年龄

Fig. 4 The bitumen samples of the Kangjiadong paleo-reservoir, Ningqiang on the ¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os vs. ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os space
The samples are scattered while showing three general trends with one of which define ages of ca. 263Ma

表2 元家洞沥青不同样品组合 Re-Os 等时线年龄及其可能的地质意义

Table 2 The Re-Os isochron ages of different subsets of the Kangjiadong bitumen samples and their possible geological implications

趋势	样品数	样品	年龄 (Ma)	对应初始 ¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os	说明
总趋势	14	所有样品	6 ± 16	3.16 ± 0.17	样品点较分散,可能与样品的形成期次不同、初始 ¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os非均质性、风化改造等因素有关.有3个明显趋势,可尝试按趋势分组做等时线.由于 ¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os较高(2.66~4.33),该沥青极有可能具有古老烃源岩的烃源岩(古生代或更老).同时,其Re和Os含量也较高,说明烃源岩可能为海相烃源岩
趋势1	4	灯四洞中、灯四云岩4、6、8	263 ± 59	2.91 ± 0.19	两组年龄接近,且为所有年龄中最古老的;根据埋藏史(图3),该年龄可能指示生油高峰或者沥青形成的年龄
	3	灯四洞中、灯四云岩6、8	270.7 ± 2.8	2.74 ± 0.01	
	3	灯四云岩6、10、3	69.0 ± 2.8	2.94 ± 0.01	两组样品等时线平行,年龄基本一致.可能代表形成于同一时代,但初始 ¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os稍有差别的两组沥青的形成年龄.所有样品一起建立的等时线定义了近似的年龄,但误差升高,反映初始 ¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os的非均质性
趋势2	4	灯四洞中、灯四云岩2、11、 沥青白云岩灯四段	68.1 ± 3.9	2.81 ± 0.02	两组样品等时线平行,年龄基本一致.可能代表形成于同一时代,但初始 ¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os稍有差别的两组沥青的形成年龄.所有样品一起建立的等时线定义了近似的年龄,但误差升高,反映初始 ¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os的非均质性
	7	以上趋势2所有样品	61.2 ± 8.4	2.89 ± 0.04	
趋势3	3	沥青白云岩、沥青白云岩灯四、 沥青云岩	7.98 ± 0.81	2.73 ± 0.01	可能代表在抬升过程中地温降低、沥青 Re-Os 体系的封闭时间
	4	灯四云岩5、沥青白云岩、 沥青白云岩灯四、沥青云岩	12.7 ± 3.0	2.65 ± 0.04	可能代表在抬升过程中地温降低、沥青 Re-Os 体系的封闭时间

一条等时线(Ge *et al.*, 2018b)。虽然沅家洞油气成藏可能以二叠纪末生油高峰阶段为主,但晚志留世的初期生油的叠加可能使沅家洞古油气藏的 Re-Os 体系变得复杂。再次,沥青在其形成中可能未达到初始¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 均一。郭旭升等(2020)发现胡家坝古油藏中的沥青有与安哥拉 Kwanza 盆地的一个近海气藏类似的特征,即在古油藏内部垂向上沥青的丰度程向下减小的趋势。该安哥拉气藏中充满大洋张开背景下的岩浆活动来源的二氧化碳,沥青被认为是在 CO₂ 先在圈闭顶部聚集、再向下充注的过程中从原油中沉淀出来并热裂解形成的;沥青之间具有¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 差异,可以根据沥青质逐步沉淀的性质解释(Mahdaoui *et al.*, 2013; DiMarzio *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2019)。而胡家坝古油气藏沥青的形成可能是受埋深地温梯度和热流造成的热裂解(郭旭升等, 2020),沅家洞古油气藏中的沥青可能也是在相似的地质过程中形成。不过,该过程中 Re 和 Os 的同位素平衡的机制及空间尺度都不清楚,但是存在¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 不能在沅家洞古油藏内或本研究取样范围内达到均一的可能性。最后,构造抬升阶段可能的风化、氧化作用可能会破坏沥青的 Re-Os 体系、影响 Re-Os 定年:对含有机质沉积岩的研究表明,风化可以导致沉积岩的 Re 和 Os 流失(Peucker-Ehrenbrink and Hannigan, 2000; Jaffe *et al.*, 2002)。

不过,沅家洞沥青样品在¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os-¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 相关图上明显有三个趋势,分别限定了约 260Ma、60~70Ma 和 8~13Ma 三个年龄(图 4、表 2)。其中,约 260Ma 的 Re-Os 年龄与指示油气充注的川中古隆起粗晶白云石矿物激光原位 U-Pb 同位素精确测年的 248 ± 27Ma、246.3 ± 1.5Ma(沈安江等, 2021)接近。沅家洞高成熟度沥青 Re-Os 年龄似乎与原油和低成熟度沥青一样指示区域内烃源岩的主生烃期、原油生成期(王杰等, 2016; Ge *et al.*, 2018b, 2020; Liu *et al.*, 2018; Shi *et al.*, 2020),而非晚三叠世-早侏罗世的液态烃热裂解期(图 3)。类似地,Shi *et al.* (2020)中被认为指示原油生成期的 Re-Os 年龄(414 ± 44Ma)也是由四川盆地中部灯影组具有较高成熟度的沥青样品建立的等时线(图 3)。这说明(沅家洞)焦沥青在其形成过程中可能完整地继承了原油的 Re-Os 同位素体系,没有发生 Re-Os 时钟的重置。不过,在前人研究中,高成熟度沥青的 Re-Os 年龄一般被认为指示的是原油热裂解和焦沥青与干气生成的年龄(Ge *et al.*, 2016, 2018a, 2021; Shi *et al.*, 2020; Su *et al.*, 2020),原油的 Re-Os 体系应在热裂解过程中受到破坏并且 Re-Os 时钟重置,即形成的焦沥青具有均一的¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 同时具有一定范围的不均一的¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os。特别地,Ge *et al.* (2018a)对与本研究沅家洞古油藏地理上相距不远的米仓山酒冷子、楠木树、马元、朱家坝、孔溪沟、汇滩、杨坝等地区焦沥青的 Re-Os 研究给出了 239 ± 150Ma ($n = 11$; MSWD = 398)的 Re-Os 年龄,作者认为是原油热裂解年龄(图 3)。Ge *et al.* (2016)认为焦沥青的 Re-Os 体系与磷灰石裂变径迹有近似的封闭温度,即 120~60℃。本研究中 60~70Ma 和 8~13Ma 的 Re-

Os 年龄与四川盆地中部焦沥青约 78Ma 的 Re-Os 年龄(Shi *et al.*, 2020)处于喜马拉雅期构造运动抬升、灯影组地温持续降低的后期,可能指示在原油在受热裂解形成焦沥青过程的末段中焦沥青 Re-Os 体系最后封闭的时刻。含油气系统中有机质(原油和沥青)的 Re-Os 时钟重置机制和 Re-Os 地球化学行为仍需进一步研究。

3.2 Os 同位素组成示踪烃源岩

四川盆地北缘烃源岩发育层数较多,有下震旦统陡山沱组、上震旦统灯三段、下寒武统筇竹寺组、下志留统龙马溪组、中泥盆统、中二叠统茅口组、上二叠统龙潭组/吴家坪组和大隆组等多套海相烃源岩(胡国艺等, 2021)。已有利用生物标志化合物和有机碳同位素等指标示踪沥青烃源岩的研究表明上覆寒武系筇竹寺组、震旦系灯影组三段及陡山沱组可能是灯影组四段油气的主要烃源岩(戴金星, 2003; 黄耀宗, 2010; 魏国齐等, 2015; 吴伟等, 2016; 杨跃明等, 2016; 梁霄, 2020; 郭旭升等, 2020)。

黄耀宗(2010)认为米仓山隆起周缘及宁强沅家洞的震旦系沥青来自于寒武系筇竹寺组烃源岩,而与上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组烃源岩在生物标志化合物特征上明显不同;可能整个米仓山隆起的震旦系沥青与宁强震旦系沥青都是同一生油源所致,该片区都同属于一个生烃中心。郭旭升等(2020)通过生物标志化合物及有机碳同位素分析认为,与沅家洞古油藏紧邻的胡家坝灯影组古油藏油气主要来自于侧向的优质筇竹寺组烃源岩,不排除灯影组三段泥质烃源岩供烃的可能。其中,灯四段中部储层沥青与灯三段泥岩有可对比性,顶部沥青与筇竹寺组泥岩有可对比性。梁霄(2020)认为整个川西坳陷北段不同层系不同相态古油藏可划归于一个受早期天井山古隆起控制的完整古油藏系统,宁强胡家坝、南江杨坝灯影组储层沥青都来自于下寒武统筇竹寺组烃源岩。张少妮(2013)认为马元铅锌矿区灯影组沥青来自于下寒武统筇竹寺组(郭家坝组)而非震旦系灯影组。

四川盆地北缘烃源岩有机质以及古油藏沥青大部分都具有高成熟度,而不同类型有机质在高成熟度阶段生物标志化合物特征趋同,给油源对比增加了难度。根据生油时原油对烃源岩 Os 同位素组成的继承关系,一般可以利用生油时烃源岩和原油二者的 Os 同位素组成的对比来给原油示踪烃源岩(Rooney *et al.*, 2012; Cumming *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2018; Shi *et al.*, 2020)。通过对比威远和川中地区灯影组中限定了生油年龄的沥青和潜在烃源岩在生油期的 Os 同位素组成,Shi *et al.* (2020)认为该地区的沥青的烃源岩是筇竹寺组而非麦地坪组。Shi *et al.* (2020)研究中的筇竹寺组、麦地坪组和灯影组三段烃源岩在 263Ma 时的¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 分别在 1.34~2.86、1.14~1.22 和 0.91~1.85 的范围内(表 3)。同时段,14 个沅家洞沥青样品中有 3 个¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 为负值,若非风化,则表明沥青的年龄远小于 263Ma(表 2 趋势 3);有 3 个样品¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 低于 2(0.46、0.80 和 1.24)的样

表3 四川盆地筇竹寺组、麦地坪组和灯影组三段烃源岩(由 Shi *et al.*, 2020 数据计算)与元家洞沥青在 263Ma 时的 Os 同位素组成关键统计数据对比

Table 3 Comparison of the key statistical data of the Os isotope composition at 263Ma of the Kangjiadong bitumen and the source rocks of the Qiongzhusi Formation, Maidiping Formation and Member 3 of the Dengying Formation (data from Shi *et al.*, 2020) of the Sichuan Basin

¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os (263Ma)	样品数	最小值	中值	最大值	平均值	标准偏差
筇竹寺组	12	1.34	1.48	2.86	1.82	0.54
麦地坪组	6	1.14	1.16	1.22	1.17	0.03
灯影组三段	6	0.91	0.98	1.85	1.15	0.36
元家洞沥青	11	0.46	2.29	3.37	2.10	0.90

品,若非风化,则其中 1.20 的样品有可能来自于麦地坪组和灯影组三段烃源岩;有 8 个样品¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 在 2.09 ~ 3.37 之间,与筇竹寺组烃源岩样品吻合,均高于同期麦地坪组和灯影组三段测试样品值,因此很可能来自于筇竹寺组烃源岩。

根据烃源岩展布特征及有机地球化学综合指标,下寒武统筇竹寺组是四川盆地北缘的一套优质烃源岩;厚度较大,在 100 ~ 300m 之间;有机质类型好,以 I 型为主;有机质丰度高,平均总有机碳含量(TOC)可达 7%;成熟度高,50% 以上样品的(等效)镜质体反射率 R_o 超过 2.0% (黄耀宗, 2010; 刘树根等, 2018; 梁霄, 2020; 胡国艺等, 2021)。

4 结论

宁强县元家洞古油藏的高成熟度沥青构建了约 260Ma、60 ~ 70Ma 和 8 ~ 13Ma 三个 Re-Os 等时线年龄,前者与区域内盆地模拟等手段限定的寒武系烃源岩的生烃高峰期相吻合,后者可能指示焦沥青形成过程中 Re-Os 体系最后封闭的时刻。同时,在 263Ma 时元家洞大部分沥青与筇竹寺组烃源岩样品的¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 分别处于 2.09 ~ 3.37 和 1.34 ~ 2.86 的范围内,两者¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 较一致,筇竹寺组有较大可能是元家洞古油藏沥青的主要烃源岩。相比之下,灯影组三段和麦地坪组烃源岩同时期的¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 比前两者要低,可能不是元家洞沥青的主要烃源岩。

致谢 感谢李腾飞博士、戴梦宁博士和赵冰爽博士为本研究实验过程中提供的帮助。感谢王长明教授和两位评审人给予的建设性意见。

References

Cai CE, Qiu NS and Xu SH. 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 LM, Chen HH, Li ZQ and Wu Y. 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)
- Chen L, Zhang W and She ZB. 2012. Methods for dating of hydrocarbon accumulation. *Xinjiang Petroleum Geology*, 33(5): 550 – 553 (in Chinese with English abstract)
- Corrick AJ, Selby D, Mckirdy DM, Hall PA, Gong S, Trefry C and Ross AS. 2019. Remotely constraining the temporal evolution of offshore oil systems. *Scientific Reports*, 9(1): 1327
- Corrick AJ, Hall PA, Gong S, Mckirdy DM, Selby D, Trefry C and Ross AS. 2020. A second type of highly asphaltic crude oil seepage stranded on the South Australian coastline. *Marine and Petroleum Geology*, 112: 104062
- Cumming VM, Selby D, Lillis PG and Lewan MD. 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
- Dai JX. 2003. Pool-forming periods and gas sources of Weiyuan Gasfield. *Petroleum Geology and Experiment*, 25(5): 473 – 480 (in Chinese with English abstract)
- Dimarzio JM, Georgiev SV, Stein HJ and Hannah JL. 2018. Residency of rhenium and osmium in a heavy crude oil. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 220: 180 – 200
- Ge X, Shen CB, Selby D, Deng DF and Mei LF. 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
- Ge X, Shen CB, Selby D, Wang GZ, Yang Z, Gong YJ and Xiong SF. 2018a. Neoproterozoic-Cambrian petroleum system evolution of the Micang Shan uplift, northern Sichuan Basin, China: Insights from pyrobitumen rhenium – osmium geochronology and apatite fission-track analysis. *AAPG Bulletin*, 102(8): 1429 – 1453
- Ge X, Shen CB, Selby D, Wang J, Ma LB, Ruan XY, Hu SZ and Mei LF. 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
- Ge X, Shen CB, Selby D, Feely M and Zhu GY. 2020. Petroleum evolution within the Tarim Basin, northwestern China: Insights from organic geochemistry, fluid inclusions, and Re-Os geochronology of the Halahatang oil field. *AAPG Bulletin*, 104(2): 329 – 355
- Ge X, Selby D, Liu JJ, Chen YZ, Cheng GF and Shen CB. 2021. Genetic relationship between hydrocarbon system evolution and Carlin-type gold mineralization: Insights from Re-Os pyrobitumen and pyrite geochronology in the Nanpanjiang Basin, South China. *Chemical Geology*, 559: 119953
- Georgiev SV, Stein HJ, Hannah JL, Galimberti R, Nali M, Yang G and Zimmerman A. 2016. Re-Os dating of maltenes and asphaltenes within single samples of crude oil. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 179: 53 – 75
- Georgiev SV, Stein HJ, Hannah JL, Yang G, Markey RJ, Dons CE, Pedersen JH and Di Primio R. 2019. Comprehensive evolution of a petroleum system in absolute time: The example of Brynhild, Norwegian North Sea. *Chemical Geology*, 522: 260 – 282
- Georgiev SV, Stein HJ, Hannah JL and Di Primio R. 2021. Timing and origin of multiple petroleum charges in the Solveig oil field, Norwegian North Sea: A rhenium-osmium isotopic study. *AAPG Bulletin*, 105(1): 109 – 134
- Guo XS, Hu DF, Huang RC, Duan JB, Jiang ZL and Zhu X. 2020. Feature of paleo-oil pools in the Sinian Dengying Formation, northeastern Sichuan Basin, and its significance to exploration. *Oil & Gas Geology*, 41(4): 673 – 683 (in Chinese with English abstract)
- He DF, Li DS, Zhang GW, Zhao LZ, Fan C, Lu RQ and Wen Z. 2011. Formation and evolution of multi-cycle superposed Sichuan Basin,

- China. Chinese Journal of Geology, 46(3): 589–606 (in Chinese with English abstract)
- He DF, Li YQ, Hang HY, Zhang J, Lu RQ and Li D. 2020. Formation, Evolution and Hydrocarbon Accumulation of Multicycle Superimposed Basins in Sichuan. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Hu GY, He F, Mi JK, Yuan YL and Guo JH. 2021. The geochemical characteristics, distribution patterns, and gas exploration potential of marine source rocks in Northwest Sichuan Basin. Natural Gas Geoscience, 32(3): 319–333 (in Chinese with English abstract)
- Huang SH, Qin MK, Selby D, Liu YS, Xu Q, He ZB, Liu ZY and Liu JJ. 2018a. Geochemistry characteristics and Re-Os isotopic dating of Jurassic oil sands in the northwestern margin of the Junggar Basin. Earth Science Frontiers, 25(2): 254–266 (in Chinese with English abstract)
- Huang SH, Qin MK, Xu Q, He ZB, Liu ZY and Selby D. 2018b. Superimposed uranium metallogenesis between deep hydrocarbon fluid and supergene oxidation fluid in the northwestern margin of Junggar Basin. Acta Geologica Sinica, 92(7): 1493–1506 (in Chinese with English abstract)
- Huang YZ. 2010. Characteristics of Lower Paleozoic source rocks in Micangshan Uplift Area, Sichuan Basin. Master Degree Thesis. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology (in Chinese with English abstract)
- Jaffe LA, Peucker-Ehrenbrink B and Petsch ST. 2002. Mobility of rhenium, platinum group elements and organic carbon during black shale weathering. Earth and Planetary Science Letters, 198(3–4): 339–353
- Jiang H, Li WZ, Huang SP, Jiang QC, Zhai XF, Gu ZD, Xie WR and Wang RJ. 2022. Process and model of hydrocarbon accumulation spanning major tectonic phases of Sinian Dengying Formation in the Sichuan Basin. Natural Gas Industry, 42(5): 11–23
- Lee M, Aronson JL and Savin SM. 1985. K/Ar dating of time of gas emplacement in Rotliegendes sandstone, Netherlands. AAPG Bulletin, 69(9): 1381–1385
- Li SJ, Wang XC, Wilde SA, Chu ZY, Li CF, He S, Liu KY, Ma XZ and Zhang YX. 2021. Revisiting rhenium-osmium isotopic investigations of petroleum systems: From geochemical behaviours to geological interpretations. Journal of Earth Science, 32(5): 1226–1249
- Li Z, Wang XC, Liu KY, Svetlana T, Yang XM, Ma XZ and Sun HT. 2017. Rhenium-osmium geochronology in dating petroleum systems: Progress and challenges. Acta Petrologica Sinica, 38(3): 297–306 (in Chinese with English abstract)
- Liang X. 2020. The deep marine hydrocarbon accumulation process under complex tectonic background in the northern segment of western Sichuan depression. Ph. D. Dissertation. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology (in Chinese with English abstract)
- Lillis PG and 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
- Liu JJ, Selby D, Obermajer M and Mort A. 2018. Rhenium-osmium geochronology and oil-source correlation of the Duvernay petroleum system, Western Canada sedimentary basin: Implications for the application of the rhenium-osmium geochronometer to petroleum systems. AAPG Bulletin, 102(8): 1627–1657
- Liu JJ, Selby D, Zhou HG and Pujol M. 2019. Further evaluation of the Re-Os systematics of crude oil: Implications for Re-Os geochronology of petroleum systems. Chemical Geology, 513: 1–22
- Liu SG, Liu S, Sun W, Song JM, Ran B, Zhong Y, Ye YH, Jiang NC and Xia GD. 2018. Tectonic and sedimentary features of the northern Mianyang-Changning intracratonic sag, Sichuan, China. Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition), 45(1): 1–13 (in Chinese with English abstract)
- Liu WH, Wang J, Tao C, Hu G, Lu LF and Wang P. 2013. The geochronology of petroleum accumulation of China marine sequence. Natural Gas Geoscience, 24(2): 199–209 (in Chinese with English abstract)
- Mahdaoui F, Reisberg L, Michels R, Hauteville Y, Poirier Y and Girard JP. 2013. Effect of the progressive precipitation of petroleum asphaltenes on the Re-Os radioisotope system. Chemical Geology, 358: 90–100
- Peucker-Ehrenbrink B and Hannigan RE. 2000. Effects of black shale weathering on the mobility of rhenium and platinum group elements. Geology, 28(5): 475–478
- Rooney AD, Selby D, Lewan MD, Lillis PG and Houzay JP. 2012. Evaluating Re-Os systematics in organic-rich sedimentary rocks in response to petroleum generation using hydrous pyrolysis experiments. Geochimica et Cosmochimica Acta, 77: 275–291
- Scarlett AG, Holman AI, Georgiev SV, Stein HJ, Summons RE and Grice K. 2019. Multi-spectroscopic and elemental characterization of southern Australian asphaltites. Organic Geochemistry, 133: 77–91
- Selby D and Creaser RA. 2005. Direct radiometric dating of hydrocarbon deposits using rhenium-osmium isotopes. Science, 308(5726): 1293–1295
- Selby D, Creaser R, Dewing K and Fowler M. 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
- Selby D, Creaser RA and Fowler MG. 2007. Re-Os elemental and isotopic systematics in crude oils. Geochimica et Cosmochimica Acta, 71(2): 378–386
- Shen AJ, Zhao WZ, Hu AP, Wang H, Liang F and Wang YS. 2021. The dating and temperature measurement technologies for carbonate minerals and their application in hydrocarbon accumulation research in the paleo-uplift in central Sichuan Basin, SW China. Petroleum Exploration and Development, 48(3): 476–487 (in Chinese with English abstract)
- Shen CB, Selby D, Mei LF, Ruan XY, Hu SZ, Liu ZQ and Peng L. 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)
- Shen CB, Liu ZY, Xiao F, Hu D and Du JY. 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 CB, Ge X and Bai XJ. 2019. Re-Os geochronology constraints on the Neoproterozoic-Cambrian hydrocarbon accumulation in the Sichuan Basin. Earth Science, 44(3): 713–726 (in Chinese with English abstract)
- Shen CB, Ge X, Mei LF and Zhu GY. 2020. Re-Os Isotopic Geochronology in Petroleum Systems. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Shi CH, Cao J, Selby D, Tan XC, Luo B and Hu WX. 2020. Hydrocarbon evolution of the over-mature Sinian Dengying reservoir of the Neoproterozoic Sichuan Basin, China: Insights from Re-Os geochronology. Marine and Petroleum Geology, 122: 104726
- Su A, Chen HH, Feng YX, Zhao JX, Nguyen AD, Wang ZC and Long XP. 2020. Dating and characterizing primary gas accumulation in Precambrian dolomite reservoirs, Central Sichuan Basin, China: Insights from pyrobitumen Re-Os and dolomite U-Pb geochronology. Precambrian Research, 350: 105897
- Sun D. 2011. The structural character and Meso-Cenozoic evolution of Micang Mountain structural zone, northern Sichuan Basin, China. Ph. D. Dissertation. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology (in Chinese with English abstract)
- Vermeesch P. 2018. IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology. Geoscience Frontiers, 9(5): 1479–1493
- Wang CM, Deng J, Carranza EJM and Lai XR. 2014. Nature, diversity and temporal-spatial distributions of sediment-hosted Pb-Zn deposits in China. Ore Geology Reviews, 56: 327–351
- Wang CM, Bagas L, Lu YJ, Santosh M, Du B and McCuaig TC. 2016. Terrane boundary and spatio-temporal distribution of ore deposits in

- the Sanjiang Tethyan Orogen: Insights from zircon Hf-isotopic mapping. *Earth-Science Reviews*, 156: 39–65
- Wang CM, Deng J, Bagas L, He XY and Zhang J. 2021. Origin and classification of the Late Triassic Huaishuping gold deposit in the eastern part of the Qinling-Dabie Orogen, China: Implications for gold metallogeny. *Mineralium Deposita*, 56(4): 725–742
- Wang D and Wang GZ. 2011. Formation and evolution of high-quality dolomite reservoir in Dengying Formation of Sinian, Nanjiang Area, Sichuan. *Geoscience*, 25(4): 660–667 (in Chinese with English abstract)
- Wang HJ, Zhang SC and Wang XM. 2013. How to achieve the precise dating of hydrocarbon accumulation. *Natural Gas Geoscience*, 24(2): 210–217 (in Chinese with English abstract)
- Wang J, Tenger, Liu WH, Ma LB, Tao C, Zhou YY, Wang P and Li C. 2016. Definition of petroleum generating time for Lower Cambrian bitumen of the Kuangshanliang in the west Sichuan Basin, China: Evidence from Re-Os isotopic isochron age. *Natural Gas Geoscience*, 27(7): 1290–1298 (in Chinese with English abstract)
- Wang PP, Hu YZ, Liu L, Jiang XJ, Li C, Bartholomew CJ and Zhang GQ. 2017. Re-Os dating of bitumen from paleo-oil reservoir in the Qinglong antimony deposit, Guizhou Province, China and its geological significance. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 91(6): 2153–2163
- Wei GQ, Xie ZY, Song JR, Yang W, Wang ZH, Li J, Wang DL, Li ZS and Xie WR. 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 W, Luo B, Luo WJ and Wang WZ. 2016. Further discussion about the origin of natural gas in the Sinian of central Sichuan paleo-uplift, Sichuan Basin, China. *Natural Gas Geoscience*, 27(8): 1447–1453 (in Chinese with English abstract)
- Yang YM, Wen L, Luo B, Wang WZ and Shan SJ. 2016. Hydrocarbon accumulation of Sinian natural gas reservoirs, Leshan-Longnusi paleohigh, Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 43(2): 179–188 (in Chinese with English abstract)
- Yin L, Li J, Liu JG, Li C, Sun SL, Liang HY and Xu JF. 2017. Precise and accurate Re-Os isotope dating of organic-rich sedimentary rocks by thermal ionization mass spectrometry with an improved H₂O₂-HNO₃ digestion procedure. *International Journal of Mass Spectrometry*, 421: 263–270
- Zhang SN. 2013. The characteristics of natural bitumen and analysis of source rock of lead-zinc deposit of Deying Formation in North Sichuan basin. Master Degree Thesis. Xi'an: Changan University (in Chinese with English abstract)
- Zhang T, Ma XZ, Wang L, Huang JX and Zhao WW. 2017. Progress of rhenium-osmium isotopes in the study of dating petroleum system. *Petroleum Geology and Engineering*, 31(4): 30–34 (in Chinese with English abstract)
- 附中文参考文献**
- 蔡长娥, 邱楠生, 徐少华. 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, 吴悠. 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
- 陈玲, 张微, 余振兵. 2012. 油气成藏时间的确定方法. *新疆石油地质*, 33(5): 550–553
- 戴金星. 2003. 威远气田成藏期及气源. *石油实验地质*, 25(5): 473–480
- 郭旭升, 胡东风, 黄仁春, 段金宝, 姜智利, 朱祥. 2020. 川东北地区胡家坝震旦系灯影组古油藏特征及其油气勘探意义. *石油与天然气地质*, 41(4): 673–683
- 何登发, 李德生, 张国伟, 赵路子, 樊春, 鲁人齐, 文竹. 2011. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化. *地质科学*, 46(3): 589–606
- 何登发, 李英强, 黄涵宇, 张健, 鲁人齐, 李涤. 2020. 四川多旋回叠合盆地的形成演化与油气聚集. 北京: 科学出版社
- 胡国艺, 贺飞, 米敬奎, 袁懿琳, 郭谨豪. 2021. 川西北地区海相烃源岩地球化学特征、分布规律及天然气勘探潜力. *天然气地球科学*, 32(3): 319–333
- 黄少华, 秦明宽, Selby D, 刘银山, 许强, 何中波, 刘章月, 刘俊杰. 2018a. 准噶尔盆地西北缘超覆带侏罗系油砂地球化学特征及 Re-Os 同位素定年. *地学前缘*, 25(2): 254–266
- 黄少华, 秦明宽, 许强, 何中波, 刘章月, Selby D. 2018b. 准噶尔盆地西北缘深部烃类流体与表生氧化流体叠合铀成矿作用. *地质学报*, 92(7): 1493–1506
- 黄耀宗. 2010. 米仓山隆起下古生界烃源岩特征. 硕士学位论文. 成都: 成都理工大学
- 姜华, 李文正, 黄士鹏, 江青春, 翟秀芬, 谷志东, 谢武仁, 王瑞菊. 2022. 四川盆地震旦系灯影组跨重大构造期油气成藏过程与成藏模式. *天然气工业*, 42(5): 11–23
- 李真, 王选策, 刘可禹, Svetlana T, 杨雪梅, 马行陟, 孙海涛. 2017. 油气藏铷-锶同位素定年的进展与挑战. *石油学报*, 38(3): 297–306
- 梁霄. 2020. 川西坳陷北段复杂地质构造背景下深层海相油气成藏过程研究. 博士学位论文. 成都: 成都理工大学
- 刘树根, 刘殊, 孙玮, 宋金民, 冉波, 钟勇, 叶玥豪, 蒋能春, 夏国栋. 2018. 绵阳-长宁拉张槽北段构造-沉积特征. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 45(1): 1–13
- 刘文汇, 王杰, 陶成, 胡广, 卢龙飞, 王萍. 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
- 沈安江, 赵文智, 胡安平, 王慧, 梁峰, 王永生. 2021. 碳酸盐矿物定年和定温技术及其在川中古隆起油气成藏研究中的应用. *石油勘探与开发*, 48(3): 476–487
- 沈传波, Selby D, 梅廉夫, 阮小燕, 胡守志, 刘昭茜, 彭蕾. 2011. 油气成藏定年的 Re-Os 同位素方法应用研究. *矿物岩石地球化学通报*, 31(4): 87–93
- 沈传波, 刘泽阳, 肖凡, 胡迪, 杜嘉祎. 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
- 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
- 沈传波, 葛翔, 梅廉夫, 朱光有. 2020. 含油气系统铷-锶同位素年代学. 北京: 科学出版社
- 孙东. 2011. 米仓山构造带构造特征及中-新生代构造演化. 博士学位论文. 成都: 成都理工大学
- 王东, 王国芝. 2011. 四川南江地区灯影组白云岩优质储层的形成与演化. *现代地质*, 25(4): 660–667
- 王华建, 张水昌, 王晓梅. 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
- 王杰, 腾格尔, 刘文汇, 马亮帮, 陶成, 周圆圆, 王萍, 李超. 2016. 川西矿山梁下寒武统沥青脉油气生成时间的厘定——来自于固体沥青 Re-Os 同位素等时线年龄的证据. *天然气地球科学*, 27(7): 1290–1298
- 魏国齐, 谢增业, 宋家荣, 杨威, 王志宏, 李剑, 王东良, 李志生, 谢武仁. 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

吴伟, 罗冰, 罗文军, 王文之. 2016. 再论四川盆地川中古隆起震旦系天然气成因. 天然气地球科学, 27(8): 1447 - 1453

杨跃明, 文龙, 罗冰, 王文之, 山述娇. 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

张少妮. 2013. 四川盆地北缘灯影组铅锌矿天然沥青特征及其源岩分析. 硕士学位论文. 西安: 长安大学

张涛, 马行陟, 王伦, 黄家旋, 赵卫卫. 2017. Re-Os 同位素油气成藏定年研究进展. 石油地质与工程, 31(4): 30 - 34