

高演化地区古油藏 Re-Os 年代学与 REE 特征分析

——以南盘江盆地板街古油藏为例

谭笑林^{1,2}, 胡煜昭^{1,3}, 周亮¹, 程涌¹, 李丕优¹

1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249;

3. 云南省矿产资源预测评价工程实验室, 昆明 650093

摘要: 由于高演化地区传统有机指标受到较大影响, 在该类地区的油源对比研究中结合 REE 这一无机指标, 将增加其结果的准确性。此外, 储层沥青 Re-Os 测年作为一种定量的年代学研究手段, 测试结果代表意义一直存在争议。对南盘江盆地板街古油藏储层沥青进行了稀土元素地球化学分析和 Re-Os 测年, 并将其稀土元素配分模式与区内主力烃源岩通过灰色关联法进行了对比分析。南盘江盆地板街古油藏储层沥青中稀土总量较低, 轻重稀土分馏明显, 呈现为弱的 Ce 负异常和明显的 Eu 负异常, 表明沥青形成时处于还原环境且未经历过强烈的风化淋滤作用, 稀土配分模式属于轻稀土富集右倾模式; 其稀土元素配分模式曲线与区内泥盆系烃源岩相似, 二者具有成因关系。Re-Os 测年结果显示, 板街古油藏沥青 Re-Os 模式年龄主要分布于 $(203.6 \pm 1.1) \sim (238.5 \pm 4.2)$ Ma, 平均 (224.8 ± 3.3) Ma ($n=7$); 最后一次扰动该沥青 Re-Os 时间体系的因素是生成沥青的过程, 该模式年龄代表了板街古油藏储层沥青形成即原油裂解成气的时代。

关键词: 高演化地区; 沥青; 稀土元素; 油源对比; Re-Os 测年

中图分类号: TE122.11

文献标识码: A

Re-Os chronology and REE analysis of paleo-oil reservoir in high evolution areas:

a case study of Banjie paleo-oil reservoir, Nanpanjiang Basin

TAN Xiaolin^{1,2}, HU Yuzhao^{1,3}, ZHOU Liang¹, CHENG Yong¹, LI Piyou¹

1. Faculty of Land and Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China;

2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

3. Yunnan Mineral Resources Laboratory, Kunming, Yunnan 650093, China

Abstract: The traditional organic index can be greatly affected in the areas with high thermal evolution degree whilst combination of REE for oil-source correlation will improve the results. In addition, Re-Os dating is a quantitative method of geochronology, but the significance of the test results is quite controversial. In this paper, REE geochemical analysis and Re-Os dating of bitumen in the Banjie paleo-oil reservoir is carried out. The REE distribution pattern of bitumen was compared with that of the main source rocks in the area using the method of grey correlation. Results show that the Σ REE of bitumen in the Banjie paleo-oil reservoir is low, and the fractionation of light and heavy REEs is obvious, showing a weak negative Ce anomaly and an obvious negative Eu anomaly, which indicates that the bitumen was formed in a reducing environment and has not experienced any strong weathering or leaching. The REE distribution mode belongs to the right-leaning mode of LREE enrichment. The REE distribution pattern curve is similar to that of Devonian source rocks in this area, indicating a genetic relationship. The results of Re-Os dating show that the Re-Os model age of bitumen in the Banjie paleo-oil reservoir ranges mainly from (203.6 ± 1.1) Ma to (238.5 ± 4.2) Ma, with an average of (224.8 ± 3.3) Ma ($n=7$). The last factor which disturbed the Re-Os system of the bitumen is the process of bitumen generation. The model age represents the age of bitumen formation in the Banjie paleo-oil reservoir, when oil was cracked into gas.

收稿日期: 2021-08-04; 修订日期: 2022-07-08。

作者简介: 谭笑林 (1995—), 男, 博士研究生, 地质资源与地质工程专业。E-mail: 529374427@qq.com。

通信作者: 胡煜昭 (1964—), 男, 教授级高级工程师, 从事沉积盆地金属和油气勘查研究及地质学教学等工作。E-mail: huyuzhao155@sohu.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41672073) 资助。

Key words: area with high thermal evolution degree; bitumen; rare earth element (REE); oil source correlation; Re-Os dating

油源对比主要是利用原油的流动性和可溶性,通过分离出的各种有机地球化学指标将原油与烃源岩进行成因联系^[1-4]。而古油藏通常是指地质历史上曾经是油气藏,后经历构造活动遭受改造和破坏,油气逸散,储层中仅残留黑色沥青质,即已亡故的油气藏^[5-7]。因此,古油藏的油源对比一般通过有机包裹体和沥青的地球化学分析来进行。在南盘江盆地高演化地区的古油藏,成熟度高,含不可溶的焦沥青^[8-9]。前人通过对南盘江地区古油藏中沥青碳同位素、生物标志物、芳烃色谱等有机地球化学指标的对比分析,进行了油源对比。其中,杨惠民等^[10]对安然古油藏进行芳烃稳定分子特征峰分析,认为其是多源古油藏。赵孟军等^[11]从该区沥青及沥青灰岩中抽提可溶化合物,进行生物标志特征测试分析,结合沥青与干酪根碳同位素实测结果对比,认为该地区沥青主要源自泥盆系烃源岩,二叠系烃源岩贡献较少。LIAO等^[12]采用催化加氢热解法释放的生物标志物,分析了南盘江坳陷部分二叠系古油藏的沥青来源,认为隆林天生桥沥青主要来源于中泥盆统泥岩;册亨册阳和望谟岫赖沥青兼有中泥盆统烃源岩和二叠系烃源岩的贡献;紫云石头寨沥青主要来源于下二叠统泥灰岩,基本不存在中泥盆统的贡献。然而,油气生成、运移、储存过程中经受各种地质作用,碳同位素、生物标志等都会受到巨大的影响^[13],尤其是在高、过演化地区,随着成熟度的增加,原油、沥青和烃源岩中的常规生物标志趋于一致,碳同位素会发生明显的热演化分馏作用^[14],而稀土元素在成岩和变质作用过程中基本不分异,即使绝对质量分数发生变化,其配分模式保持不变,和源岩保持一致^[15-18]。因此,在高演化地区应用“有机”结合“无机”的方式来进行油源对比可大大增加其准确性。本次研究对板街古油藏沥青进行稀土元素测试,将其结果与研究区二叠系、泥盆系等主力烃源岩稀土元素特征通过灰色关联法进行分析,从而进行油源对比。

在过去,石油工作者们对于油气藏的年代学研究主要通过“圈闭形成期法”、“烃源岩主排烃期法”、“油藏饱和压力法”、“生排烃史法”、“油气水界面追溯法”等间接手段进行定性或半定量分析^[19-22]。Re-Os同位素定年作为一种前沿的年代学研究方法,其优势主要在于能对烃源岩、原油、沥青质等油气藏相关样品进行直接测试分析,进而进

行年代学定量研究,近年来广泛被应用于油气藏、古油藏的年代学研究之中^[23]。SELBY等^[24]对世界各地12个石油样品进行了分析,发现大部分原油样品中有超过90%的Re、Os元素都赋存于沥青质之中,也就是说沥青质中的Re-Os体系几乎可以代表整个原油中的Re-Os同位素组成。要通过Re-Os测年来对油气藏进行年代学研究,首选的研究材料应该是沥青质或含沥青质较多的石油产物。本次研究通过对板街古油藏固体沥青进行Re-Os测年,以期对板街古油藏的油气演化提供年代学约束,并进一步讨论其代表意义。

1 地质概况

板街古油藏所在的南盘江坳陷(图1)为南盘江盆地的一个一级构造单元,地处华南褶皱系西缘,北与扬子准地台毗邻,以紫云—岫都断裂西南缘、弥勒—师宗断裂东南缘以及富宁—广南—丘北断裂以北为边界,坳陷经历过数期复杂构造变形,是一个兼具华南褶皱系和扬子准地台性质的残留构造盆地^[25-28]。南盘江坳陷内以北西向断裂带为主,在海侵阶段受到同沉积断裂控制而呈现为浅水台地和盆地相间的沉积格局。断裂带的拉张性和平行排列则使深水盆地中发育了不同大小、规模的孤立碳酸盐台地。坳陷内主要发育有泥盆系、石炭系、二叠系以及三叠系^[29-30]。南盘江盆地经历了晋宁—加里东(地块增生)、海西印支早期(弧后裂陷盆地演化)、印支中晚期(弧后前陆盆地发育)、印支晚期—喜马拉雅期构造运动(逆冲、褶皱、抬升、改造),主要形成了中下泥盆统、石炭系、二叠系以及中下三叠统等几套烃源岩^[10,27,31]。赵孟军等^[11]认为该区主力烃源岩为中下泥盆统,而南盘江坳陷内的主力烃源岩则是上泥盆统、下石炭统和上二叠统,均已达到过成熟演化阶段。坳陷内有利储层为泥盆系、石炭系和二叠系,主要分布于区内西北部碳酸盐台地边缘和孤立台地周围的礁滩环境。坳陷内盖层主要有3套:泥盆系的碳质泥岩、下石炭统的泥质岩夹粉砂岩和三叠系砂泥岩^[18,30,32-33]。总的来说,南盘江坳陷可划分为2个油气系统,即上古生界和三叠系油气系统,二者均已被破坏,具有“自生自储”和“多源、多期成藏与破坏”的特征^[28,34]。

板街古油藏位于南盘江盆地中部,南盘江坳陷北缘的册亨一带,发育在受纳板穹隆(图2)构造控

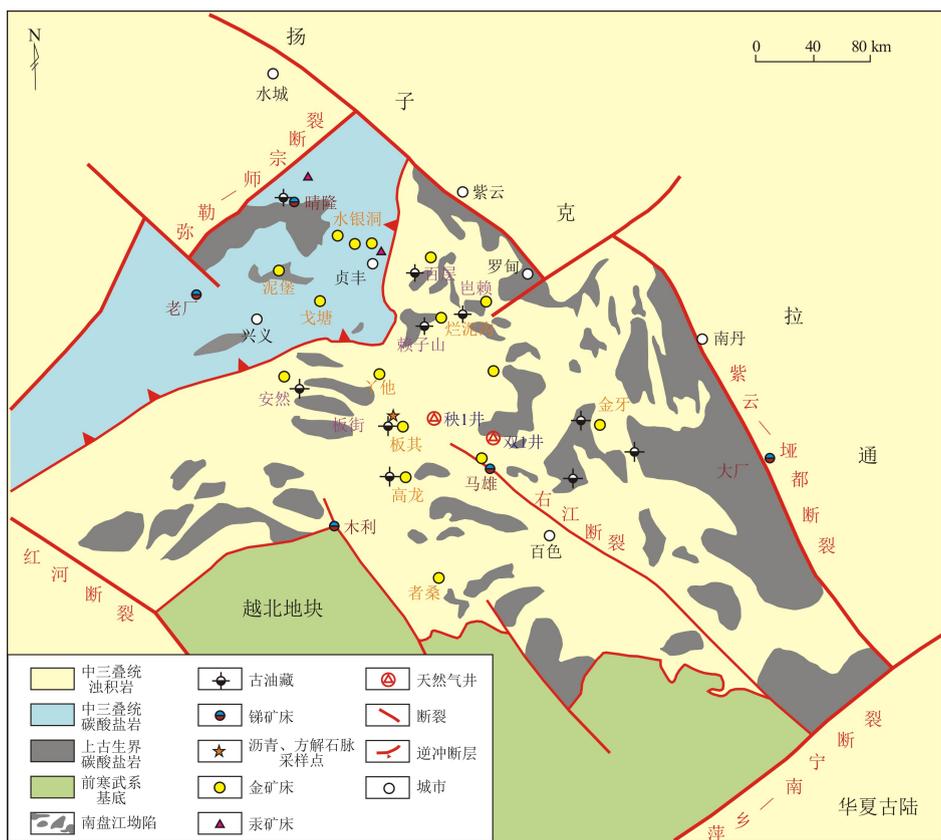


图 1 南盘江盆地地质简图
据 CHENG 等^[35] 改编。

Fig.1 Geological sketch map of Nanpanjiang Basin

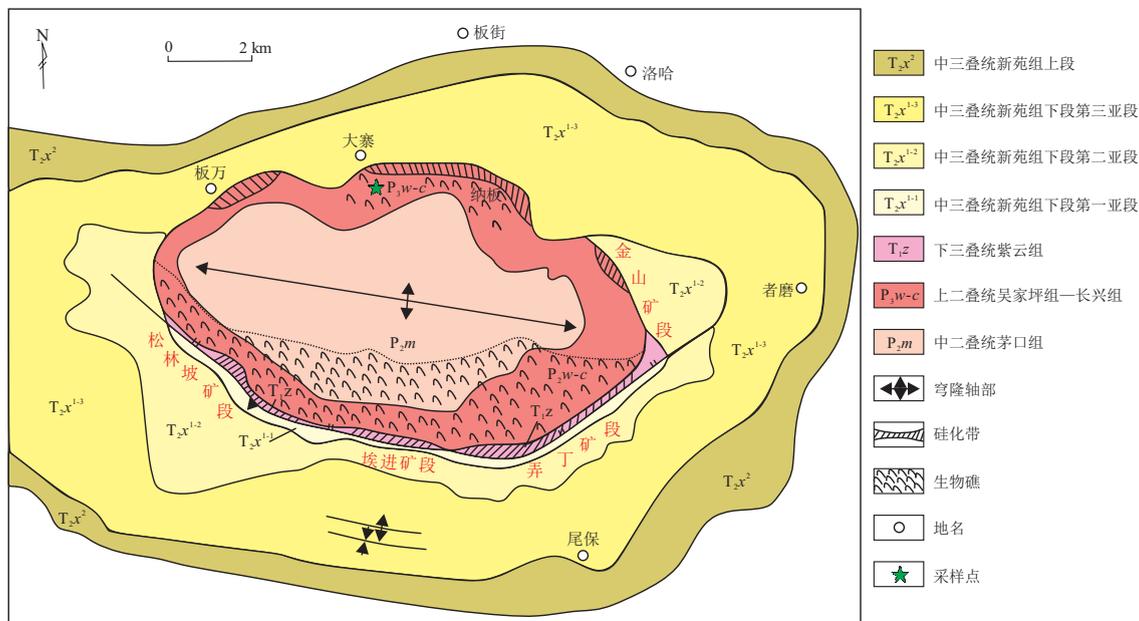


图 2 南盘江盆地纳板穹隆构造地质简图
据陈远明等^[36] 改编。

Fig.2 Tectonic geological map of Naban dome in Nanpanjiang Basin

制的丘台相生物礁沉积区, 其中主要礁体发育在纳板穹隆背斜的翼部南缘。礁体的发育开始于中二叠世茅口组, 止于晚二叠世, 礁体沿东西向延伸约

5 km, 覆盖面积约 4.5 km², 属于海退型苔藓海绵生物礁, 礁盖已不复存在。纳板穹隆为东西向延伸的短轴背斜构造, 自核部向外依次发育有下二叠统常

么组、中二叠统栖霞组—茅口组、上二叠统吴家坪组—长兴组的生物礁灰岩以及下三叠统紫云组、中三叠统许满组和边阳组陆源碎屑浊积岩。板街古油藏发育在被广海陆棚或者槽盆围限的孤立台地之上,主要和右江断裂带形成的同沉积断陷有关,位于断垒丘台边缘。板街背斜主要由二叠系组成,核部出露上石炭统上部生物碎屑灰岩,外围由三叠系组成,圈闭面积 16 km²,地貌为正地形,长轴长 6 km,短轴长 3.6 km,长短轴比约 2 : 1,属于穹隆状背斜,板街古油藏位于短轴背斜翼部,主要分布在上二叠统吴家坪组—长兴组生物灰岩中。研究表明板街古油藏的控油要素不是构造,而是岩性,即生物礁^[36-37]。古油藏中的沥青属热演化程度较高的碳质沥青。在残存的 172 m 厚的中二叠统礁灰岩中均可见沥青分布,在礁基—中二叠统茅口组顶部的 30 余米地层中,也常见晶洞或成岩缝中有沥青分布^[36,38-39]。

2 样品及测试分析方法

本次研究选择板街古油藏 8 件固体沥青样品进行稀土元素分析和 Re-Os 测年,并挑选 3 件含沥青灰岩磨制薄片进行镜下岩相学观察。采样点位于纳板穹隆北缘,板其村通往板街村的小路左侧的废弃采石场(东经 105°39'11",北纬 24°50'57"),。板街古油藏沥青(图 3)呈黑色,几乎不染手,性硬而碎,贝壳状断口,多呈边缘清晰的棱角、次棱角状,部分呈分散粒状。可见大量沥青充填于二叠系生物碎屑灰岩的孔隙、溶蚀裂缝之中。块状、脉状沥青与方解石脉体互相穿插,部分块状、散粒状沥青充填于方解石晶洞溶蚀孔和胶结方解石世代之间的孔缝之中,亦可见大量方解石颗粒充填于固体沥青气孔之中,镜下可见少量自形—半自形黄铁矿与沥青共生。

含沥青灰岩薄片的制备在昆明冶金研究院完成。薄片镜下观察,沥青样品的挑纯均在昆明理工大学国土资源工程学院西南地质调查所流体包裹体实验室进行。在双目镜下进行沥青挑纯过程中需使用木质工具逐粒将方解石、黄铁矿等杂质矿物挑出,使沥青样品纯度达 99.5% 以上,最后使用超声波清洗,除去表面粉尘等杂质。沥青 Re-Os 测年和稀土元素分析在广州市拓岩检测技术有限公司完成,其中 Re-Os 测年主要流程如下:

(1)称取 0.4 g 沥青样品,使用长颈漏斗加入卡洛斯管之中,接着向装有半杯乙醇的保温杯中加入液氮使温度降至 -80~-50 °C,把装有样品的

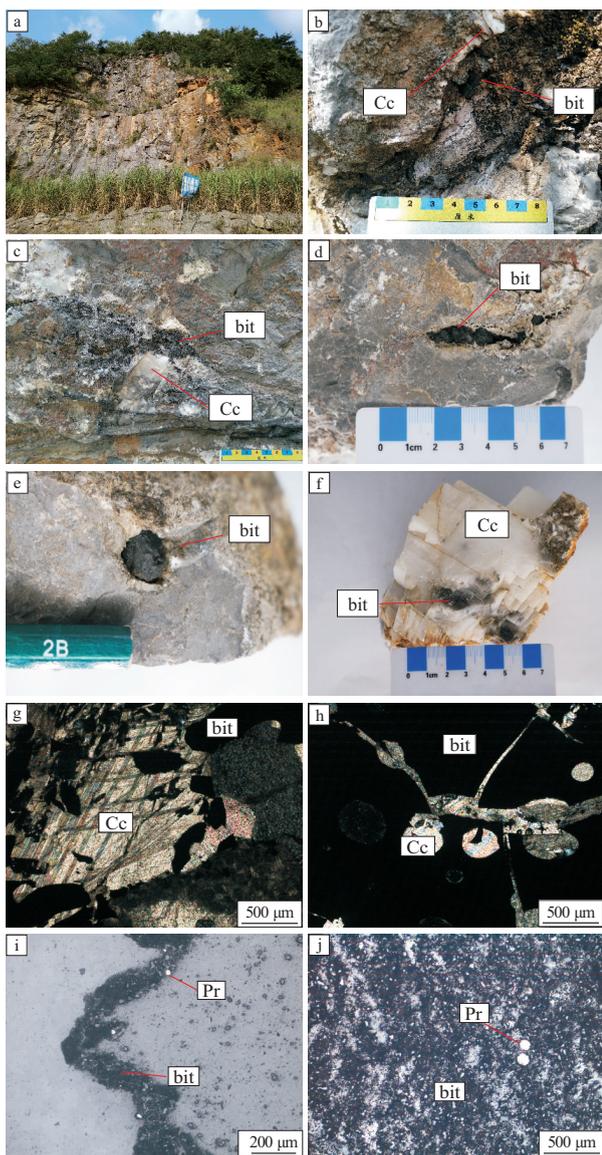


图 3 南盘江盆地板街古油藏沥青产状

a.古油藏采样点远景图;b.块状、散粒状沥青充填于方解石晶洞溶蚀孔和胶结方解石世代之间的孔缝之中;c.脉状、块状沥青穿插方解石脉体;d.脉状沥青充填于生物碎屑灰岩的溶蚀裂缝之中;e.沥青充填于生物碎屑灰岩溶蚀孔洞之中;f.与沥青共生的方解石脉体;g.不规则状沥青穿插于方解石之中;h.沥青圆形气孔中充填方解石颗粒;i.散点状半自形黄铁矿分布于脉状沥青之中;j.半自形黄铁矿充填于不规则粒状沥青之中;Cc 代表方解石,bit 代表沥青,Pr 代表黄铁矿

Fig.3 Occurrence of bitumen in Banjia paleo-oil reservoir, Nanpanjiang Basin

卡洛斯管放入保温杯中。

(2)使用长颈漏斗将定量的¹⁸⁵Re 和¹⁹⁰Os 稀释剂加入卡洛斯管中,使用反王水(6 mL, HNO₃ 和 HCl 体积比 3 : 1 的混合酸)在 240 °C 恒温下溶解样品 24 h,冷却至室温后移入蒸馏瓶中。

(3)加热蒸馏瓶至微沸腾后用 25 mL 比色管(装有 5 mL 超净水)放于冰水浴中,用以吸出蒸馏出的 OsO₄,吸出的 OsO₄ 水溶液用于 Os 同位素比

表 1 南盘江盆地板街古油藏样品沥青稀土元素含量
Table 1 REE of bitumen from Banjie paleo-oil reservoir, Nanpanjiang Basin

参数	bqs-2	bqs-4	bqs-5	bqs-6	bqs-7	bqs-8	bqs-9	xt-2	均值
La/10 ⁻⁶	0.42	0.24	0.62	10.70	1.85	1.86	0.33	2.82	2.36
Ce/10 ⁻⁶	0.59	0.36	0.85	14.60	2.19	2.23	0.44	4.22	3.18
Pr/10 ⁻⁶	0.07	0.06	0.17	1.75	0.21	0.32	0.08	0.44	0.39
Nd/10 ⁻⁶	0.30	0.28	0.89	6.54	0.76	1.22	0.40	1.77	1.52
Sm/10 ⁻⁶	0.06	0.07	0.22	0.64	0.08	0.19	0.09	0.27	0.20
Eu/10 ⁻⁶	0.01	0.02	0.05	0.07	0.01	0.04	0.03	0.05	0.04
Gd/10 ⁻⁶	0.08	0.10	0.29	0.42	0.07	0.20	0.13	0.30	0.20
Tb/10 ⁻⁶	0.01	0.01	0.05	0.07	0.01	0.03	0.02	0.05	0.03
Dy/10 ⁻⁶	0.09	0.10	0.32	0.45	0.06	0.22	0.14	0.33	0.21
Ho/10 ⁻⁶	0.02	0.02	0.07	0.11	0.01	0.05	0.03	0.08	0.05
Er/10 ⁻⁶	0.07	0.06	0.20	0.39	0.04	0.16	0.09	0.23	0.15
Tm/10 ⁻⁶	0.01	0.01	0.03	0.06	0.01	0.02	0.01	0.04	0.02
Yb/10 ⁻⁶	0.06	0.05	0.18	0.41	0.04	0.16	0.07	0.23	0.15
Lu/10 ⁻⁶	0.01	0.01	0.02	0.06	0.01	0.02	0.01	0.04	0.02
ΣREE/10 ⁻⁶	1.81	1.39	3.95	36.27	5.35	6.72	1.86	10.86	8.53
LREE/10 ⁻⁶	1.45	1.02	2.80	34.30	5.10	5.86	1.36	9.58	7.68
HREE/10 ⁻⁶	0.36	0.37	1.15	1.97	0.25	0.86	0.50	1.28	0.84
LREE/HREE	4.10	2.77	2.43	17.37	20.59	6.86	2.75	7.48	8.04
La _N /Yb _N	5.07	3.17	2.51	18.86	33.85	8.61	3.29	8.87	10.53
δEu/10 ⁻⁶	0.62	0.62	0.65	0.38	0.44	0.66	0.79	0.57	0.59
δCe/10 ⁻⁶	0.77	0.75	0.62	0.75	0.72	0.65	0.65	0.83	0.72

值的测试。

(4) 蒸馏瓶中残留的余液倒入烧杯中, 将烧杯反复加热烘干, 降低溶液酸度, 接着加入 NaOH (4~5 mL, 5 mol/L)。最后将溶液移入特氟龙离心管, 加入 4~10 mL 丙酮后震荡 60 s 用以萃取 Re。

(5) 进行 ICP-MS 测试。稀土元素使用德国 Jena 公司电感耦合等离子体质谱仪 (Plasma Quant inductively-coupled plasma mass spectrometry, Plasma Quant ICP-MS) 测定。测试流程如下: 将 50 mg 样品粉末转移至特氟龙消解罐中, 并往其中加入 0.6 mL 的 HF 和 3 mL 的 HNO₃。随后将密封的消解罐置于烘箱 (185 °C) 中加热消解 36 h。待冷却后, 将消解罐放置在电热板上, 蒸干消解液。往消解罐中加入 200 ng 元素 Rh 做内标, 并加入 2 mL HNO₃ 和 4 mL 水, 然后拧紧消解罐, 再次放入烘箱 (135 °C) 中加热 5 h, 使蒸干物完全溶解。冷却后, 将消解液稀释 3 000 倍, 用 ICP-MS 进行分析。

以国际标样 AMH-1 (安山岩) 和 OU-6 (板岩) 作为标准参考物质, 其分析结果与不确定度均与参考值吻合 [40-41]。ICP-MS 对大部分元素的相对分析误差均优于 ±(5%~10%)。

3 沥青稀土元素特征

板街古油藏 8 件沥青样品稀土元素测试结果见

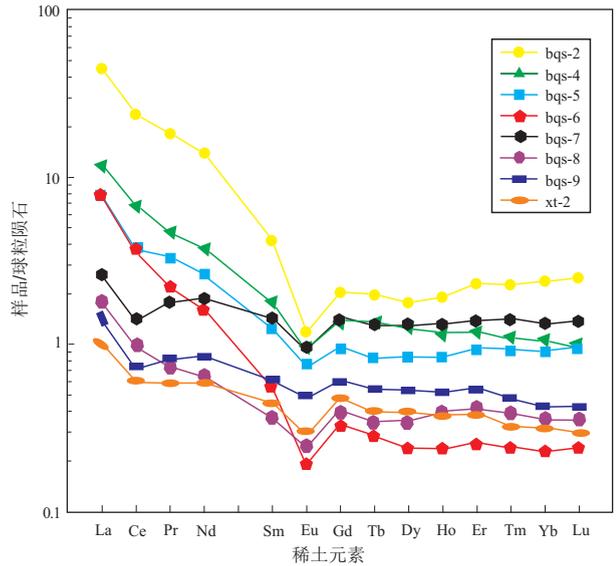


图 4 南盘江盆地板街古油藏沥青稀土元素球粒陨石标准化分布形式

Fig.4 Normalized REE chondrites distribution pattern of bitumen from Banjie paleo-oil reservoir, Nanpanjiang Basin

表 1, 球粒陨石标准化后的沥青稀土元素配分模式图见图 4。分析结果表明, 板街古油藏沥青中稀土总量较低, ΣREE 为 (1.39~36.27) × 10⁻⁶, 均值为 8.53 × 10⁻⁶。轻稀土总量 ΣLREE 为 (1.02~34.30) × 10⁻⁶, 均值为 7.68 × 10⁻⁶。重稀土总量 ΣHREE 为 (0.25~1.97) × 10⁻⁶, 均值为 0.84 × 10⁻⁶。轻重稀土比值 ΣLREE/ΣHREE 为 2.43~20.59, 均值为 8.04。La_N/Yb_N 为 2.51~33.85,

均值为 10.53,由此可见轻重稀土的分馏十分明显。 δEu 为 $(0.38 \sim 0.79) \times 10^{-6}$,均值为 0.59×10^{-6} , δCe 为 $(0.62 \sim 0.83) \times 10^{-6}$,均值为 0.72×10^{-6} ,呈现为弱的 Ce 负异常和明显的 Eu 负异常,表示形成时处于还原环境,稀土配分模式属于轻稀土富集右倾模式。值得注意的是,若沥青经历过风化作用,Ce³⁺易被氧化为 Ce⁴⁺,接受水解并沉淀后会造成 Ce 大量亏损,即会表现为强烈的 Ce 负异常^[42]。由此可见,板街古油藏沥青未经历过强烈的风化淋滤作用。

4 沥青 Re-Os 测年

本次研究通过对板街古油藏 8 件沥青样品进行 Re-Os 测年,试图为板街古油藏的演化史提供年代学约束,测试结果见表 2,其中¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os 为 535~1 402,¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 为 2.578~2.960,普通 Os 为 0.583~1.073 ng/g,¹⁸⁷Os 为 0.210 5~0.404 0 ng/g,Re 为 89.20~279.90 ng/g。模式年龄主要分布于 $(203.6 \pm 1.1) \sim (238.5 \pm 4.2)$ Ma,平均 (224.8 ± 3.3) Ma ($n=7$),仅样品 bqs-5 得出异常数据 (105.4 ± 1.7) Ma。GE 等^[43]在板街古油藏邻近地区板其和赖子山储层取沥青组合样品进行了 Re-Os 测年,得出的等时线年龄 (228 ± 16) Ma 与本次测试结果也十分接近,该结果具有较大可信度。

5 讨论

5.1 板街古油藏沥青来源分析

该地区的油源和烃源岩热演化史均存在部分争议,赵孟军等^[9,11]的研究表明,南盘江地区古油藏沥青主要来源于泥盆系烃源岩,下二叠统烃源岩或有小部分贡献;南盘江中部地区中下泥盆统烃源岩在晚石炭世进入生油窗,早二叠世处于生油高峰期(R_o 为 0.9%~1.2%),二叠纪末期进入湿气阶段($R_o > 1.3\%$),中三叠世早期进入干气阶段($R_o >$

2.0%),在中三叠世晚期基本无生烃能力($R_o > 3.2\%$);下二叠统烃源岩在中三叠世早期进入生油窗,中三叠世处于生油高峰期(R_o 为 0.9%~1.2%),中三叠世晚期进入湿气阶段($R_o > 1.3\%$),三叠世末期进入干气阶段($R_o > 2.0\%$)。刘培初等^[38]认为板街地区的油气运移始于晚石炭世初期,止于晚三叠世中后期,早侏罗世后期燕山运动的强烈褶断,使油气的原始状态改变。而徐仕海^[37]则认为该区泥盆系和下三叠统的油源普遍以构造断裂作为运移通道,只可能存在局部富集,据此判定该区二叠系古油藏主要烃源岩为二叠系领苻组和其本身;板街古油藏的主力烃源岩亦为领苻组烃源岩,中三叠世末期—晚三叠世为生油窗时期,侏罗纪初期开始大量热裂解生气,并形成沥青;板街古油藏成藏时期为晚三叠世,晚三叠世末—侏罗世初开始发生原油歧化,早白垩世末期停止,生气高峰期为早白垩世。LIAO 等^[12]采用催化加氢热解法释放的生物标志物分析了南盘江坳陷部分二叠系古油藏的沥青来源,认为册亨、册阳一带的沥青兼有中泥盆统烃源岩和二叠系烃源岩的贡献。

赵孟军等^[9]对板街古油藏沥青进行了沥青反射率测试,其结果 R_o 为 3.53%~4.41%,表明其已达过成熟阶段。稀土元素不受热演化影响且在有机质演化过程中保持其稳定性,因此,将沥青稀土元素这一指标应用于板街古油藏的油源对比之中,可增加其准确性。

板街古油藏主要分布于二叠系生物灰岩储层之中,其上下发育了泥盆系、二叠系等数套烃源岩。本次研究对板街古油藏沥青进行稀土元素测试,将其结果与南盘江盆地二叠系、泥盆系等可能烃源岩稀土元素特征(表 3)通过灰色关联法^[44]进行分析,从而进行油源对比。

板街古油藏地势较高,储集层为孤立台地上发育的生物礁灰岩,埋藏相对较浅,遭受地表水和地

表 2 南盘江盆地板街古油藏沥青 Re-Os 测试结果

Table 2 Re-Os test results of bitumen from Banjie paleo-oil reservoir, Nanpanjiang Basin

样号	¹⁸⁷ Re/ ¹⁸⁸ Os		¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os		普通 Os/(ng·g ⁻¹)		¹⁸⁷ Os/(ng·g ⁻¹)		Re/(ng·g ⁻¹)		模式年龄/Ma	
	测定值	1 σ	测定值	1 σ	测定值	1 σ	测定值	1 σ	测定值	1 σ	测定值	1 σ
bqs-2	720	26	2.807	0.033	0.583	0.020	0.210 5	0.004 8	89.20	1.00	226.0	5.2
bqs-4	763	15	2.960	0.020	1.073	0.019	0.404 0	0.004 0	173.89	1.34	222.4	2.1
bqs-5	1 402	38	2.578	0.040	0.940	0.024	0.308 0	0.005 0	279.90	2.90	105.4	1.7
bqs-6	711	35	2.641	0.052	0.815	0.039	0.290 9	0.009 5	123.10	1.40	226.2	7.4
bqs-7	754	12	2.720	0.030	0.621	0.009	0.212 0	0.001 0	99.55	0.67	203.6	1.1
bqs-8	678	22	2.700	0.020	0.991	0.031	0.337 0	0.004 0	142.67	1.68	226.3	2.8
bqs-9	695	12	2.780	0.010	0.958	0.009	0.341 0	0.003 0	141.43	1.98	230.9	1.9
xt-2	535	18	2.650	0.040	0.786	0.023	0.222 0	0.004 0	89.28	1.29	238.5	4.2

表 3 南盘江盆地板街古油藏沥青与可能烃源岩稀土元素质量分数对比

Table 3 REE correlation of bitumen and source rock from Banjie paleo-oil reservoir, Nanpanjiang Basin

稀土元素	稀土质量分数/10 ⁻⁶				
	板街古油藏沥青	泥盆系罗富组碳质泥岩	泥盆系火烘组碳质泥岩	二叠系龙潭组煤系烃源岩	二叠系茅口组灰岩
La	2.36	39.60	55.66	85.81	0.722
Ce	3.18	66.70	99.79	172.88	1.320
Pr	0.39	8.10	12.07	21.48	0.133
Nd	1.52	30.90	45.44	82.85	0.524
Sm	0.20	5.10	7.41	15.41	0.082
Eu	0.04	1.00	1.30	4.04	0.036
Gd	0.20	5.38	5.97	14.32	0.190
Tb	0.03	0.87	1.06	2.36	0.025
Dy	0.21	5.40	5.92	12.58	0.155
Ho	0.05	1.15	1.17	2.30	0.031
Er	0.15	3.41	3.41	6.17	0.080
Tm	0.02	0.50	0.58	0.85	0.011
Yb	0.15	3.17	3.64	5.09	0.054
Lu	0.02	0.42	0.51	0.76	0.005
ΣREE	8.53	171.70	243.93	426.90	3.368
数据来源	实测	文献[45]	文献[35]	文献[46]	文献[47]

下水淋失等水—岩反应较多,因而沥青稀土总量低。比较板街古油藏沥青与南盘江盆地可能烃源岩的稀土元素配分模式对比图(图 5),发现该区沥青与泥盆系和二叠系龙潭组煤系烃源岩的稀土元素配分模式相似。然而板街古油藏所在的南盘江坳陷为南盘江盆地的一个一级构造单元,该区内无二叠系龙潭组煤系烃源岩发育,可排除其作为主力烃源岩的可能性。综合前人研究情况,笔者认为泥

盆系烃源岩对板街古油藏沥青具有较大的贡献。

5.2 板街古油藏沥青 Re-Os 测年代表意义

Re-Os 测年结果所代表的意义研究者们持有不同看法,要解决这一问题,我们需要考虑到测试样品本身以及可能扰动甚至重置样品 Re-Os 时间体系的因素。SELBY 等^[24,48-49]和 LILLIS 等^[50]认为,Re-Os 等时线年龄代表了油气生成和初次运移的年龄,而不是烃源岩的年龄或油气二次运移的年龄,除此之外,TSR 反应与生成沥青的过程均会导致 Re-Os 时间体系的重置,生油窗时期的油驱作用亦会对此产生影响,而热裂解、生物降解和水洗作用等则几乎不会影响该体系。然而,李超等^[51]则认为若油气在生成以后未经历大规模运移和聚集,沥青基本分布在本层烃源岩,那么此时 Re-Os 等时线年龄代表了烃源岩形成的年龄;若油气生成后经历了一系列后生地质作用并发生二次运移,沥青为原油经蒸发降解以后残留,其 Re-Os 测年结果则代表了油气藏破坏的时代,而非生烃的时代,也就是说只有在发生运移过程中 Re-Os 体系达到交换平衡的油气所形成的沥青,其 Re-Os 同位素年龄才代表了油气发生迁移的年龄。部分学者认为黑色页岩中的 Re-Os 体系不会受烃类物质熟化作用的影响,该测年结果代表其沉积的时代^[52-54]。JAFFE 等^[55]通过研究发现,经历风化作用后的黑色页岩 Re-Os 同位素体系遭到了破坏,Re 几乎全部丢失,Os 则丢失约 39%。FINLAY

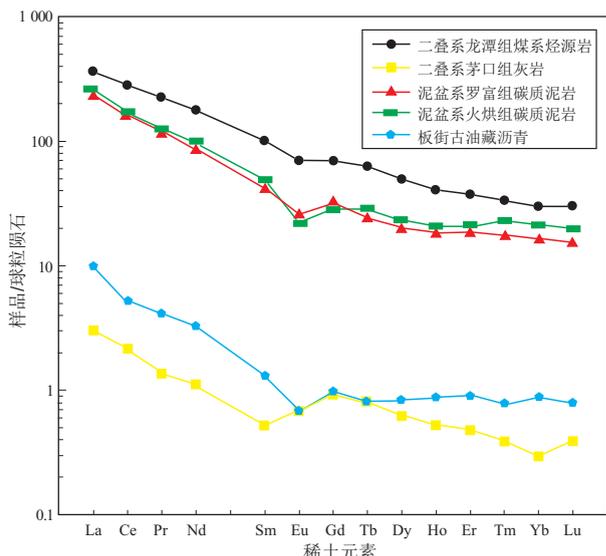


图 5 南盘江盆地板街古油藏沥青与可能烃源岩的稀土元素配分模式对比

Fig.5 Comparison of REE patterns for bitumen and source rock from Banjie paleo-oil reservoir, Nanpanjiang Basin

等^[56]和 ROONEY 等^[57]研究表明,低温(约 100 ℃)热液流体亦可对烃源岩和储层中的 Re-Os 时间体系产生扰动。

笔者认为,无论进行 Re-Os 测年的样品是原油、沥青或是烃源岩,其结果代表的都是 Re-Os 同位素体系最后一次发生重置的时间。本次研究的样品为过成熟的焦沥青,是一类特殊的成岩矿物,记录了油气藏被改造和破坏的地质信息^[21]。板街古油藏储层沥青中可见共生黄铁矿,说明其经历过 TSR 反应,也就是说在发生 TSR 反应的时候,发生过一次 Re-Os 时间体系的重置。而生物降解作用主要是对轻质油组分产生影响^[58],因此,不会扰动沥青的 Re-Os 同位素体系,而前面对沥青的稀土元素特征分析也已确定其未受过较强的风化作用。也就是说,会导致板街古油藏 Re-Os 时间体系重置的主要因素应为 TSR 反应和生成沥青的过程,然而沥青包裹黄铁矿的产出关系说明前者形成晚于后者,也就是说最后一次 Re-Os 体系达到交换平衡的时期应该是沥青形成的时期。本次研究得出的模式年龄平均为(224.8±3.3) Ma,即三叠世末期左右,此时板街古油藏处于干气阶段,主要产物为气态烃和固体沥青,这一结果也证实了前面的推测,本次 Re-Os 测年的结果代表了板街古油藏储层沥青形成的时代,即原油裂解成气的时代。

值得注意的是,本次实验得出的异常数据(105.4±1.7) Ma,即早白垩世,而板街古油藏在早侏罗世后期已遭受破坏,因此在分析 Re-Os 测年的结果时应剔除该数据。

5.3 古油藏年代学与油源对比研究启示

本次研究体现了在高演化地区采用 REE 这一“无机”指标进行油源对比的优越性,并为该类地区应用、解释 Re-Os 测年结果提供了借鉴。

前面已经提到,沥青 Re-Os 测年是古油藏年代学研究的优选手段,其结果代表意义取决于最后一次导致 Re-Os 时间体系重置的地质事件。由于测试样品是沥青,则主要考虑 TSR 反应、生成沥青的过程以及后生地质作用(主要是风化作用)的影响。

因此,在进行古油藏年代学和油源对比研究时,首先应该对沥青样品进行镜下观察,确定是否有 TSR 反应发生,以及该反应发生与沥青生成过程的先后顺序;其次通过微量元素测试,进行油源对比,同时根据 Ce 异常情况判断沥青样品是否遭受过强烈的风化淋滤作用,确定其是否符合 Re-Os 测年的要求;最后进行沥青 Re-Os 测年,并结合岩

相学和稀土元素研究对测年结果进行合理的解释。按照以上步骤开展研究,不仅可以有效控制科研成本,更是能够提高研究结果的准确性。

6 结论

(1)南盘江盆地板街古油藏沥青稀土总量较低, ΣREE 为(1.39~36.27) $\times 10^{-6}$,均值为 8.53×10^{-6} 。轻稀土总量 ΣLREE 为(1.02~34.30) $\times 10^{-6}$,均值为 7.68×10^{-6} 。重稀土总量 ΣHREE 为(0.25~1.97) $\times 10^{-6}$,均值为 0.84×10^{-6} 。轻重稀土比值 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 为2.43~20.59,均值为8.04。 La_N/Yb_N 为2.51~33.85,均值为10.53,轻重稀土分馏十分明显。 δEu 为(0.38~0.79) $\times 10^{-6}$,均值为 0.59×10^{-6} , δCe 为(0.62~0.83) $\times 10^{-6}$,均值为 0.72×10^{-6} ,呈现为弱的 Ce 负异常和明显的 Eu 负异常,表示沥青形成时处于还原环境且未经历过强烈的风化淋滤作用。

(2)板街古油藏沥青稀土配分模式属于轻稀土富集右倾模式,其配分模式曲线与区内泥盆系烃源岩的稀土元素配分模式相似,二者具有成因关系。

(3)板街古油藏沥青 Re-Os 模式年龄主要分布于(203.6±1.1)~(238.5±4.2) Ma,平均224.8±3.3 Ma($n=7$);最后一次扰动该沥青 Re-Os 时间体系的因素是生成沥青的过程,该模式年龄代表了板街古油藏储层沥青形成,即原油裂解成气的时代。

致谢:感谢编辑部和审稿专家提出的宝贵意见!

参考文献:

- [1] MAGOON L B. Petroleum system: status of research and methods, 1992 [R]. Alexandria: Geological Survey, 1992.
- [2] MOLDOWAN J M, SEIFERT W K, GALLEGOS E J. Relationship between petroleum composition and depositional environment of petroleum source rocks [J]. AAPG Bulletin, 1985, 69(8): 1255-1268.
- [3] 王启军, 陈建渝. 油气地球化学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1988: 280-290.
WANG Qijun, CHEN Jianyu. Petroleum geochemistry [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1988: 280-290.
- [4] 万涛, 张洪安, 张宝君, 等. C₂₉ 重排谷甾烷在油源对比研究中的应用: 以银额盆地查干凹陷为例 [J]. 断块油气田, 2021, (2): 173-178.
WAN Tao, ZHANG Hongan, ZHANG Baojun, et al. The application of C₂₉ rearranged sitostane in oil source correlation research: taking Chagan Depression of Yingen-Ejinaqi Basin for example [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2021, (2): 173-178.
- [5] 施继锡, 余孝颖, 王华云. 古油藏、沥青及沥青包裹体在金属成矿研究中的应用 [J]. 矿物学报, 1995, 15(2): 117-122.
SHI Jixi, YU Xiaoying, WANG Huayun. The role of ancient oil

- reservoirs, bitumens and bitumen inclusions in metallogenic research[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1995, 15(2): 117-122.
- [6] 王守德,郑冰,蔡立国.中国南方古油藏与油气评价[J]. *海相油气地质*, 1997, 2(1): 44-50.
WANG Shoude, ZHENG Bing, CAI Ligu. The destroyed oil pools in South China and hydrocarbon prospecting[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 1997, 2(1): 44-50.
- [7] 梁霄,吴亮亮,李亚丁,等.川西坳陷天井山古油藏油源判别及其与深层油气成藏关系厘定[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(1): 96-111.
LIANG Xiao, WU Liangliang, LI Yading, et al. Oil source correlation and its relationship with deeply buried hydrocarbon accumulations in Tianjingshan Paleo-uplift area, northern segment of Western Sichuan Depression[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(1): 96-111.
- [8] 滇黔桂石油地质志编写组.中国石油地质志.卷十一,滇黔桂油气区[M].北京:石油工业出版社,1992.
Compilation Group of Yunnan Guizhou Guangxi Petroleum Geology. *Petroleum geology of China*. Volume 11, Dian-Qian-Gui oil and gas region[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992.
- [9] 赵孟军,张水昌,赵陵,等.南盘江盆地古油藏沥青地球化学特征及成因[J]. *地质学报*, 2006, 80(6): 893-901.
ZHAO Mengjun, ZHANG Shuichang, ZHAO Ling, et al. Geochemistry and genesis of bitumen in paleo-oil reservoir in the Nanpanjiang Basin, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(6): 893-901.
- [10] 杨惠民,刘炳温,邓宗淮,等.滇黔桂海相碳酸盐岩地区最佳油气保存单元的评价与选择[M].贵阳:贵州科技出版社, 1999: 98-125.
YANG Huimin, LIU Bingwen, DENG Zonghuai, et al. Evaluation and selection of the best hydrocarbon preservation units in Dian-Qian-Gui marine carbonate area[M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 1999: 98-125.
- [11] 赵孟军,张水昌,赵陵,等.南盘江盆地主要烃源岩热演化史及油气生成史[J]. *石油实验地质*, 2006, 28(3): 271-275.
ZHAO Mengjun, ZHANG Shuichang, ZHAO Ling, et al. The thermal evolution history and oil and gas generation history of main source rocks in the Nanpanjiang Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2006, 28(3): 271-275.
- [12] LIAO Yuhong, FANG Yunxin, WU Liangliang, et al. The source of highly overmature solid bitumens in the Permian coral reef paleo-reservoirs of the Nanpanjiang Depression[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 59: 527-534.
- [13] 张同伟,王先彬,陈践发,等.天然气运移的气体组分的地球化学示踪[J]. *沉积学报*, 1999, 17(4): 627-632.
ZHANG Tongwei, WANG Xianbin, CHEN Jianfa, et al. Chemical composition of gases as a geochemical tracer of natural gas migration[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(4): 627-632.
- [14] 梁狄刚,陈建平.中国南方高、过成熟区海相油源对比问题[J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(2): 8-14.
LIANG Digang, CHEN Jianping. Oil-source correlations for high and over matured marine source rocks in South China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(2): 8-14.
- [15] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The continental crust: its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwell, 1985: 5-90.
- [16] 金强,田海芹,戴俊生.微量元素组成在固体沥青—源岩对比中的应用[J]. *石油实验地质*, 2001, 23(3): 285-290.
JIN Qiang, TIAN Haiqin, DAI Junsheng. Application of microelement composition to the correlation of solid bitumen with source rocks[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2001, 23(3): 285-290.
- [17] 张殿伟,刘文汇,高波,等.稀土元素灰色关联法用于南方高演化油源示踪[J]. *石油学报*, 2012, 33(S1): 126-131.
ZHANG Dianwei, LIU Wenhui, GAO Bo, et al. Application of REE-based gray-correlation analysis method to trace oil sources of high evolution degrees in South China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(S1): 126-131.
- [18] 杨守业,李从先.REE 示踪沉积物物源研究进展[J]. *地球科学进展*, 1999, 14(2): 164-167.
YANG Shouye, LI Congxian. Research progress in REE tracer for sediment source[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1999, 14(2): 164-167.
- [19] 王飞宇,金之钧,吕修祥,等.含油气盆地成藏期分析理论和新方法[J]. *地球科学进展*, 2002, 17(5): 754-762.
WANG Feiyu, JIN Zhijun, LÜ Xiuxiang, et al. Timing of petroleum accumulation: theory and new methods[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17(5): 754-762.
- [20] 赵靖舟.油气成藏年代学研究进展及发展趋势[J]. *地球科学进展*, 2002, 17(3): 378-383.
ZHAO Jingzhou. Geochronology of petroleum accumulation: new advances and the future trend[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17(3): 378-383.
- [21] 马安来,张水昌,张大江,等.油气成藏期研究新进展[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(3): 271-276.
MA Anlai, ZHANG Shuichang, ZHANG Dajiang, et al. New advancement in study of reservoiring period[J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(3): 271-276.
- [22] 李真,王选策,刘可禹,等.油气藏铼—钨同位素定年的进展与挑战[J]. *石油学报*, 2017, 38(3): 297-306.
LI Zhen, WANG Xuance, LIU Keyu, et al. Rhenium-osmium geochronology in dating petroleum systems: progress and challenges[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(3): 297-306.
- [23] 武鲁亚,金之钧,储著银,等.富有机质样品 Re-Os 同位素定年实验方法[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(3): 513-523.
WU Luya, JIN Zhijun, CHU Zhuyin, et al. Re-Os isotopic dating procedures for organic-rich samples[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(3): 513-523.
- [24] SELBY D, CREASER R A, FOWLER M G. Re - Os elemental and isotopic systematics in crude oils[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(2): 378-386.
- [25] 夏文臣,雷建喜,周杰,等.黔桂地区海西—印支阶段的构造古地理演化及沉积盆地的时空组合[J]. *地球科学*, 1991, 16(5): 477-488.
XIA Wenchen, LEI Jianxi, ZHOU Jie, et al. The tectono-palaeogeographic evolution and time-space association of sedimentary basins of Guizhou and Guangxi provinces in Hercynian-Indosinian stage[J]. *Earth Science*, 1991, 16(5): 477-488.
- [26] 吴诒,龚一鸣,杜远生.华南泥盆纪层序地层及海平面变化[M].武汉:中国地质大学出版社,1997.

- WU Yi, GONG Yiming, DU Yuansheng. Devonian sequence stratigraphy and sea level change of South China [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997.
- [27] 刘特民, 刘炳温, 陈国栋, 等. 南盘江盆地构造演化与油气保存区划分[J]. 天然气工业, 2001, 21(1): 18-23.
- LIU Temin, LIU Bingwen, CHEN Guodong, et al. Tectonic evolution and hydrocarbon preservation region division in Nanpanjiang Basin [J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(1): 18-23.
- [28] 徐云俊, 赵宗举, 俞广. 南盘江坳陷油气系统分析[J]. 海相油气地质, 2001, 6(2): 13-20.
- XU Yunjun, ZHAO Zongju, YU Guang. The petroleum system in Nanpanjiang Depression [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2001, 6(2): 13-20.
- [29] 赖生华, 陈洪德, 余谦. 南盘江坳陷二叠系层序地层格架及古地理环境[J]. 沉积与特提斯地质, 2004, 24(3): 80-89.
- LAI Shenghua, CHEN Hongde, YU Qian. Sequence stratigraphic framework and palaeogeographic environments of the Permian strata in the Nanpanjiang Depression, Guangxi [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2004, 24(3): 80-89.
- [30] 王圣柱. 南盘江坳陷晚古生代碳酸盐岩储层特征及评价[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(1): 121-127.
- WANG Shengzhu. Characteristics and quality assessment of Late Paleozoic carbonate reservoirs in Nanpanjiang Depression [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2013, 33(1): 121-127.
- [31] 秦建华, 吴应林, 颜仰基, 等. 南盘江盆地海西—印支期沉积构造演化[J]. 地质学报, 1996, 70(2): 99-107.
- QIN Jianhua, WU Yinglin, YAN Yangji, et al. Hercynian - Indosinian sedimentary - tectonic evolution of the Nanpanjiang Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 1996, 70(2): 99-107.
- [32] 韦宝东, 盘鹏慧. 南盘江坳陷烃源岩再认识[J]. 南方油气, 2005, 18(3): 7-8.
- WEI Baodong, PAN Penghui. Re-consideration on hydrocarbon source conditions in Nanpanjiang Sag [J]. Southern China Oil & Gas, 2005, 18(3): 7-8.
- [33] 刘磊. 南盘江坳陷上古生界古油藏特征及油气成藏规律[J]. 内蒙古石油化工, 2010, 36(15): 113-116.
- LIU Lei. The character of paleo-oil pools and reservoiring laws in Upper Palaeozoic, Nanpanjiang Depression [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2010, 36(15): 113-116.
- [34] 周明辉. 南盘江坳陷油气系统研究[J]. 云南地质, 1999, 18(3): 248-265.
- ZHOU Minghui. A study on the petroleum system of Nanpanjiang Sag [J]. Yunnan Geology, 1999, 18(3): 248-265.
- [35] CHENG Yong, HU Yuzhao, WANG Di, et al. Oil-source rock analysis and metallogenic significance of the palaeo-oil reservoir in the Qinglong antimony deposit, South China [J]. Ore Geology Reviews, 2021, 137: 104281.
- [36] 陈远明, 张爱华, 李建全. 册亨板其金矿地球化学特征及其找矿意义[J]. 贵州地质, 1987(4): 488-496.
- CHEN Yuanming, ZHANG Aihua, LI Jianquan. The geological features of Banqi all-ore deposit in Ceheng county and its ore-finding significance [J]. Guizhou Geology, 1987(4): 488-496.
- [37] 徐仕海. 黔桂地区古生界储层流体与成藏成矿的关系研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2007.
- XU Shihai. Study on the relationship between Palaeozoic reservoir fluid and accumulation and mineralization in Guizhou and Guangxi area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007.
- [38] 刘培初, 刘玉胜, 赵芳. 南丹大厂. 册亨板街生物礁古油藏调研与油气系统研究[R]. 贵阳: 滇黔桂石油勘探局勘探开发科学院贵州石油地质研究所, 1998.
- LIU Peichu, LIU Yusheng, ZHAO Fang. Study on reef-type paleo-oil reservoirs and oil-gas system in Nandan Dachang and Ceheng Banjie [R]. Guiyang: Guizhou Institute of Petroleum Geology, Academy of Exploration and Development, Dian - Qian - Gui Petroleum Exploration Bureau, 1998.
- [39] 靳晓野, 李建威, HOFSTRA A, 等. 黔西南卡林型金矿床与区域古油藏的关系: 来自流体包裹体气相组成和沥青拉曼光谱特征的证据[J]. 岩石学报, 2016, 32(11): 3295-3311.
- JIN Xiaoye, LI Jianwei, HOFSTRA A, et al. Relationship between Carlin-type gold deposits and paleo-petroleum reservoirs in SW Guizhou, China: evidence from gas compositions of fluid inclusions and Raman spectroscopic characteristics of bitumen [J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(11): 3295-3311.
- [40] POTTS P J, KANE J S. International association of geoanalysts certificate of analysis; certified reference material OU-6 (Penrhyn Slate) [J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 2005, 29(2): 233-236.
- [41] THOMPSON M, POTTS P J, KANE J S, et al. GeoPT5. An international proficiency test for analytical geochemistry laboratories—report on round 5 [J]. Geostandards Newsletter, 2000, 24(1): E1-E28.
- [42] 孙承兴, 王世杰, 季宏兵. 碳酸盐岩风化成土过程中 REE 超常富集及 Ce 强烈亏损的地球化学机理[J]. 地球化学, 2002, 31(2): 119-128.
- SUN Chengxing, WANG Shijie, JI Hongbing. Formation mechanism of the superhigh concentration of REE and the strong negative Ce anomalies in the carbonate rock weathering profiles in Guizhou Province, China [J]. Geochemica, 2002, 31(2): 119-128.
- [43] GE Xiang, SELBY D, LIU Junjie, et al. 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 [J]. Chemical Geology, 2021, 559: 119953.
- [44] 傅立. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1992: 185-186.
- FU Li. Grey system theory and its application [M]. Beijing: Scientific and Technical Documentation Press, 1992: 185-186.
- [45] 成永生, 黄惠明. 广西大厂矿田泥盆系地层地球化学及其成矿指示[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(9): 2649-2658.
- CHENG Yongsheng, HUANG Huiming. Geochemical characteristics and mineralization indication of Devonian strata in Dachang ore field, Guangxi [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(9): 2649-2658.
- [46] 田利, 谢红东, 张学东. 贵州盘县土城向斜南西翼二叠系龙潭组地球化学特征及意义[J]. 中国煤炭地质, 2014, 26(7): 15-20.
- TIAN Li, XIE Hongdong, ZHANG Xuedong. Permian Longtan Formation geochemical characteristics and significance in southwest Limb of Tucheng syncline, Panxian, Guizhou [J]. Coal Geology of China, 2014, 26(7): 15-20.

- biomarkers in thermal simulation of hydrocarbon generation and expulsion and its geological significance[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2020, 27(6): 689-694.
- [39] 张文正,杨华,候林慧,等.鄂尔多斯盆地延长组不同烃源岩 $17\alpha(\text{H})$ -重排藿烷的分布及其地质意义[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 2009, 39(10): 1438-1445.
- ZHANG Wenzheng, YANG Hua, HOU Linhui, et al. Distribution and geological significance of $17\alpha(\text{H})$ -diahopanes from different hydrocarbon source rocks of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2009, 52(7): 965-974.
- [40] 何川,郑伦举,王强,等.烃源岩生排烃模拟实验技术现状、应用与发展方向[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(5): 862-870.
- HE Chuan, ZHENG Lunju, WANG Qiang, et al. Experimental development and application of source rock thermal simulation for hydrocarbon generation and expulsion[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(5): 862-870.
- [41] 龙祖烈,石创,朱俊章,等.珠江口盆地白云凹陷原油半开放条件下裂解成气模拟实验[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(3): 507-512.
- LONG Zulie, SHI Chuang, ZHU Junzhang, et al. Simulation of crude oil cracking and gas generation with semi-open condition, Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(3): 507-512.
- [42] JIANG Lian, ZHANG Min, LI Hongbo, et al. Characteristics of rearranged hopanes of hydrocarbon source rocks in saline sedimentary environment; a case study of the Songliao Basin[J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2016, 90(6): 2269-2270.
- [43] 仰云峰,鲍芳,腾格尔,等.四川盆地不同成熟度下志留统龙马溪组页岩有机孔特征[J]. *石油实验地质*, 2020, 42(3): 387-397.
- YANG Yunfeng, BAO Fang, BORJIGIN Tenger, et al. Characteristics of organic matter-hosted pores in Lower Silurian Longmaxi shale with different maturities, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(3): 387-397.
- [44] 李二庭,向宝力,李际,等.甾烷和藿烷的国产X型分子筛分离制备实验研究[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(4): 713-720.
- LI Ertong, XIANG Baoli, LI Ji, et al. Separation of steranes and hopanes by domestic X-type molecular sieves[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(4): 713-720.
- [45] LOCKHART R S, MEREDITH W, LOVE G D, et al. Release of bound aliphatic biomarkers via hydropyrolysis from type II kerogen at high maturity[J]. *Organic Geochemistry*, 2008, 39(8): 1119-1124.

(编辑 黄娟)

(上接第 886 页)

- [47] 黄建国,李虎杰,李文杰,等.贵州戈塘金矿含矿岩系元素地球化学特征[J]. *中国地质*, 2012, 39(5): 1318-1326.
- HUANG Jianguo, LI Hujie, LI Wenjie, et al. Element geochemistry of ore-bearing rock series in the Getang gold deposit, Guizhou Province[J]. *Geology in China*, 2012, 39(5): 1318-1326.
- [48] SELBY D, CREASER R A. Direct radiometric dating of hydrocarbon deposits using rhenium-osmium isotopes[J]. *Science*, 2005, 308(5726): 1293-1295.
- [49] SELBY D, CREASER R A. Direct radiometric dating of the Devonian-Mississippian time-scale boundary using the Re-Os black shale geochronometer[J]. *Geology*, 2005, 33(7): 545-548.
- [50] LILLIS P G, SELBY D. Evaluation of the rhenium-osmium geochronometer in the Phosphoria petroleum system, Bighorn Basin of Wyoming and Montana, USA[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 118: 312-330.
- [51] 李超,屈文俊,王登红,等.富有机质地质样品 Re-Os 同位素体系研究进展[J]. *岩石矿物学杂志*, 2010, 29(4): 421-430.
- LI Chao, QU Wenjun, WANG Denghong, et al. Advances in the study of the Re-Os isotopic system of organic-rich samples[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2010, 29(4): 421-430.
- [52] RAVIZZA G, TUREKIAN K K. Application of the ^{187}Re - ^{187}Os system to black shale geochronometry[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53(12): 3257-3262.
- [53] COHEN A S, COE A L, BARTLETT J M, et al. Precise Re-Os ages of organic-rich mudrocks and the Os isotope composition of Jurassic seawater[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 167(3/4): 159-173.
- [54] CREASER R A, SANNIGRAHI P, CHACKO T, et al. Further evaluation of the Re-Os geochronometer in organic-rich sedimentary rocks; a test of hydrocarbon maturation effects in the Exshaw Formation, Western Canada Sedimentary Basin[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(19): 3441-3452.
- [55] JAFFE L A, PEUCKER-EHRENBRINK B, PETSCH S T. Mobility of rhenium, platinum group elements and organic carbon during black shale weathering[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 198(3/4): 339-353.
- [56] FINLAY A J, SELBY D, OSBORNE M J, et al. Fault-charged mantle-fluid contamination of United Kingdom North Sea oils: insights from Re-Os isotopes[J]. *Geology*, 2010, 38(11): 979-982.
- [57] ROONEY A D, CHEW D M, SELBY D. Re-Os geochronology of the Neoproterozoic-Cambrian Dalradian Supergroup of Scotland and Ireland: implications for Neoproterozoic stratigraphy, glaciations and Re-Os systematics[J]. *Precambrian Research*, 2011, 185(3/4): 202-214.
- [58] SPEIGHT J G. The chemistry and technology of petroleum[M]. New York: M. Dekker, 1980.

(编辑 黄娟)