

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.06.076

文章编号: 1006-6616 (2020) 06-0952-09

云南禄劝地区泥盆系油苗地球化学特征及地质意义

马中良^{1,2,3}, 谭静强¹, 赵 喆¹, 郑家锡², 赵中熙²

MA Zhongliang^{1, 2, 3}, TAN Jingqiang¹, ZHAO Han¹, ZHENG Jiaxi², ZHAO Zhongxi²

1. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083;

2. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126;

3. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 江苏 无锡 214126

1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;

2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Sinopec Exploration and Production Research Institute, Wuxi 214126, Jiangsu, China;

3. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment and Effective Development, Wuxi 214126, Jiangsu, China

MA Z L, TAN J Q, ZHAO H, et al., 2020. Organic geochemistry and geological significance of oil seepage from the Devonian of Luquan area, Yunnan Province [J]. Journal of Geomechanics, 26 (6): 952–960. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.06.076

Abstract: With the successful exploration and development of marine conventional natural gas and shale gas in the Sichuan Basin, the oil and gas explorations in new areas and new strata are gradually put on the agenda. Devonian shales in Yunnan are widely distributed in local areas with high abundance of organic matter; however, little drilling work and research have been done there so that the oil and gas enrichment is unknown. Through the field investigation, liquid oil seepages were found in the Huaning Formation of Middle Devonian in Luquan area of Yunnan Province. The organic geochemical analysis shows that oil seepage had a good relationship with marl in the third section of the Huaning Formation of Middle Devonian. The marls in the third section of the Huaning Formation of the Middle Devonian were generally deposited in a strong reduction-reduction environment and were in their mature stage. Hydrocarbon generation materials were mainly algae and other lower aquatic organisms, and higher plants did contribute too. They had strong hydrocarbon generation ability, equivalent to that of type II₁ source rock. The Devonian marls in the western margin of the Kangdian ancient land once produced oil and gas, and the crude oil produced were mainly saturated hydrocarbon and aromatic hydrocarbon, which has certain potential for shale oil and gas exploration and conventional oil and gas exploration under good preservation conditions.

Key words: Luquan area; Devonian; oil seepage; biomarkers; shale gas

摘要: 随着四川盆地海相常规天然气和页岩气勘探开发的成功, 新区、新层系的油气勘探逐渐提上议程。云南地区泥盆系泥页岩在局部地区广泛分布, 有机质丰度较高, 但钻井工作很少, 研究较为薄弱, 油气富集情况不明。通过野外调查, 在云南禄劝地区中泥盆统华宁组发现了液态油苗。有机地球化学分析表明: 油苗与中泥盆统华宁组三段的泥灰岩亲缘关系较好; 中泥盆统华宁组三段的泥灰岩整体沉积于强还原—还原环境, 生烃母质主要为藻类等低等水生生物, 也有来自高等植物的贡献, 已处于成熟阶段,

基金项目: 国家自然科学基金 (41872151, 42072156); 国家科技重大专项 (2017ZX05036002-004, 2017ZX05005001-003)

第一作者简介: 马中良 (1984-), 男, 高级工程师, 在读博士, 主要从事石油实验地质学、油气地球化学和非常规油气地质研究。

E-mail: mazl.syky@sinopec.com

通讯作者: 谭静强 (1983-), 男, 教授, 主要从事非常规油气地质与地球化学、非常规储层改造及其环境影响评价研究。

E-mail: tanjingqiang@csu.edu.cn

收稿日期: 2020-08-25; 修回日期: 2020-10-20; 责任编辑: 范二平

引用格式: 马中良, 谭静强, 赵晗, 等, 2020. 云南禄劝地区泥盆系油苗地球化学特征及地质意义 [J]. 地质力学学报, 26 (6): 952-960. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.06.076

具有较强的油气生成能力, 生烃能力与 II₁型烃源岩相当; 康滇古陆西缘泥盆系泥灰岩有过生油气过程, 生成的原油以饱和烃和芳香烃为主, 且保存条件好的情况下, 具有一定的页岩油气和常规油气勘探前景。

关键词: 禄劝地区; 泥盆系; 油苗; 生物标志物; 页岩气

中图分类号: P618.13; TE122.1 **文献标识码:** A

0 引言

近年来, 随着四川盆地海相天然气和页岩气勘探开发的成功(郭旭升等, 2016; 马新华和谢军, 2018; 周磊等, 2018), 对滇黔桂地区海相地层也进行了大规模的地质勘查和油气评价研究工作(张启跃等, 2009; 孟江辉等, 2016)。这些研究主要集中于上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组和下寒武统筇竹寺组/牛蹄塘组, 而该地区除这两套页岩外, 还发育多套暗色泥页岩(潘仁芳等, 2009; 王鹏万等, 2012; 周雁等, 2014)。其中, 中、下泥盆统泥页岩分布最为广泛, 有机质丰度较高。但前期工作以野外剖面调查和二维地震为主, 投入工作最多的为桂中坳陷, 桂中坳陷泥盆系发现多处油苗及沥青。中泥盆统主要为台盆相暗色泥页岩和深灰色、灰黑色泥灰岩, 有机质丰度高, 处于高—过成熟热演化阶段, 具备良好的生烃条件; 其中, 中西部地区地层相对平缓, 断裂密度和剥蚀强调小, 具备页岩气的保存条件, 鹿寨—来宾—合山—大化地区为有利区带(林良彪等, 2009; 王鹏万等, 2012; 孟江辉等, 2016; 苑坤等, 2017)。

云南地区研究最为薄弱, 钻井工作很少, 除了少量的野外工作外, 几乎没有其他方面工作量的投入, 勘探程度低, 油气富集情况并不明确。鉴于此, 中国地质调查局油气资源调查中心于2018年9月针对云南地区泥盆系部署了第一口地质调查井——云宁地1井, 构造位置位于盐-源盆地南缘李子河背斜北翼, 钻至井深为1500.68 m(张子亚等, 2019)。依次钻遇了第四系(50 m)、上泥盆统烂泥箐组(570 m)、中泥盆统碳山坪组(480 m)、中泥盆统大槽子组(360 m)、下泥盆统大瓜坪组(40.68 m未穿)。2019年6月, 点火成功, 气测显示丰富, 中泥盆统碳山坪组和大槽子组(1007~1380 m)气测值整体较高, 录井全烃异常值1.5%~11.95%, 现场解析气达3.25 m³/t, 展现了康滇古陆西缘宁南—盐源地区泥盆系良好

的常规天然气和页岩气勘探潜力(董林, 2017)。此次在云南禄劝地区中泥盆统华宁组尖上村剖面发现了油苗显示, 表明该地区有过石油的生成和运移历史, 全面了解油苗的地球化学特征, 分析油苗的来源和烃源岩的特征, 对于认识区内泥盆系油气生成条件、可能的油气藏形成类型和寻找有利的勘探地带, 具有十分重要的科学意义。

1 样品与方法

野外剖面位于云南省禄劝彝族苗族自治县尖上村, GPS点位置为N 25°39'52", E 102°31'44"(图1)。区内主要发育早泥盆统和中泥盆统地层, 缺失晚泥盆统地层(时言和龚大明, 1992; 方润森, 2000; 刘文斌等, 2008; 秦建中等, 2006)。早泥盆统地层分为a、b两段, a段底部岩性为灰白色石英砂岩夹黑色泥页岩, 上部为杂色泥岩段; b段底部岩性为黑色炭质泥岩、夹薄层泥灰岩, 向上为砂岩和薄层白云岩。中泥盆统岩性从下到上分别为杂色泥岩, 薄层灰岩、泥灰岩夹紫色含钙泥岩, 中部为大砂岩、杂色泥岩、瘤状灰岩。

经挖探槽, 共揭示中泥盆统华宁组三段灰岩、泥灰岩约8.2 m。自下而上分层描述如下: ①厚层状灰色瘤状泥灰岩, 视厚度0.7 m; ②深灰色生屑泥灰岩, 视厚度1.4 m, 局部有鸟眼状方解石充填, 方解石孔洞中充注有原油(油苗A; 图2a); ③深灰色钙质泥岩, 视厚度约10 cm; ④灰黑色泥灰岩, 视厚度60 cm; ⑤深灰色含生屑泥灰岩, 视厚度约70 cm; ⑥深灰色含炭质泥质微晶灰岩, 视厚度约30 cm; ⑦灰黑色含生屑泥灰岩, 视厚度70 cm; ⑧深灰色含生屑微晶灰岩, 视厚度80 cm, 原油由裂缝中渗出(油苗B; 图2b), 并且在裂缝中可见沥青残留物; ⑨灰黑色含生屑泥灰岩, 视厚度2.9 m。

对油苗基质岩石进行氯仿沥青“A”抽提, 对抽提物和油苗分别进行族组分分离、饱和烃GC、GC-MS测试。氯仿沥青“A”抽提按照《SY/T 5118—2005 岩石中氯仿沥青的测定》标准, 族组

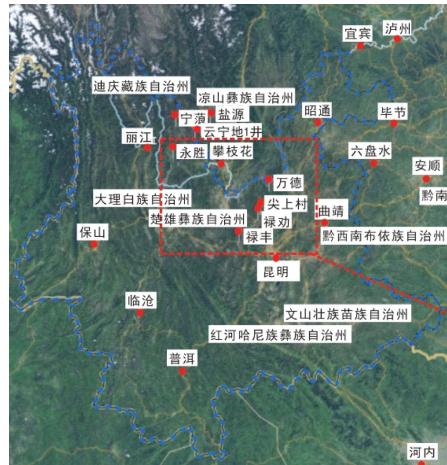


图 1 样品采集点位置及野外剖面示意图 (据刘文斌等, 2008 修改)

Fig. 1 Sample collection site and schematic diagram of the field section (the base map modified after Liu et al., 2008)



(a) 油苗A



(b) 油苗B

图 2 油苗照片

Fig. 2 Photographs of oil seepages

分分析按照《SY/T 5119—2016 岩石中可溶有机物及原油族组分分析》标准, 饱和烃的化合物组成按照《GB/T 18606—2017 气相色谱—质谱法测定沉积物和原油中生物标志物》标准进行(国家发展和改革委员会, 2005; 国家能源局, 2016; 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会, 2017)。

2 结果与讨论

2.1 有机族组成

原油族组成与母质来源有关, 不同来源的原油具有不同的族组成。油苗 A 的饱和烃含量 55.89%, 芳香烃含量 21.75%, 非烃含量 12.59%, 沥青质含量 6.14%; 油苗 B 的饱和烃含量 37.24%, 芳香烃含量 26.65%, 非烃含量 18.12%, 沥青质

含量 15.94%; 相对而言, 饱和烃和芳香烃含量较高, 非烃和沥青质的含量较低(表 1)。油苗 A 的基质岩石抽提物饱和烃含量 16.80%, 芳香烃含量 16.40%, 非烃含量 19.37%, 沥青质含量 42.39%; 油苗 B 的基质岩石抽提物饱和烃含量 14.42%, 芳香烃含量 19.77%, 非烃含量 24.72%, 沥青质含量 22.65%; 整体上, 两者饱和烃和芳香烃含量相似, 但油苗 A 基质岩石抽提物中沥青质含量比油苗 B 基质岩石抽提物高 20%。油苗 A 和 B 的原油饱和烃和芳香烃含量均高于其基质岩石抽提物, 而沥青质含量均较小, 说明原油运移到裂缝和方解石孔洞的过程中, 沥青质作为大分子, 不利于运移, 滞留在基质岩体内。

表 1 油苗与基质岩石抽提物族组分组成

Table 1 Composition of extracts from oil seepages and matrix rocks

样品	饱和烃/ %	芳香烃/ %	非烃/ %	沥青质/ %
油苗 A	55.89	21.75	12.59	6.14
油苗 B	37.24	26.65	18.12	15.94
油苗 A 基质岩石抽提物	16.80	16.40	19.37	42.39
油苗 B 基质岩石抽提物	14.42	19.77	24.72	22.65

2.2 正构烷烃和类异戊二烯烃

正构烷烃在原油和烃源岩抽提物中含量很高, 其分布的综合特征可以很好地反映有机质母质来源和成熟度方面信息, 可以作为油源对比的重要参数(刘光祥, 2008; 孙丽娜等, 2015; 王奇等, 2018; 郭永岩等, 2019)。由于油苗样品为来自同一层段的临近泥灰岩, 因此, 成熟度差异不大。从油苗 A 和 B 及其基质岩石的原油正构烷烃结构参数对比来看

(表 2, 图 3), 油苗 A 基质岩石抽提物的正构烷烃的分布峰型主要呈现单峰前峰型, 主峰碳以 C_{22} 为主, OEP (奇偶优势) 为 0.851, 正烷烃轻重碳比 $\sum nC_{21-} / \sum nC_{22+}$ 为 0.314, 具有微弱的偶碳优势和明显的重碳优势; 油苗 B 基质岩石抽提物的正构烷烃的分布峰型主要呈现单峰后峰型, 主峰碳以 C_{25} 为主, OEP (奇偶优势) 为 1.038, 正烷烃轻重碳比

$\sum nC_{21-} / \sum nC_{22+}$ 为 0.177, 具有微弱的奇碳优势和明显的重碳优势。油苗 A 和油苗 B 相对于基质岩石抽提物来说, 轻重碳比更高, 主峰碳数前移。一方面体现了油气运移的地质效应, 另一方面也间接表明油苗 A 和油苗 B 源岩生烃母质的差异, 油苗 A 源岩长链正烷烃 C—C 断裂而成为中—短链正构烷烃数量多, 生成更多的小分子轻烃。

表 2 油苗与基质岩石抽提物正构烷烃结构参数

Table 2 Structural parameters of n-alkanes of extracts from oil seepages and matrix rocks

样品	主峰碳	OEP	Pr/ C_{17}	Ph/ C_{18}	Pr/Ph	$\sum nC_{21-} / \sum nC_{22+}$
油苗 A	C_{19}	0.999	1.424	0.618	1.697	1.973
油苗 B	C_{25}	1.056	1.852	1.125	0.863	0.423
油苗 A 基质岩石抽提物	C_{22}	0.851	1.119	0.844	0.071	0.314
油苗 B 基质岩石抽提物	C_{25}	1.038	1.110	0.767	0.186	0.177

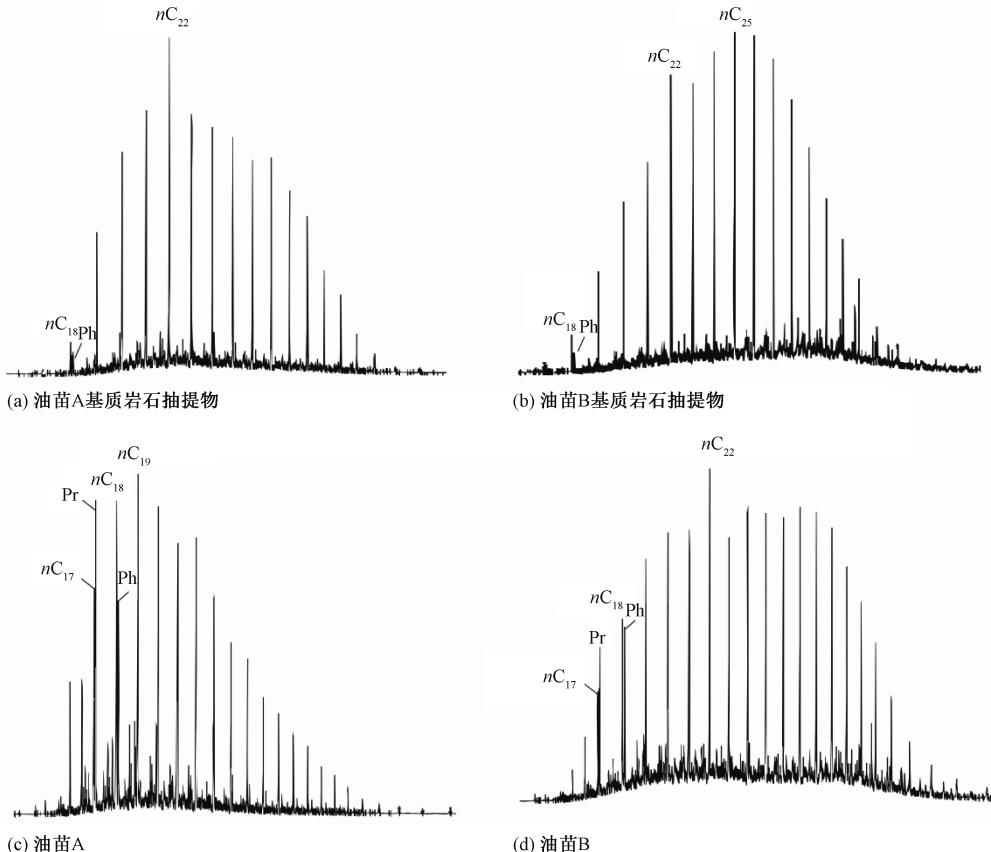


图 3 油苗与基质岩石抽提物饱和烃色谱

Fig. 3 Saturated hydrocarbon chromatography of extracts from oil seepages and matrix rocks

类异戊二烯烷烃中 Pr/C_{17} 和 Ph/C_{18} 值常用来研究母质类型、源岩沉积古环境和成熟度 (张启跃等, 2009), Pr/C_{17} 和 Ph/C_{18} 的交会图反映出油苗 A 和油苗 B 母质来源大类上相似 (图 4), 为海相—盐湖相。 Pr/Ph 是指示氧化还原环境的有效指标, 根据划分标准: $Pr/Ph < 0.5$, 强还原膏盐沉积

环境; $Pr/Ph = 0.5 \sim 1.0$, 还原环境; $Pr/Ph = 1 \sim 2$, 弱还原—弱氧化环境; $Pr/Ph > 2$, 偏氧化, 河湖及滨海沼泽或浅湖—海沉积; $Pr/Ph > 2.5$, 典型的煤系地层。 Pr/Ph 显示油苗 A 基质岩石抽提物、油苗 B 基质岩石抽提物和油苗 B 均为强还原—还原沉积古环境, 而油苗 A 为弱还原—弱氧化沉积古环境。

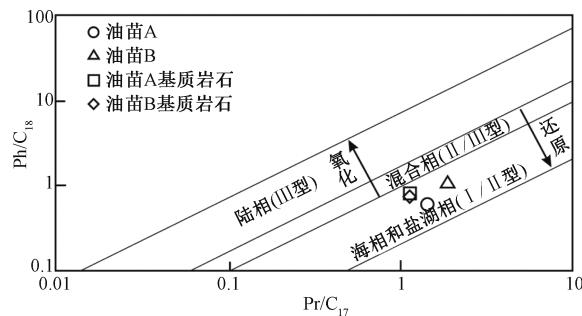


图 4 油苗和基质岩石抽提物 Pr/C_{17} 和 Ph/C_{18} 值相关图

Fig. 4 Relationship between Pr/C_{17} and Ph/C_{18} of extracts from oil seepages and matrix rocks

2.3 蒽烷和甾烷

甾类化合物是重要的生物标志化合物，也是

表 3 油苗与基质岩石抽提物生标参数

Table 3 Biomarker parameters of extracts from oil seepages and matrix rocks

样品来源	$\text{C}_{29} \text{ 20S}/(20S+20R)$	$\text{C}_{29} \beta\beta/(αα+ββ)$	Ts/Tm	重排甾烷/(规则甾烷+重排甾烷)	$\text{C}_{24} \text{ TeT}/\text{C}_{26} \text{ TT}$	$(\text{C}_{20}+\text{C}_{21})/\text{T}/(\text{C}_{23}+\text{C}_{24}) \text{ TT}$
油苗 A	0.45	0.54	0.10	0.37	1.92	0.65
油苗 B	0.53	0.56	0.52	0.33	3.18	0.49
油苗 A 基质岩石抽提物	0.45	0.49	0.08	0.35	2.40	0.35
油苗 B 基质岩石抽提物	0.50	0.53	0.44	0.36	3.84	0.36

注: $\text{Ga}/\text{C}_{30}\text{H}$ —伽马蜡烷/ C_{30} 萘烷; $\text{C}_{24} \text{ TeT}/\text{C}_{26} \text{ TT}$ — C_{24} 四环萜烷/ C_{26} 三环萜烷; $(\text{C}_{20}+\text{C}_{21})/\text{T}/(\text{C}_{23}+\text{C}_{24}) \text{ TT}$ — $(\text{C}_{20}+\text{C}_{21})$ 三环萜烷/ $(\text{C}_{23}+\text{C}_{24})$ 三环萜烷

重排甾烷主要用于有机质热演化程度判别,对于沉积古环境也有一定的指示作用(王炳凯等,2017),一般认为,有机质演化程度较低或者咸化水体的重排甾烷含量较低,油苗A、B及其基质岩石抽提物的重排甾烷/(规则甾烷+重排甾烷)比值较低,集中在0.32~0.37之间,且 $\text{C}_{29} \text{ 20S}/(20S+20R)$ 和 $\text{C}_{29} \beta\beta/(αα+ββ)$ 参数表明其已处于成熟阶段,故表明中泥盆统华宁组为咸化水体。

C_{27} 、 C_{28} 和 C_{29} 甾烷的相对含量对来源也有很好的指示作用,因为 C_{27} 和 C_{28} 甾烷通常来源藻类等低等水生生物,而 C_{29} 甾烷主要来源高等植物,因此,常用 C_{27} 、 C_{28} 和 C_{29} 的分布形态来判别来源,进行油源对比。油苗A和油苗A基质岩石抽提物总体上是 C_{27} 占优势,油苗B和油苗B基质岩石抽提物总体上是 C_{29} 占优势(图5),这表明油苗B有更多的高等植物的生烃贡献。TT(三环萜烷)来自菌藻类生物,因此局限咸化水体或者低等生物输入的TT丰度较高;TT具有很强的热稳定性,经历强烈的生物降解而不丧失生源信息,是很好的生源对比参数(卢双舫和张敏,2008)。油

经典的油源对比参数(刘全有等,2007;刘光祥,2008;孙丽娜等,2015;孙涛等,2011;赵晗等,2020)。研究发现 $\text{C}_{29} \text{ 20S}/(20S+20R)$ 和 $\text{C}_{29} \beta\beta/(αα+ββ)$ 小于0.25为未熟油,处于0.25~0.40之间的为低熟油,大于0.40的为成熟油(Peters et al., 2005;卢双舫和张敏,2008;蒋文龙,2016)。云南禄劝尖上村剖面不同位置油苗的 $\text{C}_{29} \text{ 20S}/(20S+20R)$ 值在0.45~0.53之间, $\text{C}_{29} \beta\beta/(αα+ββ)$ 值为0.49~0.56,均属于成熟油(表3),并且油苗A和油苗B成熟度要高于其基质岩石抽提物。同时,油苗A和油苗A基质岩石抽提物的Ts/Tm分别为0.10和0.08,油苗B和油苗B基质岩石抽提物的Ts/Tm分别为0.52和0.44(表3),说明油苗B和油苗B基质岩石成熟度更高一些。

苗B和油苗B基质岩石抽提物($\text{C}_{20}+\text{C}_{21})/\text{T}/(\text{C}_{23}+\text{C}_{24}) \text{ TT}$ 和 $\text{C}_{24} \text{ TeT}/\text{C}_{26} \text{ TT}$ 含量总体来说较高,分别为3.18~3.84、0.36~0.49,而油苗A和油苗A基质岩石抽提物($\text{C}_{20}+\text{C}_{21})/\text{T}/(\text{C}_{23}+\text{C}_{24}) \text{ TT}$ 和 $\text{C}_{24} \text{ TeT}/\text{C}_{26} \text{ TT}$ 含量较低(表3),也表明油苗B和油苗B基质抽提物的生烃母质具有较多的陆源高等植物的贡献。

3 地质意义

综上所述,从油苗、基质岩石抽提物的族组分、饱和烃甾烷及色谱对比图来看,油苗与中泥盆统华宁组三段的泥灰岩亲缘关系良好。云南禄劝地区中泥盆统华宁组三段的泥灰岩整体沉积于强还原—还原环境,已处于成熟阶段,生烃母质主要为藻类等低等水生生物,也有来自陆源高等植物的贡献,生成的原油经短距离源内运移后以饱和烃和芳香烃为主。

相关学者曾选取采自同一剖面的中泥盆统华宁组低熟泥灰岩开展了生烃热模拟实验(李慧莉等,2007),如图6所示,随着热演化程度的升高,

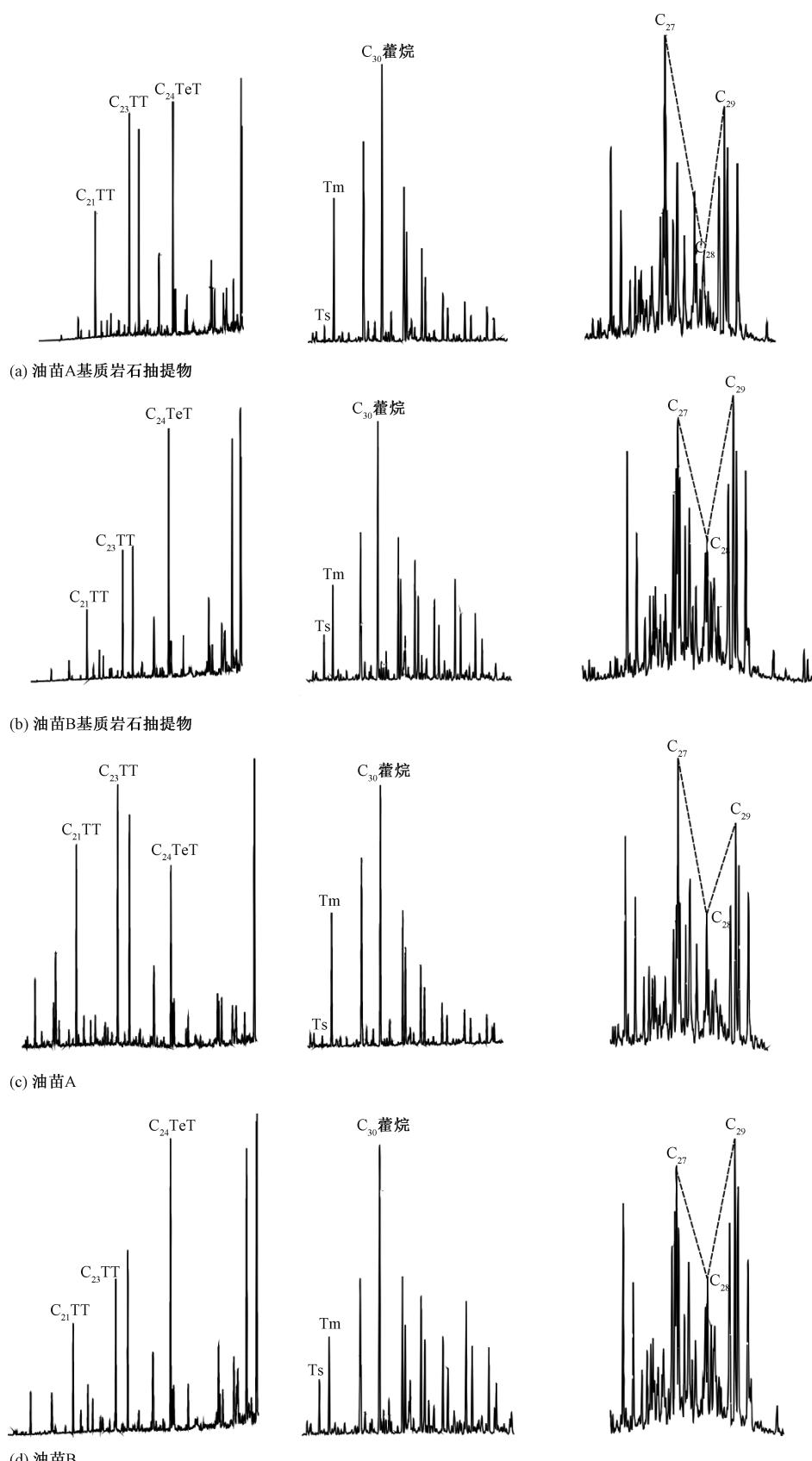


图 5 油苗与基质岩石抽提物生物标志化合物特征图谱

Fig. 5 Biomarker characterization of extracts from oil seepages and matrix rocks

呈现先生油、后生气的特征，在生油窗（等效镜质体反射率 $VR_o = 1.06\%$ ），最高液态烃产率可达 $360 \text{ mg/g} \cdot \text{TOC}$ ，至高过演化阶段，生成的液态烃继续热裂解生成烃气，当 $VR_o = 2.30\%$ 时，烃气产率达 $380 \text{ mg/g} \cdot \text{TOC}$ ，可见，中泥盆统华宁组泥灰岩具有较强的油气生成能力，生烃能力与 II₁ 型烃源岩相当（李剑等，2018；马中良等，2020）。

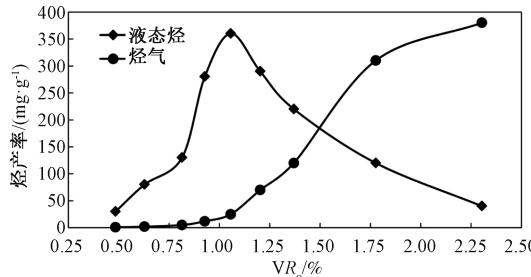


图 6 云南禄劝中泥盆统低熟泥灰岩热模拟实验结果（数据引自李慧莉等，2007）

Fig. 6 Experimental results of thermal simulation of low mature marls from the middle Devonian of Luquan, Yunnan (Data from Li et al., 2007)

此次野外剖面油苗的发现，证实了康滇古陆西缘泥盆系泥灰岩有过生油气过程，且保存条件好的情况下，油质较轻，以饱和烃和芳香烃为主，具有一定的页岩油气勘探潜力，在局部如有好的圈闭，也可兼探常规油气。如宁蒗盆地泥盆纪时期整体为海侵沉积环境，早泥盆世，盆地西北丽江阿冷初至盆地东南部的跑马坪一带泥页岩、泥灰岩的 TOC 平均为 3.67% ，属非常好的烃源岩， R_o 均已超过 2% ，已进入干气阶段（董林，2017）；中泥盆世，盆地东部形成大套礁灰岩-礁白云岩，为最重要的储层段；以下泥盆统海相碳酸盐岩作为生油层，中泥盆礁灰岩-礁白云岩做储层，盆地相泥页岩作为盖层的组合，形成一套较好生储盖组合。其中，腹部的宁东断坳带和宁中断阶带构造圈闭发育，埋深适中，是常规油气的有利勘探区；东部的宁东南断阶带，断裂相对不发育，埋藏深度不大且泥盆系烃源岩厚度较大，是非常规页岩气勘探的有利场所（董林，2017；王振华，2000；林宗满，2012）。

中国地质调查局油气资源调查中心在宁蒗—盐源地区部署的云宁地 1 井显示中泥盆统大槽子组发育潟湖相沉积，生屑泥岩厚度大，气测显示好，是有利的页岩气勘查层位；碳山坪组为生物礁相沉积，储集性能好，具有良好的生储组合，气测

显示好，是有利的常规天然气勘查层位（张子亚等，2019）。建议进一步加强该地区泥盆系泥页岩地质背景、分布特征、有机地化、保持条件和含气性等综合研究，明确该地区常规和非常规油气富集条件和主控因素，为勘探部署提供科学依据。

4 结论

(1) 云南禄劝地区中泥盆统华宁组发现了液态油苗，地球化学特征表明其与中泥盆统华宁组三段的泥灰岩亲缘关系较好。

(2) 中泥盆统华宁组三段的泥灰岩整体沉积于强还原—还原环境，生烃母质主要为藻类等高等水生生物，也有来自陆源高等植物的贡献，已处于成熟阶段，具有较强的油气生成能力，生成的原油经短距离源内运移后以饱和烃和芳香烃为主。

(3) 油苗的发现和勘探实践表明康滇古陆西缘泥盆系泥灰岩有过生油气过程，保存条件好的情况下，具备常规和非常规油气勘探潜力。

References

- DONG L, 2017. Analysis on advantageous area of oil and gas exploration in Ninglang Basin [J]. China Energy and Environmental Protection, 39 (2): 155-159. (in Chinese with English abstract)
- FANG R S, 2000. A discussion about the Devonian stratigraphy of Yunnan [J]. Yunnan Geology, 19 (1): 62-90. (in Chinese with English abstract)
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China, 2017. The test method for biomarkers in sediment and crude oil by GC-MS: GB/T 18606-2017 [S]. Beijing: China Standard Press.
- GUO X S, HU D F, WEI Z H, et al., 2016. Discovery and exploration of Fuling shale gas field [J]. China Petroleum Exploration, 21 (3): 24-37. (in Chinese with English abstract)
- GUO Y Y, LIANG M L, WANG Z X, et al., 2019. Organic geochemistry and mineral composition characteristics in shales of Niutitang formation, Northwestern Hunan [J]. Journal of Geomechanics, 25 (3): 392-399.
- JIANG W L, 2016. Comparative study on the source rock geochemical characteristics of natural evolution and thermal simulation in Western Canada sedimentary basin [D]. Beijing: China University of Geosciences. (in Chinese with English abstract)
- LI H L, JIN Z J, HE Z L, et al., 2007. Thermal simulation experiment on the hydrocarbon regeneration of marine carbonate source rock [J]. Chinese Science Bulletin, 52 (14): 1992-1999.

- LI J, MA W, WANG Y F, et al., 2018. Modeling of the whole hydrocarbon-generating process of sapropelic source rock [J]. Petroleum Exploration and Development, 45 (11): 445-454. (in Chinese with English abstract)
- LIN L B, CHEN H D, CHEN Z L, et al., 2009. Characteristics of Middle Devonian hydrocarbon source rocks in the Guizhong (Middle Guangxi) depression [J]. Natural Gas Industry, 29 (3): 45-47. (in Chinese with English abstract)
- LIN Z M, 2012. A demanding development to hydrocarbon resources in Chuxiong basin [J]. Journal of Geomechanics, 18 (4): 359-378. (in Chinese with English abstract)
- LIU G X, 2008. Thermal simulation study of crude oil from well S74 in the Tarim Basin (I): Geochemical characteristics of the simulation products [J]. Petroleum Geology & Experiment, 30 (2): 179-185, 191. (in Chinese with English abstract)
- LIU Q Y, LIU W H, MENG Q X, 2007. Geochemical characteristics of steranes in saturated hydrocarbons from coal and exinite in pyrolysis under closed systems [J]. Natural Gas Geoscience, 18 (2): 249-253, 265. (in Chinese with English abstract)
- LIU W B, HU K, QIN J Z, et al., 2008. Organic geochemistry and hydrocarbon potential of liptobiolite in Luquan, Yunnan province [J]. Geochimica, 37 (1): 68-76. (in Chinese with English abstract)
- LU S F, ZHANG M, 2008. Petroleum geochemistry [M]. Beijing: Petroleum Industry Press. (in Chinese)
- MA X H, XIE J, 2018. The progress and prospects of shale gas exploration and exploitation in southern Sichuan Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 45 (1): 161-169. (in Chinese with English abstract)
- MA Z L, SHEN B J, PAN A Y, et al., 2020. Origin and carbon isotope reversal of shale gas in Wufeng-Longmaxi formations, Sichuan Basin: implication from pyrolysis experiments [J]. Petroleum Geology & Experiment, 42 (3): 428-433. (in Chinese with English abstract)
- MENG J H, PAN R F, CHEN H, et al., 2016. Shale gas accumulation condition and resource potential analysis of devonian in Dian-Qian-Gui basin [J]. Geoscience, 30 (1): 181-191. (in Chinese with English abstract)
- National Development and Reform Commission, 2005. Determination of bitumen from rocks by chloroform extraction: SY/T5118-2005 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press. (in Chinese)
- National Energy Administration, 2016. Analytical method of soluble organic matters in rocks and crude oil group composition column chromatography: SY/T5119-2016 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press. (in Chinese)
- PAN R F, HUANG X S, 2009. Shale gas and its exploration prospects in China [J]. China Petroleum Exploration, 14 (3): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- PETERS K E, WALTERS C C, MOLDOWAN J M, 2005. The biomarker guide, volume 2: biomarkers and isotopes in the petroleum exploration and earth history [M]. Cambridge: Cambridge University Press: 490.
- QIN J Z, LIU B Q, ZHENG L J, et al., 2006. Study on capability of hydrocarbon generation and expulsion from marine carbonate source rocks [J]. Oil & Gas Geology, 27 (3): 348-355. (in Chinese with English abstract)
- SHI Y, GONG D M, 1992. Advances of Devonian research in Baoshan-Shidian area, W-Yunnan [J]. Journal of Chengdu College of Geology, 19 (3): 21-32. (in Chinese with English abstract)
- SUN L N, ZHANG Z N, WU Y D, et al., 2015. Evolution patterns and their significances of biomarker maturity parameters—a case study on liquid hydrocarbons from type III source rock under HTHP hydrous pyrolysis [J]. Oil & Gas Geology, 36 (4): 573-580. (in Chinese with English abstract)
- SUN T, DUAN Y, 2011. Geochemical characteristics of steranes of coal generated hydrocarbons: A case of high temperature and fined simulated experiment [J]. Natural Gas Geoscience, 22 (6): 1082-1087. (in Chinese with English abstract)
- WANG B K, FENG Q, TIAN F Z, et al., 2017. The characteristics and significance of biomarker compounds in the Permian Lucaogou Formation hydrocarbon source rock on the southern margin of the Junggar Basin [J]. Geological Bulletin of China, 36 (2): 304-313. (in Chinese with English abstract)
- WANG P W, CHEN Z L, HE X Y, et al., 2012. Shale gas accumulation conditions and play evaluation of the Devonian in Guizhong depression [J]. Oil & Gas Geology, 33 (3): 353-363. (in Chinese with English abstract)
- WANG Q, HAO F, XU C G, et al., 2018. Origin and accumulation characterization of petroleum in buried hill reservoirs in Shaxibei area, Bohai Sea [J]. Oil & Gas Geology, 39 (4): 676-684. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z H, 2000. Oil and gas exploration potential analysis of Ninglang Basin [J]. Yunnan Geology, 19 (4): 443-448. (in Chinese with English abstract)
- YUAN K, FANG X X, WEN T, et al., 2017. Accumulation conditions of Devonian shale gas in Well GY 1 in northwestern Central Guangxi depression [J]. China Petroleum Exploration, 22 (4): 90-97. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Q Y, ZHOU C Y, LU T, et al., 2009. Discovery of oil seepage from the Middle Triassic of Luoping area, eastern Yunnan, China [J]. Geological Bulletin of China, 28 (10): 1526-1532. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Z Y, ZHANG C, SHI D S, et al., 2019. Important discovery of Devonian natural gas in Yunningdi 1 Well of Ninglang-Yanyuan area [J]. Geology in China, 46 (2): 432-433. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO H, MA Z L, ZHENG L J, et al., 2020. Geochemical characteristics of hydrocarbon products under thermal simulation of temperature and pressure co-control in finite space [J]. Natural Gas Geoscience, 31 (1): 73-83 (in Chinese with English abstract)
- ZHOU L, WANG Z X, LI H J, et al., 2018. Accumulation pattern of organic matter in shales of the lower Cambrian niutitang formation, Chuandong-Wulingshan Area [J]. Journal of Geomechanics, 24 (5): 617-626.
- ZHOU Y, ZHU D Y, MENG Q Q, et al., 2014. Geological conditions

and exploration potential of shale gas in Central Guangxi basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 41 (5): 529-537. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 董林, 2017. 宁蒗盆地油气勘探有利区分析 [J]. 能源与环保, 39 (2): 155-159.
- 方润森, 2000. 云南泥盆系区域地层及有关问题探讨 [J]. 云南地质, 19 (1): 62-90.
- 国家发展和改革委员会, 2005. 岩石中氯仿沥青的测定: SY/T 5118-2005 [S]. 北京: 石油工业出版社.
- 国家能源局, 2016. 岩石中可溶有机物及原油族组分分析: SY/T 5119-2016 [S]. 北京: 石油工业出版社.
- 郭旭升, 胡东风, 魏志红, 等, 2016. 涪陵页岩气田的发现与勘探认识 [J]. 中国石油勘探, 21 (3): 24-37.
- 郭永岩, 梁明亮, 王宗秀, 等, 2019. 湘西北地区下寒武统牛蹄塘组页岩有机地球化学与矿物组成特征 [J]. 地质力学学报, 25 (3): 392-399.
- 蒋文龙, 2016. 西加盆地烃源岩自然演化与热模拟地球化学特征对比研究 [D]. 北京: 中国地质大学.
- 李慧莉, 金之钧, 何治亮, 等, 2007. 海相烃源岩二次生烃热模拟实验研究 [J]. 科学通报, 52 (11): 1322-1328.
- 李剑, 马卫, 王义凤, 等, 2018. 腐泥型烃源岩生排烃模拟实验与全过程生烃演化模式 [J]. 石油勘探与开发, 45 (11): 445-454.
- 林良彪, 陈洪德, 陈子焯, 等, 2009. 桂中坳陷中泥盆统烃源岩特征 [J]. 天然气工业, 29 (3): 45-47.
- 林宗满, 2012. 楚雄盆地油气资源亟待勘查发现 [J]. 地质力学学报, 18 (4): 359-378.
- 刘光祥, 2008. 塔里木盆地 S74 井稠油热模拟实验研究 (一): 模拟产物地球化学特征 [J]. 石油实验地质, 30 (2): 179-185, 191.
- 刘全有, 刘文汇, 孟仟祥, 2007. 热模拟实验中煤岩及显微组分饱和烃甾烷系列化合物有机地球化学特征 [J]. 天然气地球科学, 18 (2): 249-253, 265.
- 刘文斌, 胡凯, 秦建中, 等, 2008. 云南禄劝残植煤的有机地球化学特征及其石油地质意义 [J]. 地球化学, 37 (1): 68-76.
- 卢双舫, 张敏, 2008. 油气地球化学 [M]. 北京: 石油工业出版社.
- 马新华, 谢军, 2018. 川南地区页岩气勘探开发进展及发展前景 [J]. 石油勘探与开发, 45 (1): 161-169.
- 马中良, 申宝剑, 潘安阳, 等, 2020. 四川盆地五峰组-龙门溪组页岩气成因与碳同位素倒转机制: 来自热模拟实验的认识 [J]. 石油实验地质, 42 (3): 428-433.
- 孟江辉, 潘仁芳, 陈浩, 等, 2016. 滇黔桂盆地泥盆系页岩气成藏条件及资源潜力分析 [J]. 现代地质, 30 (1): 181-191.
- 潘仁芳, 黄晓松, 2009. 页岩气及国内勘探前景展望 [J]. 中国石油勘探, 14 (3): 1-5.
- 秦建中, 刘宝泉, 郑伦举, 等, 2006. 海相碳酸盐岩烃源岩生排烃能力研究 [J]. 石油与天然气地质, 27 (3): 348-355.
- 时言, 龚大明, 1992. 滇西保山施甸地区泥盆系研究新知 [J]. 成都地质学院学报, 19 (3): 21-32.
- 孙丽娜, 张中宁, 吴远东, 等, 2015. 生物标志化合物热成熟度参数演化规律及意义: 以Ⅲ型烃源岩 HTHP 生排烃热模拟液态烃产物为例 [J]. 石油与天然气地质, 36 (4): 573-580.
- 孙涛, 段毅, 2011. 煤系有机质生成烃类中甾烷系列化合物地球化特征: 以高温封闭体系下热模拟实验为例 [J]. 天然气地球科学, 22 (6): 1082-1087.
- 王炳凯, 冯乔, 田方正, 等, 2017. 新疆准噶尔盆地南缘二叠系芦草沟组烃源岩生物标志化合物特征及意义 [J]. 地质通报, 36 (2): 304-313.
- 王鹏万, 陈子科, 贺训云, 等, 2012. 桂中坳陷泥盆系页岩气成藏条件与有利区带评价 [J]. 石油与天然气地质, 33 (3): 353-363.
- 王奇, 郝芳, 徐长贵, 等, 2018. 渤海海域沙西北地区潜山油源及成藏特征 [J]. 石油与天然气地质, 39 (4): 676-684.
- 王振华, 2000. 宁蒗盆地油气勘探远景分析 [J]. 云南地质, 19 (4): 443-448.
- 苑坤, 方欣欣, 闻涛, 等, 2017. 桂中坳陷西北部桂页 1 井泥盆系页岩气聚集条件研究 [J]. 中国石油勘探, 22 (4): 90-97.
- 张启跃, 周长勇, 吕涛, 等, 2009. 滇东罗平地区中三叠统中发现液态油苗 [J]. 地质通报, 28 (10): 1526-1532.
- 张子亚, 张聪, 石砾石, 等, 2019. 宁蒗—盐源地区(云宁地 1 井)泥盆系获天然气重大发现 [J]. 中国地质, 46 (2): 432-433.
- 赵晗, 马中良, 郑伦举, 等, 2020. 有限空间温压共控热模拟油气产物地球化学特征 [J]. 天然气地球科学, 31 (1): 73-83.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2017. 气相色谱-质谱法测定沉积物和原油中生物标志物: GB/T 18606-2017 [S]. 北京: 中国标准出版社.
- 周磊, 王宗秀, 李会军, 等, 2018. 川东—武陵山地区下寒武统牛蹄塘组页岩有机质富集模式 [J]. 地质力学学报, 24 (5): 617-626.
- 周雁, 朱东亚, 孟庆强, 等, 2014. 桂中盆地页岩气地质条件及潜力分析 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 41 (5): 529-537.

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

