

四川盆地江油厚坝油砂有机地球化学特征 与成因研究

罗 茂¹, 耿安松^{1*}, 廖泽文¹, 单玄龙²

(1. 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, 广东 广州 510640; 2. 吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061)

摘 要: 四川江油厚坝油砂产于侏罗系沙溪庙组下段, 含油砂层沿北东方向延伸约 25 km。露头 and 岩芯油砂样抽提得到氯仿沥青“A”含量为 0.4%~3.3%。抽提物饱和烃 GC-MS 分析得到的分子有机地球化学特征表明, 油砂油遭受严重生物降解, 饱和烃分布呈现双大鼓包, 正构烷烃和异构烷烃基本被降解; 三环萜烷含量丰富, 孕甾烷和升孕甾烷含量也较高, 规则甾烷具 C₂₉ 优势; 芳烃组分中富含噻吩类化合物和烷基萘, 露头和岩芯样品氯仿沥青“A”碳同位素值小于-34‰。厚坝油砂分子地球化学特征、碳同位素组成和川西北地区地质构造特征表明, 原油可能主要来自震旦系和寒武系烃源岩, 母质来源以藻类和细菌为主。

关键词: 侏罗系油砂; 甾烷和萜烷; 碳同位素; 生物降解; 四川盆地

中图分类号: P593 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2011)03-0280-09

The organic geochemical characteristics and genesis study of Houba oil sand in the Sichuan Basin, China

LUO Mao¹, GENG An-song^{1*}, LIAO Ze-wen¹ and SHAN Xuan-long²

1. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. School of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

Abstract: Oil sand is widely cropped out at Houba region of Sichuan Province. The lower member of the Jurassic Shaximiao Formation is the main oil reservoir, which is composed of sandstone beds stretching towards north-east orientation for as long as roughly 25 km. Tar sand oil contents of cropped and drilled samples range from 0.4% to 3.3%. Characteristics of saturated hydrocarbon component analyzed by GC-MS showed that tar sand oils were severely biodegraded, which was featured by the disappearance of *n*-alkanes and iso-alkanes. Biomarkers like tricyclic terpane, pregnane and homo-pregnane have relatively high contents. Meanwhile, the content of C₂₉ regular steranes is relatively high compared to its C₂₇, C₂₈ series. Mass chromatograms of aromatic hydrocarbons were characterized by prolific alkylated phenanthrenes and thiophene series. Bulk oil carbon isotope components of the tar sand oils from drilled and cropped samples are depleted (< -34‰). Features for both biomarkers and carbon isotope ratios of the Houba oil sand imply that these oils may have originated from Sinian-Cambrian source rocks and had biological sources comprising of algae and bacteria.

Key words: Jurassic oil sand; steranes and terpanes; carbon isotope; biodegradation; Sichuan Basin

0 引 言

随着常规石油资源的不断消耗和我国对能源需

求的增加, 寻找新的替代能源显得异常紧迫。油砂作为非常规石油资源, 在油价长期居高的情势下将成为重要接替能源, 在今后能源结构中会占有越来越重要的位置。我国油砂资源丰富, 探明的资源量

收稿日期(Received): 2010-07-19; 改回日期(Revised): 2010-11-25; 接受日期(Accepted): 2010-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(40772071); 全国油气资源战略选区调查与评价专项(2009GYXQ14)

作者简介: 罗茂(1985-), 男, 硕士研究生, 有机地球化学专业。E-mail: mao850503@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): GENG An-song, E-mail: asgeng@gzb.ac.cn, Tel: +86-20-87682870

为 22.58 亿 t^[1], 主要分布在松辽、鄂尔多斯、塔里木、柴达木、准噶尔和四川等各含油气盆地。近年来, 随勘探程度和野外地质调查的进一步深入, 在川西北地区发现了丰富的油砂资源, 如厚坝和天井山油砂矿, 此外川西北地区丰富的油苗和沥青出露点(矿山梁, 碾子坝地区)暗示了这个地区蕴含油气资源。以往针对厚坝油砂岩及其邻区油砂矿(如天井山)的研究, 多集中于对油砂油的来源和成藏机制等问题的探讨^[2-5], 且这些研究多是从构造的角度和烃源岩的区域展布上展开, 对油砂的基本地球化学特征研究相对较少^[6]。

本次研究拟针对四川厚坝地区油砂进行系统的有机地球化学研究, 初步查明江油厚坝地区油砂油的基本地球化学特征, 并结合油砂沥青中生物标志化合物、稳定碳同位素和区域地质构造特征对厚坝油砂的油源进行有益的探讨, 以为厚坝油砂资源的合理评估和开发利用提供基础资料积累, 并为指导川西北地区油气资源的深入勘探提供基础。

1 样品与实验

研究区位于川西北龙门山推覆构造带的北段, 也是龙门山推覆构造带的山前带^[6]。这一构造区块油气苗显示丰富。对厚坝地区进一步的地质调查发现, 厚坝油砂位于厚坝镇至青林口镇公路之间, 含油砂层主要为侏罗系沙溪庙组下段(J₂S¹)砂岩层。这套地层出露较全, 地层走向 40°~50°, 倾角 30°~45°, 南南东倾, 底部为中厚层中粒砂岩, 风化强烈, 胶结疏松, 具交错、板状层理; 上部砂粒较细, 见平行层理, 为河-湖相沉积环境。

四川厚坝油砂产出层位为下侏罗统沙溪庙组, 本次工作对沿线该砂岩层进行了野外考察和采样, 并对厚坝辛家沟一带布设的钻井岩芯进行了系统取样。野外共取得露头样 20 个, 岩芯样 34 个。取样位置的分布如图 1 所示, 沙溪庙组含油砂岩层展布广泛, 地层延伸达 25 km。油砂样品位置和编号见表 1。

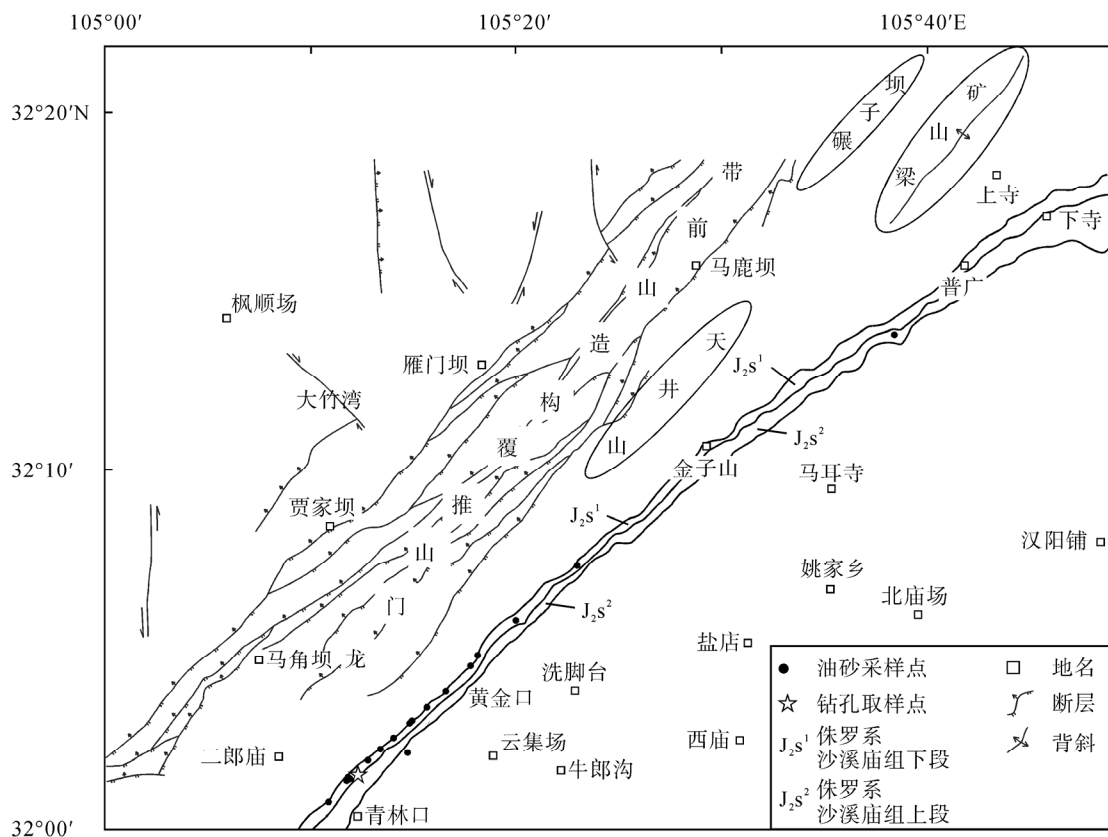


图 1 四川厚坝-青林口地区侏罗系沙溪庙组油砂野外考察取样分布图(1:20 万)

Fig.1 A simplified geological map showing sampling locations of Jurassic oil sand in Houba region of Sichuan Province (1:200000)

表1 四川盆地厚坝侏罗系油砂样品一览表
Table 1 Jurassic oil sand sample localities from Houba region of the Sichuan Basin

样号	GPS 点位(N/E)	性质	深度(m)	样号	性质	深度(m)
HBDH-01	32°04'02.4"/105°09'52.3"	露头样	/	HBDH-28	岩芯样	53.60
HBDH-02	32°03'41"/105°09'25.8"	露头样	/	HBDH-29	岩芯样	52.35
HBDH-03	32°03'39.4"/105°09'24"	露头样	/	HBDH-30	岩芯样	50.40
HBDH-04	32°03'35.9"/105°09'19.5"	露头样	/	HBDH-31	岩芯样	48.90
HBDH-05	32°03'12.5"/105°08'50.7"	露头样	/	HBDH-32	岩芯样	47.50
HBDH-06	32°02'53.9"/105°08'25.9"	露头样	/	HBDH-33	岩芯样	46.00
HBDH-07	32°02'48"/105°09'16.5"	露头样	/	HBDH-34	岩芯样	44.30
HBDH-08	32°02'36.2"/105°08'03.1"	露头样	/	HBDH-35	岩芯样	43.20
HBDH-09	32°02'09"/105°07'32"	露头样	/	HBDH-36	岩芯样	41.80
HBDH-10	32°02'09"/105°07'32"	露头样	/	HBDH-37	岩芯样	40.60
HBDH-11	32°02'08"/105°07'32"	露头样	/	HBDH-38	岩芯样	38.40
HBDH-12	32°02'08"/105°07'32"	露头样	/	HBDH-39	岩芯样	37.00
HBDH-13	32°02'08"/105°07'33"	露头样	/	HBDH-40	岩芯样	35.30
HBDH-14	32°01'31"/105°06'50"	露头样	/	HBDH-41	岩芯样	33.60
HBDH-15	32°14'02"/105°24'17"	露头样	/	HBDH-42	岩芯样	31.70
HBDH-16	32°04'27"/105°10'26.9"	露头样	/	HBDH-43	岩芯样	30.10
HBDH-17	32°05'9.3"/105°11'12.9"	露头样	/	HBDH-44	岩芯样	28.70
HBDH-18	32°05'25.5"/105°11'30.1"	露头样	/	HBDH-45	岩芯样	27.50
HBDH-19	32°06'22.9"/105°12'36.8"	露头样	/	HBDH-46	岩芯样	25.60
HBDH-20	32°07'49.9"/105°14'30.3"	露头样	/	HBDH-47	岩芯样	23.90
HBDH-21	32°02'11.5"/105°07'29"	岩芯样	62.40	HBDH-48	岩芯样	22.50
HBDH-22		岩芯样	61.65	HBDH-49	岩芯样	21.50
HBDH-23		岩芯样	60.95	HBDH-50	岩芯样	19.20
HBDH-24		岩芯样	59.40	HBDH-51	岩芯样	18.30
HBDH-25		岩芯样	58.10	HBDH-52	岩芯样	16.50
HBDH-26		岩芯样	56.85	HBDH-53	岩芯样	15.10
HBDH-27		岩芯样	55.10	HBDH-54	岩芯样	14.20

注: HBDH-21~HBDH-54 采自同一口钻井岩芯。

将露头和岩芯样分别粉碎至 35~40 目, 其中岩芯样在处理前先用刷子洗去表层打钻污染的润滑油和泥浆等成分。取破碎后的油砂样 10~30 g 左右, 利用 CHCl_3 (分析纯)索氏抽提约 72 h 后得到氯仿沥青“A”。

实验室对抽提出的 54 个油砂样氯仿沥青“A”进行了族组分分离, 正己烷沉淀得到沥青质组分, 剩下的沥青组分用硅胶、氧化铝层析柱进一步分离得到饱和烃、芳烃和非烃组分; 饱和烃、芳烃和非烃组分分别用正己烷、甲苯和乙醇洗脱得到。

对分离出来的饱和烃, 芳烃组分进一步做 GC-MS 分析, 在 ThermoFisher-DSQ II 色谱质谱分析仪上完成上述测试。测试条件: 色谱柱为 DB-5MS(60 m×0.32 mm×0.25 μm)弹性石英毛细管

柱。饱和烃升温程序采用 80 °C 恒温 4 min, 以 4 °C/min 速率升温至 295 °C, 恒温 30 min; 芳烃组分升温程序为从 80 °C 开始恒温 4 min, 再以 3 °C/min 速率升温至 290 °C, 恒温 15 min。质谱条件为, EI 源(70 eV), 离子源温度 250 °C, He 气为载气, 进样口温度 290 °C, 传输线温度 280 °C。油砂氯仿沥青碳同位素分析采用 Thermo Finigan-Delta Plus XL 气相色谱-稳定同位素比值质谱仪检测, 每个样品同位素分析都做了平行实验, 误差范围在 0.5‰ 以内。

2 结果与讨论

2.1 油砂含油率与族组成

54 个油砂样品的含油率测试结果表明, 厚坝油

砂含油率普遍较低。露头样品与岩芯样品含油率相当,在0.4%~3.3%之间不等;纵向上油砂层样品含油率变化也不大,大部分样品集中在2%左右。当前油砂开采利用上,将油砂矿分为贫矿和富矿。富矿油砂含油在10%以上,贫矿含油4%~5%,甚至更低^[7]。厚坝油砂属贫矿范畴。此外,与典型油砂(如加拿大Alberta省油砂)相比,厚坝油砂岩胶结相对致密,资源开发的难度较大。

对抽提得到的氯仿沥青进行柱层析分离,得到的54个油砂抽提物的族组分含量分布如图2所示。可以看到,厚坝油砂露头样品中饱和烃、芳烃组分与胶质沥青质含量变化较大;岩芯样品中,族成分分布趋于一致,表现为油砂油饱/芳比略大于1,(饱和烃+芳烃组分) > (非烃+沥青质);而对于露头样品,20个样品中有11个样品的(胶质+沥青质) > (饱和烃+芳烃组分),9个样品则相反。露头样品和岩芯样品在族组成上的差别反映了水洗、氧化过程对地表露头油砂样品的改造,这种改造作用导致油砂抽提物中胶质和沥青质含量有增高的趋势。

2.2 饱和烃

对54个油砂样品所作气相色谱-质谱分析得到的饱和烃分布举例如图3所示,油砂普遍遭受生物降解,样品中正构烷烃和无环类异戊二烯烷烃已损失殆尽,鼓包严重,未分辨化合物含量高。进一步对油砂样品中甾烷,萜烷和藿烷类化合物的识别和辨认发现,甾烷和藿烷类都遭受不同程度降解,并普遍检测出17 α (H)-25降藿烷。依照Peters *et al.* 所定生物降解级别序列^[8],厚坝油砂生物降解程度已达7级。

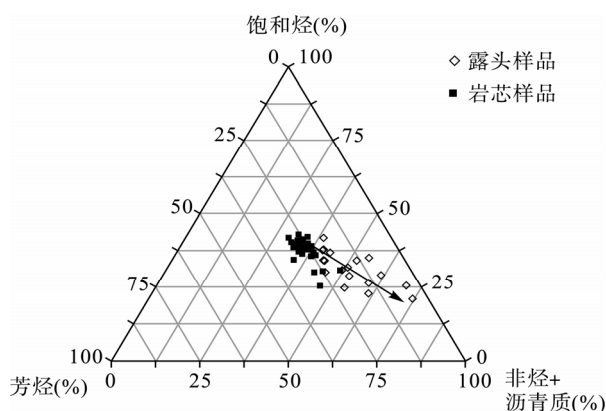


图2 油砂氯仿沥青族组成分布三角图

Fig.2 Ternary diagram showing relative proportions of saturate, aromatic and NOS+asphaltene fractions for the Houba oil sand bitumens

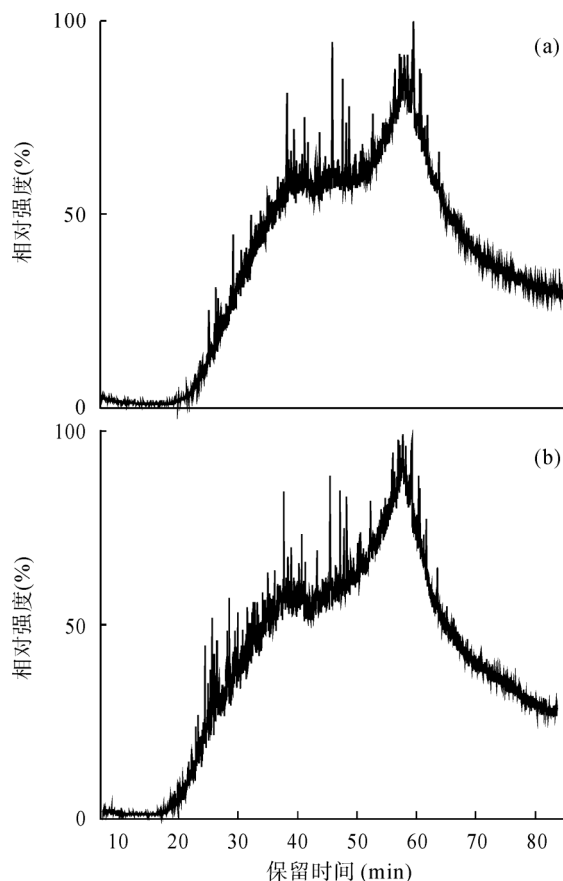


图3 厚坝油砂两个样品的饱和烃总离子流图

Fig.3 Representative chromatograms of saturate fractions from extracts of Houba oil sand
(a)露头油砂样; (b)岩芯油砂样(深度48.90 m)。
(a)Cropped oil sand sample; (b)drilled oil sand sample (depth: 48.90 m).

2.3 芳烃

厚坝油砂中检测出来的芳烃化合物具体包括甲基萘系列、菲及其甲基化系列化合物、噻吩类化合物(包括二苯并噻吩、甲基二苯并噻吩、二甲基二苯并噻吩和三甲基二苯并噻吩)、萤葱、芘和三芳甾(图4)。在芳烃总离子流图上,以二甲基菲系列化合物构成基峰,其次噻吩系列化合物含量也较高,甲基萘系列化合物丰度相对较低。在 m/z 231质量色谱图上,以 C_{21} 三芳甾为基峰,其次为 C_{20} 、 C_{26} 、 C_{27} 和 C_{28} 三芳甾,含量相对较低(图5),后三者中以 C_{28} 三芳甾烷占优势。

芳烃化合物由于具有一定的生物毒性,因而对生物降解有一定的抵抗能力,其降解难易程度一般随芳环数以及烷基取代侧链的增加而降低,同时不同烷基取代位置对生物降解作用有一定的影响;多环芳烃抗生物降解能力的强弱顺序大致是:三芳甾烷系列>甾系列>菲系列>萘系列^[9]。厚坝油砂中低含

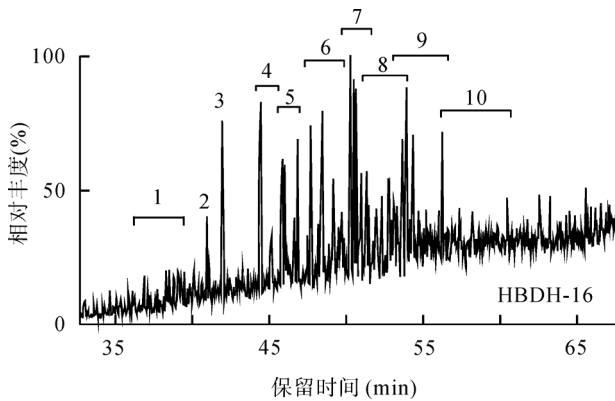


图4 厚坝油砂露头样品的芳烃总离子流图

Fig.4 Representative chromatograms of aromatic fractions from extracts of Houba oil sand

1-四甲基萘; 2-二苯并噻吩; 3-菲; 4-甲基二苯并噻吩; 5-甲基菲; 6-二甲苯二苯并噻吩; 7-二甲基菲; 8-三甲基二苯并噻吩; 9-三甲基菲; 10-四甲基菲。

1-Tetramethylnaphthalenes; 2-dibenzothiophene; 3-phenanthrene; 4-methyl-dibenzothiophenes; 5-methylphenanthrenes; 6-dimethyl-dibenzothiophenes; 7-dimethyl-phenanthrenes; 8-trimethyl-dibenzothiophenes; 9-trimethyl-phenanthrenes; 10-tetramethyl-phenanthrenes.

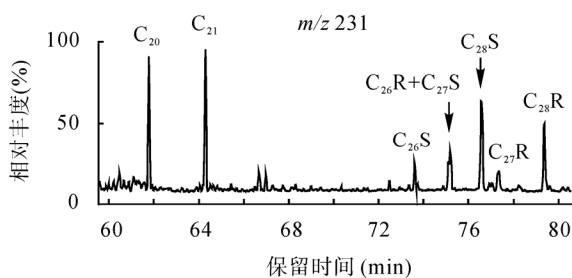


图5 四川厚坝油砂氯仿沥青中三芳甾烷质量色谱图

Fig.5 Mass chromatograms of triaromatic steranes from extracts of Houba oil sand

其中 C_{20} 代表 $C_{20}H_{20}$ 三芳甾烷, R、S 代表不同的构型异构体。
 C_{20} represents $C_{20}H_{20}$ triaromatic sterane, R, S denotes different configurational isomers.

量萘系列化合物可能源于生物降解作用对原油的改造, 因萘系列化合物最易受降解作用的改造; 三芳甾烷类化合物因抗生物降解能力强而保留完整。

2.4 生物标志化合物

厚坝油砂饱和烃中检测出丰富的二环倍半萜类, 在 m/z 123 质量色谱图上可辨认出 C_{15} 、 C_{16} 两组倍半萜类化合物(图6)。在分布上, C_{15} 以 $8\beta(H)$ -补身烷为主峰, C_{16} 以 $8\beta(H)$ -升补身烷为主峰, 且谱图以后者为基峰。 $8\alpha(H)$ -升补身烷可能因含量少或是受到成熟度的影响未被检测出。 $8\alpha(H)$ -升补身烷和 $8\beta(H)$ -升补身烷相对丰度会随成熟度变化而变化, $8\alpha(H)$ -

升补身烷热稳定性低, 容易发生变化; 而 $8\beta(H)$ -升补身烷在热演化过程中不易发生变化^[10-12]。厚坝油砂倍半萜中未检出 $8\alpha(H)$ -升补身烷, 而是以 $8\beta(H)$ -升补身烷为基峰的特征分布, 这似乎表明原油经历了相当程度的热演化。

遭受生物降解后, 厚坝油砂中三环萜烷因其他化合物的降解而表现出一定优势(图7), 而藿烷系列化合物遭到降解后明显损失。作为微生物生油母质的生物标志物, 三环萜烷分布以 C_{23} 三环萜为主峰, 而代表陆源有机质来源输入的 C_{20} 和 C_{21} 三环萜含量较低。三环萜烷中 $(C_{19}+C_{20}+C_{21})/(C_{23}+C_{24})$ 的比值一定程度上反映了生油母质类型, 厚坝油砂油中三环萜的这一比值普遍大于 0.50, 分布范围在 0.6~0.8 之间, 反映了母质来源中低等生源物质的输入¹⁾; C_{21}/C_{23} 三环萜烷比值分布在 0.50~0.58 之间, 表明 C_{23} 三环萜烷更富集, 同样体现了低等水生生物腐泥型生油母质的特征^[13]。作为成熟度参数的 C_{31} 升藿烷指数 $C_{31}22S/(22S+22R)$, 在 54 个油砂样品中其分

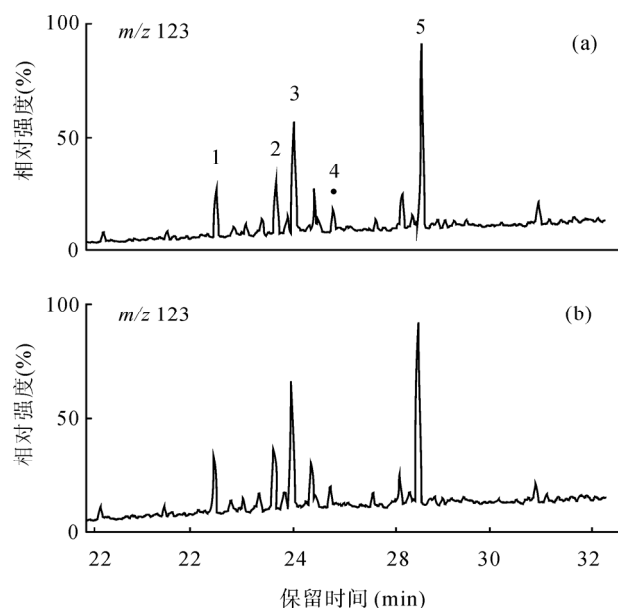


图6 厚坝油砂氯仿沥青“ A ”饱和烃 m/z 123 质量色谱图

Fig.6 Partial m/z 123 mass fragmentograms showing the distribution of bicyclic alkanes from extracts of Houba oil sand

(a) 露头油砂样; (b) 岩芯油砂样 (深度 41.80 m)。
 1-4, 4, 8, 8, 9-重排补身烷(C_{15}); 2-4, 4, 8, 9, 9-重排补身烷(C_{15}); 3- $8\beta(H)$ -补身烷(C_{15}); 4- $8\alpha(H)$ -补身烷(C_{15}); 5- $8\beta(H)$ -升补身烷(C_{16})。
 (a) Cropped oil sand sample; (b) drilled oil sand sample (depth: 41.80 m).
 1-4, 4, 8, 8, 9-diadrimane; 2-4, 4, 8, 9, 9-diadrimane; 3- $8\beta(H)$ -drimane; 4- $8\alpha(H)$ -drimane; 5- $8\beta(H)$ -homodrimane.

1) 刘洛夫, 肖中尧, 方家虎, 赵建章, 塔里木盆地志留系沥青砂岩成因作为烃源岩的可能性(研究报告), 石油大学, 1998。

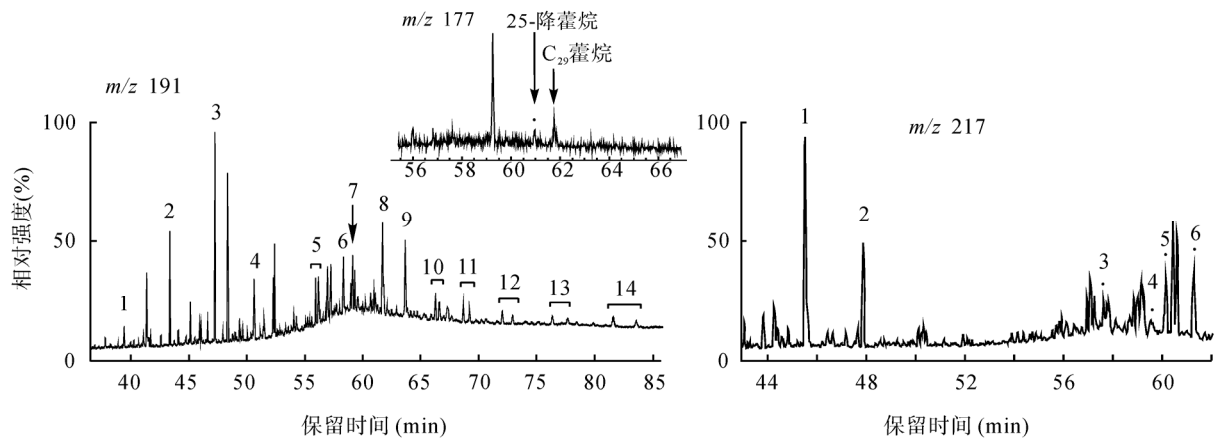


图7 厚坝油砂样品氯仿沥青“A”中饱和烃萜烷和甾烷质量色谱图

Fig.7 GC/MS chromatograms of terpanes (m/z 191) and steranes (m/z 217) of the bitumen oils from Houba oil sand

m/z 191: 1- C_{19} 三环萜烷; 2- C_{21} 三环萜烷; 3- C_{23} 三环萜烷; 4- C_{25} 三环萜烷; 5- C_{28} 三环萜烷; 6-Ts; 7-Tm; 8- C_{29} 17 α 藿烷; 9- C_{30} 藿烷; 10-14- C_{31} - C_{35} 升藿烷系列。

m/z 217: 1-孕甾烷; 2-升孕甾烷; 3- $\alpha\alpha\alpha$ - C_{27} 甾烷 20R; 4- $\alpha\alpha\alpha$ - C_{28} 甾烷 20R; 5- $\alpha\alpha\alpha$ - C_{29} 甾烷 20S; 6- $\alpha\alpha\alpha$ - C_{29} 甾烷 20R。

m/z 191: 1- C_{19} tricyclic; 2- C_{21} tricyclic; 3- C_{23} tricyclic; 4- C_{25} tricyclic; 5- C_{28} tricyclic; 6-Ts; 7-Tm; 8- $\alpha\beta$ - C_{29} norhopane; 9- $\alpha\beta$ - C_{30} hopane; 10-14- C_{31} - C_{35} homohopane series.

m/z 217: 1-pregnane; 2-homopregnane; 3-20R- $\alpha\alpha\alpha$ - C_{27} cholestane; 4-20R- $\alpha\alpha\alpha$ - C_{28} cholestane; 5-20S- $\alpha\alpha\alpha$ - C_{29} cholestane; 6-20R- $\alpha\alpha\alpha$ - C_{29} cholestane.

布范围为 0.51~0.58, 已基本接近或超过平衡值。虽然油砂遭受了中等以上程度的生物降解, 但 C_{31} 藿烷两异构体浓度是以大致相近的速率下降的^[14], 因此 $C_{31}22S/(22S+22R)$ 比值可用来指示成熟度, 厚坝油砂生物标志物中的这一比值超过平衡值一定程度上反映出油砂原油成熟度较高。

在 m/z 217 质量色谱图上(图 7), 抗生物降解的低碳数孕甾烷、升孕甾烷构成强峰。规则甾烷中 C_{29} 甾烷占优势, 大体表现为 C_{27} 占 30%、 C_{28} 占 30%、 C_{29} 占 40%。甾烷分布特征表明原油与藻类母源有关。甾烷成熟度参数比值在露头样品和岩芯样品中分布具有一致性。露头样品中, $C_{29}20S/(20S+20R)$ 比值为 0.42 ~ 0.51, 多数样品集中在 0.44 ~ 0.48 这一范围; 岩芯样品中除个别的 $C_{29}20S/(20S+20R)$ 比值超过了平衡值(0.52 ~ 0.55)外, 大部分样品的这一比值与露头样品表现出一致性分布, 为 0.44 ~ 0.49。总体而言, 油砂样品中 $C_{29}20S/(20S+20R)$ 已接近平衡值。

2.5 氯仿沥青碳同位素

厚坝油砂氯仿沥青的稳定碳同位素比值偏负(表 2), 抽取的 8 个样品(包括 4 个露头样和 4 个岩芯样)氯仿沥青抽提物 $\delta^{13}C$ 同位素值分布在 -33.801‰ ~ -34.593‰ 之间, 平均值为 -34.20‰。偏负的原油碳同位素值与我国来源于下古生界源岩的原油碳同位素值接近^[15]。

表 2 四川厚坝侏罗系油砂氯仿“A”沥青碳同位素组成
Table 2 Carbon isotope composition of Houba Jurassic oil sand in Sichuan Basin

样号	氯仿沥青“A”碳同位素(‰)
HB-DH-09	-33.801
HB-DH-15	-34.059
HB-DH-16	-34.233
HB-DH-20	-34.248
HB-DH-25	-34.104
HB-DH-36	-34.170
HB-DH-47	-34.418
HB-DH-54	-34.593

2.6 厚坝油砂的地球化学成因

四川厚坝油砂虽遭受了强烈生物降解, 但那些强抗生物降解的生物标志物如孕甾烷、升孕甾烷、三环萜烷和三芳甾类化合物等在降解油中保留了原油原始生源信息和成熟度信息, 可用于原油的油源对比。此外, 结合油砂氯仿沥青“A”稳定碳同位素和川西北地区地质构造特征, 推断厚坝油砂油可能来源于下古生界震旦系和寒武系烃源岩。

厚坝油砂生物标志物中孕甾烷、升孕甾烷以及补升烷系列化合物的分布特征与川西北矿山梁、碾子坝古老沥青抽提物^[16]中的生物标志物分布特征相似(图 8)。甾烷的分布模式上, 都以孕甾烷和升孕甾烷构成强峰为特点, 其次是规则甾烷中 C_{29} 甾烷优势明显, 次为 C_{27} 甾烷。二环倍半萜系列中, 补身烷

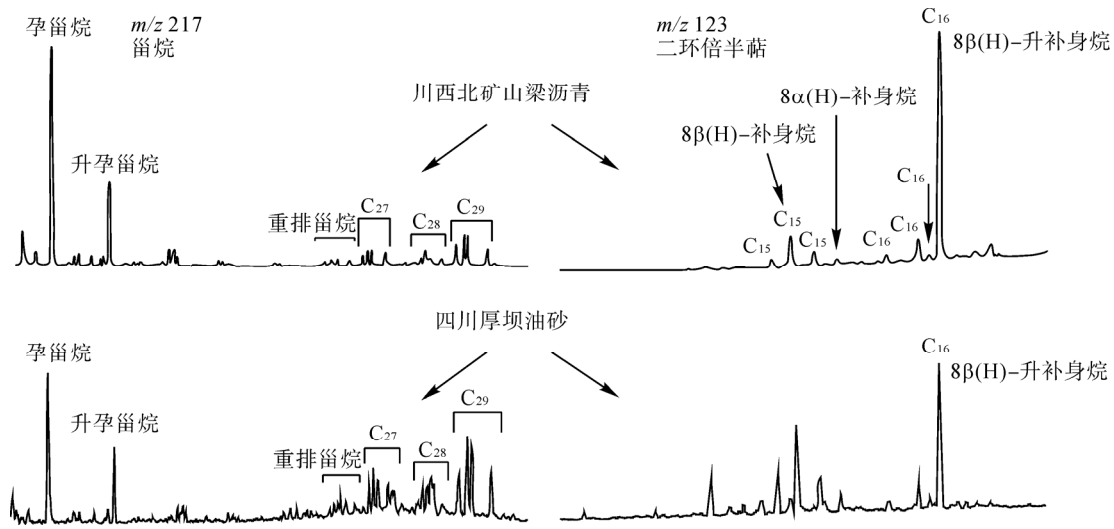


图 8 四川厚坝油砂与矿山梁沥青脉抽提物氯仿沥青“ A ”中生物标志物的比较

Fig.8 Comparisons of biomarker characteristics between extracts of bitumen from Kuangshanliang region and from Houba oil sand 其中作为对比的川西北矿山梁沥青抽提物谱图来自文献[16].

Comparing GC/MS chromatograms of extract from Kuangshanliang bitumen were from reference [16].

都以 C₁₆ 8β(H) 异构体为强峰, C₁₅ 补升烷次之。生物标志物相似性表明两者在成因上有联系, 可能有相同的母质来源。另外, 厚坝油砂生物标志物中三芳甾烷 C₂₈ 占优势, 且规则甾烷具 C₂₉ 甾烷优势, 这些特征与川西北地区来自广元长江沟寒武层位沥青中生物标志物特征相似, 显示出寒武系海相油源特征^[17]。

四川龙门山北段油气显示丰富, 除了厚坝侏罗系油砂矿外, 还有天井山油砂矿和丰富的油气苗和沥青脉发育。其中, 在矿山梁背斜和碾子坝鼻状构造上沥青脉极为发育, 这些保存在下古生界寒武系地层中的沥青脉源于震旦、寒武系古油藏^[16], 其抽提得到氯仿沥青 A 的 δ¹³C 值为 -35.8‰, 这与厚坝侏罗系油砂全油平均碳同位素值(-34.20‰)接近。

在区域上, 川西北地区的烃源岩包括: (1)上三叠统须家河组(含煤); (2)二叠系泥岩, 黑色页岩^[5]; (3)上元古界震旦系陡山沱组黑色页岩以及寒武系黑色泥岩。烃源岩特征表现为二叠系和三叠系有机质成熟度相对较低, R^o 分布在 0.55% ~ 0.96%之间; 其干酪根类型三叠纪为 III 型, 二叠系多为 II 型(II₁ 和 II₂)^[18]。震旦系和寒武系有机质成熟度相对较高, R^o 在 1.50% ~ 2.99%之间, 属高成熟到过成熟范围, 干酪根类型为 I 型和 II₁ 型。

结合四川盆地干酪根碳同位素数据与干酪根类型的划分投点图^[19], 以及厚坝油砂氯仿沥青稳定碳同位素(图 9)的对比分析, 油砂中原油可能来自于下

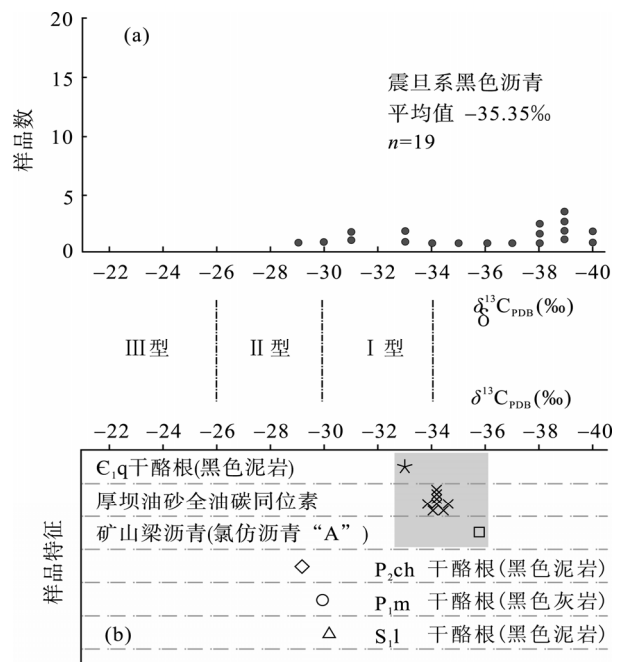


图 9 四川地区油苗和干酪根碳同位素分布及其与有机质类型的关系

Fig. 9 Statistical schemes of carbon isotope compositions of different oil seeps and kerogen types from Sichuan Basin (a) 四川盆地震旦系黑色沥青碳同位素分布; (b) 厚坝油砂全油碳同位素与矿山梁沥青以及不同时代烃源岩干酪根碳同位素的比较。图中对比数据来自文献[6]、[16]、[19]。

(a) Plot showing the carbon isotope values of black bitumens from various regions of Sichuan Basin; (b) a comparison showing the carbon isotope values between Houba sand oils, Kuangshanliang bitumen and source rock kerogens of different geological times. Carbon isotopes of Sinian bitumens were from reference[6], source rock kerogen data were from [16], Kuangshanliang bitumen isotope were from [19].

古生界震旦系和寒武系烃源岩; 表现在厚坝油砂全油碳同位素值(-34.20‰)与来自寒武系黑色泥岩的干酪根碳同位素值(-33.06‰)接近, 且与川西北矿山梁和碾子坝储存在寒武系地层中的古老沥青脉抽提物碳同位素值也相差不大(-35.8‰)。这一特征表明厚坝油砂与这些古老沥青脉可能有相同的烃源供给。相比较而言, 来自二叠系和志留系烃源岩干酪根的碳同位素普遍偏重(图 9b)。

此外, 在地质构造单元上, 矿山梁和碾子坝地区以及厚坝侏罗系沙溪庙组砂岩同位于川西北龙门山推覆构造带上^[6]。二叠纪末期的海西运动使得龙门山褶皱隆升, 并向东南推掩, 逆掩断层的推覆作用在矿山梁构造上形成了许多小型断层和裂缝体系, 这为下伏震旦、寒武统油藏原油的注入提供了条件^[16]。而侏罗系沙溪庙组砂岩则属于厚坝单斜构造体系, 在喜山期, 由于强烈的构造活动, 龙门山地区海相和陆相地层发生强烈褶皱, 同时这一超晚期的构造活动形成了一系列断层带和深大断裂, 如二郎庙断裂带和马鹿坝断裂带等^[4]。这些大断裂带为深部震旦寒武系烃源生成的油气向上部运移提供了可能的通道, 使得古油藏中原油调整注入到厚坝侏罗系沙溪庙组油砂中形成油砂岩。矿山梁碾子坝构造上沥青脉和沙溪庙组油砂在形成机制上有类似的特点, 都是断层和裂缝体系造成贯通体系, 使来自深部烃源的古老油藏中原油注入到新地层中。

3 结 论

四川厚坝侏罗系沙溪庙组油砂野外出露广泛, 含油砂层延伸达 25 km。油砂含油率为 0.4%~3.3%, 属贫矿范畴。油砂中沥青遭受严重生物降解, 生物降解级别达 7 级。饱和烃中生物标志物特征反映了油砂母质来源中低等生源物质的输入。结合四川盆地有机质干酪根类型、碳同位素的划分投点图、厚坝油砂氯仿沥青稳定碳同位素组成以及油砂生物标志物特征, 厚坝油砂与川西北矿山梁沥青有相似的母质来源, 其油源可能来源于震旦、寒武系烃源岩。在构造区块上, 不同时期形成的断裂和裂缝体系为深部震旦、寒武系烃源古油藏中的原油调整到上部地层提供了通道, 从而为矿山梁、碾子坝地区丰富的沥青脉和厚坝侏罗系沙溪庙组油砂岩的形成提供了条件。

野外考察和采样过程中, 吉林大学的汪名友硕士给予了很大帮助, 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的田彦宽和朱训勇同学协助完成了部分样品的测试, 在此一并表示感谢。

参考文献(References):

- [1] 贾承造. 油砂资源状况与储量评估方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007: 1-157.
Jia Cheng-zao. Oil Sands Resources and Evaluation Methods of Reserves [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007: 1-157 (in Chinese).
- [2] 邓虎成, 周文, 丘东洲, 谢润成. 川西北天井山构造泥盆系油砂成矿条件与资源评价[J]. 吉林大学学报, 2008, 38(1): 69-75.
Deng Hu-cheng, Zhou Wen, Qiu Dong-zhou, Xie Run-cheng. Oil sand-forming conditions and evaluation on resource of oil sand in Tianjingshan Structure in Northwest part of Sichuan Basin[J]. J Jinlin Univ (Earth Sci Ed), 2008, 38(1): 69-75 (in Chinese with English abstract).
- [3] 周文, 邓虎成, 丘东洲, 谢润成. 川西北天井山构造泥盆系古油藏的发现及意义[J]. 成都理工大学学报, 2007, 34(4): 413-417.
Zhou Wen, Deng Hu-cheng, Qiu Dong-zhou, Xie Run-cheng. The discovery of significance of the Devonian paleo-reservoir in Tianjingshan Structure of the Northwest Sichuan, China[J]. J Chengdu Univ Technol (Sci Technol Ed), 2007, 34(4): 413-417 (in Chinese with English abstract).
- [4] 徐世琦, 曾庆, 唐大海, 张光荣. 江油厚坝油砂岩成藏条件分析[J]. 天然气勘探与开发, 2005, 28(3): 1-4.
Xu Shi-qi, Zeng Qing, Tang Da-hai, Zhang Guang-rong. Analysis of reservoir forming condition of Houba oil sand in Jiangyou area[J]. Nat Gas Explor Develop, 2005, 28(3): 1-4 (in Chinese with English abstract).
- [5] 王兰生, 韩克猷, 谢邦华, 张鉴, 杜敏, 万茂霞, 李丹. 龙门山推覆构造带北段油气田形成条件探讨[J]. 天然气工业, 2005, 25(增刊 A): 1-6.
Wang Lan-sheng, Han Ke-you, Xie Bang-hua, Zhang Jian, Du Min, Wan Mao-xia, Li Dan. Reservoiring conditions of the oil and gas field in the North Section of Longmen Mountain nappe structural belts [J]. Nat Gas Ind, 2005, 25(Suppl A): 1-6 (in Chinese with English abstract).
- [6] 戴鸿鸣, 刘文龙, 杨跃明, 李跃刚, 段勇. 龙门山北段山前带侏罗系油砂岩成因研究[J]. 石油实验地质, 2007, 29(6): 604-608.
Dai Hong-ming, Liu Wen-long, Yang Yue-ming, Li Yue-gang, Duan Yong. The origin of Jurassic oil soaked sandstone in the piedmont zone of North Longmenshan, the Sichuan basin[J]. Pet Geol Exp, 2007, 29(6): 604-608 (in Chinese with English abstract).
- [7] 许修强, 王红岩, 郑德温, 葛稚新, 张繁军, 曹祖斌. 油砂开发利用的研究进展[J]. 辽宁化工, 2008, 37(4): 268-271.
Xu Xiu-qiang, Wang Hong-yan, Zheng De-wen, Ge Zhi-xin,

- Zhang Fan-jun, Cao Zu-bin. Research progress in application of the oil sands[J]. Liaoning Chem Ind, 2008, 37(4): 268-271 (in Chinese with English abstract).
- [8] Peters K E, Moldowan J M. The Biomarker Guide: Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and Ancient Sediments [M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993: 1-363.
- [9] 马安来, 张水昌, 张大江, 金之钧. 生物降解原油地球化学研究新进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(4): 449-454.
Ma An-lai, Zhang Shui-chang, Zhang Da-jiang, Jin Zhi-jun. The advances in the geochemistry of biodegraded oil [J]. Adv Earth Sci, 2005, 20(4): 449-454 (in Chinese with English abstract).
- [10] Noble R A, Alexander R, Kagi R I, Knox J. Identification of some diterpenoid hydrocarbons in petroleum[J]. Org Geochem, 1986, 10(4-6): 825-829.
- [11] Noble R A, Alexander R, Kagi R I. Configurational isomerization in sedimentary bicyclic alkanes [J]. Org Geochem, 1987, 11(3): 151-156.
- [12] 汪利群, 包建平, 马达德, 党玉琪, 朱翠山, 朱俊章, 陈琰. 倍半萜类分布和组成与低熟烃源岩有机质热演化研究[J]. 地球化学, 2005, 34(2): 173-179.
Wang Li-qun, Bao Jian-ping, Ma Da-de, Dang Yu-qi, Zhu Cui-shan, Zhu Jun-zhang, Chen Yan. Distribution and compositions of sesquiterpanoids and thermal maturation of organic matter in the low mature source rocks [J]. Geochimica, 2005, 34(2): 173-179 (in Chinese with English abstract).
- [13] 袁际华, 柳广第. 苏北盆地泰州组原油有机地球化学特征及成因[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(6): 34-38.
Yuan Ji-hua, Liu Guang-di. Geochemistry and genesis of crude oil of Taizhou Formation in Northern Jiangsu Basin[J]. J Southwest Pet Univ, 2007, 29(6): 34-38 (in Chinese with English abstract).
- [14] 包建平, 朱翠山. 生物降解作用对辽河盆地原油甾萜烷成熟度参数的影响[J]. 中国科学(D 辑), 2008, 38(增刊 II): 38-46.
- Bao Jianping, Zhu Cuishan. The effects of biodegradation on biomarker maturity indicators in sequentially biodegraded oils from Liaohe Basin, China[J]. Sci China (D), 2009, 52 (Suppl I): 42-50.
- [15] 王大锐. 油气稳定同位素地球化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000: 1-295.
Wang Da-rui. Stable Isotope Geochemistry of Oil and Gases[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000: 1-295 (in Chinese).
- [16] 黄第藩, 王兰生. 川西北梁山梁地区沥青脉地球化学特征及其意义[J]. 石油学报, 2008, 29(1): 23-28.
Huang Di-fan, Wang Lan-sheng. Geochemical characteristics of bituminous dike in Kuangshanliang area of the Northwestern Sichuan basin and its significance[J]. Acta Pet Sinica, 2008, 29(1): 23-28 (in Chinese with English abstract).
- [17] 饶丹, 秦建中, 腾格尔, 张美珍. 川西北广元地区海相层系油苗和沥青来源分析[J]. 石油实地质, 2008, 30(6): 596-570.
Rao Dan, Qin Jian-zhong, Teng Ge-er, Zhang Mei-zhen. Source analysis of oil seepage and bitumen originating from marine layer strata in Guangyuan Area, the Northwest Sichuan basin[J]. Pet Geol Exp, 2008, 30(6): 596-570 (in Chinese with English abstract).
- [18] 谢邦华, 王兰生, 张鉴, 陈吉盛. 龙门山北段烃源岩纵向分布及地化特征[J]. 天然气工业, 2003, 23(5): 21-24.
Xie Bang-hua, Wang Lan-sheng, Zhang Jian, Chen Ji-sheng. Vertical distribution and geochemical behaviors of the hydrocarbon source rocks in the North Section of Longmen Mountains [J]. Nat Gas Ind, 2003, 23(5): 21-24 (in Chinese with English abstract).
- [19] 黄籍中, 冉隆辉. 四川盆地震旦系灯影灰岩黑色沥青与油气勘探[J]. 石油学报, 1989, 10(1): 27-39.
Huang Ji-zhong, Ran Long-hui. Bitumen and oil-gas exploration in Sichuan "Dengying limestone" in Sichuan basin[J]. Acta Pet Sinica, 1989, 10(1): 27-39 (in Chinese).