

冀北坳陷下马岭组底砂岩古油藏成藏演变历史与烃源剖析

王铁冠^{1*}, 钟宁宁¹, 王春江¹, 朱毅秀¹, 刘岩^{1,2}, 宋到福¹

1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2 长江大学录井技术与工程研究院, 荆州 434023

* 通信作者, wwtgg@aliyun.com

收稿日期: 2016-03-24

摘要 燕辽裂陷带冀北坳陷中元古界(1 800~1 327 Ma)具有高于庄组黑色泥晶白云岩和洪水庄组黑色页岩 2 套烃源层, 以及龙潭沟、双洞、卢家庄 3 处下马岭组底部沥青砂岩古油藏。沥青砂岩含有 2 期固体沥青组分: 早期沥青组分反射率 R_o 值 1.68%~2.52%; 晚期沥青组分 R_o 值 0.81%~1.01%。辉长辉绿岩岩床的侵位, 导致早期古油藏蚀变成沥青砂岩; 岩床围岩蚀变带的稠油油苗, 提供岩浆冷凝后晚期石油充注的证据。沥青砂标志下马岭组底砂岩成岩作用初期(1 400 Ma), 业已开始石油早期充注成藏过程; 依据辉长辉绿岩侵位时间 1 327 Ma, 可厘定底砂岩古油藏的蚀变年龄。基于层序地层厚度分析, 确定古油藏早期成藏的油源来自高于庄组烃源层, 生烃门限深度约 3 600 m; 洪水庄组烃源层充注成藏时间应在中生代。冀北坳陷雾迷山组、铁岭组等液体油苗和下马岭组沥青砂岩晚期沥青的可溶烃组分源自洪水庄组烃源层。

关键词 中元古界; 下马岭组; 底部沥青砂岩, 古油藏; 石油成藏年龄; 生烃门限深度

0 引言

冀北坳陷分布于河北省北部兴隆、承德、宽城、平泉以及辽宁省西部凌源等市、县境内, 地理上属于燕山地区, 地质构造上则属于燕辽裂陷带北部的一个中-新元古界沉积坳陷, 面积 8 733 km²。该坳陷北界以承德—平泉—凌源大断裂与“内蒙地轴”相邻; 东界连接辽西坳陷, 二者以凌源—叨尔登走滑断裂为界; 西界以密怀隆起与宣龙坳陷相隔; 南界以山海关隆起, 分隔京西、冀东坳陷; 总体上构成燕辽裂陷带“五坳—两隆”的区域构造轮廓(图 1)。

燕辽裂陷带 5 个沉积坳陷均发育中元古界巨厚沉积, 包含 Pt_1^1 长城系(时限 1 800~1 600 Ma)、 Pt_2^2 蔚县系(1 600~1 400 Ma)和 Pt_3^3 待建系(1 400~1 327 Ma)在内, 地层层序可划分为“三系十组”, 并以冀东—冀北坳陷作为沉积-沉降中心; 在地层柱上缺失 Pt_5^4 地层

(1 327~1 000 Ma)。新元古界地层划分为“一系两组”, 而且唯一的 Pt_3^1 青白口系(1 000~800 Ma)沉积厚度也有限, 此外还缺失 Pt_3^2 南华系(800~630 Ma)与 Pt_3^3 震旦系(630~543 Ma)沉积(表 1)。

以冀北坳陷为例, 中元古界沉积厚度达 7 931.1 m, 新元古界青白口系仅厚 111.8 m, 中-新元古界俱以碳酸盐岩为主, 含部分碎屑岩沉积, 总厚度达 8 043 m(表 1), 上覆为古生界与中生界。

下马岭组曾作为新元古界青白口系下部 Pt_3^1 的地层单位, 近年来基于锆石同位素年龄的新证据, 而划归中元古界 Pt_2^3 “待建系”^[1]。下马岭组以页岩为主, 其沉积-沉降中心迁移至宣龙坳陷, 地层总厚度 540 m, 可细分 4 个岩性段, 以下三段黑色页岩为主要烃源层段; 但是由于期后的“蔚县运动”, 引起地壳隆升剥蚀, 在冀北坳陷仅残余底部的下一段砂质页岩, 下三段烃源层则完全缺失。

引用格式: 王铁冠, 钟宁宁, 王春江, 朱毅秀, 刘岩, 宋到福. 冀北坳陷下马岭组底砂岩古油藏成藏演变历史与烃源剖析. 石油科学通报, 2016, 01: 24-37

Wang T-G, Zhong N N, Wang C J, Zhu Y X, Liu Y, Song D F. Source beds and oil entrapment-alteration histories of fossil-oil-reservoirs in the Xiamaling Formation Basal Sandstone, Jibei Depression. Petroleum Science Bulletin, 2016, 01: 24-37. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.01.002

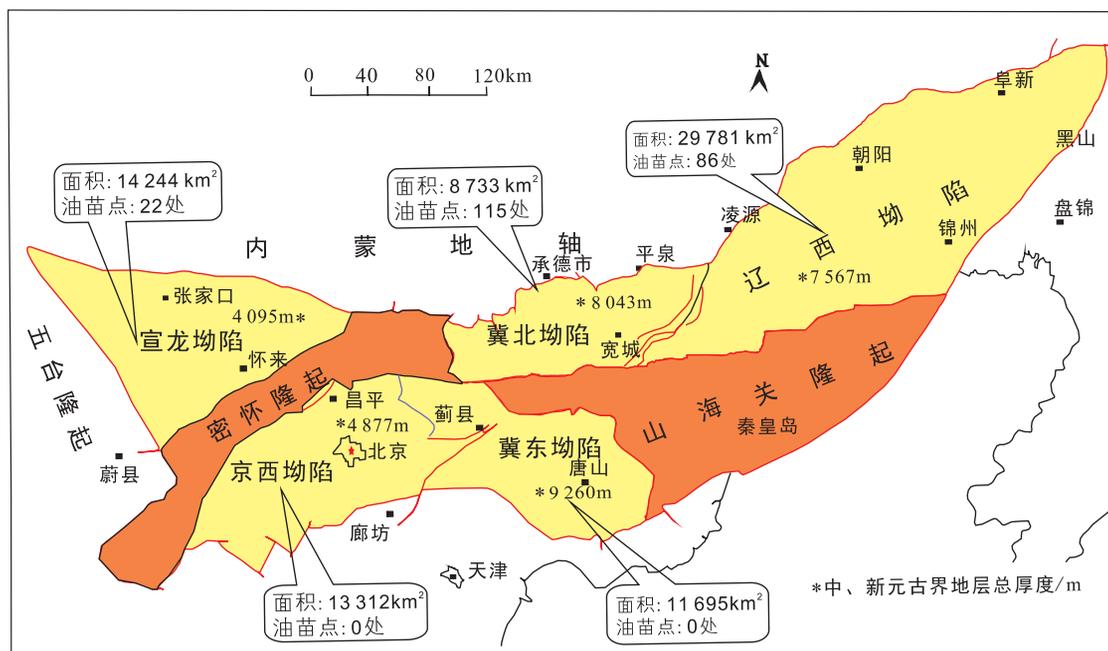


图1 燕辽裂陷带地质构造单元、中-新元古界地层厚度与油苗点分布(据文献[2]修改)

注:图中*标记中-新元古界地层厚度

Fig. 1 Tectonic units, Mesoproterozoic to Neoproterozoic stratum thickness and oil-seepage distribution in the Yanliao faulted-depressions (modified after Reference[2])

Note: *Indicates the total Meso-to Neoproterozoic stratum thickness

迄今为止,冀北拗陷共发现地表油苗、沥青、沥青砂岩点115处,其中78处分布于中元古界地层,占油苗、沥青点总数的85.2%(表1)^{[2-3]①②}。从产层与产状分析,液态油苗、沥青主要产于铁岭组(共60处,占52.2%)和雾迷山组(20处,占13%)碳酸盐岩中,下马岭组产沥青砂岩(20处,占17.4%),主要见于该组底砂岩。

作为冀北拗陷沥青砂岩与古油藏的前期研究例证,辽宁凌源龙潭沟下马岭组底部沥青砂岩陆续见于文献报道^{[4-7]①}。此后,对该底砂岩古油藏的调查研究进一步拓展到宽城卢家庄和河北平泉双洞古油藏^{[8]①③}。

本文试图剖析下马岭组底部沥青砂岩古油藏的烃类来源、充填成藏与演变历史以及其石油地质意义。

1 下马岭组底砂岩岩石学特征

受“芹峪运动”影响,冀北拗陷下马岭组与下伏

铁岭组地层呈平行不整合接触,在不整合面上发育0.5 m(宽城卢家庄)~7.58 m(凌源何杖子)厚的下马岭组底砂岩。沿纵、横向底砂岩的岩性变化较大,常呈灰白、白色含硅—硅质中—粗粒或粉—细粒石英砂岩,局部含有细砾。砂粒质纯,以单晶石英粒为主(占90%以上),含硅质岩岩屑(即燧石或多晶石英,占1%~10%),微含长石、云母,且砂粒原始圆球度高,矿物成分的成熟度极高,属于滨岸前滨带沉积,岩石薄片可见石英砂粒发育2期次生加大边,并有溶蚀边(图2a)。

底砂岩胶结物主要为硅质以及少量泥质和碳酸盐胶结物,泥质来自早期的长石蚀变或砂粒间的杂基。胶结物含量多变,变化范围可达1%~12%,其分布主频为2%~3%,砂岩胶结程度非常不均匀(图2b~d)。

下马岭组底砂岩的粒间孔隙与裂缝中可充填黑、灰黑、黑褐色固体沥青,以致底砂岩新鲜露头和岩石新鲜断面均显黑色,而风化面则常见黄绿、墨绿色。

①王铁冠,钟宁宁,朱士兴,等. 2009. 华北地台下组合含油性及区带预测(科研报告). 北京: 中国石油大学(北京). 347页.

②卢学军,刘宝泉,吴继龙,等. 1992. 冀北拗陷油苗调查报告(地调报告). 河北任丘: 华北油田石油管理局勘探开发研究院, 75页.

③钟宁宁,张枝焕,黄志龙,等. 2010. 燕山地区中-新元古界热演化生烃与油气成藏史(科研报告). 北京: 中国石油大学(北京), 250页.

表1 冀北拗陷中-新元古界地层表(据王铁冠等, 2009^①修改)Table 1 Mesoproterozoic & Neoproterozoic stratigraphic chart in the Jibei Depression (modified after Wang Tieguan, et al., 2009^①)

界	系/统	组	地层厚度/m		岩性	年龄时限/Ma	
古生界	下寒武统	C ₁	府君山组	—	灰白色灰岩, 含三叶虫	← 543	
新元古界	震旦系	Pt ₃ ³	地层缺失(地壳隆升期 257 Ma)				← 630
	南华系	Pt ₃ ²					
	青白口系	Pt ₃ ¹	景儿峪组	39.2	111.8	蛋青、灰白色白云质灰岩	← 800
骆驼岭组			72.6	长石石英砂岩、海绿石砂岩和杂色页岩			
中元古界	待建系	Pt ₂ ⁴	地层缺失(地壳隆升期 327 Ma)				← 1 000
		Pt ₂ ³	下马岭组	369.5	369.5	黑色、绿色页岩和杂色砂岩、细砂岩、粉砂岩	← 1 327
	蓟县系	Pt ₂ ²	铁岭组	211.1	4 519.0	含锰白云岩、杂色页岩和叠层石灰岩	← 1 400
			洪水庄组	101.7		黑色页岩和浅色泥质白云岩	
			雾迷山组	2 947.2		燧石条带白云岩和叠层石白云岩	
			杨庄组	322.4		紫红色和灰白色泥砂质白云岩	
			高于庄组	936.6		燧石条带白云岩、含锰白云岩、白云质灰岩	
	长城系	Pt ₂ ¹	大红峪组	442.6	3 042.6	砂岩和富钾基性火山岩	← 1 600
			团山子组	259.2		富铁白云岩	
			串岭沟组	293.0		绿色和黑色页岩	
			常州沟组	2 047.8		砾岩和砂岩	← 1 800

充填于粒间孔隙的固体沥青可成为底砂岩的次生胶结物(图 2b, d); 充填于砂岩缝隙中的沥青则作为填隙物, 产状呈脉状、条带状、丝带状(图 2c)。底砂岩中沥青含量变化大, 镜下估算其变化范围 1%~25%, 均值达 13.6%, 使含硅—硅质石英砂岩变成含沥青或沥青质石英砂岩, 本文统称为“沥青砂岩”。底砂岩沥青含量可影响砂岩的胶结方式, 沥青含量 $\geq 10\%$ 的底砂岩多呈孔隙式胶结, 而沥青含量 $< 10\%$ 者则呈接触式和镶嵌式胶结。

总体上, 底砂岩的沥青含量与硅质胶结物含量之间呈现出互补关系: 以硅质胶结为主的底砂岩, 不含或少含沥青, 胶结致密, 岩性坚硬(图 2a); 以沥青胶结为主的底砂岩, 硅质胶结物含量少, 岩性疏松易碎, 甚至在凌源龙潭沟、宽城卢家庄均见到未经胶结沥青砂(图 2d)与硅质胶结沥青砂岩的共生现象(图 2b~c)。

2 下马岭组底砂岩古油藏分布与地质产状

冀北拗陷的二级构造单元由卸甲营向斜带、平泉背斜带、党坝向斜带、郭杖子单斜带组成, 总体上呈 NEE 向展布, 自北向南形成正向—负向单元相间的构

造格局。正向构造单元平泉背斜带与郭杖子单斜带, 地表均出露中—新元古界地层, 卸甲营与党坝向斜带作为负向构造单元, 中—新元古界地层之上还填充覆盖着古生界与中生界地层; 因此有利于中元古界油气藏的形成与保存。这种构造格局定型于中生代时期(图 3)。

已知冀北拗陷下马岭组底部沥青砂岩分布于党坝向斜带的南、北两侧, 即构成南侧的龙潭沟、卢家庄古油藏以及北侧的平泉双洞古油藏(图 3)。

2.1 凌源龙潭沟古油藏

凌源龙潭沟古油藏位于辽宁省凌源市大河北乡龙潭沟一带, 距冀、辽省界约 700 m 处; 区域地质构造部位处于郭杖子单斜带的北缘, 由中元古界构成 NW 倾向的单斜构造(图 3 和图 4)。

下马岭组黑色页岩具有中—薄层状石英砂岩夹层或透镜体, 沥青砂岩主要集中分布于底砂岩之中。底砂岩平面分布稳定, 顺沿地层走向, 在何杖子—龙潭沟—中心村—一线约 5 km 范围内, 见到 6 处下马岭组底部沥青砂岩露头, 属于岩性地层型古油藏(图 3 和图 4)。底部沥青砂岩厚 3.8 m(龙潭沟)~7.58 m(何杖子), 砂岩的沥青含量与胶结物含量呈互补关系, 致使沥青

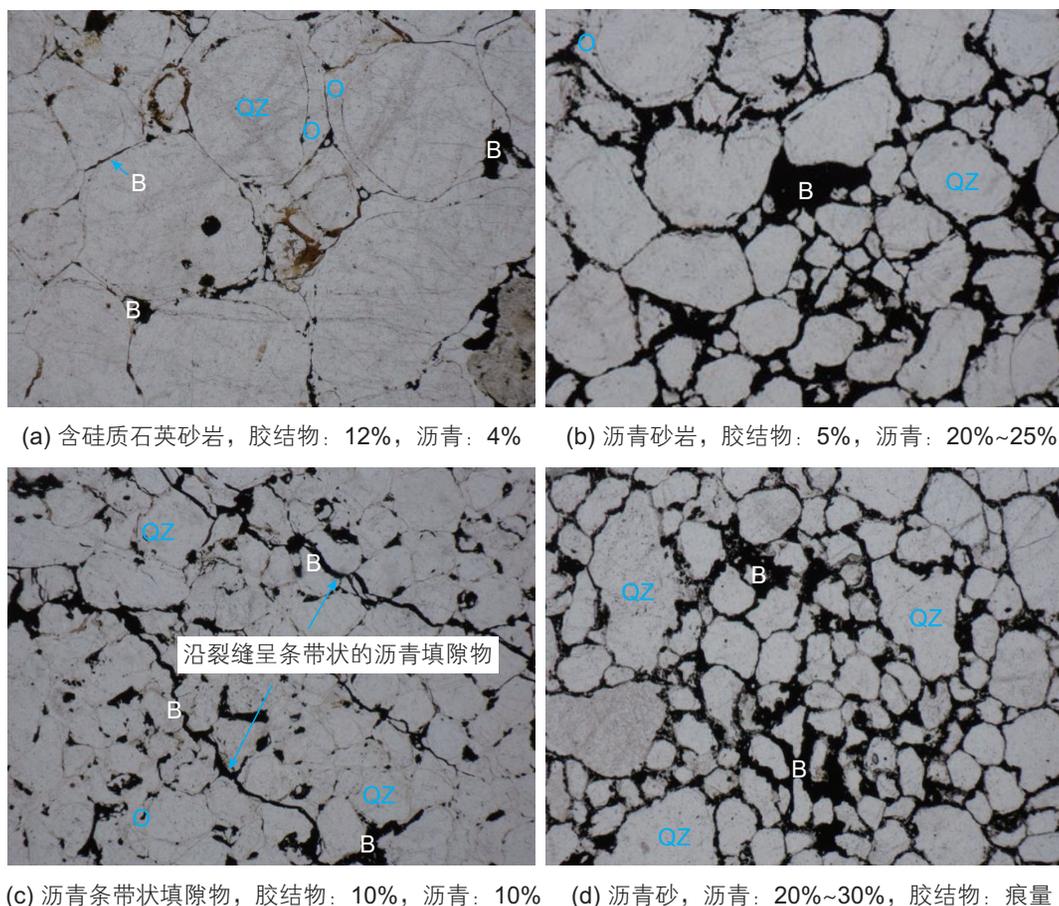


图2 单偏光镜下底砂岩(a)、沥青砂岩(b, c)与沥青砂(d)显微照片(a: $\times 50$; b-d: $\times 40$)

注: QZ-石英砂粒; O-石英次生加大边(硅质胶结物); B-固体沥青

Fig. 2 Microphotographs of basal sandstone (a), bituminous sandstone (b, c) and bituminous sands (d, artificial cemented) under mono-polarizing microscope (a: $\times 50$; b-d: $\times 40$)

Notes: QZ-quartz sands; O-secondary quartz enlargementcorona (siliceous cement); B-solid bitumen

富集程度有明显差别, 例如何杖子北沟前梁下马岭组底部为沥青砂(图2d), 颜色呈灰黑、黑色, 未经胶结或仅含痕量硅质胶结物, 岩性疏松, 手捻易碎; 而在马石烈沟和宋杖子, 底砂岩呈肉红色, 岩性较为致密坚硬, 未见或少见沥青, 镜下见砂粒间有少量沥青充填(如图2a)。

2.2 平泉双洞古油藏

平泉双洞古油藏位于河北省平泉县双洞子乡, 区域构造部位属于平泉背斜带东北端的双洞短轴背斜构造, 地面构造由雾迷山组—中奥陶统地层组成。地表油苗广布, 在萤石矿洞、露天采石场等人工露头上, 从蓟县系雾迷山组、铁岭组和下寒武统府君山组碳酸盐岩的裂隙中, 常见“活”油苗渗出, 或含有无流动性的稠油, 时而有固体沥青伴生, 此类油苗点共约30

处, 构成背斜型古油藏(图4)。

在背斜构造主高点的南翼, 还发现下马岭组底部沥青砂岩, 其胶结物含量较少(硅质含量1.5%~2.5%, 泥质含量1%~2.5%), 砂岩面孔率达7.5%~20%, 而沥青含量可达5%~8%, 岩性疏松。

2.3 宽城卢家庄古油藏

宽城卢家庄古油藏位于河北省宽城县塔山乡。区域构造上, 与龙潭沟古油藏同属于郭杖子单斜带的北缘。顺着区域地层走向, 沿河东村—卢家庄—和尚沟村一线, 下马岭组底砂岩厚0.50~7.67 m不等, 在10 km范围内, 地表连续发现8处沥青砂岩露头, 构成岩性地层型古油藏(图3和图5); 其以卢家庄—冀浅2井为核心, 卢家庄沥青砂岩厚4.32 m, 占底砂岩厚度的97.7%, 主要为厚—中厚层状含砾粗砂岩和



图3 冀北拗陷二级构造单元区划 (附:下马岭组底砂岩古油藏分布^①)

Fig. 3 Division of second-order structure units in the Jibei Depression and fossil-oil-reservoir distribution within the Xiamaling Fm. basal sandstone^①

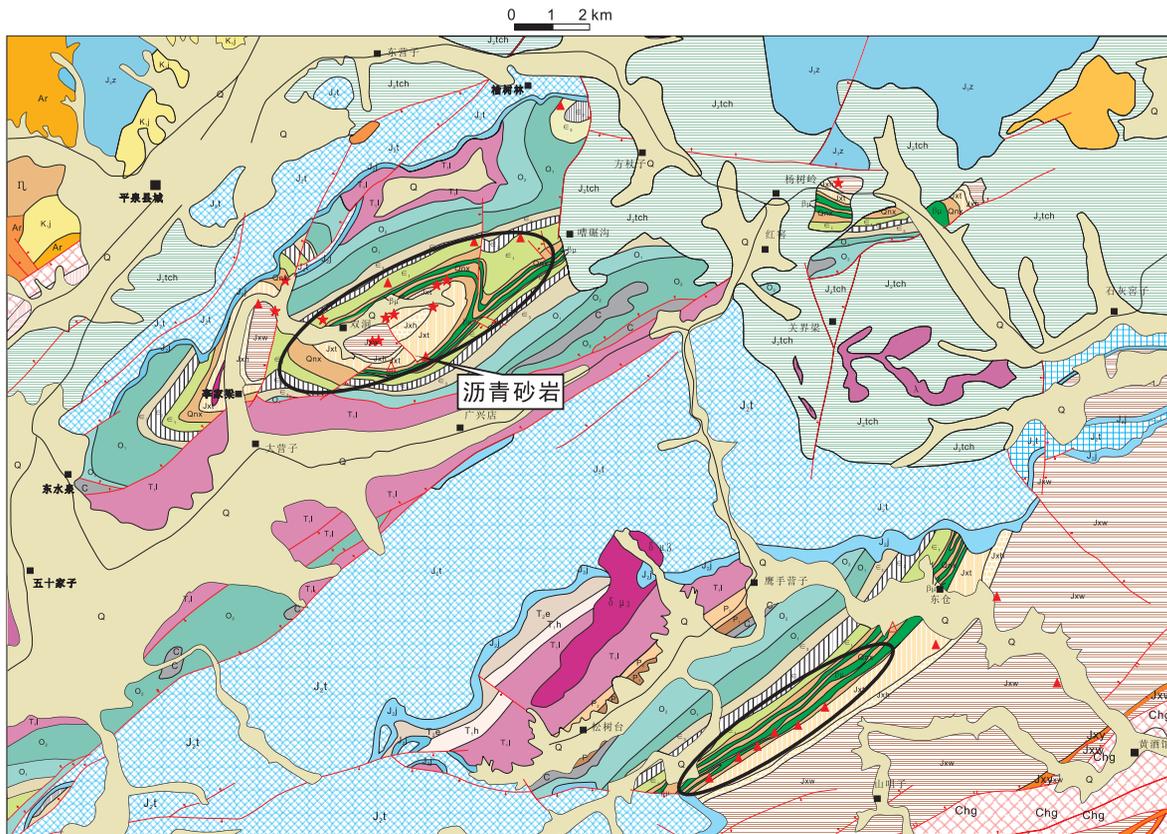


图4 冀北拗陷龙潭沟、双洞古油藏分布 (据钟宁宁等, 2009^②修改)

Fig. 4 Distribution of Longtangou and Shuangdong fossil-oil-reservoirs in the Jibei Depression (modified after Zhong Ningning et al., 2009^②)

粗粒—中粒砂岩, 岩石较疏松, 孔渗性较好, 面孔率一般为1%~18%, 均值15.9%, 最高可达33%; 冀浅2井沥青砂岩厚7.67 m, 占底砂岩的100%, 岩性为粉—细粒砂岩。从卢家庄—冀浅2井向东、西两侧, 底砂岩逐渐变致密, 砂岩颜色逐次呈现出灰黑色—灰色—灰白或红色的变化; 砂岩古面孔率以卢家庄为最高, 也向两侧逐渐降低。

在党坝向斜带南侧, 即郭杖子单斜带的北缘, 凌源龙潭沟与宽城卢家庄两处古油藏的产状类型、沥青属性完全相同, 二者顺沿产层的区域走向延续分布, 并且与党坝向斜带北侧平泉双洞背斜南翼的下马岭组沥青砂岩露头遥相对应, 相互可以进行对比, 由此可见下马岭组古油藏的分布范围与成藏规模(图3)。

3 沥青砂岩成因与古油藏成藏演变历史

3.1 底砂岩古油藏充注时间厘定

显然, 不具流动性的固体沥青是难以直接注入底砂岩孔缝空间的, 而应以液态石油的渗滤方式注入底砂岩, 形成古油砂层或古含油砂岩, 后经蚀变作用才得以演变成沥青砂或沥青砂岩; 因此, 沥青砂岩可作为古砂岩油层或古油藏的标志。下马岭组底部沥青砂岩的分布, 平面上波及到党坝向斜带的两侧(图3),

其露头连续分布长度可达5 km(龙潭沟古油藏, 图4)~10 km(卢家庄古油藏, 图5), 纵向上沥青砂岩厚3.80 m(龙潭沟, 图6)~7.67 m(冀浅2井)。

特别值得注意的是, 龙潭沟与卢家庄古油藏中, 均发现有未经胶结的新鲜沥青砂(图2d)与胶结致密的沥青砂岩(图2b)的共生产状, 标志在下马岭组成岩作用早期, 砂岩胶结作用正在进行而尚未完结之际, 就已经有液态石油注入一部分未胶结的底砂层之中, 驱替其储集空间的原生孔隙水, 使得砂层中不再形成矿物质沉淀, 砂粒的胶结过程得以戛然而止, 从而形成松散的油砂, 即为沥青砂的前身物; 因此, 该沥青砂可以标志下马岭组底砂岩古油藏充注成藏的起始节点, 在时间上, 接近于下马岭组底界的地质年龄1 400 Ma(表1)。

3.2 下马岭组辉长辉绿岩侵位时间及其围岩蚀变

3.2.1 围岩蚀变带的地质产状

冀北拗陷下马岭组地层普遍夹有1~4层顺层分布的辉长辉绿岩侵入体, 自下而上依次命名为 $\beta\mu 1$ ~ $\beta\mu 4$ 岩床。据11条野外地层剖面与冀浅2井钻井剖面统计: 单层岩床厚度为13.3~143.5 m不等, 尤以 $\beta\mu 1$ 岩床为最厚, 其厚度可超过63.5 m; 地层剖面中岩床累计厚度达到117.5~312.3 m, 约占下马岭组地层厚度的一半(43%~62%)^{[9]①}。

以凌源龙潭沟剖面为例, 下马岭组夹有 $\beta\mu 1$ ~ $\beta\mu 3$

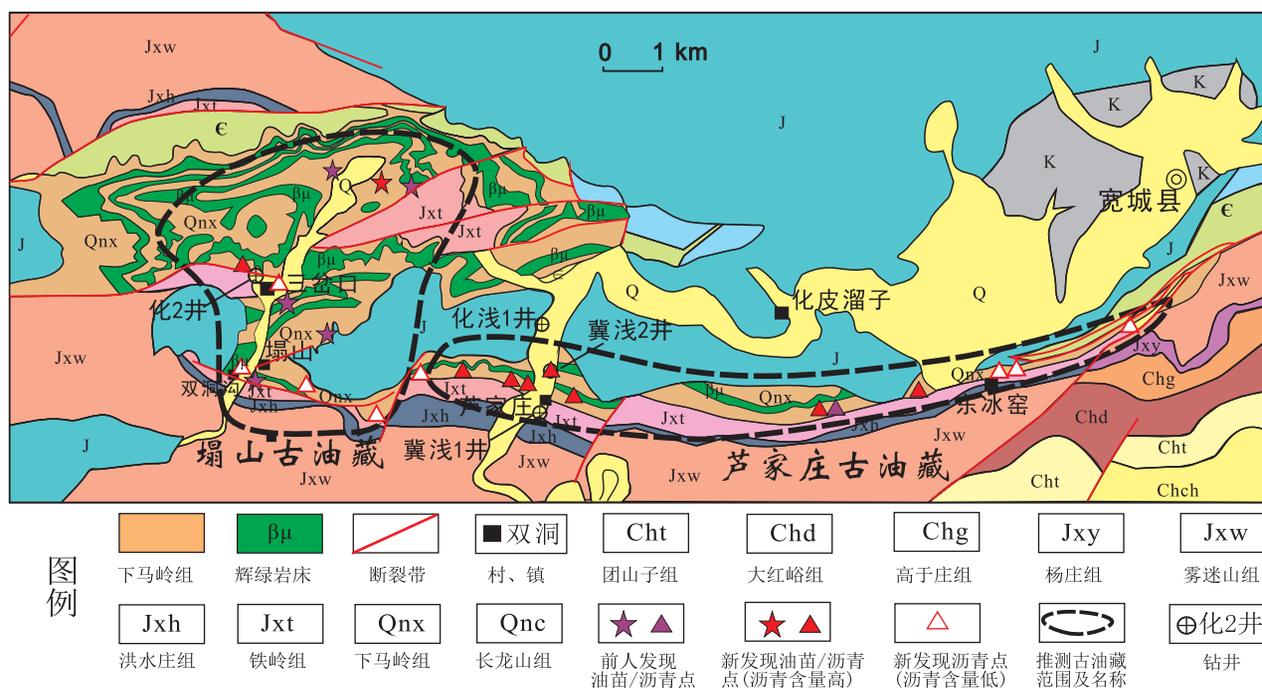


图5 冀北拗陷卢家庄古油藏分布^[7]

Fig. 5 Distribution of Lujiashuang fossil-oil-reservoir in the Jibei Depression^[7]

三层岩床侵入体,其顶、底板均具有明显的围岩蚀变带(图6)。其中: $\beta\mu 1$ 岩床厚达79.6 m,其围岩蚀变带也最厚,顶板蚀变带厚60 m以上,蚀变强度较弱且不均匀,呈现板岩与碳质页岩的混杂伴生产状;而底板蚀变带厚度仅16.1 m,但蚀变强度大,带内页岩全部蚀变成深灰色红柱石板岩,其下伏岩层依次为17.6 m厚的深灰色页岩以及3.8 m厚的底砂岩(图6)。 $\beta\mu 1$ 岩床的岩浆烘烤作用则可跨越16.1 m厚的底板蚀变带及其下伏17.6 m厚的深灰色页岩,并波及到距 $\beta\mu 1$ 底面33.7 m以远的底砂岩,导致3.8 m厚的底砂岩古油层全部蚀变成沥青砂岩(图6),甚至连底砂岩下伏的铁岭组灰岩也无任何液态油显示,显微镜下仅见到灰岩缝合线内的固体沥青填隙物。

3.2.2 两期沥青组分差异反射率 R_b 的地质意义

从凌源龙潭沟古油藏的三处露头剖面,采集到下

马岭组底部黑色沥青石英砂岩样品,实测沥青反射率 R_b 值,以厘定其固体沥青组分的成熟度(表2)。

由表2可见,在龙潭沟兔子山沥青砂岩中,镜下实测得到高、低两组沥青组分的 R_b 数据,二者之间成熟度差异非常显著。这意味着沥青砂岩包含两期具有明显差异热演化历史的沥青组分:早期沥青组分 R_b 值高达1.68%~2.52%,热演化程度已达到过成熟阶段;晚期沥青组分 R_b 值仅为0.81%~1.01%,热演化程度仍处于烃类“液态窗”阶段。

此外,在龙潭沟北沟前梁、何杖子北沟前梁两处露头剖面的沥青砂岩中,分别测得沥青组分 R_b 值1.98%~2.39%,均处于早期沥青组分 R_b 值的分布范围之内,不含晚期沥青组分。

无论从含沥青组分的沥青砂岩样品数量来看,还是就沥青组分的测点数量而言,下马岭组底砂岩的早

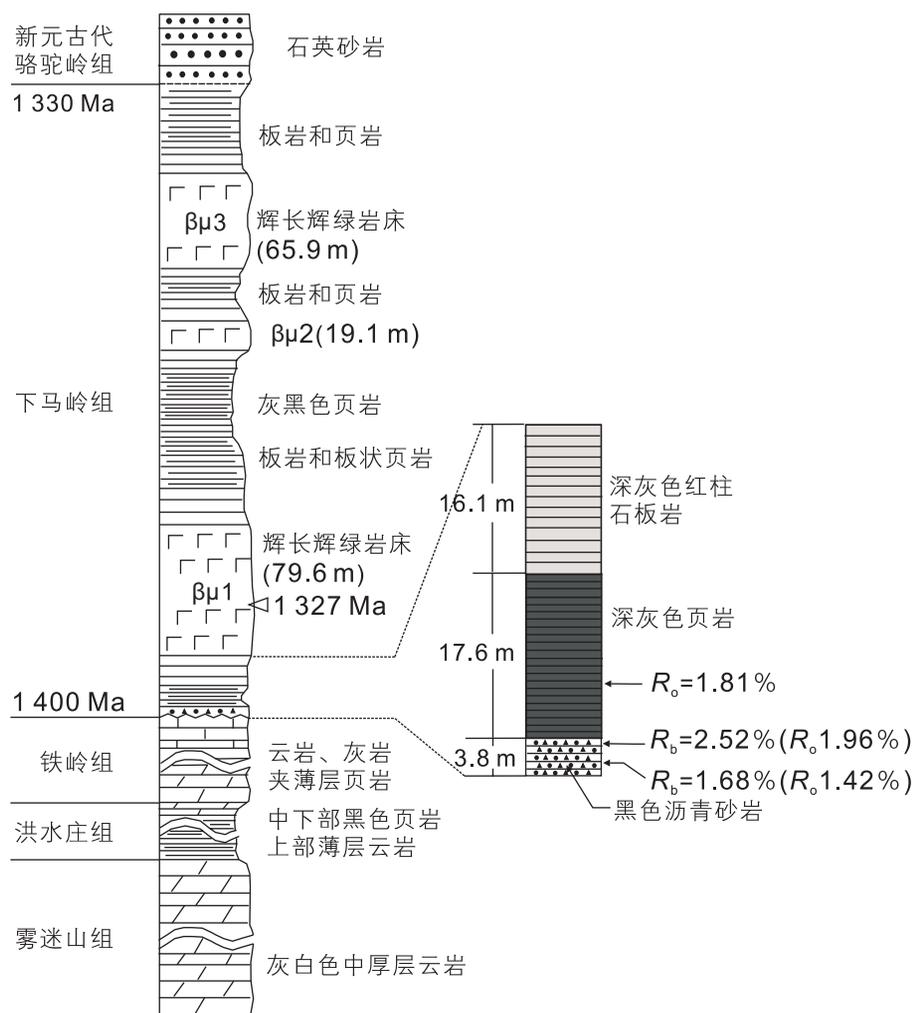


图6 凌源龙潭沟下马岭组辉长辉绿岩岩床与底部沥青砂岩产状剖面(据王铁冠等,2009^①修改)

Fig. 6 Occurrence profile of the Xiamaling Fm. gabbro-diorite sills and basal bitumenous sandstone at Longtangou, Lingyuan (modified after Wang T-G, et al., 2009^①)

表 2 凌源龙潭沟下马岭组底砂岩两期固体沥青组分的判别

Table 2 Distinguish of two phases of solid bitumen components within the Xiamaling Fm. basal sandstone in Longtangou, Lingyuan

样品编号	岩性	采样地点	岩样层位	期次 R_b	实测沥青反射率 $R_b/\%*$	雏晶镶嵌结构
L2	黑色沥青石 英砂岩 (底砂岩)	龙潭沟 兔子山	至底砂岩顶面 1.8 m	早期	2.52 (16)	大量
晚期				0.81 (35)	无	
L1		龙潭沟 北沟前梁	至底砂岩顶面 2.9 m	早期	1.68 (17)	少量
晚期				1.01 (17)	无	
LY-LT-17		龙潭沟 北沟前梁	至底砂岩顶面 0.5 m	早期	2.39 (30)	大量
LY-LT-16				早期	2.22 (35)	大量
LY-2-1	何杖子 北沟前梁	至底砂岩顶面 0.2 m	早期	2.38 (11)	大量	
				1.98 (7)	无	

*注：括弧中数字为显微镜下固体沥青的测点数。

期沥青组分分布普遍，具有明显的数量优势，晚期沥青组分仅见于部分沥青砂岩。例如，表 2 所列 5 件岩样均含早期沥青组分，晚期沥青组分仅见于 2 件岩样；而且早期沥青组分镜下测点数高达 116 个，晚期沥青组分却只有 52 个测点，二者测点数相差 2.2 倍。据此可推断，底部沥青砂岩古油藏应以早期石油充注成藏为主，晚期的石油充注只侵染、叠覆于早期沥青组分之上。

就早期沥青组分而言，在龙潭沟兔子山地层剖面底部沥青砂岩的中上部(距顶界 1.8 m 处)，早期沥青组分 R_b 值达 2.52%，而地层剖面下部(距顶界 2.9 m 处) R_b 值则为 1.68%，纵向上二者的地层厚度间隔仅 1.1 m， R_b 值竟然呈现出“上高一下低”的反向异常变化现象(表 2)。对此异常现象的唯一解释是：在沥青砂岩上覆地层中，必然具有“局域性热源”。事实上，在龙潭沟下马岭组底砂岩上覆地层中，地层厚度间隔 33.1 m 处，确实存在一层 79.6 m 厚的 $\beta\mu 1$ 岩床，可作为“局域性热源”，导致古油砂层上部受热烘烤作用比下部更强烈(图 6)。

但是，兔子山剖面沥青砂岩晚期沥青组分的 R_b 值，自上而下的变化范围则为 0.81%~1.01%，并保持成熟度“上低一下高”的正常变化规律，表明晚期沥青组分不受 $\beta\mu 1$ 辉长辉绿岩“局域性热源”的影响，其形成时间应当在 $\beta\mu 1$ 岩床的岩浆冷却凝固之后(表 2)。

3.2.3 天然石油焦及其地质意义

正交偏光显微镜下，在沥青砂岩的早期沥青组分中，均可见到数量不等的雏晶镶嵌结构(图 7)，其中 R_b 值高达 2.22%~2.52%者均含有大量雏晶镶嵌结构，而 R_b 值较低者(分别为 1.68% 和 1.98%)，却只有少量

或者未见雏晶镶嵌结构，而且在正交偏光显微镜下，晚期沥青组分都呈现出全消光，都不见雏晶镶嵌结构(表 2)。

雏晶镶嵌结构的存在，标志在持续的岩浆高温烘烤作用下，古油藏的油分子向甲烷方向裂解气化，可溶烃组分逐渐损失殆尽，同时极性组分缩合成固体沥青，以致沥青组分的氢原子急剧丧失，碳原子开始结晶，向天然石油焦及其中间产物转变，导致正交偏光显微镜下出现雏晶镶嵌结构。天然石油焦是沥青过成熟阶段的高端产物，可作为上述古油藏围岩蚀变作用的重要佐证。

总之，沥青砂岩古油藏的早期充注成藏过程，势必发生在辉长辉绿岩岩床侵位之前，岩浆侵位可引起古油藏蚀变，形成具有雏晶镶嵌结构的早期固体沥青组分；而不含雏晶镶嵌结构的晚期固体沥青组分，则属于岩床侵位期后，古油藏受到成熟液态石油充注、侵染过程的产物。

下马岭组底砂岩古油藏以早期充注成藏的贡献为主：早期沥青组分在数量上具有优势，其可溶烃类组分几乎业已丧失殆尽；晚期沥青组分对古油藏的贡献有限，但是可溶烃组分的含量则远超过早期沥青组分。

3.2.4 辉长辉绿岩岩床侵位时间的厘定

在宽城冀浅 2 井(井位见图 6)岩心以及平泉双洞沥青砂岩地面露头(图 4)中，分别采集到下马岭组 $\beta\mu 1$ 与 $\beta\mu 3$ 岩床中晶辉长岩的新鲜岩样，镜下总共挑选出 960 颗斜锆石晶体(图 8b)。

采用中科院地质与地球物理研究所的 Cameca IMS-1280 型高分辨二次离子质谱，对 2 件岩样的 36 个斜锆石晶体进行 U-Pb 法年龄测定，获得 $\beta\mu 1$ 和 $\beta\mu 3$

两个辉长辉绿岩岩床相互一致的侵位年龄值 1 327 Ma (图 8a)^{[8]①}, 表明下马岭组多层辉长辉绿岩岩床属于同期侵位成因, 此年龄值也应当是下马岭组底部沥青砂岩的确切形成时间。

综上所述, 下马岭组底砂岩古油藏的石油充注成藏起始时间应为 1 400 Ma, 由辉长辉绿岩侵位引起围岩蚀变的时间为 1 327 Ma。因此, 底砂岩古油藏的存续时限为 1 400~1 327 Ma, 实际存续期只有 72.5 Ma。依据这个侵位年龄, 可确认冀北拗陷中元古界下马岭组底砂岩古油藏是迄今已知成藏年代最为古老早的古油藏。

3.2.5 岩浆侵位前后 2 期石油充注的旁证

冀北拗陷下马岭组地层中, 辉长辉绿岩岩床在广泛分布, 导致下马岭组页岩普遍遭受高温热蚀变。值得注意的是, 在岩床的穿层(图 9a)与顺层(图 9b)的围岩蚀变带中, 都发现有黑色稠油油苗。在 1 327 Ma 辉

长辉绿岩岩浆侵位时, 早期形成的下马岭组底砂岩古油层均遭到热烘烤蚀变, 形成由早期固体沥青组分构成的沥青砂岩古油藏; 而现今直接赋存于围岩蚀变带的稠油油苗, 并无任何遭受热烘烤的蚀变迹象, 显然是在岩床冷却凝固成岩之后, 由晚期石油运移、充注所致。因此, 这些围岩蚀变带的油苗显示, 应当是在 1 327 Ma 以后, 晚期石油运移注入的证据。晚期石油运移、充注正是形成下马岭组底砂岩的晚期固体沥青组分及其可溶烃组分的物质来源。

4 下马岭组底砂岩古油藏的烃源研究

4.1 冀北拗陷的有效烃源层分析

研究表明, 燕辽裂陷带中元古界发育有 3 套烃源层: 即蓟县系高于庄组与洪水庄组、待建系下马岭组;

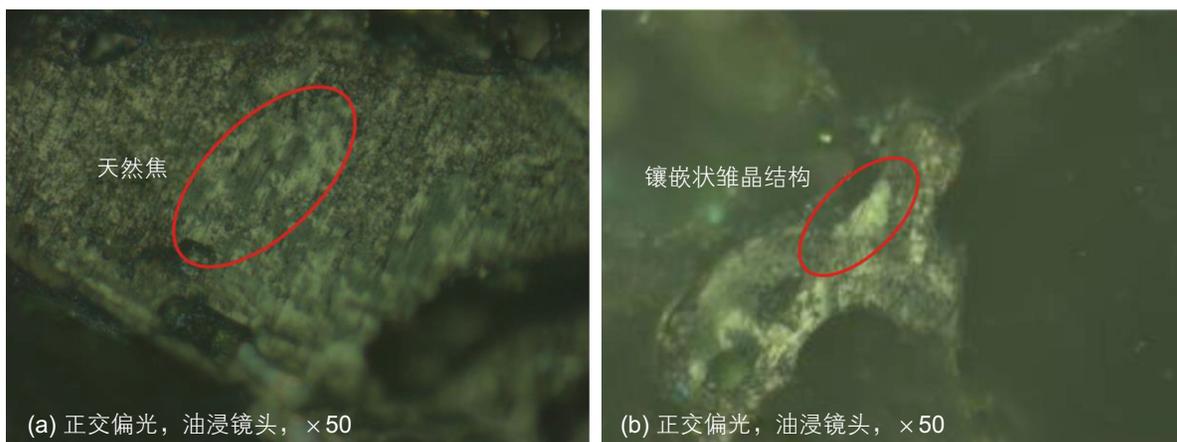


图 7 下马岭组沥青砂岩中呈镶嵌状雏晶结构的天然石油焦^③

Fig. 7 Natural pitch coke with mosaic crystallite structure in Xiamaling Fm. bitumenous sandstone^③

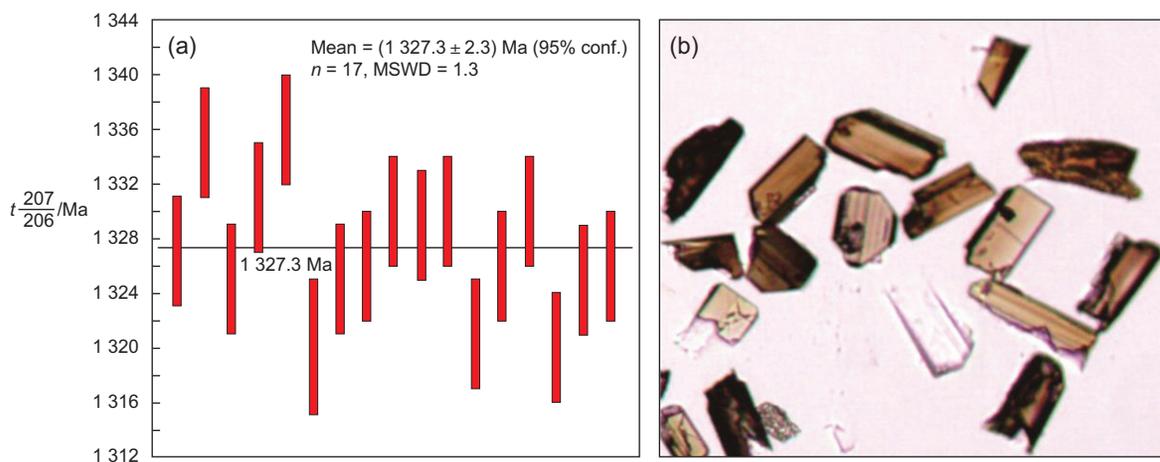


图 8 冀北拗陷下马岭组辉长辉绿岩床中的斜锆石 (b) 及其 Cameca IMS-1280 型高分辨二次离子质谱 U-Pb 法年龄谱 (a)^{[9]①}

Fig. 8 Baddeleyite in the Xiamaling Fm. gabbro-aplite sills, Jibei Depression (b) and its U-Pb isotopic age by Cameca IMS-1280 Model high resolution secondary ion mass spectrometry (a)^{[9]①}

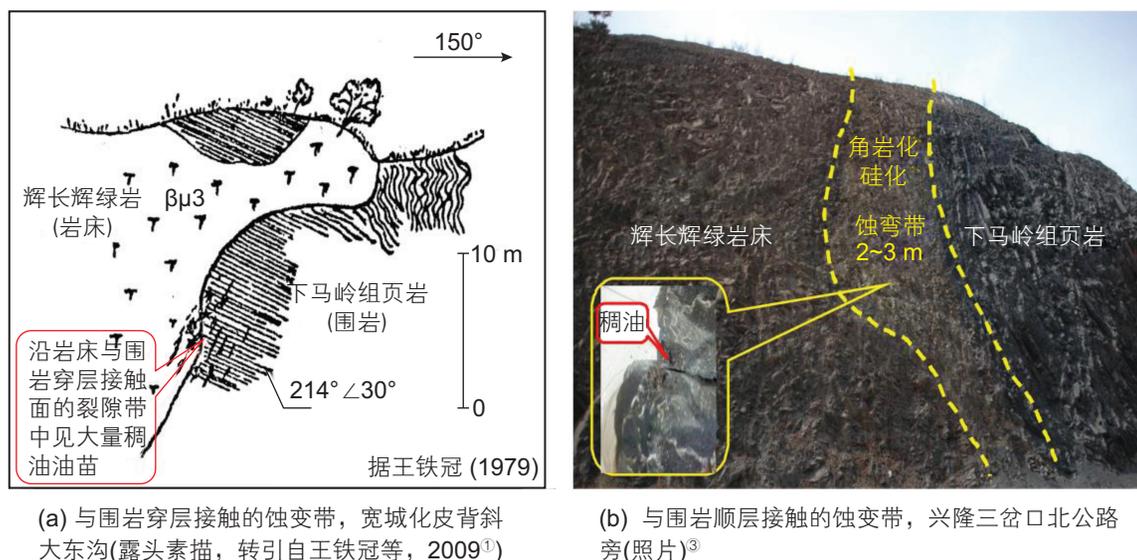


图9 下马岭组辉长辉绿岩岩床穿层与顺层围岩蚀变带的稠油油苗产状

Fig. 9 Occurrence of viscous oil seepages at both transverse and bedding wall-rock alteration zones within Xiamaling Fm.

但是，就冀北拗陷而论，仅洪水庄组与高于庄组可作为有效烃源层。

以TOC(总有机碳)含量 $\geq 0.5\%$ 作为烃源岩有机质丰度的下限标准，冀北拗陷洪水庄组黑色页岩烃源层累计厚度达60 m，具有高TOC值(均值4.65%，最高达7.21%)、高氯仿沥青含量340~4 510 ppm，均值265 ppm，呈现出高有机质丰度特征，其等效镜质组反射率 R_o 值0.90%~1.42%，均值1.19%，基本上尚处于生烃“液态窗”阶段；因此，对洪水庄组烃源层应属于成熟—高成熟有效好烃源岩的范畴。

冀北拗陷TOC含量 $\geq 0.5\%$ 的高于庄组黑色、灰黑色泥晶白云岩烃源层的累计厚度达164 m，也具有高TOC值(均值1.16%，最高达4.29%)；但氯仿沥青含量偏低(26~152 ppm，均值仅63 ppm)，等效镜质组反射 R_o 值却高达1.38%~1.75%，均值1.59%，显示出高有机质丰度的过成熟烃源岩典型特征。

待建系沉积之后，由于受“蔚县运动”的影响，冀北拗陷下马岭组仅残留底部的下一段地层，该组下三段最佳烃源层段黑色页岩业已被剥蚀殆尽。而且下马岭组普遍含2~4层辉长辉绿岩岩床(图6和图9)，岩床累计厚度可占下马岭组地层总厚度的43%~62%，岩床顶、底板的泥质围岩也因遭受高温热烘烤，而蚀变成角岩或板岩，围岩蚀变带的厚度16~60 m不等，残余的黑色页岩生烃潜力基本丧失；因此，冀北拗陷下马岭组并非有效的烃源层。

4.2 下马岭组底砂岩古油藏的烃源剖析

4.2.1 烃源层生烃门限深度分析

鉴于冀北拗陷中元古界仅有高于庄组与洪水庄组两个有效烃源层，下马岭组底界与洪水庄组烃源层底界之间，地层厚度间隔312.8 m(表1和表3)，在1 400 Ma时下马岭组底砂岩古油藏开始早期充注成藏，此时洪水庄组黑色页岩的埋藏深度，最多只有区区312.8 m，远未达到生烃的常规门限深度，烃源层尚处于未成熟阶段，不可能为下马岭组底砂岩供油，所以洪水庄组黑色页岩不可能成为底砂岩古油藏早期成藏的烃源层。

然而，在1 400 Ma时，高于庄组与下马岭组底界的地层间距则可达3 582 m(表1和表3)，高于庄组烃源层业已跨进生烃门限；因此从生烃门限深度分析，高于庄组黑色泥晶白云岩早已具备向下马岭组底砂岩供油的条件，完全可以作为沥青砂岩古油藏油源层的条件。

若以1 400 Ma时期高于庄组埋藏深度3 582 m的近似值3 600 m，作为冀北拗陷中元古界烃源层的生烃门限深度，即可按照上覆地层厚度推算洪水庄组烃源层进入3 600 m门限深度的时间。考虑到在中元古代末期缺失 Pt_4 沉积期(时限1 327~1 400 Ma)，燕辽裂陷带的地壳隆升期长达327 Ma(表1)，新元古代后期缺失 Pt_2 南华系和 Pt_3 震旦系地层(时限800~543 Ma)，地壳再度隆升257 Ma(表1)，古生代又缺失中奥陶

统一下石炭统地层(时限 465~310 Ma), 地壳又隆升 155 Ma; 因此从中元古代晚期至古生代中期, 燕辽裂陷带的地壳隆升期总计可达到 7.39 亿 a, 期间缺失相应的沉积地层。因此洪水庄组烃源层埋藏进入 3600 m 门限深度的时间, 应在古生代之后的中生代时期。这正是冀北坳陷不仅具有晚期生油、运移、充注成藏, 而且还有中元古代液态石油保存至今的原因之所在。

4.2.2 冀北坳陷油苗、沥青的烃源对比

王铁冠等(1990)最早从冀北坳陷下马岭组底部沥青砂岩可溶烃组分中, 检测出一种新的生物标志物 $C_{18}\sim C_{23}13\alpha$ (正烷基)-三环萜烷系列(图 10d)^[5-6, 8], 此后冀北、宣龙坳陷的雾迷山组、铁岭组的油苗、沥青(图 10e-f)^[10-12]^④, 以及川西北龙门山的大沥青脉^[13], 均检测到 13α (正烷基)-三环萜烷。由于龙门山大沥青脉的烃源也来自震旦系陡山沱组黑色页岩^[12], 迄今为止对 13α (正烷基)-三环萜烷的报道, 仅限于元古界生源的烃类, 因此推测这类化合物可作为元古界烃类的特征性生物标志物。

从燕辽裂陷带高于庄组黑色泥晶白云岩、洪水庄组与下马岭组黑色页岩三层潜在烃源岩中, 分离、提纯出干酪根, 进行人工加氢催化降解反应, 获得干酪根的降解产物。高于庄组泥晶白云岩和下马岭组黑色页岩的干酪根降解产物中, 均未检出 13α (正烷基)-三环萜烷(图 10a 和图 10c), 唯有洪水庄组黑色页岩的干酪根降解产物中, 检测出 $C_{18}\sim C_{22}13\alpha$ (正烷基)-三环萜烷系列(图 10b)。

然而雾迷山组、铁岭组油苗以及下马岭组底部沥青砂岩的可溶烃组分与高于庄组、下马岭组烃源层均无可比性(图 10), 以致使 13α (正烷基)-三环萜烷成为洪水庄组烃源层独有的生物标志物, 并且与冀北坳陷雾迷山组、铁岭组液体油苗、下马岭组底部沥青砂岩的可溶烃组分都具有良好的可比性, 从而证明冀北坳陷洪水庄组黑色页岩是中元古界液体油苗以及下马岭

组沥青砂岩可溶烃组分的烃源层^③。

4.2.3 沥青砂岩的两期可溶烃组分

如前所述, 下马岭组底砂岩古油藏早期成藏的油源来自高于庄组烃源层。在 1 327 Ma 岩浆侵入底砂岩, 使得古油藏演变为过成熟沥青砂岩, 其沥青的物质组成以早期固体沥青组分为主, 其中仅残留痕量的早期可溶烃组分。

中生代时期, 洪水庄组烃源层的埋深才得以进入生烃门限, 导致晚期石油运移、充注成藏, 形成雾迷山组、铁岭组等层位的潜在油藏与地表液体油苗。晚期石油注入下马岭组底砂岩古油藏, 形成晚期沥青组分及其伴生的可溶烃组分。在沥青砂岩中, 虽然处于成熟阶段的晚期固体沥青组分含量有限, 但其晚期可溶烃组分的含量, 足以掩盖早期固体沥青组分痕量可溶烃的生物标志物信息, 造成下马岭组沥青砂岩可溶烃组分的烃源对比结果, 呈现出洪水庄组黑色页岩的烃源特征(图 10d)。

4.2.4 岩石圈埋深与燕辽裂陷带的生烃门限

徐常芳(1996)依据大地电磁法测深(Magnetotellurics, 简称 MT)成果, 解释我国地壳深部结构得出: 燕辽裂陷带北部宣龙—冀北—辽西坳陷一带, 处于岩石圈的深埋地带, 岩石圈顶界埋深可达到 140 km 以深, 具有中国东部最厚的岩石圈和最低的古、今地温梯度, 其上覆地壳沉积层构成中国东部唯一的“冷圈”“冷盆”地带(图 11)^[14]。

中国东部中—新生代沉积盆地的生烃门限深度一般均在 2 500 m 左右, 通常不超过 3 000 m; 然而燕辽裂陷带具有中国东部最大的岩石圈埋深, 以及最大的生烃门限深度, 以致冀北坳陷高于庄组的生烃门限深度接近 3 600 m, 并且足以保证高于庄组烃源层在 1 400 Ma 时期, 作为向下马岭组古油藏早期供油的有效烃源层, 这一深度也可作为厘定洪水庄组烃源层生烃门限与成藏时期的依据。

表 3 冀北坳陷下马岭组古油藏成藏期(1 400 Ma)两套烃源层的埋藏深度

Table 3 Buried depth of two source beds at the entrapment age (1400 Ma) for Xiamaling Fm. fossil-oil-reservoir in the Jibei Depression

地层单元		铁岭组	洪水庄组	雾迷山组	杨庄组	高于庄组
地层厚度/m		211.1	102.7	2 947.2	322.4	939.6
埋藏深度/m	洪水庄组	顶界	211.1	—	—	—
		底界	313.8		—	—
	高于庄组	顶界	3 582.4			—
		底界	4 523.0			

④王春江, 王军, 董亭, 等. 2009. 燕山地区中新元古界烃源层、油源及资源潜力. 中国石油大学(北京). (科研报告). 302 页

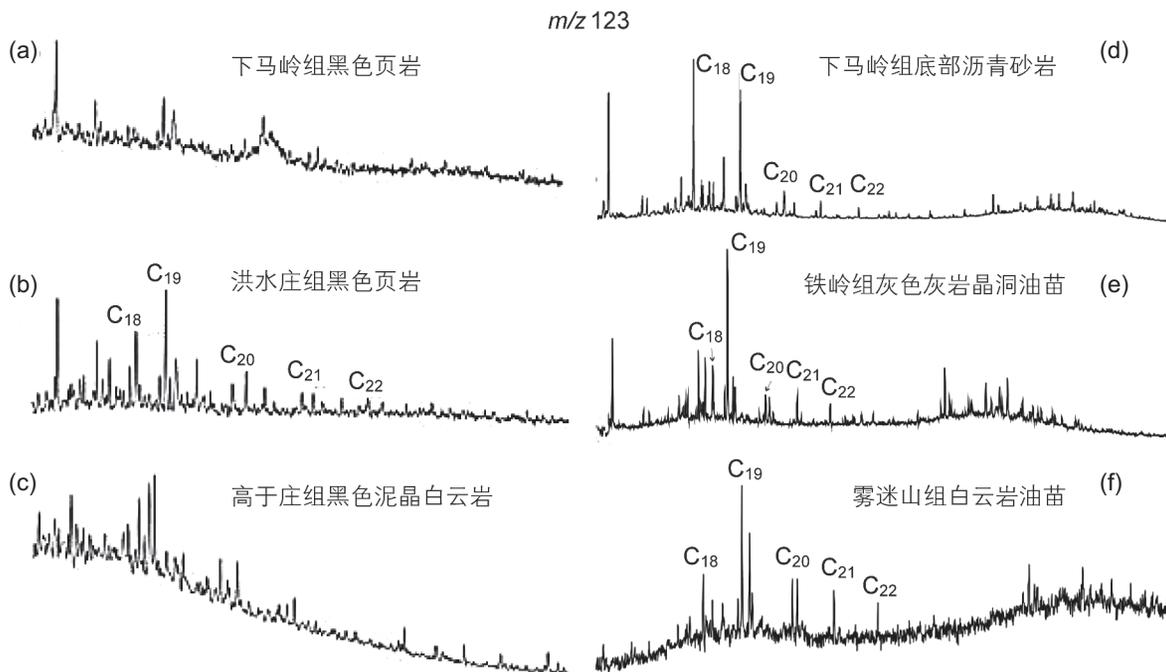


图 10 冀北坳陷中元古界油苗 m/z 123 质量色谱图油—岩对比^③

注: a-c: 烃源岩干酪根加氢催化降解产物; d-f: 油苗、沥青砂岩饱和烃馏分; C_{18} - C_{23} : 13 α (正烷基)-三环萜烷系列

Fig. 10 m/z 123 mass chromatographs for oil-source rock correlation of the Mesoproterozoic oil-seepages^②

Notes: a-c: Degradation product of catalytic hydrocracking from source rock kerogen; d-f: Aliphatic fraction of oil seepages and bituminous sandstone; C_{18} - C_{23} : 13 α (n-alkyl)-tricyclic terpane series

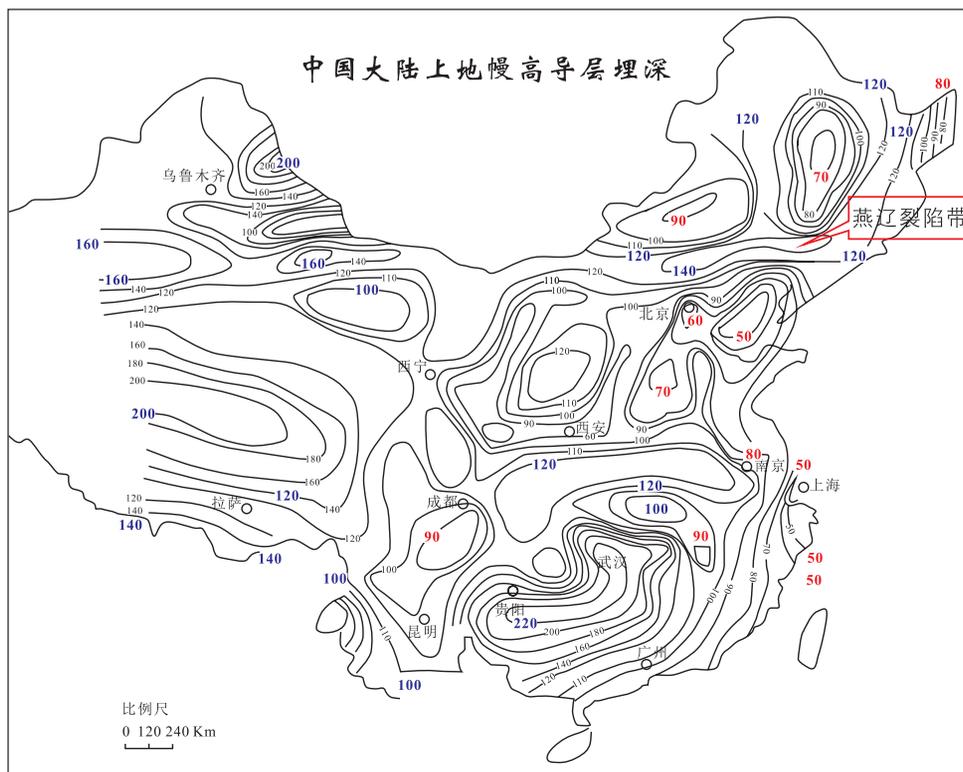


图 11 中国大陆上地幔第一高导层埋藏深度等值线图^[14]

Fig. 11 The depth contour map of upper mantle 1st electroconductive layer in Chinese mainland^[14]

5 结论

(1) 冀北坳陷中元古界具有2个有效烃源层: 高于庄组过成熟黑色泥晶白云岩, 累计厚度164 m; 洪水庄组成熟的黑色页岩, 累计厚度60 m。

(2) 已知冀北坳陷具有凌源龙潭沟、平泉双洞、宽城卢家庄3处中元古界下马岭组底部沥青砂岩古油藏; 沥青砂岩含有2期不同成因的固体沥青组分, 并以早期形成的固体沥青组分为主, 沥青反射率 R_b 值1.68%~2.52%, 在正交偏光显微镜下, 均可见锥晶镶嵌结构的天然石油焦, 部分沥青砂岩含有晚期形成的固体沥青组分, R_b 值0.81%~1.01%, 不含天然石油焦。与晚期固体沥青组分同源伴生的可溶烃组分含量相对较高, 可掩盖早期固体沥青的可溶烃组分分子信息。

(3) 生物标志物油源对比结果, 冀北坳陷雾迷山组、铁岭组等液体油苗以及下马岭组沥青砂岩的可溶烃组分, 均源自洪水庄组烃源层。

(4) 冀北坳陷下马岭组地层中, 夹有呈区域性分布的多层辉长辉绿岩岩床及其围岩蚀变带; 在其底砂岩中, 早期过成熟沥青组分、天然石油焦以及围岩蚀变带稠油的发现, 标志中元古界经历过早、晚2期石油运移、充注成藏的历史。

(5) 下马岭组底砂岩古油藏中, 沥青砂的发现标志在底砂岩的成岩初期(1 400 Ma), 古油藏业已开始早期充注成藏; 1 327 Ma辉长辉绿岩的侵位, 导致早期充注的石油蚀变为过成熟的早期固体沥青组分, 古油砂层蚀变成沥青砂岩或沥青砂。

(6) 基于地层层序与厚度分析, 确定下马岭组早期成藏的原油只能来自高于庄组烃源层, 其生烃门限深度约3 600 m; 大地电磁法测深(MT)揭示, 燕辽裂陷带北部宣龙—冀北—辽西坳陷一带的岩石圈埋深达到140 km以深, 属于“冷圈”“冷盆”结构, 应具有较深的生烃门限深度。按照此门限深度, 洪水庄组烃源层的成藏时间应厘定于中生代时期。

致谢

在对燕辽裂陷带古、今地温梯度与岩石圈结构的研讨中, 马宗晋院士提供并介绍徐常芳研究员的大地电磁测深成果, 这里对两位先生谨致由衷的谢忱。中国地质大学(北京)苏犁教授、中国科学院地质与地球物理研究所李献华研究员协助完成辉长辉绿岩岩石学鉴定与年代学测定, 中国石油大学(北京)李术元教授、岳长涛副教授为干酪根加氢催化反应提供实验流程指导与实验装置, 在此一并致谢。

参考文献

- [1] 高林志, 张传恒, 史小颖, 等. 华北古陆下马岭组归属中元古界的锆石 SHRIMP 年龄新证据 [J]. 科学通报, 2008, 53(21): 2617-2623. [Gao Linzhi, Zhang Chuanheng, Shi Xiaoying, et al.. Mesoproterozoic age for Xiamaling Formation in North China Plate indicated by SHRIMP dating [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(21): 2617-2623.]
- [2] 王铁冠. 燕山地区震旦亚界油苗的原生性及其石油地质意义 [J]. 石油勘探与开发, 1980, 7(2): 34-52. [Wang Tieguan. Primary properties of Sinian Suberathem oil-seep and its petroleum geological significance in Yanshan region [J]. Petroleum Exploration And Development [J], 1980, 7(2): 34-52.]
- [3] 王铁冠, 韩克猷. 论中—新元古界油气资源 [J]. 石油学报, 2011, 31(1): 1-7. [Wang Tieguan, Han Keyou. On Meso-Neoproterozoic primary petroleum resources [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 31(1): 1-7.]
- [4] 王铁冠, 黄光辉, 徐中一. 辽西龙潭沟元古界下马岭组底砂岩古油藏探讨 [J]. 石油与天然气地质, 1988, 9(3): 278-287. [Wang Tieguan, Huang Guanghui, Xu Zhongyi. Approach to the Proterozoic Xiamaling Formation basal sandstone fossil-oil-reservoir [J]. Oil & Gas Geology, 1988, 9(3): 278-287.]
- [5] 王铁冠. 燕山东段上元古界含沥青砂岩中一个新三环萜烷系列生物标志物 [J]. 中国科学B辑, 1990 (10): 1077-1085. [Wang Tieguan. A novel tricyclic terpane biomarker series in the Upper Proterozoic bituminous sandstone, eastern Yanshan region [J]. Science in China Series B, 1991, 34(4): 479-489.]
- [6] Wang Tieguan. Geochemical characteristics of Longtangou bituminous sandstone in Lingyuan, eastern Yanshan region, North China—approach to a Precambrian reservoir bitumen [J]. J. SE. Asia Earth Science, 1991a, 5(1-4): 373-379.
- [7] Wang T.-G., Simoneit B.R.T. Tricyclic terpanes in Precambrian bituminous sandstone from the eastern Yanshan region, North China [J]. Chemical Geology, 1995, 120: 155-170.
- [8] 刘岩, 钟宁宁, 田永晶, 等. 中国最老古油藏—中元古界下马岭组沥青砂岩古油藏 [J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(4): 503-512. [Liu Yan, Zhong Ningning, Tian Yongjing, et al.. The oldest (1327Ma) oil accumulation in China: Meso-proterozoic Xiamaling Formation bituminous sandstone reservoirs [J]. Petroleum Exploration And Development, 2011, 38(4): 503-512.]
- [9] 苏犁, 王铁冠, 李献华, 等. 第14章 燕辽裂陷带中元古界下马岭组辉长辉绿岩岩床成岩机制与侵入时间. //孙枢, 王铁冠. 中国

- 东部中-新元古界地质学与油气资源 [M]. 北京: 科学出版社. 2016: 325-342. [Su Li, Wang Tieguan, Li Xianhua, et al.. Chapter 14 Diagenetic mechanism and emplacement age of Mesoproterozoic Xiamaling Formation gabbro-diabase sills in Yanliao Fault-depression. in: Sun Shu, Wang Tieguan, Meso- to Neoproterozoic Geology and Petroleum Resources. Beijing: Science Press. 2016: 325-342.]
- [10] 张水昌, 张宝民, 边立曾, 等. 8 亿多年前由红藻堆积而成的下马岭组油页岩 [J]. 中国科学D辑: 地球科学, 2007, 37(5): 636-643. [Zhang Shuichang, Zhang Baiomin, Bian Lizeng, et al.. The Xiamaling oil shale generated through Rhodophyta over 800 Ma age [J]. Science in China Series D: Earth Science, 2007, 50(4): 527-535.]
- [11] Wang C J, Wang M, Xu J, et al.. 13a(n-alkyl)-tricyclic terpanes: A series of biomarkers for the unique microbial mat ecosystem in the middle Mesoproterozoic (1.45~1.30Gyr) North China Sea [J]. Mineralogical Magazine, 2011, 7: 2114.
- [12] 韩克猷, 王广利, 王铁冠, 等. 第 24 章 川西北龙门山前山带沥青脉的石油地质特征. // 孙枢, 王铁冠. 中国东部中-新元古界地质学与油气资源 [M]. 北京: 科学出版社. 2016: 542-559. [Han Keyou, Wang Guangli, Wang Tieguan, et al.. Chapter 24 Petroleum geological characteristics of asphalt veins in the Front Mountain Belt of Longmen Mountain, Northwest Sichuan. in: Sun Shu, Wang Tieguan. Meso- to Neoproterozoic Geology and Petroleum Resources. Beijing: Science Press. 2016: 542-559.]
- [13] 黄蒂藩, 王兰生. 川西北矿山梁地区沥青脉地球化学特征 [J]. 石油学报, 2008, 29(1): 23-28. [Huang Difan, Wang Lansheng. Geochemical characteristics of bitumenous dike in Kangshanliang area of the Northwestern Sichuan Basin and its significance [J]. Acta Petrolei Sinica. 2008, 29(1): 23-28.]
- [14] 徐常芳. 中国大陆地壳上地幔电性结构及地震分布规律(一) [J]. 地震学报, 1996, 18(2): 254-261. [Xu Changfang. Electroconductive layers of the upper mantle and earthquake distribution in Chinese Mainland (Part 1)[J]. Acta Seismologica Sinica, 1996, 18(2): 254-261.]

Source beds and oil entrapment-alteration histories of fossil-oil-reservoirs in the Xiamaling Formation basal sandstone, Jibei Depression

Wang T -G¹, Zhong N N¹, Wang C J¹, Zhu Y X¹, Liu Y^{1,2}, Song D F¹

1 The State Key Laboratory of Petroleum Resources & Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249

2 Institute of Mud Logging Technology & Engineering, Yangtze University, Hubei, Jingzhou 434023

Abstract As for the Mesoproterozoic strata (1 800~1 327 Ma) in Jibei Depression, Yanliao Faulted-Depression Zone, there are 2 sets of hydrocarbon source beds (i.e., Gaoyuzhuang Fm. black micritic dolomite and Hongshuizhuang Fm. black shale) as well as 3 sites of the basal bitumenous sandstone fossil-oil-reservoirs in Xiamaling Fm. respectively at Longtangou, Shuangdong and Lujiazhuang. The bitumenous sandstone has two phases of solid bitumen components (SBCs): the early SBC with 1.68%~2.52% in bitumen reflectance R_b and the late one with 0.81%~1.01%. Owing to emplacement of gabbro-diabase sills, palaeo-oil-reservoir had been altered into bitumenous sandstone (i.e. fossil-oil-reservoir), whereas viscous oil seepages found within wall-rock alteration zone provide an evidence for late oil migration and filling after the magma cooling and consolidation. The discovery of bitumenous sands can indicate that early oil filling and entrapment process would be started at the early diagenetic period of basal sandstone in Xiamaling Fm. (~1 400Ma), while its alteration age would be determined according to the emplacement age of Xiamaling Fm. gabbro-diabase (1 327Ma). Based on the stratigraphic sequence and stratum thickness analyses, it could be defined that early oil filling and entrapment of Xiamaling Fm. basal oil reservoir could only be sourced by the Gaoyuzhuang Fm. source bed, it's threshold depth of hydrocarbon generation would be around 3 600 m. On the basis of the threshold depth, the oil entrapment age from the Hongshuizhuang Fm. source bed should be at the Mesoproterozoic period. Oil correlation results show that all the oil-seepages found in the Wumishan and Tieling Fms. and the Late SBC extracts of Xiamaling Fm. basal bitumenous sandstone are sourced by Hongshuizhuang Fm..

Keywords mesoproterozoic; xiamaling formation; basal bitumenous sandstone; fossil-oil-reservoir; oil entrapment age; threshold depth of hydrocarbon generation

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.01.002

(编辑 郝洁 马桂霞)