

大港油田上古生界煤系烃源岩地球化学特征与二次成烃

周立宏,滑双君,孙超因,代 昆,牟智全

(中国石油 大港油田分公司,天津 300280)

摘要:大港油田上古生界煤系地层主要分布于中南部,分布面积近10 000 km²。烃源岩包括煤层、碳质泥岩和泥岩3种类型,总厚度100~450 m,纵向上主要分布在太原组和山西组,本溪组少量发育。煤层有机质丰度高,85%以上属于好-极好烃源岩类型,而泥岩丰度各地区之间差异较大。烃源岩显微组分构成中以镜质组含量占优势,50%以上,成熟阶段具有良好的生气条件,同时受成煤环境的影响,主要成煤中心的煤系地层也富含一定的富氢组分,在低熟-成熟阶段具有良好的生油能力。上古生界在地史演化中经历了多期构造活动的改造,煤系源岩也随之经历了两次生烃过程,其中二次生烃范围分布广,资源规模大,是潜山勘探的重要区域。按照构造演化分类,油田内发育4种埋藏史类型,即早埋晚抬型、早抬晚埋型、持续深埋型与稳定埋藏型。除早埋晚抬型之外,其他3类均具有二次生烃条件。经多年的勘探,在二次生烃范围内,相继在孔西“古生中储型”和乌马营潜山、埕海潜山、王官屯潜山“古生古储型”原生油气藏实现了潜山勘探的重大突破。

关键词:二次生烃;煤系烃源岩;原生油气藏;大港油田

中图分类号:TE 122.1

文献标识码:A

Geochemical characteristics and secondary hydrocarbon generation of coal-measure source rocks in Upper Paleozoic of Dagang oilfield

Zhou Lihong, Hua Shuangjun, Sun Chaonan, Dai Kun, Mu Zhiqian

(Dagang Oilfield Company, PetroChina, Tianjin 300280, China)

Abstract: Coal-measure formations in the Upper Paleozoic mainly distributes in central-south part of Dagang Oilfield and covers an area of nearly 10 000 km². Source rocks there consist of coal beds, carbonaceous mudstone and mudrock, and have a gross thickness of 100 to 450 m. Vertically, they distribute mainly in the Taiyuan and Shanxi Formations with some developed in the Benxi Formation. The coal beds are rich in organic matter (more than 85%) and are high to very high quality source rocks, while the organic matter content in mudstone varies greatly from place to place. Vitrinite dominates the maceral of the source rocks with a content of more than 50%, indicating favorable conditions for gas generation during the mature stage of the rocks. Meanwhile, affected by coal-forming environment, the coal-measure strata in the main coal-forming centers are also contain some hydrogen-rich macerals, hinting large oil generation capacity during low maturity to mature stage. The Upper Paleozoic strata experienced multiple phases of tectonic activities, so were the coal-measure source rocks, which went through two stages of hydrocarbon generation. The secondary hydrocarbon generation was characterized by large area and high resource potential and has been the focus of study during the buried hill exploration. Four types of burial history can be recognized in the oilfield based on the tectonic evolution: the early-burial and late-lift type, the early-lift and late-burial type, the continuous deep-burial type and the steady-burial type. Except for the first type, all the other three types possessed favorable conditions for secondary hydrocarbon generation. Years of exploration in the area of secondary hydrocarbon generation yielded primary oil and gas discoveries in buried hills one after another: Kongxi, Wumaying, Chenghai and Wangguantun, to name just a few.

Key words: secondary oil generation, coal-measure source rock, primary oil and gas accumulation, Dagang Oilfield

收稿日期:2016-12-26;修订日期:2017-10-11。

第一作者简介:周立宏(1968—),男,教授级高级工程师,油气综合勘探。E-mail:zhoulh@petrochina.com.cn。

基金项目:中国石油重大科技专项(2014E-06-01)。

大港油田潜山勘探最早始于1964年,先后经历了复杂的勘探过程。20世纪70年代,按照“任丘式”风化壳型残丘潜山找油模式,相继在港西潜山、孔店潜山以及徐黑潜山等高位潜山实施集中钻探,共钻探井37口,但未获得突破。20世纪90年代中后期转向低位潜山,相继在孔店潜山带西翼孔西“古生中储型”和乌马营潜山、埕海潜山、王官屯潜山“古生古储型”原生油气藏实现了潜山勘探的重大突破(图1)。由于潜山经历了多期构造活动改造,原生油气藏勘探规模和勘探方向取决于上古生界煤系源岩的生烃潜力与生烃过程,具有良好生烃能力且具备二次生烃条件的地区是后期勘探的主要方向。

1 煤系地层分布与有机地球化学特征

1.1 大港油田煤系烃源岩厚度大

煤系地层是指石炭系—二叠系下部山西组、太原组和本溪组,是不整合于奥陶系之上的一套海陆交互相含煤地层,也是一套重要的供烃层。主要分布在大

港油田中南部,分布面积近10 000 km²。煤系源岩包括煤层、碳质泥岩和暗色泥岩3种类型,烃源岩总厚度为100~450 m,纵向主要分布于太原组和山西组,本溪组少量发育。其中煤层单层厚度为2~5 m,累计厚度为20~45 m,太原组煤层最发育且分布稳定,占煤层厚度的65%。平面上主要分布于乌马营—王官屯地区、徐黑地区、孔店—港西地区以及歧南—埕海地区。碳质泥岩厚度为40~110 m,平面分布与煤层有较好的对应关系,除此之外,沧县隆起—东光地区厚度较大。暗色泥岩在三类源岩中最发育,总厚度为150~350 m。大港油田北部的北塘地区沼泽化程度较小,煤层、碳质泥岩及暗色泥岩厚度均较小(图2)。

1.2 煤系烃源岩生成石油与天然气

烃源岩的显微组分构成对生烃能力起到决定性作用。通常认为惰质组几乎没有生烃能力;腐泥组和壳质组是主要的生油母质,含量的多少基本决定了煤系源岩的质量;镜质组生烃变化大,主要生烃组分是其中的基质镜质组,也是主要的生气母质。显微组分构成

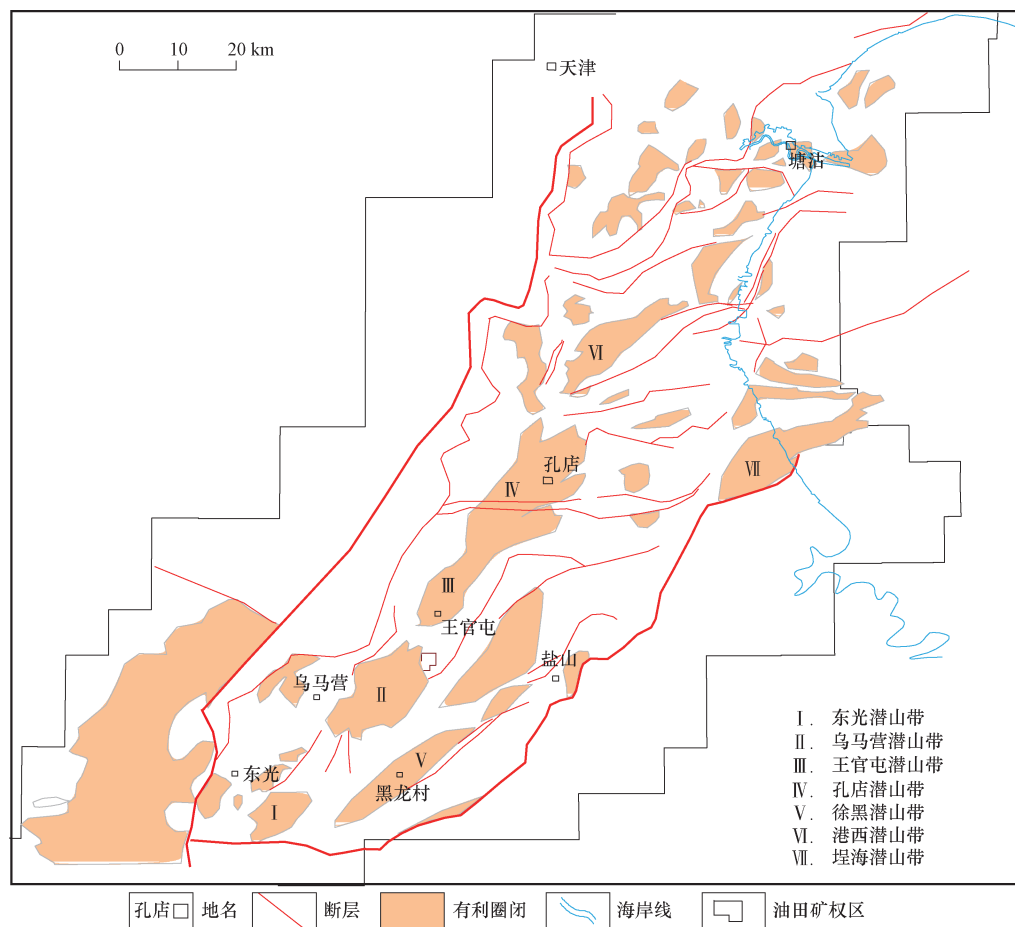


图1 大港油田潜山分布示意图

Fig. 1 Distribution of buried hills in Dagang oilfield

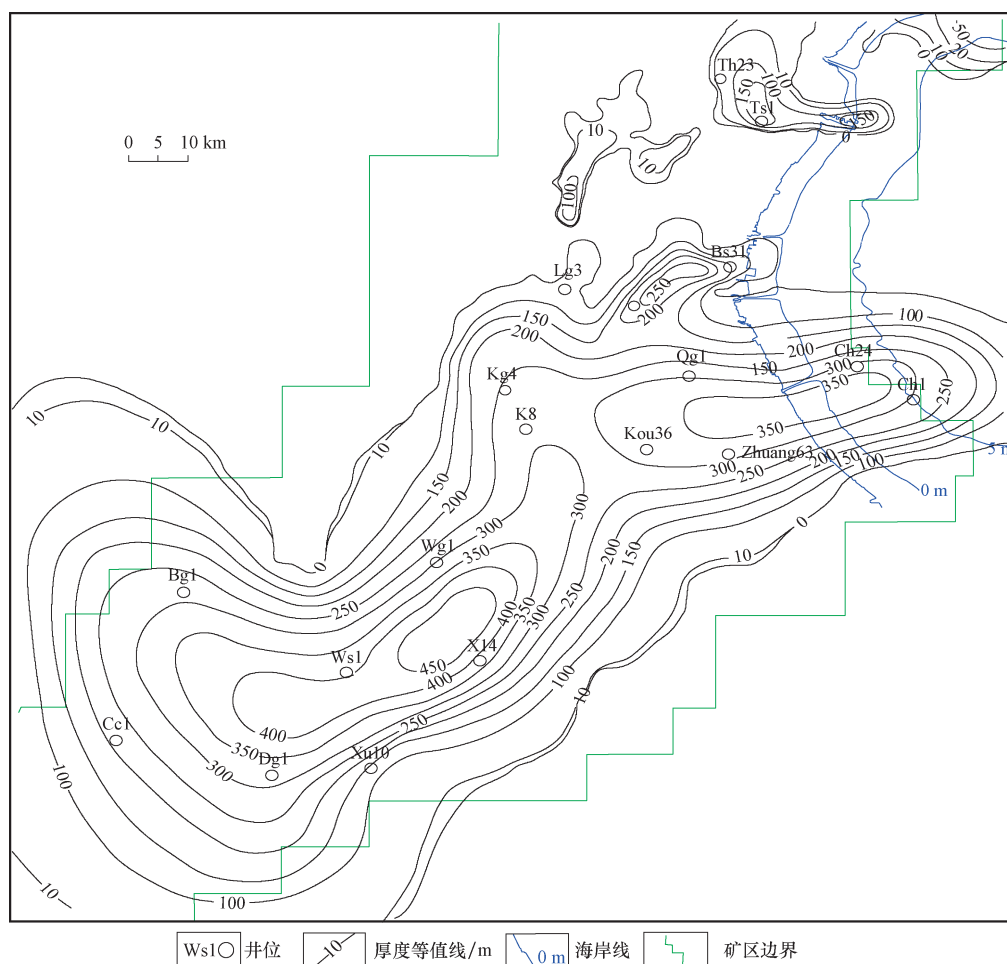


图2 大港油田煤系地层烃源岩厚度

Fig. 2 Thickness of source rocks in coal measure strata, Dagang oilfield

除与母质类型有关外,与成煤环境密切相关。大港油田煤系地层形成于以蕨类植物为主的滨海沼泽环境,这种环境下形成的煤及碳质泥岩在成熟-高熟阶段能够形成大规模的天然气聚集,这已经是共识^[1]。但在广阔的森林沼泽背景下由于地貌条件的复杂性,在相对低洼、水体环境闭塞区域,水中繁殖了大量水生低等生物,富氢组分含量增多,使源岩生烃能力提高的同时兼具一定的生油性^[2]。

根据大港油田 280 个实测样品点的统计,本区煤系源岩无论是泥岩、碳质泥岩还是煤层总体是以镜质组含量占优势为特征,镜质组含量基本大于 50%,以腐植煤为主,这与整个华北地台在这一时期的总体特征是一致的^[2]。平面上,各地区之间由于成煤环境的不同,显微组分构成差异较大。在地貌的相对低洼处也是主要的成煤中心,富氢组分含量高,如孔店地区煤壳质组+腐泥组含量为 14%~23.74%,平均为 17.7%;港西地区为 8.95%~22.4%,平均为 13.1%;歧南-埕海地区为 19%~32.2%,平均为 23.3%;徐黑地区为 9.7%~

46.7%,平均 18.8%,这在我国石炭-二叠系煤岩中含量也是比较高的。这种类型的有机质不仅可以生气也可以生油。乌马营-王官屯地区尽管也是重要的成煤中心,但地貌相对开阔水体环境偏氧化,壳质组+腐泥组含量只有 4.2%~9%,平均为 6.6%,而是以镜质组含量占优势,在 60%以上,尤其基质镜质组占 26.75%,是重要的生气母质(图 3)。碳质泥岩显微组分的构成以及分布趋势和煤基本一致,值得注意的是泥岩显微组分构成及分布与煤层并没有保持很好的一致性。如孔店地区煤层中的富氢组分较高,而泥岩相对要低,壳质组+腐泥组含量为 6.0%~15.3%,平均为 8.8%;港西地区泥岩富氢组分要远高于煤,为 17.2%~33.6%,平均为 30.7%,其中腐泥组含量占有一定的比例,为 1.3%~19.6%,平均为 5.6%,是各区当中占比最高的,这可能是由于港西地区成煤环境更闭塞还原性更强,使泥岩中腐泥质成分偏多。该区源岩的碳同位素偏轻, $\delta^{13}C_1$ 为 -25.7‰~-27.5‰,说明源岩偏腐泥型,Pr/Ph 低为 1.2~1.5,也证实了这一观点。

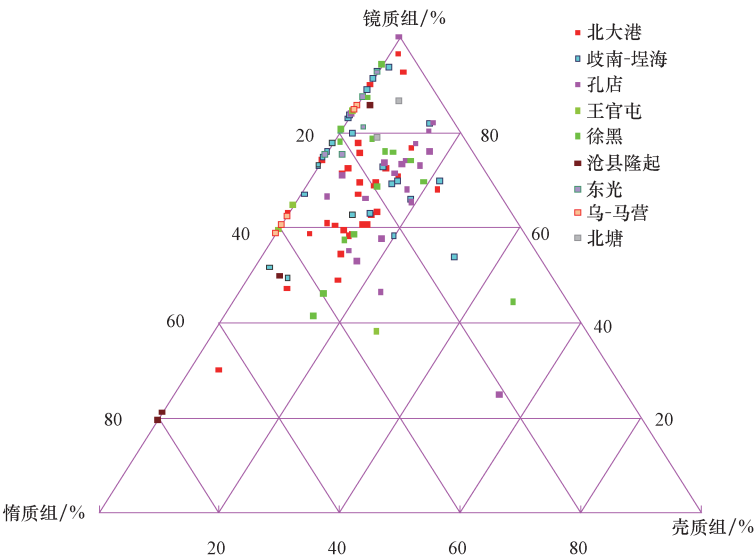


图 3 大港油田煤层显微组分组成
Fig. 3 Maceral of coal beds in Dagang oilfield

各种显微亚组分的成烃阶段有较大差异,虽然目前各家观点尚未统一,但普遍认为树脂体和木栓质体的 R_o 为 0.35% 即可进入生烃门限;角质体和孢子体生油门限相对滞后, R_o 为 0.5%;藻类体具有很好的生烃性,但一般含量较低且生烃晚;镜质组在成熟阶段达到高峰期,生烃潜力比壳质组和腐泥组低,但其数量可弥补质量上的不足^[3-7]。本区显微亚组分中,基质镜

质体普遍占镜质体的 50% 左右,在成熟阶段具有很好的生气条件;壳质组中以角质组和孢子体占比较高,含有一定的树脂体,但很少见木栓质体。港西地区煤层和泥岩显微亚组分含量中孢子体与角质体含量高。孔店地区煤层与港西地区相近,泥岩中富氢亚组分偏低(图 4)。将其与吐哈盆地侏罗系典型煤系含油盆地相比较,显微组分构成相近,侏罗系煤和泥岩中树脂体和

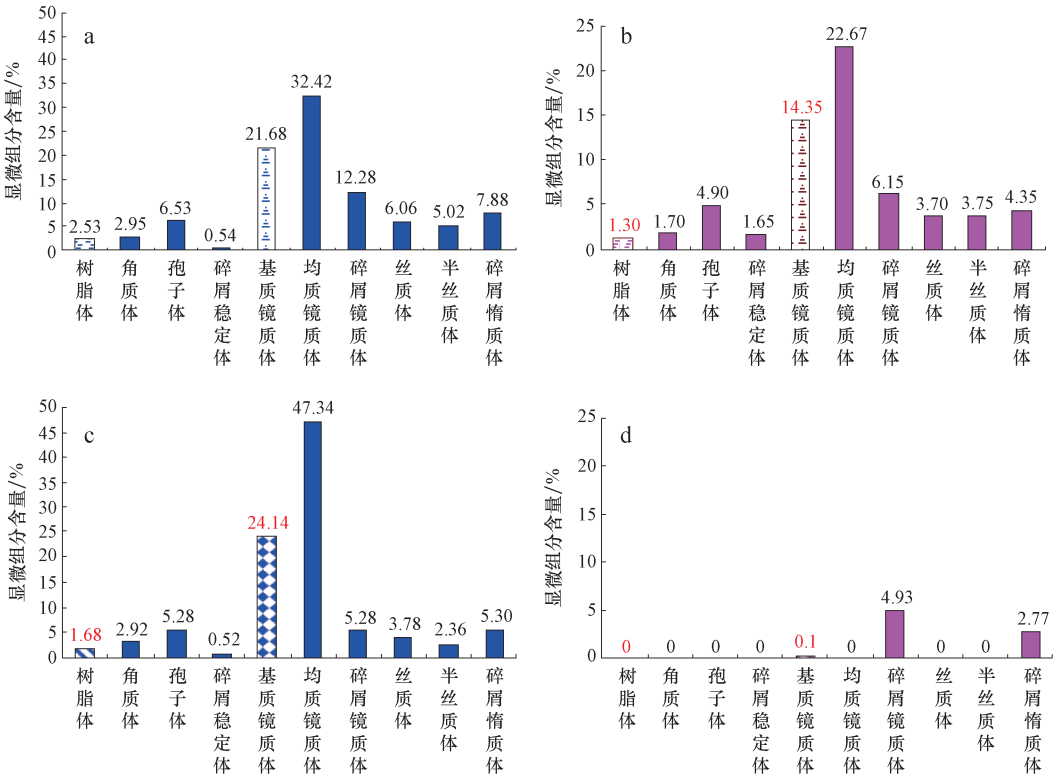


图 4 大港油田孔店-港西地区烃源岩有机显微组分组成
Fig. 4 Maceral of source rocks in Kongdian-Gangxi area, Dagang oilfield
a. 港西地区煤系烃源岩; b. 港西地区泥质烃源岩; c. 孔店地区煤系烃源岩; d. 孔店地区泥质烃源岩

木栓质体含量都很低,煤中平均含量仅为 0.25% 和 0.78%,泥岩一般小于 0.5%,远低于角质体 2.15% 和孢子体 1.92% 的含量^[8]。进一步说明了本区煤系源岩不仅能够生成煤成气也具有生成煤成油的可能性。

1.3 煤系烃源岩具有良好的生烃能力

煤系烃源岩由于成因类型、成煤环境以及有机质构成等的不同,生烃性质和生烃潜力差异很大。3 种源岩类型中,煤和碳质泥岩有机质丰度一般很高,高出泥岩数倍甚至十数倍,因此在评价时不宜采用同样的标准。本次分析采用的是 1997 年陈建平等制定的含煤地层烃源岩有机质丰度评价标准^[9]。

大港油田煤层有机质丰度普遍较高,TOC 分布在 20% ~ 80%, $S_1 + S_2$ 一般为 20 ~ 150 mg/g,最大为 191.88 mg/g。对于两套主要的含煤地层,太原组煤层有机质丰度要好于山西组,达到好 - 极好级别的烃源岩分别为 90.6% 和 88.7%;碳质泥岩同样为太原组有机质丰度偏高;与煤层绝大部分样品能够达到好 - 很好的级别不同,泥岩有机质丰度参差不齐,TOC 为 0.25% ~ 14.83%,平均为 4.32%, $S_1 + S_2$ 为 0.45 ~ 20.14,平均为 7.91,且中等及以下样品较多占 50% 以上,山西组则略好于太原组(表 1)。平面上有机质丰度的高值区与源岩厚值区基本对应,即烃源岩厚度大的区域有机质丰度高,但沧县隆起 - 东光地区烃源岩有机质丰度偏低,一是受成煤环境的影响,二是可能受到演化程度的影响,沧县隆起 - 东光地区受火成岩影响 R_o 在 2.0% 以上,高演化条件下随着烃类的排出有机质丰度下降。

2 煤系源岩生烃过程与二次成烃潜力

2.1 煤系烃源岩经历了两次生烃过程

大港油田煤系源岩演化程度差别很大, R_o 值一般

为 0.5% ~ 1.5%,部分地区如沧县隆起南段及东光地区受火成岩侵入的影响, R_o 超过 2.0%,最大达 3.73%。如果只考虑成岩的影响,大港油田内钻至石炭系最深的井乌马营地区 W_{s1} 井埋深 5 405 m 时, R_o 为 1.53%,据此推测现今埋藏比较深的歧南 - 歧北以及埕海潜山低部位热演化程度较高,可以达到 1.5% ~ 2.0% 以上。部分地区尽管经历了长时期的演化,但烃源岩的成熟度普遍还处于相对较低的演化程度,孔店地区、港西地区以及徐黑地区 R_o 值为 0.6% ~ 1.0%。

上古生界经历了多期构造活动的改造,经受多次大规模的沉积间断和抬升剥蚀才形成现今的面貌。据前人对该区古构造研究证实,由于印支期古隆起的作用,上古生界煤系地层在第三纪以前长期处于相对抬升的构造环境,侏罗纪至白垩纪,煤系地层埋深为 600 ~ 2 800 m,大港油田南部东光 - 乌马营 - 王官屯地区及沧县隆起南段能够达到 1 500 ~ 2 800 m。第三纪以来大港油田内除沧县隆起外大部分地区持续沉降,始新世晚期大港油田南部快速沉降,至渐新世,大港油田中部也就是现今的歧口凹陷煤系地层相继深埋,现今的埋藏深度远超过中生代时期的埋深。与之对应,煤系源岩也经历了两期生烃过程。一次生烃是指侏罗纪 - 白垩纪时期烃源岩生烃作用,此时仅大港油田南部东光 - 乌马营及王官屯地区进入生烃门限,但演化程度低、生烃规模较小。之后由于地层再次抬升,生烃作用基本停滞,先期形成的油气藏也易遭受破坏。二次生烃是指第三纪以来至现今的生烃作用,仍是南部东光 - 乌马营及王官屯地区煤系源岩首先达到二次生烃门限,孔一段晚期即生烃,持续时间长。歧口凹陷区煤系地层直至稳定的拗陷阶段才出现大规模二次生烃,煤系烃源岩现今镜质体反射率最高达到 1.5% 以上^[10-11]。二次生烃范围广、生烃规模大,因此,具备二次生烃条件的地区是油气的主要富集区。

表 1 大港油田煤系地层有机质丰度评价标准
Table 1 Organic matter abundance of coal measure strata in Dagang oilfield

烃源岩类型	层系	有机碳含量/%	生烃潜量/(mg · g ⁻¹)	氯仿沥青“A”含量/%	烃源岩级别占比/%	
					好 - 极好	中等
煤层	山西	36.20(61)	74.67(62)	1.209 5(18)	88.71	8.06
	太原	45.30(85)	86.66(85)	1.909 0(39)	90.59	7.06
碳质泥岩	山西	9.04(37)	14.37(37)	0.277 9(11)	72.27	16.22
	太原	14.20(57)	20.20(49)	0.381 0(24)	78.95	7.02
泥岩	山西	5.18(71)	9.19(71)	0.103 2(42)	42.89	28.54
	太原	3.45(121)	6.63(121)	0.091 0(56)	39.19	35.54

注:36.2(61)代表平均值(样品个数)。

2.2 煤系烃源岩二次成烃潜力

为了客观分析煤系地层成烃潜力,选取了代表不同地区演化特征的Cc1,Bs7,Ws1和Ch24等多口探井恢复其剥蚀厚度,分析埋藏史、热史^[12],刻画了大港油田四种生烃热演化史类型,即早埋晚抬型、早抬晚埋型、持续深埋型以及稳定埋藏型(图5)。其中除早埋晚抬型只经历了一次生烃过程之外,其余3类均达到了二次生烃条件。

1) 早抬晚埋型

这类地区多属于位于第三系凹陷中的古构造,即第三系沉积之前是位于构造高背景区,第三系沉积之后深埋于凹陷之中,目前的演化程度和埋深多已超过第三纪时期,因此经历两次生烃过程。孔西潜山位于孔店潜山带西侧围斜部位,是残留的中生代逆掩褶皱构造带。第三系沉积之前位于构造高部位,逆断层发育,石炭系-二叠系与中生界砂岩储层具有良好的接触关系,可通过断层侧向供烃(图6)。目前深埋于凹陷之中,演化程度和埋深多已超过第

三纪时期, R_o 为0.68%~0.91%。煤显微组分中富氢组分含量高为6.0%~15.3%,平均为8.8%;有机质丰度高, TOC 均值为52%, S_1+S_2 为86 mg/g,在该演化阶段具备生成液态烃的条件。部署的Kg4井中生界获得工业油流,原油具有低密度(0.7882 g/cm^3)、低粘度($1.05\text{ MPa}\cdot\text{s}$)、低凝固点($-27\text{ }^{\circ}\text{C}$)以及低蜡的物性特点,属凝析油藏。原油同位素偏重,为 -26.8‰ ~ -25.9‰ ,与国内几个典型的煤成凝析油碳同位素相近,如冀中凹陷碳同位素为 -25.94‰ ,东濮凹陷碳同位素为 -26.85‰ ,四川中坝碳同位素为 -26.79‰ ,吐哈碳同位素为 -26.2‰ ^[13-15]。气相色谱具前峰型特点,主峰碳 C_{11} ,属于典型的煤成油藏。Kg4井勘探的成果也更坚定了大港油田探索煤成油勘探的信心。

2) 持续深埋型

主要位于现今的凹陷之中,中生代并未遭受太强烈的剥蚀,还保存较完整的侏罗系-白垩系以及三叠系,目前又处在第三系的深凹陷之中,这些地区具有连续生烃,演化程度高的特点。乌马营、王官屯潜山及埕

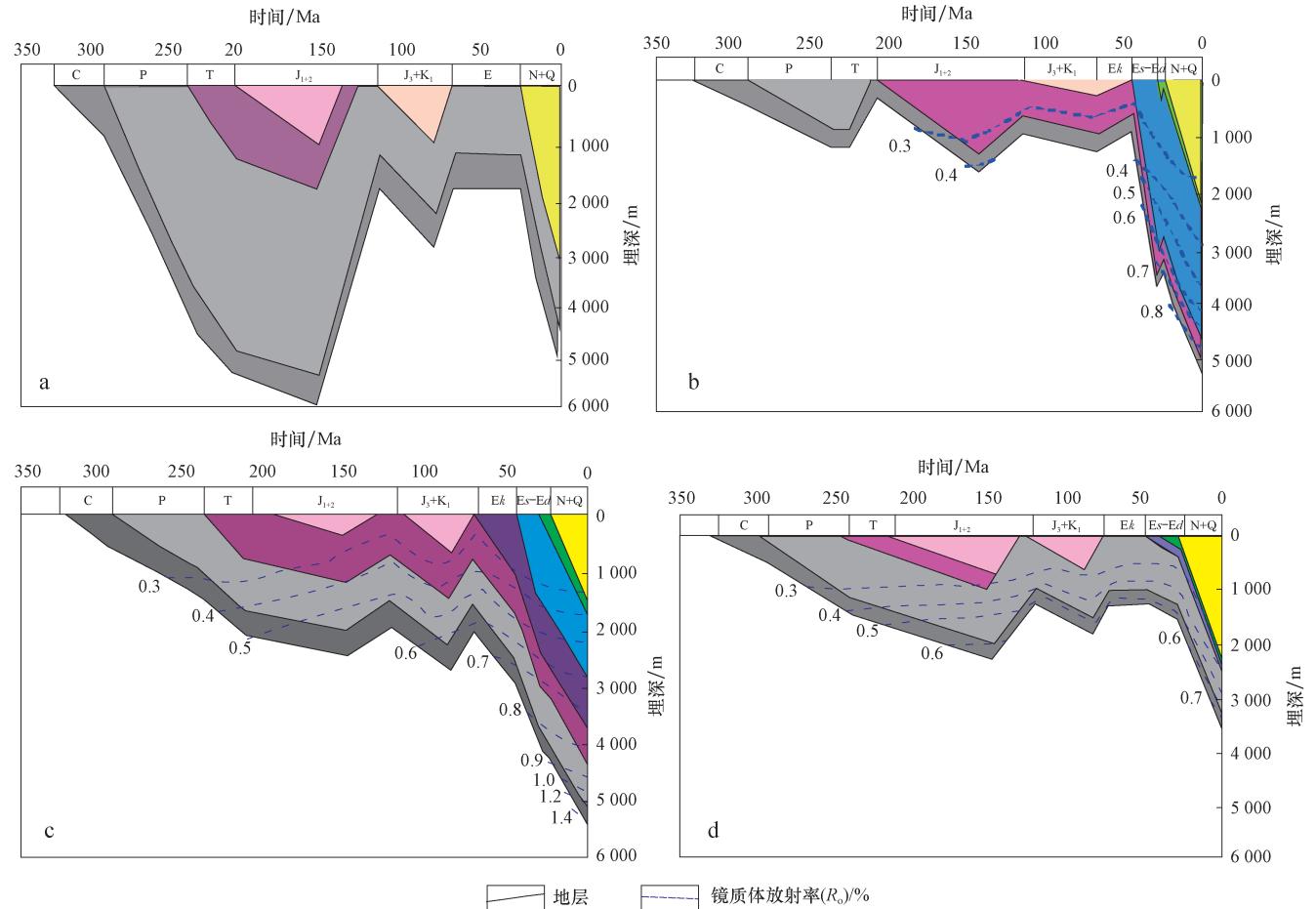


图5 大港油田石炭系-二叠系典型井生烃埋藏史类型

Fig.5 Burial history types of the Carboniferous-Permian in typical wells in Dagang oilfield

a. cc1 井,早埋晚抬型;b. bs7 井,早抬晚埋型;c. ws1 井,持续深埋型;d. ch24 井,稳定埋藏型

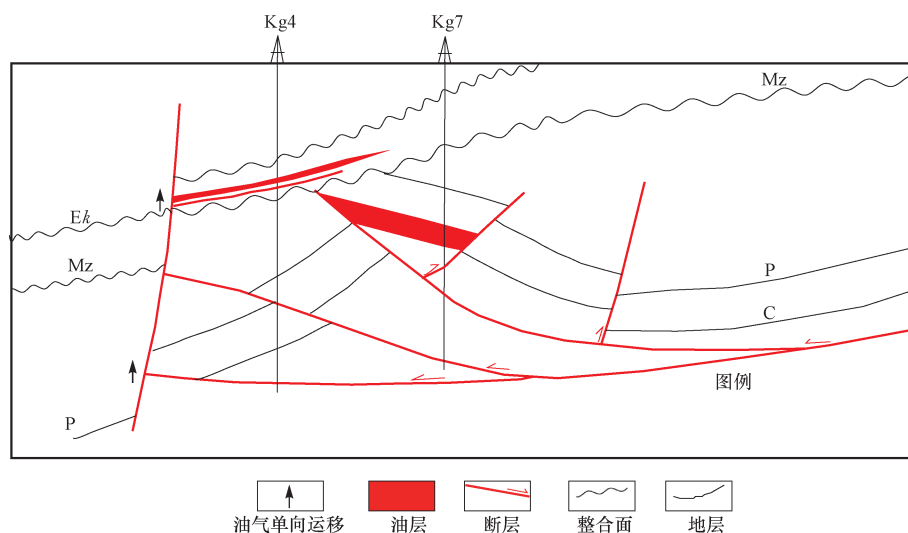


图6 大港油田孔西潜山油藏剖面

Fig. 6 Oil accumulation profile of Kongxi buried hill in Dagang Oilfield

海潜山均属于这种类型,也获得重要突破^[16]。王官屯潜山位于沧东凹陷大型中央背斜构造带上乌马营-王官屯潜山带的北端,勘探面积为 60 km²。该潜山带为燕山期形成的挤压逆冲构造,由于逆掩带上部逆冲席逆冲拱升,使石炭系-二叠系烃源岩直接与二叠系砂岩侧向接触。同时,东西两侧的上古生界烃源岩直接与奥陶系储层侧向相接,供油气关系也十分理想。王官屯中生代以来持续沉降,具有连续的生烃条件,现今演化程度高, R_o 一般为 0.9%~1.2%。烃源岩有机质丰度高,煤层基本都属于好-极好烃源岩类型。母质类型以基质镜质组占绝对优势,在高演化程度下以生

气为主。潜山内部发育二叠系砂岩和奥陶系碳酸盐岩两套储层。二叠系石盒子砂岩属河流相沉积,渗透砂岩厚度为 120~170m,孔隙度平均为 14%,渗透率平均为 $8.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,具有较好的储集性能。奥陶系储层储集空间以孔-洞-缝复合型为主,厚度约为 50m。因此具备形成原生油气藏条件的同时,古近纪断层改造程度较弱也利于原生油气聚集与保存(图 7)。王官屯潜山钻遇多口探井均显示良好,Wg1 井在奥陶系和石炭系-二叠系获得高产油气流。从天然气组分来看,烃类气体中甲烷含量高,干燥系数为 0.94,与第三系天然气相比偏干,应属煤成气范畴^[17]。天

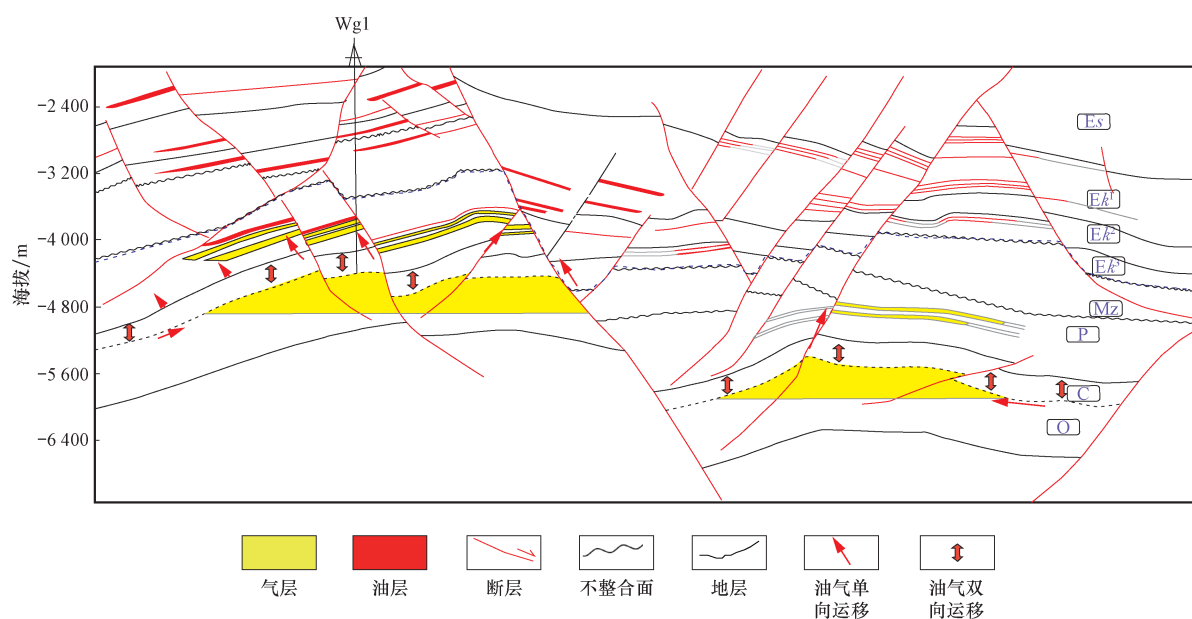


图7 大港油田王官屯潜山油藏剖面

Fig. 7 Oil accumulation profile of Wangguantun buried hill in Dagang oilfield

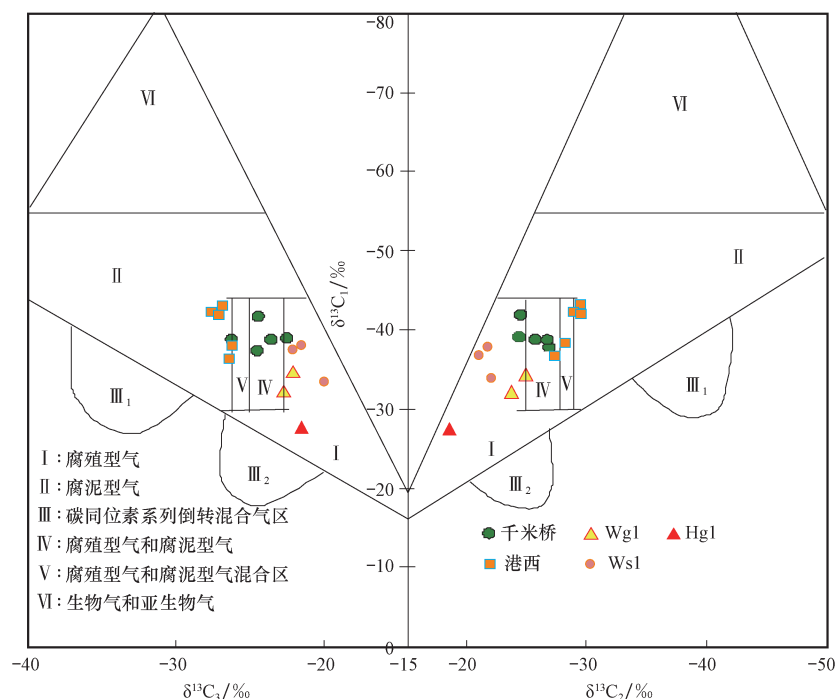


图8 大港油田天然气判识图版

Fig. 8 Identification charts of nature gas in Dagang Oilfield

然气甲烷碳同位素为 -35.3‰ , 乙烷碳同位素为 -25.4‰ , 在戴金星天然气判识^[18]图版上均落在煤成气范围(图8)。需要注意的是王官屯潜山奥陶系煤成气中含有一定硫化氢气体, 含量为 8.7% , 造成目前开采难度大。前人分析硫化氢主要源自石膏 TSR 反应, 奥陶系峰峰组与上马家沟组发育一套膏盐层, 其发育程度及埋藏条件影响硫化氢浓度。而石炭系-二叠系的碎屑岩储层在大港油田内分布稳定, 发育良好, 可作为下步煤成烃勘探主要目的层。

3) 稳定埋藏型

这类地区是指目前的埋藏和演化程度虽已超过第三纪时期, 但超过的幅度并不大, 即早期和现在的埋深以及演化程度都不是很高的地区, 多位于二级基底断裂上升盘, 如港西潜山、徐-黑潜山, 虽然都达到了二次生烃条件, 但演化程度偏低。徐-黑潜山钻遇多口探井均见显示, X13 井灰岩岩心见油浸显示, 通过色谱分析原油与煤系烃源岩亲缘关系密切^[10]。港西潜山带近期勘探获得突破, 相继钻探的 Z1502 与 GG1507 等多口探井获得工业油流, 初步分析油气既有来自古近系油源也见到煤成烃的特征。

基于上述分析, 圈定了能够达到二次生烃条件的勘探面积约为 $5\,300\text{ km}^2$, 其中二次生烃能够达到成熟阶段的面积也近 $3\,000\text{ km}^2$ 。据第四次油气资源评价结果, 分别预测了侏罗纪末和现今的天然气聚集量为 $0.23 \times 10^8\text{ m}^3$, 其中一次聚集量为 $0.04 \times 10^8\text{ m}^3$, 二次

聚集量为 $0.19 \times 10^8\text{ m}^3$ 。根据目前的勘探情况, 煤成气的资源发现率仍不足 20% , 因此还有很大的勘探空间。除此之外, 在演化程度适中, 富氢组分比较高的地区还会存在一定的煤成油资源, 其聚集量有待进一步研究。

3 结论

1) 大港油田煤系源岩在中南部广泛分布, 烃源岩厚度大、有机质丰度高, 有机显微组分中以镜质组为主, 具有良好的生气条件, 部分地区也富含一定的富氢组分, 在低熟-成熟阶段具有生油能力。

2) 上古生界经历了多期构造活动的改造, 煤系源岩也随之经历了两次生烃过程, 其中二次生烃范围分布广, 资源规模大, 是潜山勘探的重要类型。

3) 大港油田育4种埋藏史类型, 除早埋晚抬型之外, 其他3类都具有二次生烃条件。持续埋深型潜山地层发育全, 后期构造改造弱, 烃源岩基本处于连续生烃状态, 生气规模大, 乌马营潜山、王官屯潜山、埕海潜山3个潜山带均已获得突破, 该类潜山仍然是今后煤成气勘探的重要领域; 早抬晚埋型潜山虽然经历了抬升再埋藏演化过程, 但现今演化程度适中利于煤成油气的生成, 孔西潜山勘探的成功展示此类型潜山的勘探潜力; 稳定埋藏型潜山也已见到良好显示, 可作为潜山勘探的后备领域。

参 考 文 献

- [1] 戴金星. 成煤作用中形成的天然气和石油[J]. 石油勘探与开发, 1979, 6(3): 10-17.
Dai Jinxing. Formation of natural gas and oil in the incoation[J]. Petroleum Exploration and Development, 1979, 6(3): 10-17.
- [2] 黄第藩, 秦匡宗, 王铁冠, 等. 煤成油的形成和成烃机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
Huang Difan, Qin Kuangzong, Wang Tieguan, et al. Formation of Coal-formed oil and mechanism of hydrocarbon generation[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995.
- [3] 王春江. 关于煤成油形成演化阶段及有关问题的讨论[J]. 地质评论, 1999, 45(4): 394-401.
Wang Chunjiang. Generation and evolution stages of coal-derived oil and some relative problems[J]. Geological Review, 1999, 45(4): 394-401.
- [4] 钟宁宁, 王铁冠, 熊波, 等. 煤系低熟油形成机制及其意义[J]. 江汉石油学院学报, 1995, 17(1): 1-7.
Zhong Ningning, Wang Tieguan, Xiong Bo, et al. The mechanisms of immature oil generation in coal-bearing sequences and its significances[J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 1995, 17(1): 1-7.
- [5] 徐永昌, 王晓峰, 史宝光. 低熟气—煤成气理念的延伸[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(3): 408-412.
Xu Yongchang, Wang Xiaofeng, Shi Baoguang. Low-mature gas: An extension of the concept of coal-formed gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(3): 408-412.
- [6] 席伟军. 和什托洛盖盆地低熟煤系烃源岩生烃潜力及勘探前景分析[J]. 非常规油气, 2014, 1(1): 27-32.
Xi Weijun. Hydrocarbon generation potential and exploration prospect analysis of jurassic immature source rocks in the Heshentoluogai Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2014, 1(1): 27-32.
- [7] 陈建平, 黄第藩, 李晋超, 等. 西北地区侏罗纪煤系有机质成烃模式[J]. 地球化学, 1999, 28(4): 327-339.
Chen Jianping, Huang Difan, Li Jinchao, et al. The petroleum generation model for organic matter from Jurassic coal measure. Northwest China[J]. 1999, 28(4): 327-339.
- [8] 吴俊, 金奎利. 显微组分成烃动力学及煤成烃阶段性研究[J]. 煤田地质与勘探, 1993, 21(4): 19-26.
Wu Jun, Jin Kuili. Researches on hydrocarbon-generating dynamics of organic macerals and coal-formed hydrocarbonation stages[J]. Coal Geology & Exploration, 1993, 21(4): 19-26.
- [9] 陈建平, 赵长毅, 何忠华. 煤系有机质成烃潜力评价标准探讨[J]. 石油勘探与开发, 1997, 24(1): 1-5.
Criteria for evaluating the hydrocarbon generating potential of organic matter in coal measures[J]. Petroleum Exploration and Development, 1997, 24(1): 1-5.
- [10] 杨池银, 于学敏, 刘岩, 等. 渤海湾盆地黄骅坳陷中南部煤系发育区煤成气形成条件及勘探前景[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(1): 23-32.
Yang Chiying, Yu Xuemin, Liu Yan, et al. Geology conditions of coal-derived gas accumulation prospect in the carboniferous-permian covered area from south central of Huanghua Depression in Bohai Bay Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(1): 23-32.
- [11] 周立宏, 李三忠, 刘建忠, 等. 渤海湾盆地前第三系构造演化与潜山油气成藏模式[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003: 159-170.
Zhou Lihong, Li Sanzhong, Liu Jianzhong, et al. Pre-Tertiary tectonic evolution and buried hill-type oil-gas development and reservation under the Bohai Bay Basin[J]. Beijing: Science Press, 2003: 159-170.
- [12] 崔军平, 任战利, 李金翔, 等. 海拉尔盆地呼伦湖凹陷热演化史恢复[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(01): 35-42.
Cui Junping, Ren Zhanli, Li Jinxiang, et al. Reconstruction of geothermal history in Hulunhu Depression, Hailaer Basin[J]. Oil & Gas geology, 2015, 36(01): 35-42.
- [13] 梁宏斌, 降栓奇, 杨桂茹, 等. 冀中坳陷北部天然气类型、成藏模式及成藏条件研究[J]. 中国石油勘探, 2002, 7(1): 17-33.
Liang Hongbin, Jiang Shuangqi, Yang Jiarong, et al. Discussion on petro China's natural gas exploration strategy in the near Future on Basis of Foreign natural gas development law[J]. China Petroleum Exploration, 2002, 7(1): 17-33.
- [14] 程克明, 赵长毅, 苏爱国, 等. 吐哈盆地煤成油气的地质地球化学研究[J]. 勘探家, 1997, 2(2): 5-10.
Cheng Keming, Zhao Changyi, Su Aiguo, et al. Prospects and development of natural gas resource in China[J]. Petroleum Explorationist, 1997, 2(2): 5-10.
- [15] 王昌桂, 程克明, 徐永昌, 等. 吐哈盆地侏罗纪煤成烃地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
Wang Changgui, Cheng Keming, Xu Yongchang, et al. Hydrocarbon geochemistry of Jurassic coal derived hydrocarbon in Turpan-Hami Basin[M]. Beijing: Science Press, 1988.
- [16] 吴永平, 杨池银. 渤海湾盆地北部奥陶系潜山[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
Wu Yongping, Yang Chiying. Ordovician buried hill in the northern Bohai Bay Basin[M]. Beijing: Geology Press, 2002.
- [17] 陈敬轶, 贾会冲, 李永杰, 等. 鄂尔多斯盆地伊盟隆起上古生界天然气成因及气源[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(02): 205-209.
Chen Jingyi, Jia Huichong, Li Yongjie, et al. Origin and source of natural gas in the Upper Paleozoic of the Yimeng Uplift, Ordos Basin[J]. Oil & gas geology, 2016, 37(02): 205-209.
- [18] 戴金星. 天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别[J]. 天然气地球科学, 1993, 2(3): 23-28.
Dai Jinxing. The characteristics of carbon and hydrogen isotopes and the identification of various types of natural gas[J]. Nature Gas Geoscience, 1993, 2(3): 23-28.

(编辑 董立)