

文章编号:0253-9985(2011)06-0873-09

松辽盆地南部幔源 CO₂ 与油气充注时序

——来自含片钠铝石砂岩的证据

刘立¹, 侯启军², 刘娜¹, 杨会东³, 李福来¹, 于志超¹

(1. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061; 2. 中国石油吉林油田公司, 吉林 松原 138001;

3. 中国石油吉林油田公司勘探开发研究院, 吉林 松原 138001)

摘要: 沉积盆地中幔源 CO₂ 的充注时间是进行 CO₂-砂岩相互作用以及 CO₂-原油相互作用研究的基础。一般将 CO₂ 气藏附近火山岩的喷发年龄视为幔源 CO₂ 的充注时间, 但是, 这一思路明显不适用于具有多期火山活动的含油气盆地。通过成岩共生序列和流体包裹体的系统研究, 在松辽盆地南部含片钠铝石砂岩中解读出两期油气和一期 CO₂ 充注记录, 其中, 第一期和第二期油气充注记录主要以液烃包裹体和气液烃包裹体形式赋存于自生矿物和碎屑矿物的裂隙中, 幔源 CO₂ 充注的记录为片钠铝石自生矿物和赋存于碎屑矿物裂隙中的含 CO₂ 包裹体, 幔源 CO₂ 的充注略晚于第二期油气充注或与其大致同时。根据含片钠铝石砂岩的成岩共生序列和流体包裹体研究, 结合已有的油气成藏时间和构造裂缝发育时间判断, 松辽盆地南部形成片钠铝石的幔源 CO₂ 的充注时间可能为白垩纪末(明水期末)—古近纪。

关键词: 充注时序; 幔源 CO₂; 油气; 含片钠铝石砂岩; 松辽盆地南部

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Charging time sequence of mantle CO₂ and hydrocarbon in southern Songliao Basin: an evidence from dawsonite-bearing sandstones

Liu Li¹, Hou Qijun², Liu Na¹, Yang Huidong³, Li Fulai¹ and Yu Zhichao¹

(1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun, Jilin 130061, China;

2. PetroChina Jilin Oilfield Company, Songyuan, Jilin 138001, China;

3. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Jilin Oilfield Company, Songyuan, Jilin 138001, China)

Abstract: Charging time of mantle CO₂ in sedimentary basins is a basis for studying interaction of CO₂-sandstone and CO₂-crude oil. Generally, eruption age of volcanic rocks near CO₂ reservoirs is supposed to be the charging time of mantle CO₂, but this approach is obviously not suitable to hydrocarbon basins with multi-stage volcanic eruption. Two hydrocarbon charging phases and one CO₂ charging phase have been identified in the dawsonite-bearing sandstone by the systematic observation and determination of diagenetic sequence and fluid inclusions in Southern Songliao Basin. The first and second hydrocarbon charging were recorded by the liquid hydrocarbon inclusion and gas-liquid hydrocarbon inclusion within fractures of authigenic minerals and detrital minerals, while the mantle CO₂ charging by the dawsonite and CO₂-bearing inclusion within fractures of detrital minerals. The charging time of mantle CO₂ is slightly latter than or approximately the same as the second phase of hydrocarbon charging. According to the analysis of diagenetic sequence and liquid inclusions in dawsonite-bearing sandstone, and in combination with the timing of hydrocarbon accumulation and structural fractures development, the charging time of mantle CO₂ leading to dawsonite formation in Songliao Basin might be from the end of Creta-

收稿日期: 2011-01-15。

第一作者简介: 刘立(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 沉积地质学。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40672074, 40972075, 40372060); 教育部高等学校博士学科专项科研基金项目(20070183137)。

ceous (the end of Mingshui period) to Paleogene.

Key words: charging time sequence, mantle CO₂, hydrocarbon, dawsonite-bearing sandstone, southern Songliao Basin

越来越多的证据表明,目前发现的绝大多数 CO₂ 气(藏)田的形成与岩浆活动有关,CO₂ 气(藏)田和与其具有成因联系的火山岩大都在空间上邻近或具有输运通道沟通,前者如美国科罗拉多高原上的 9 个正在开发或已废弃的 CO₂ 气田^[1]、中国渤海湾盆地的花 17、阴 25 气藏和高青气田^[2];后者以渤海湾盆地的平方王气藏和平南气藏^[2]为代表。基于这一考虑,一般将 CO₂ 气藏附近火山岩的喷发年龄视为 CO₂ 气的充注时间,例如美国科罗拉多高原的 Bravo 穹窿 CO₂ 气田、McElmo 穹窿 CO₂ 气田^[1],澳大利亚 Otway 盆地 Ladbroke Grove 天然气田^[3]等。然而,这一思路对于赋存在多期火山活动背景中的 CO₂ 气藏的成藏时间的确定并不完全适用。例如,松辽盆地自形成以来发生了早白垩世、晚白垩世、古近纪和第四纪 4 期火山活动,而幔源 CO₂ 气藏既分布于深部地层,也分布于中浅部地层中,因此,难以确定哪一期火山活动与幔源 CO₂ 的充注有关。正因为如此,关于松辽盆地幔源 CO₂ 的成藏时间目前存在早期成藏和晚期成藏两种认识。早期成藏指的是,CO₂ 产生于早白垩世营城组火山岩后期脱气作用^[4]。晚期成藏观点则强调,CO₂ 形成于古近纪以后的火山活动,但具体表述不尽相同。例如,中生代末期至新生代^[5]、新生代^[6-7]和晚新生代以后^[8]等。显然,松辽盆地幔源 CO₂ 成藏时间的确定尚需要更多的证据。针对这一科学问题,我们以松辽盆地南部含片钠铝石砂岩为研究对象,试图通过片钠铝石和油气包裹体在成岩共生序列中的“定位”,确定形成片钠铝石的 CO₂ 与油气充注的先后关系,为查明幔源 CO₂ 的真实充注时间提供岩石学依据。

1 成岩共生序列与片钠铝石的成因

地球化学数值模拟^[9]和热力学计算^[10]表明,片钠铝石稳定存在于高 CO₂ 分压的体系中。一旦 CO₂ 分压降低,片钠铝石将发生溶解^[10]。片钠铝石也是天然 CO₂ 气藏中常见的自生矿物^[11-14]。

因此,有理由相信片钠铝石是指示天然 CO₂ 充注的特征矿物。

在松辽盆地南部,片钠铝石自生矿物主要分布于华字井阶地和扶新隆起的泉头组四段、长岭凹陷的青山口组三段和红岗阶地的青山口组—姚家组及嫩江组三段砂岩中(图 1)。含片钠铝石砂岩的岩石类型主要为长石砂岩、长石岩屑砂岩及岩屑长石砂岩。偏光显微镜和扫描电镜观察表明,CO₂ 充注后形成的自生矿物组合主要为片钠铝石、铁白云石以及晚期方解石。CO₂ 充注前形成的自生矿物组合取决于其宿主砂岩的沉积环境和成岩历史,例如,在孤店 CO₂ 气藏孤 27 井中,CO₂ 充注前形成的自生矿物组合主要为次生加大石英、次生加大长石、高岭石和伊利石^[15];乾安油田主要为早期方解石、高岭石、次生加大石英和伊利石^[16];红岗油田主要为早期方解石、次生加大石英和高岭石^[17]。除了以自生矿物形式产出外,在扶新隆起,片钠铝石也分布于砂岩裂缝中。在裂缝中,片钠铝石呈半充填状,裂缝局部见有石油浸染现象。

华字井阶地、长岭凹陷和红岗阶地砂岩中片钠铝石的 $\delta^{13}\text{C}$ 分布范围为 $-5.30\% \sim 3.29\%$ (PDB),其中 82.8% 的数据分布于 $-2\% \sim 2\%$ (PDB) 区间; $\delta^{18}\text{O}$ 的分布范围较宽,为 $8.95\% \sim 21.04\%$ (SMOW)。总体上,以样品分布广、 $\delta^{13}\text{C}$ 数据分布集中为特征。这一特征与澳大利亚 Bowen-Gunnedah-Sydney 盆地系的片钠铝石的碳氧同位素分析数据极为相似,虽然其样品采自 Bowen, Gunnedah 和 Sydney 3 个盆地,但是测得的 $\delta^{13}\text{C}$ 数据 80% 以上分布于 $-2.0\% \sim 3.0\%$ (PDB) 区间^[18]。在 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) - $\delta^{18}\text{O}$ (SMOW) 图解上(图 2),松辽盆地南部和澳大利亚 Bowen-Gunnedah-Sydney 盆地系的片钠铝石落于同一区域,说明这两个地区片钠铝石中的“碳”都具有来源相对单一的基本特征。Baker 等^[18]根据该盆地系广泛分布的古近纪岩床、岩脉和喷出岩以及 Bowen 盆地和 Sydney 盆地煤层中赋存的高含量的岩浆成因 CO₂ ($\delta^{13}\text{C}$ 为 $-7\% \pm 2\%$) 的事实,提出该盆地系形成片钠铝石的碳来自岩浆活动的观点。Golab 等^[19]对 Sydney 盆地西北部 Upper Hunter Valley 二

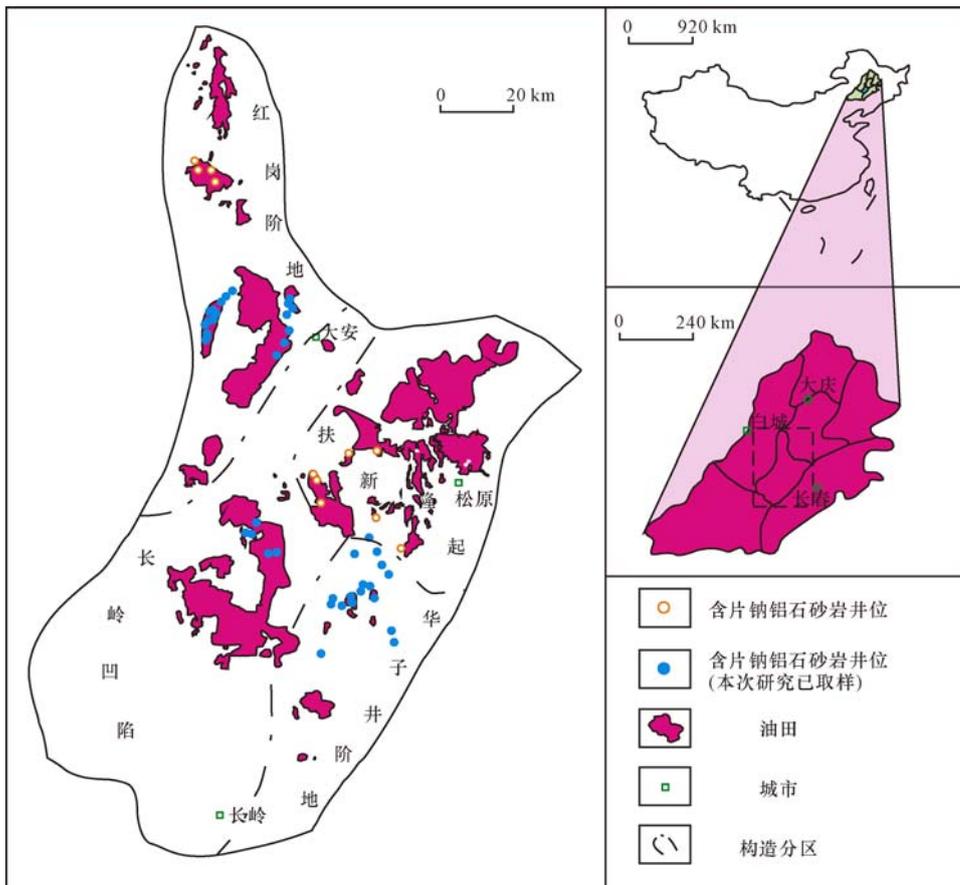


图1 松辽盆地南部含片钠铝石砂岩分布

Fig. 1 Distribution map of dawsonite-bearing sandstone in southern Songliao Basin

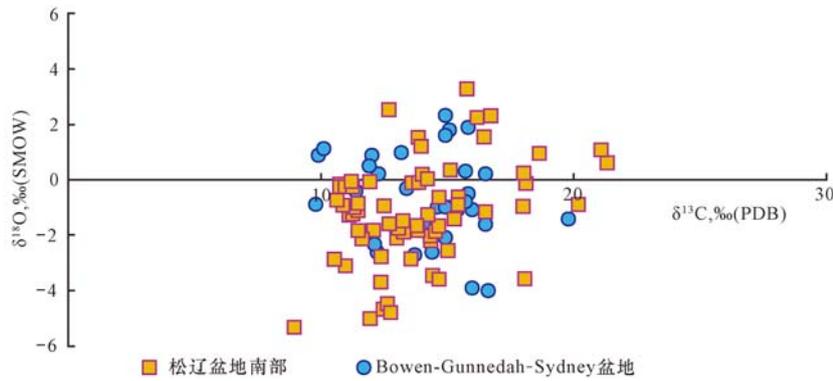


图2 松辽盆地南部与澳大利亚 Bowen-Gunnedah-Sydney 盆地系^[18]中片钠铝石的碳、氧同位素比较

Fig. 2 Comparison of oxygen and carbon isotopes for dawsonite between southern Songliao Basin and Bowen-Gunnedah-Sydney Basin system^[18]

叠系煤系中片钠铝石的研究证实了 Baker 等^[18]的判断。松辽盆地与 Bowen-Gunnedah-Sydney 盆地系类似,既发育幔源-岩浆成因的 CO₂ 气藏,也存在与 CO₂ 具有潜在成因联系的火山岩。最近的研究表明,松辽盆地幔源-岩浆成因 CO₂ 分布广泛,其中,仅泉头组、青山口组和嫩江组地层中 CO₂ 的

地质储量就达 144.74 × 10⁸ m³。与 CO₂ 具有潜在成因联系的火山岩包括大屯火山岩、双辽火山岩和五大连池火山岩。显然,松辽盆地南部片钠铝石的形成与幔源-岩浆成因 CO₂ 的充注应具有密切的成因联系。

由于目前尚无片钠铝石-CO₂ 的分馏系数,

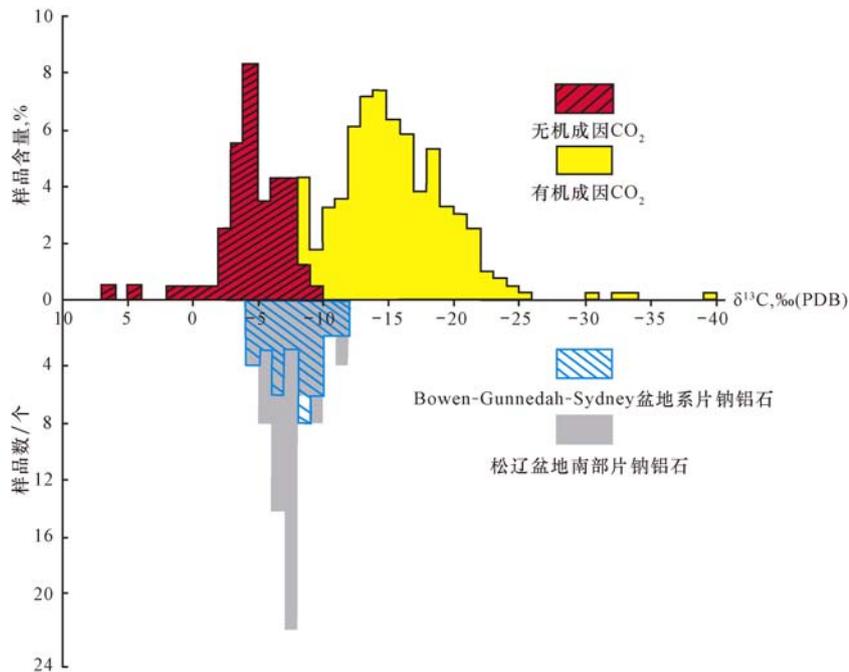


图3 松辽盆地南部形成片钠铝石的CO₂碳同位素与无机/有机成因CO₂碳同位素^[21]比较

Fig. 3 Comparison of carbon isotopes between CO₂ gas in isotopic equilibrium with the dawsonite and CO₂ gas of inorganic or organic origin^[21] in southern Songliao Basin

本文采用 Baker^[18] 等人的替代方法, 即将方解石-CO₂ 的分馏系数^[20] 视为相当于同温度下片钠铝石-CO₂ 的分馏系数, 并利用方解石-CO₂ 分馏方程^[20] 计算(温度数据来自平均地温梯度 4.2 °C/100m 与现今埋深乘积)。计算表明, 与片钠铝石平衡的 δ¹³C_{CO₂} 的范围为 -11.7‰ ~ -4.2‰。根据最近编制的松辽盆地 CO₂ 成因判别图板^[6], 松辽盆地的 CO₂ 以无机成因为主, 其 δ¹³C_{CO₂} 介于 -2‰ ~ -10‰, 平均值为 -5‰ 左右, 为幔源-岩浆成因。有机成因 CO₂ 的含量小于 20%, δ¹³C_{CO₂} 小于 10‰。按照上述标准, 松辽盆地南部的片钠铝石主要 (89.6%) 形成于无机 CO₂ 背景, 少量 (10.4%) 形成于有机 CO₂ 背景(图 3)。这说明, 松辽盆地南部引起片钠铝石形成的 CO₂ 和气藏中的 CO₂ 具有相同的碳来源, 均为幔源-岩浆成因。

2 油气包裹体特征与期次

2.1 油气包裹体特征

含片钠铝石砂岩中发育的包裹体包括含烃盐水包裹体、液烃包裹体、气液烃包裹体和气烃包裹体, 其主要特征如下。

含烃盐水包裹体呈无色-灰色、浅灰色、浅褐色和浅褐黄色, 零星或呈带状分布于石英次生加大边、片钠铝石、方解石和碎屑石英的裂隙中, 与液烃包裹体和气液烃包裹体共生。含烃盐水包裹体的大小为 1 μm × 5 μm ~ 20 μm × 40 μm, 气液比 ≤ 5%, 均一温度范围为 65 ~ 175 °C。

液烃包裹体呈浅褐色、褐色和深褐色, 部分包裹体显示浅黄色、浅黄绿色荧光。包裹体成群、成带分布于石英次生加大边内侧、早期方解石或分布于切及(未切穿)石英次生加大边的微裂隙中。

气液烃包裹体中的液烃呈无色透明、淡黄色、浅黄色, 显示较强的浅黄色、浅黄绿色、浅蓝白色、浅蓝色荧光, 气烃呈灰色。包裹体成群、成带或零星分布于晚期方解石、片钠铝石、穿切碎屑石英及其次生加大边和碎屑长石的裂隙中。包裹体的大小为 1 μm × 10 μm ~ 30 μm × 40 μm, 气液比 ≤ 5%, 均一温度范围为 54 ~ 138 °C。

气烃包裹体呈灰色, 分布局限, 一般呈零星或成群仅分布于个别晚期方解石胶结物中。

2.2 油气包裹体期次

根据油气包裹体中的烃类性质, 结合其宿主

矿物或赋存产状,含片钠铝石砂岩中的油气包裹体明显分为两期。其中,第一期包裹体主要为液烃包裹体,少量为气液烃包裹体。包裹体赋存于早期石英次生加大边、早期方解石和切及(未切穿)石英次生加大边的裂隙中。在早期石英次生加大边中,包裹体沿次生加大边内侧零星或成带分布,发育丰度相差悬殊,低丰度($GOI < 0.5\%$)、中等丰度(GOI 约为 $1\% \sim 3\%$)和极高丰度(GOI 约为 10%)者均有产出,主要为液烃包裹体,少量为气液烃包裹体。赋存于早期方解石中的包裹体成群分布,均为褐色、深褐色的液烃包裹体。在切及(未切穿)石英次生加大边的裂隙中,包裹体呈带状分布,主要为液烃包裹体,个别为气液烃包裹体。与第一期油气包裹体共生的盐水包裹体的均一温度峰值不同地区略有差别,其中,红岗阶地为 $70 \sim 90^\circ\text{C}$,乾安凹陷为 $70 \sim 80^\circ\text{C}$,华字井阶地为 $70 \sim 100^\circ\text{C}$ (图4)。

第二期包裹体主要为气液烃包裹体(占 $60\% \sim 90\%$),其次为液烃包裹体(占 $40\% \sim 9\%$),极个别为气烃包裹体(占 1% 左右)。包裹体赋存于晚期方解石、晚期石英次生加大边、片钠铝石和穿切碎屑石英及其次生加大边的微裂隙中以及碎屑长石中。赋存于晚期石英次生加大边中的包裹体发育丰度中等(GOI 约为 3%),包裹体成群、成带分布。赋存于晚期方解石和片钠铝石中的包裹体成群或孤立状分布,其中,晚期方解石中的包裹体发育丰度极高(约 $70\% \sim 80\%$ 的晚期方解石中见有包裹体)。在穿切碎屑石英及其次生加大边的微裂隙中,包裹体呈带状分布。在长石碎屑中,包裹体亦成群、成带分布。红岗阶地与第二期油气包裹体共生的盐水包裹体的均一温度峰值为 $100 \sim 120^\circ\text{C}$,乾安凹陷为 $90 \sim 100^\circ\text{C}$,华字井阶地为 $110 \sim 120^\circ\text{C}$ (图4)。

需要说明的是,两期油气充注是松辽盆地南部中浅层(白垩系泉三段—嫩江组)油气成藏的基本特征。扶新隆起泉四段^[22]、扶新隆起及中央坳陷区泉四段^[23]、海坨子地区和黑帝庙地区高台子油层^[24-26]、海坨子地区泉四段^[27-28]和黑帝庙地区青山口组与嫩江组^[29]均具有两期油气充注现象。上述事实表明,含片钠铝石砂岩记录的两期油气充注过程与松辽盆地南部中浅层(白垩系泉三段—嫩江组)油气成藏的基本特征是一致的。

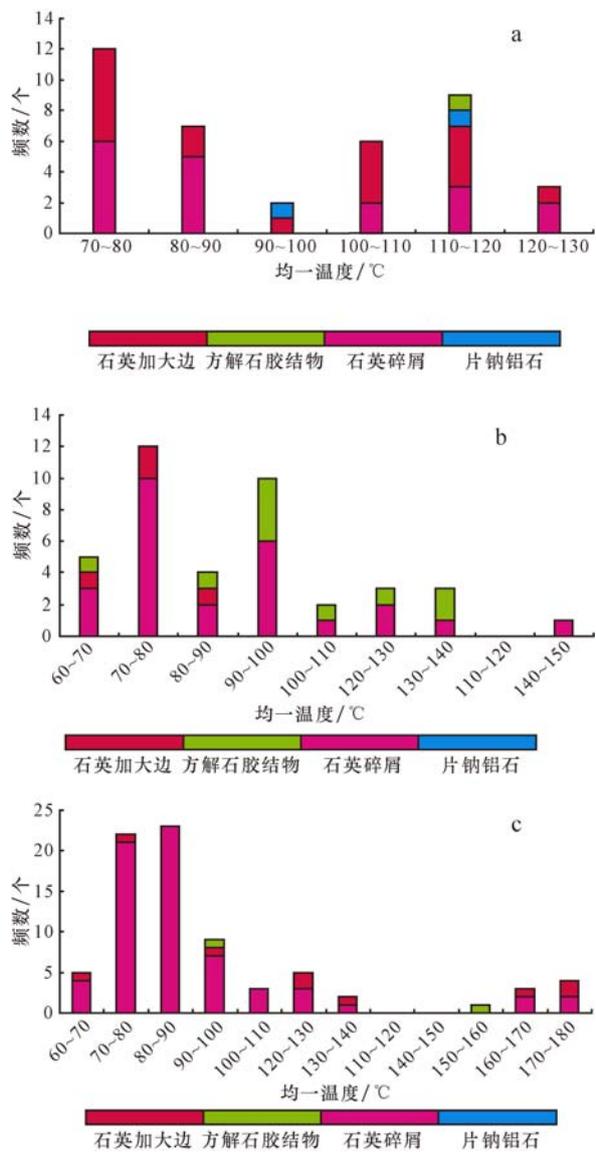


图4 松辽盆地南部含片钠铝石砂岩内与油气包裹体伴生的含烃盐水包裹体均一温度直方图

Fig. 4 Histograms of homogenization temperatures of saline-aqueous inclusions associated with the petroleum inclusions in the dawsonite-bearing sandstone in southern Songliao Basin

a. 红岗阶地; b. 长岭凹陷; c. 华字井阶地

3 CO₂ 包裹体特征

在含片钠铝石砂岩中,含CO₂包裹体主要赋存于碎屑石英裂隙,极少数发育于次生加大石英中。在室温下,其相态包括气相、气液两相气液三相和气液固三相。气相包裹体主要为CO₂,其次为CH₄。液相包裹体为CO₂,CO₃²⁻和H₂O。在含片钠铝石砂岩中的方解石、铁白云石和片钠铝石

中未检测到含 CO₂ 包裹体。

值得注意的是,杨光^[29]在松辽盆地南部黑地庙地区青山口组砂岩中检测到的 CO₂ 包裹体也主要分布在裂隙中,极少数分布于胶结物中。

4 讨论

含片钠铝石砂岩的成岩共生序列和流体包裹体研究表明,松辽盆地南部中浅层地层中曾发生了三期资源性流体充注过程。第一期以液烃充注为主,第二期以气液烃充注为主,第三期为幔源 CO₂ 的充注。其中,幔源 CO₂ 的充注略晚于第二期油气充注或与其大致同时,主要证据包括:①石英次生加大边的内侧发育第一期油气包裹体(以液烃包裹体为主),外侧发育第二期油气包裹体(以气烃包裹体为主),而示踪 CO₂ 充注的片钠铝石普遍充填于石英次生加大边结晶后剩余的孔隙空间,说明 CO₂ 的充注略晚于第二期油气充注;②片钠铝石中赋存第二期油气包裹体(气液包裹体),暗示在片钠铝石结晶时,孔隙流体以 CO₂ 及其溶解于地层水的组分为主,油气为辅;③在穿切碎屑石英及其次生加大边微裂隙中的包裹体内不但检测到气相 CO₂、液相 CO₂ 以及 CO₃²⁻,而且检测到 CH₄ 组分,说明 CO₂ 在运移过程中曾发生了对烃类的萃取作用,虽然不能排除萃取早期形成的烃类的可能性,但是萃取与其准同时充注的烃类的可能性更大;④穿切碎屑石英及其次生加大边的微裂隙既是 CO₂ 包裹体的主要赋存空间,也是第二期油气包裹体的赋存空间之一,难以确定二者充注的先后关系;⑤宏观裂缝中既见有晶簇状片钠铝石充填物,又见有含油现象,说明裂缝和微裂隙都形成于 CO₂ 和第二期油气充注之前。

研究表明^[30-31],松辽盆地南部构造裂缝的形成与反转期构造活动有关。陈均亮等人^[32]进行的三维构造物理模拟表明,松辽盆地不同方向的正向二级背斜构造带均为白垩纪末期(明水末期)同一挤压应力场作用的结果,张震等^[33]也证实,明水组末期为朝阳沟油田扶余油层裂缝的主要形成期。这就意味着第二期油气充注应晚于白垩纪末期。近年来根据传统方法开展的油气成藏时间研究表明,松辽盆地南部中浅层油气的成藏时间为嫩江期末、白垩纪末(明水末期)—古近纪^[26-27]。

邹才能等^[23]针对扶新隆起扶余油层开展的伊利石 K/Ar 定年和流体包裹体均一温度综合分析(结合埋藏史和热史)得出的两期油气注入时间依次为 85 ~ 65 Ma 和 50 ~ 25 Ma,前者相当于嫩江—明水期,后者主体为古近纪。尽管对于第一期油气注入时间是嫩江期—明水期^[23]还是嫩江期末^[26-27]尚有不同的理解或表述,但是,第二期油气充注发生于白垩纪末(明水期末)—古近纪却得到了普遍的认同。鉴于第二期油气充注与幔源 CO₂ 的充注准同时,因此,幔源 CO₂ 的充注也应该发生于白垩纪末(明水期末)—古近纪。事实上,古近纪是中国东部含油气盆地中幔源—岩浆 CO₂ 的主要成藏时期,例如,戴金星等^[21]的研究表明,中国东部无机成因 CO₂ 气藏的分布与古近纪至第四纪北西西向玄武岩活动带展布相一致,CO₂ 可能大部分与古近纪至第四纪玄武岩活动有关;王兴谋等^[34]基于岩浆岩分布、年代学及岩石学研究提出,沙三期(渐新世)是中国东部地区 CO₂ 的主要成藏期。

除了松辽盆地南部,幔源 CO₂ 晚于油气充注(第一期)的现象也见于珠江口盆地^[35]、苏北盆地^[36]和海拉尔盆地^[37]等。理论分析和实验研究均证实,CO₂ 极易溶解于原油,并且能够降低油水界面张力和原油粘度、引起原油体积膨胀、改善流度比。基于这一原理形成的注 CO₂ 提高采收率技术已广泛地应用于石油开采领域。类似的过程也应当发生于地质背景中,即,幔源 CO₂ 注入到早期形成的油气藏中引起已存在的原油发生再次运移。已报道具有这种可能性的盆地包括南海北部大陆架盆地^[35,38-39]、渤海湾盆地^[40-41]和苏北盆地^[42]以及海拉尔盆地^[37]。虽然松辽盆地南部尚未有类似的研究报道,但是一些工作者^[7,43-44]已开始研究无机与有机油气共生成藏组合类型及分布规律,强调查明 CO₂ 气的分布规律对于寻找次生油气藏的重要性。本文得出的幔源 CO₂ 晚于油气充注(第一期)的认识,说明幔源 CO₂ 充注对于松辽盆地南部油气成藏的影响不容忽视。

5 结论

1) 在含片钠铝石砂岩中,CO₂ 充注后形成的自生矿物组合由片钠铝石、铁白云石以及晚期方解石组成。片钠铝石的 δ¹³C 分布范围(-5.30‰ ~

3. 29‰)(PDB)与已证实与岩浆活动具有成因联系的澳大利亚 Bowen-Gunnedah-Sydney 盆地系的片钠铝石一致。片钠铝石主要形成于无机 CO₂ 背景,且与气藏中的 CO₂ 具有相同的碳来源,均为幔源-岩浆成因。

2) 含片钠铝石砂岩中的油气包裹体明显分为两期。第一期包裹体主要为液烃包裹体,少量为气液烃包裹体;包裹体赋存于早期石英次生加大边、早期方解石和切及(未切穿)石英次生加大边的裂隙中;与第一期油气包裹体共生的盐水包裹体的均一温度峰值为 70~90℃(红岗阶地)、70~80℃(乾安凹陷)和 70~100℃(华字井阶地)。第二期包裹体主要为气液烃包裹体,其次为液烃包裹体;包裹体赋存于晚期方解石、晚期石英次生加大边、片钠铝石和穿切碎屑石英及其次生加大边的微裂隙中以及碎屑长石中;与第二期油气包裹体共生的盐水包裹体的均一温度峰值为 100~120℃(红岗阶地)、90~100℃(乾安凹陷)和 110~120℃(华字井阶地)。

3) 在含片钠铝石砂岩中,含 CO₂ 包裹体主要赋存于碎屑石英裂隙,极少数发育于次生加大石英中。

4) 含片钠铝石砂岩的成岩共生序列和流体包裹体研究表明,松辽盆地南部中浅层地层中曾发生了 3 期流体充注过程,即,第一期以液烃充注为主,第二期以气液烃充注为主,第三期为幔源 CO₂ 的充注。其中,幔源 CO₂ 的充注略晚于第二期油气充注或与其大致同时。形成片钠铝石的幔源 CO₂ 的充注时间可能为白垩纪末(明水期末)-古近纪。

参 考 文 献

- [1] Gilfillan S M V, Ballentine C J, Holland G, et al. The noble gas geochemistry of natural CO₂ gas reservoirs from the Colorado Plateau and Rocky Mountain provinces, USA[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72: 1174-1198.
- [2] 胡安平,戴金星,杨春,等. 渤海湾盆地 CO₂ 气田(藏)地球化学特征及分布[J]. *石油勘探与开发*, 2009, 36(2): 181-189. Hu Anping, Dai Jinxing, Yang Chun, et al. Geochemical characteristics and distribution of CO₂ gas fields in Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(2): 181-189.
- [3] Watson M N, Zwingmann N, Lemon N M. The Ladbroke Grove-Katnook carbon dioxide Natural laboratory: A recent CO₂ accumulation in a lithic sandstone reservoir[J]. *Energy*, 2004, 29: 1457-1466.
- [4] 刘德良,李振生,孙岩,等. 松辽盆地北部火山岩 CO₂ 脱气参数及其对 CO₂ 资源量估算的意义[J]. *高校地质学报*, 2006, 12(2): 223-227.
- Liu Deliang, Li Zhensheng, Sun Yan, et al. Degassing parameter of carbon dioxide in volcanic rocks in the Northern Songliao Basin and its significance in forecasting geological resource of carbon dioxide[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2006, 12(2): 223-227.
- [5] 王颖,李锡瑞,曹跃,等. 松辽盆地南部长岭断陷二氧化碳成藏期次[J]. *中国石油勘探*, 2009, 4: 21-25. Wang Ying, Li Xirui, Cao Yue, et al. Study on CO₂ reservoir-forming periods in Changling Fault Depression of Southern Songliao Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2009, 4: 21-25.
- [6] 鲁雪松,宋岩,王兆宏,等. 松辽盆地二氧化碳成因及分布主控因素[J]. *天然气工业*, 2009, 29(3): 125-128, 148. Lu Xuesong, Song Yan, Wang Zaohong, et al. Origin and main control factors of CO₂ in the Songliao basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(3): 125-128, 148.
- [7] 唐振兴,刘国文,姜泽军,等. 松南构造认识及无机成因 CO₂ 分布规律研究[J]. *石油天然气学报(江汉石油学院学报)*, 2009, 31(1): 1-5. Tang Zhenxing, Liu Guowen, Jiang Zejun, et al. Structure and distribution rules of inorganic-origin carbon dioxide in Southern Songliao Basin[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2009, 31(1): 1-5.
- [8] 米敬奎,张水昌,陶士振,等. 松辽盆地南部长岭断陷 CO₂ 成因与成藏期研究[J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(4): 452-456. Mi Jingkui, Zhang Shuichang, Tao Shizhen, et al. Genesis and accumulation period of the CO₂ in Changling Fault Depression of Songliao Basin, Northeastern China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(4): 452-456.
- [9] Okuyama Y, Sasaki M, Nakanishi S, et al. Geochemical CO₂ trapping in open aquifer storage-the Tokyo Bay model[J]. *Energy*, *Procedia*, 2009, 1: 3253-3258.
- [10] Hellevang H, Aagaard P, Oelkers E, et al. Can dawsonite permanently trap CO₂? [J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, 39: 8281-8287.
- [11] 杜韞华. 一种次生的片钠铝石[J]. *地质科学*, 1982, 4: 434-437. Du Yunhua. Secondary dawsonite in Shengli Oil Field, China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 1982, 4: 434-437.
- [12] 徐衍斌,陈平,徐永成. 海拉尔盆地碳钠铝石分布与油气的关系[J]. *石油与天然气地质*, 1994, 15(4): 322-327. Xu Yanbin, Chen Ping, Xu Yongcheng. NaAlCO₃(OH)₂ Distribution and its relationship with Oil and Gas in Hailar Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 1994, 15(4): 322-327.
- [13] 黄善炳. 金湖凹陷阜宁组砂岩中片钠铝石特征及对物性影响[J]. *石油勘探与开发*, 1996, 23(2): 32-34. Huang Shanbing. The character of dawsonite in sandstone reservoirs of the Fu'ning Formation in Jinhu Sag and its influence on reservoir properties[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1994, 15(4): 322-327.
- [14] Moore J, Adams T M, Allis R, et al. Mineralogical and geo-

- chemical consequences of the long-term presence of CO₂ in natural reservoirs: An example from the Springerville-St. Johns Field, Arizona, and New Mexico, U. S. A [J]. *Chemical Geology*, 2005, 217: 365-385.
- [15] 高玉巧, 刘立, 杨会东, 等. 松辽盆地孤店二氧化碳气田片钠铝石的特征及成因[J]. *石油学报*, 2007, 28(4): 62-67
Gao Yuqiao, Liu Li, Yang Huidong, et al. Characteristics and origin of dawsonite in Gudian carbon dioxide gas field of Songliao Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(4): 62-67.
- [16] 李福来, 刘立, 杨会东, 等. 松辽盆地南部乾安油田青山口组含片钠铝石砂岩的成岩作用[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2009, 39(2): 217-224.
Li Fulai, Liu Li, Yang Huidong, et al. Lithification of dawsonite-bearing sandstone in the Qingshankou Formation in the Qi' an oil field of the South Songliao Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2009, 39(2): 217-224.
- [17] 董林森, 刘立, 曲希玉, 等. 松辽盆地南部红岗油田青山口组片钠铝石的结晶特征及成因探讨[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2009, 39(6): 1031-1041.
Dong Linsen, Liu Li, Qu Xiyu, et al. Crystal characteristics and genesis of dawsonite of the Qingshankou Formation in the Honggang Oilfield in the Southern Songliao Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2009, 39(6): 1031-1041.
- [18] Baker J C, Bai G P, Hamilton P J, et al. Continental-scale magmatic carbon dioxide seepage recorded by dawsonite in the Bowen-Gunnedah-Sydney basin system, Eastern Australia [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1995, A65: 522-530.
- [19] Golab A N, Carr P F, Palamara D R. Influence of localized igneous activity on cleat dawsonite formation in Late Permian coal measures, Upper Hunter Valley, Australia [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2006, 66: 296-304.
- [20] Ohmoto H, Rye R O. Isotopes of sulphur and carbon, in Barnes H L. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* [M]. New York: Wiley, 1979, 509-567.
- [21] 戴金星, 胡国, 倪云燕, 等. 中国东部天然气分布特征[J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(4): 471-487.
Dai Jinxing, Hu Guoyi, Ni Yunyan, et al. Distribution characteristics of natural gas in Eastern China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(4): 471-487.
- [22] 陶士振, 邹才能, 袁选俊. 流体包裹体在油气勘探中的应用—以吉林油田扶新隆起扶余油层为例[J]. *中国石油勘探*, 2006, 4: 46-51.
Tao Shizhen, Zou Caineng, Yuan Xuanjun. Application of fluid inclusion in oil-gas exploration [J]. *China Petroleum Exploration*, 2006, 4: 46-51.
- [23] 邹才能, 陶士振, 张有瑜. 松辽南部岩性层油气藏成藏年代研究及其勘探意义[J]. *科学通报*, 2007, 52(19): 2319-2329.
Tao Shizhen, Zou shizhen, Zhang youyu. Study on geochronological and its Exploration Significance for the Lithologic Stratigraphic in Southern part of Songliao [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(19): 2319-2329.
- [24] 魏志平, 毛超林, 孙岩, 等. 松辽盆地南部大情字井地区油气成藏过程分析[J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(3): 11-16.
Wei Zhiping, Mao Chaolin, Sun Yan, et al. Oil and gas accumulation process in Daqingzi region of southern Songliao basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(3): 11-16.
- [25] 赵占银, 李洪革, 王兴光, 等. 松辽盆地南部中浅层成藏机制研究[J]. *石油勘探与开发*, 2004, 31(6): 17-19.
Zhao Zhanyin, Li Hongge, Wang Xingguang, et al. Pool formation mechanism of medium shallow layer in south Songliao Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(6): 17-19.
- [26] 唐振兴, 苗洪波, 李爱民, 等. 松辽盆地南部嫩江组—泉四段油气运移特征[J]. *大庆石油地质与开发*, 2007, 26(6): 40-46.
Tang Zhenxing, Miao Hongbo, Li Aiming, et al. Hydrocarbon migration characteristics of Nenjiang Formation - Member 4 of Quantou Formation in southern Songliao basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2007, 26(6): 40-46.
- [27] 刘宝柱, 孙万军, 陈少军, 等. 松辽盆地南部中浅层油气藏的成藏史[J]. *现代地质*, 2003, 17(1): 87-91.
Liu Baozhu, Sun Wanjun, Cheng Shaojun, et al. The history of petroleum accumulation in the south of the songliao basin [J]. *Geoscience*, 2003, 17(1): 87-91.
- [28] 黄志龙, 高岗. 松辽盆地南部海坨子地区油气成藏研究[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 2003, 27(1): 4-7.
Huang Zhilong, Gao Gang. Study on hydrocarbon accumulation in Haituozi Region in Southern Songliao Basin [J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 2003, 27(1): 4-7.
- [29] 杨光. 松辽盆地南部油气成藏期研究—以黑帝庙地区为例[J]. *世界地质*, 2008, 27(1): 53-58.
Yang Guang. Research on oil-gas reservoir formation period in southern Songliao Basin: taking Heidimiao area as an example [J]. *Global Geology*, 2003, 27(1): 4-7.
- [30] 刘子良, 梁春秀. 松辽盆地南部构造裂缝成因机制及分布方向[J]. *石油勘探与开发*, 1999, 26(5): 83-85.
Liu Ziliang, Liang Chunxiu. Study on the genetic and its distribution direction of structural fracture in southern Songliao basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1999, 26(5): 83-85.
- [31] 张莉, 岳乐平, 杨亚娟, 等. 反转构造盆地裂缝特征—以松辽盆地大庆三肇地区为例[J]. *石油与天然气地质*, 2002, 23(4): 361-363, 376.
Zhang Li, Yue Leping, Yang Yajuan, et al. Fracture features of reversed basin: taking Sanzhao Area of Songliao Basin for example [J]. *Oil & Gas Geology*, 2002, 23(4): 361-363, 376.
- [32] 陈均亮, 李忠权, 应丹琳, 等. 松辽盆地北部白垩纪末反转变形的三维构造物理模拟[J]. *地质科学*, 2009, 44(1): 63-73.
Chen Junliang, Li Zhongquan, Ying Danlin, et al. 3D tectonophysical modelling of the inversion structures in the Latest Cretaceous in the Northern Songliao Basin [J]. *Geological Science*

- ences, 2009, 44 (1): 63 - 73.
- [33] 张震, 鲍志东. 松辽盆地朝阳沟油田储层裂缝发育特征及控制因素[J]. 地学前缘, 2009, 16(4): 166 - 172.
Zhang Zhen, Bao Zhidong. Development characteristics and controlling factors of reservoir fractures in Chaoyangou Oil-field, Songliao Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16 (4): 166 - 172.
- [34] 王兴谋, 夏斌, 陈根文, 等. 中国东部地区新生代岩浆活动对区域性 CO₂ 形成时间的制约[J]. 大地构造与成矿学, 2004, 28(3): 338 - 344.
Wang Xinmou, Xia Bin, Chen Genwen, et al. Constraints on formation time of CO₂ from Cenozoic magmatism in Eastern China [J]. Geotectonica Et Metallogenia, 2004, 28(3): 338 - 344.
- [35] 向风典. 珠江口盆地东部的气藏及其对油气聚集的影响[J]. 中国海上油气(地质), 1994, 8(3): 155 - 162
Xiang Fengdian. The carbon dioxide gas reservoir of oil of the Pearl river Estuary Basin (east) and the effect to gas accumulation [J]. China Offshore Oil and Gas (geology), 1994, 8(3): 155 - 162.
- [36] 王杰, 刘文汇, 秦建中, 等. 苏北盆地黄桥 CO₂ 气田成因特征及成藏机制[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(6): 826 - 834.
Wang Jie, Liu Wenhui, Qin Jianzhong, et al. Reservoir forming mechanism and origin characteristics in Huangqiao carbon dioxide gas field, North Jiangsu Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(6): 826 - 834.
- [37] 刘立, 高玉巧, 曲希玉, 等. 海拉尔盆地乌尔逊凹陷无机 CO₂ 气储层的岩石学与碳氧同位素特征[J]. 岩石学报, 2006, 22(8): 1861 - 1868.
Liu Li, Gao Yuqiao, Qu Xiyu, et al. Petrology and carbon-oxygen isotope of inorganic CO₂ gas reservoir in Wuersun depression, Hailaer basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(8): 1861 - 1868.
- [38] 何家雄, 刘全稳. 南海北部大陆架边缘盆地 CO₂ 成因和运聚规律的分析与预测[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(1): 12 - 19.
He Jiaxiong, Liu Quanwen. The analysis and discussion of the characters on generative cause, migration and distribution of CO₂ in YingQiong Basins, North of the South China Sea [J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15(1): 12 - 19.
- [39] 王振峰, 何家雄, 张树林, 等. 南海北部边缘盆地 CO₂ 成因及充注驱油的石油地质意义[J]. 石油学报, 2004, 25(5): 48 - 53.
Wang Zhenfeng, He Jiaxiong, Zhang Shulin, et al. Genesis of carbon dioxide and geological significance for carbon dioxide infilling and oil displacement in the northern marginal basin of South China Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(5): 48 - 53.
- [40] 高锡兴. 黄骅坳陷二氧化碳气与油气藏分布关系[J]. 石油实验地质, 1985, 7(3): 227 - 231.
Gao Xixing. The distributional relationship between CO₂ gas and oil-gas pools in Huanghua Depression [J]. Petroleum Geology and Experiment, 1985, 7(3): 227 - 231.
- [41] 杜灵通, 王利. 济阳坳陷无机成因 CO₂ 气藏成藏条件[J]. 天然气工业, 2007, 27(10): 6 - 8.
Du Lingtong, Wang Li. Conditions of abiogenic CO₂ gas reservoiring in Jiyang Depression [J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(10): 6 - 8.
- [42] 殷红. 下扬子区黄桥 CO₂ 气田流体特征分析[J]. 内蒙古石油化工, 2005, (5): 135 - 136.
Yin Hong. The analysis of Huangqiao CO₂ reservoir in Lower Yangze Area [J]. Inner Mongolian Petrochemical Industry, 2005, (5): 135 - 136.
- [43] 杨会东, 刘立, 姚萍, 等. 松南无机成因天然气成藏输导体系识别[J]. 大庆石油地质与开发, 2008, 27(3): 18 - 21.
Yang Huidong, Liu Li, Yao Ping, et al. Conducting system identification for inorganic gas reservoir formation in southern Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2008, 27(3): 18 - 21.
- [44] 周荔青, 雷一心, 王红燕. 松辽盆地长岭断陷无机与有机油气共生组合类型及分布规律[J]. 石油实验地质, 2009, 31(4): 324 - 328.
Zhou Liqing, Lei Yixin, Wang Hongyan. Play types and distribution features of coexistence of organic and abiogenic hydrocarbon in the Changling faulted depression of Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2009, 31(4): 324 - 328.

(编辑 董立)

(上接第 872 页)

- Wang Hanyun, Yang Tianyu. Gas oil pyrolysis simulation experiment [J]. Natural Gas Industry, 1982, (3): 28 - 33.
- [19] 王铜山, 耿安松, 孙永革, 等. 川东北飞仙关组储层固体沥青地球化学特征及其气源指示意义[J]. 沉积学报, 2008, 26(2): 340 - 345.
Wang Tongshan, Geng Ansong, Sun Yongge, et al. Geochemical characteristics of solid bitumen in reservoir and their implication for the origin of natural gas of Feixianguan Formation in Northeastern Sichuan Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(2): 340 - 345.
- [20] 马永生, 蔡勋育, 郭彤楼. 四川盆地普光大型气田油气充注与富集成藏的主控因素[J]. 科学通报, 2007, 52(增刊1): 149 - 155.
Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Guo Tonglou. Puguang large gas field in Sichuan Basin and rich integrated oil and gas charging possession of the controlling factors [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(S1): 149 - 155.

(编辑 董立)