

黄骅坳陷港西断裂带流体包裹体的地球化学特征^{*}

丁巍伟^{1,2} 戴金星³ 初凤友^{1,2} 韩喜球^{1,2}

DING WeiWei^{1,2}, DAI JinXing³, CHU FengYou^{1,2} and HAN XiQiu^{1,2}

1. 国家海洋局海底科学重点实验室, 杭州 310012

2. 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012

3. 中国石油勘探开发科学研究院, 北京 100083

1. Key Laboratory of Submarine Geoscience of the State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China

2. Department of Earth Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

3. China Institute of Marine Affairs, State Oceanic Administration, Beijing 100086, China

2007-01-16 收稿, 2007-04-30 改回.

Ding WW, Dai JX, Chu FY and Han XQ. 2007. Geochemical characteristics of the fluid inclusions in the Gangxi fault belt, Huanghua depression, Bohai bay basin, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9):2287–2295

Abstract We studied the geochemical characteristics of the fluid inclusions in the Ordovician carbonates and the Eocene Shahejie Formation sandstones from 15 wells in the Gangxi Fault Belt, Huanghua Depression. The fluid inclusions are all secondary with gas/liquid ratio of 5% ~ 10%. Base on Raman they are mainly composed of H₂O, CO₂ and CH₄. The homogenization temperatures, combined with burial and geothermal history of the host rock, indicate that the fluid flows in the Shahejie Formation and the Ordovician carbonates were trapped in Neocene. Using a VG5400 mass spectrometer, the helium isotopic compositions were analyzed. Interpretation of results suggested a significant amount of mantle-derived helium mainly accumulating in the intersections of the NWW trending Xuzhuangzi and NE trending Gangxi faults. The maturity of hydrocarbon decreases from the intersection to the outside pointed out that the fluid related to the NWW trending Xuzhuangzi and NE trending Gangxi faults. These factors implied the fluid inclusions have a close relationship to the local tectonic setting. Gangxi Fault Belt experienced intensive Neo-tectonic activities in Cenozoic. Widespread faulted-depressions and strong volcanic eruptions manifested its tectonic status of extensional stress field. Mantle uplift caused the movement of magma that carried mantle-derived gases and deep heat flows, the deep-rooted tension faults provided the passages for the gases and heat flows to shallow crust levels.

Key words Gangxi Fault Belt, Fluid inclusion, Composition, Mantle-derived, Maturity, Local tectonic setting

摘 要 通过对黄骅坳陷港西断裂带奥陶系灰岩和新近系沙河街组砂岩中 11 个钻井的岩心包裹体的特征,均一温度和组分等方面的分析,对其所反映的气体来源,形成环境,油气演化以及地质意义进行研究。研究区的包裹体均为次生成因包裹体,气液比在 5% ~ 10% 之间,根据激光拉曼光谱技术分析组分主要为 H₂O, CO₂ 和 CH₄。利用均一温度,结合古地温和埋藏史,发现奥陶系灰岩和新近系沙河街组砂岩中包裹体中流体均捕获于新近纪。对氦同位素的分析发现包裹体中均有幔源氦的侵入,侵入的份额受到 NE 向港西断层和 NWW 向徐庄子断层的控制靠近断裂带的灰岩和砂岩中的包裹体含有还原性气体,由断层交汇中心向四周减少。包裹体中烷烃气的成熟度也与断层活动相关,具有从断层交汇中心向四周减小的相似特征。研究区内港西断层和徐庄子断层交汇处不仅是幔源气体上涌的有利通道,也是地热活动强烈的地区,有利于烷烃气的成熟。

关键词 港西断裂带; 流体包裹体; 组分; 幔源; 成熟度

中图法分类号 P618.130.1

* 本文为国家重点基础研究发展规划(973 计划)(2007CB411704),中国边缘海重点实验室基金(MSGL0609),国家海洋局青年科学基金(2007313)资助成果。

第一作者简介: 丁巍伟,男,1977 年生,博士,副研究员,主要从事构造地质学和天然气地球化学方面研究, E-mail: wwdingsio@yahoo.com.cn

1 引言

岩石成岩后由于构造、热液等活动的影响,往往在岩石的裂隙里发育一些次生包裹体。这些包裹体可以视为一个与外界没有物质交换的封闭体系,保留了在被捕获时的原始组分(Kelly *et al.*, 2000; 范建国等, 2000; Yang *et al.*, 2001),对于流体包裹体的研究可以获得关于流体的原始组分(Pang *et al.*, 1998; Aplin *et al.*, 1999; Moore *et al.*, 2001),充注历史和被捕获时古温压状况(England *et al.*, 1987; Thiéry *et al.*, 2002)等方面的原始地球化学信息。近年来关于包裹体的研究的研究经被广泛应用于天然气藏的成因及气源研究(戴金星等, 1995; Dallai *et al.*, 2005),沉积盆地油气储层的沉积成岩演化和充注历史的研究(Thiéry *et al.*, 2002; Feely *et al.*, 2003; 肖贤明等, 2002; 高玉巧等, 2006),壳幔流体活动(Stuart *et al.*, 1995; Wolfgang *et al.*, 1999; Hoke *et al.*, 2000; Doğan *et al.*, 2006),矿产资源(Burnard *et al.*, 1999; Hu *et al.*, 2004; Kendrick *et al.*, 2001),构造活动(Oxburgh *et al.*, 1987; Tao *et al.*, 1997; Graupner *et al.*, 2006),地热研究(Polyak *et al.*, 1985; Muramatsu *et al.*, 2006)等方面。

渤海湾盆地黄骅凹陷地区,关于流体包裹体已经进行了大量的研究,并在包裹体组分来源(刘立等, 2004),组分特征与油气运聚特征关系(邹海峰和徐学纯, 2001),成藏流体历史分析(钟宁宁等, 2002),成藏期次综合研究(高玉巧等, 2003)等方面取得了巨大的进展。本文作者在前人工作基础上,选用了渤海湾盆地黄骅凹陷港西断裂带地区奥陶系灰岩和第三系砂岩包裹体样本,通过包裹体特征,均一温度,组分特征等方面的分析,对其反映的气体来源、形成环境、油气演化以及地质意义进行探讨。

2 地质背景和样品选取

黄骅凹陷位于渤海湾盆地区的中部,总体呈 NNE 向展布,东西两侧为埕宁隆起和沧县隆起所挟持,北端和燕山褶皱带相接,东部邻近著名的郯庐断裂带,是新生代发展起来的裂陷型凹陷,经历了强烈的岩浆和断裂活动。而港西断裂带地区是黄骅凹陷构造活动最活跃的地区之一,包括了 NE 向展布的港西断层和 NW 向展布的徐庄子断层。港西断层从印支期开始发育,燕山期活动强烈,并在断层两侧有玄武岩发育(大港油田石油地质志编辑委员会, 1991),新生代以来以伸展活动为主,在古近纪依然有活动(漆家福等, 1995)。徐庄子断层主要为前第三纪发育的断层,切割深度大,长期活动,古近纪以来走滑运动为主。该断层虽然伸展性较差,但往深部的贯通性较好(丁巍伟等, 2004)。港西断裂带地区不仅发现了高产的有机成因油气田,同时也发现了无机成因的翟庄子 CO₂ 气藏,其中港 151 井 CO₂ 浓度高达 98.61%

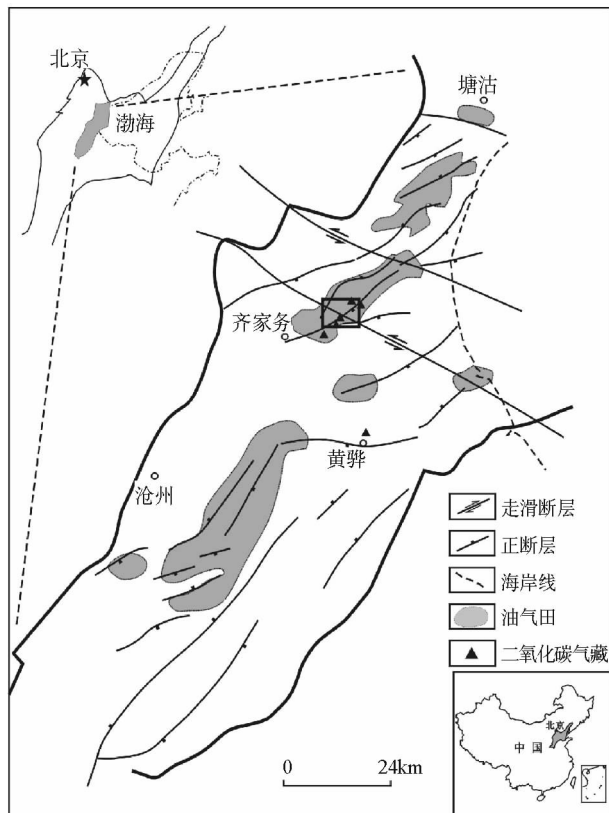


图1 黄骅凹陷构造简图及油气田、CO₂ 气藏位置图(方框内为研究区位置)

Fig.1 Geological sketch map of the Huanghua Depression and the distribution of the oil&gas fields and CO₂ gas pools.

The pane shows the studied area.

(戴金星等, 1995)。作者在此地区采集了 11 个钻井中的 30 个岩心包裹体样品进行详细研究,采样点的深度,岩性和层位见表 1,采样点位置见图 1。

3 分析方法

在西安地质矿产研究所实验测试中心应用激光拉曼光谱分析技术对包裹体进行气、液成分分析。本次实验仪器为法国 Jobin-Yvon 仪器公司的 RAMANOR-U1000 型激光拉曼探针。实验条件: 采用 Ar + 激光器,波长 514.5nm,激光功率 300mW,双单色器狭缝 450μm,色散率 9.2cm⁻¹/mm,光电倍增管高压 1530V,样品室温度 23℃,湿度 65%。具有代表性的激光拉曼光谱图如图所示,波峰位置是做定性分析的寄出,依峰高做定量分析。

包裹体特征的观测和均一温度的测定采用 Linkham 公司生成的 THMS-G600 显微冷热台(温控精度为 ±0.1℃),升温速率控制在 4℃~5℃/min。

在中国科学院兰州地球化学研究所气体地球化学国家重点实验室用真空电磁破碎法提取了样品包裹体中的流体,

并在 VG5400 质谱仪上在线测定了包裹体中的氦同位素,氦同位素的测定以兰州的空气为工作标准。氦同位素的测定以兰州的空气为工作标准,检测时利用真空电磁破碎装置抽真空使得系统的真空率小于 10^{-2} Pa, 并加热至 400℃ 将样品破碎至 20 目, 除去吸附气, 包裹体中释放的气体经 -80℃ 冷阱除去水蒸气直接导入 VG5400 质谱仪中检测(孙明良等,1998)。

4 结果与讨论

4.1 包裹体类型及特征

奥陶系灰岩中包裹体分布于亮晶方解石解理缝和沿裂隙充填的方解石脉中,为次生成因(图 2)。颜色从淡黄色到深褐色,包裹体全部为气液相,气液比在 5% 左右,少量达到 10%。包裹体基本为独立的单个体,呈球形,椭球形,在不同的取样井之间包裹体大小有所差异,大的多以 $3 \times 4, 3 \times 5 \mu\text{m}^2$ 为主,小的在 $2 \times 3 \mu\text{m}^2$ 左右(表 1)。

第三系沙河街组砂岩中的包裹体主要分布于石英裂隙中,电镜观察绝大部分呈串珠状定向分布,次生成因(图 2)。在 S10 井中观测到有石英加大边,偶尔见加大边中有包体存

在。包裹体全部为气液相,气液比在 5% ~ 10% 之间,呈淡黄色。大小在 $2 \times 3, 2 \times 4 \mu\text{m}^2$ 左右(表 1)。

4.2 均一温度

共测试了 52 个盐水包裹体的均一温度。其中奥陶系灰岩包裹体 26 个, Es₁ 砂岩包裹体 6 个, Es₂ 4 个, Es₃ 16 个(表 1)。奥陶系灰岩包裹体中均一温度在 145.6℃ ~ 178.5℃ 之间,峰值出现在 160℃ ~ 170℃ 之间。Es₃ 包裹体中均一温度在 142.3 ~ 173.2℃ 之间,各个井之间略微有些差异,其中 F29 井均一温度平均值为 157.4℃, T16 井为 148.3℃, Q85 井为 168.1℃。Es₂ 包裹体中均一温度在 126.2℃ ~ 144.5℃ 之间,平均为 136.1℃, Es₁ 包裹体中均一温度在 102.3℃ ~ 140.2℃ 之间,平均为 123.9℃。

4.3 组分

包裹体中气相组分摩尔百分含量如表 2 所示。组分中主要为 H₂O, 含量在 42.47% ~ 82.93mol% 之间,剩余的组分主要为 CO₂ 和 CH₄。激光拉曼光谱分析显示 CO₂ 含量在 1.25% ~ 34mol% 之间(F29 井未检测到 CO₂ 组分), CH₄ 含

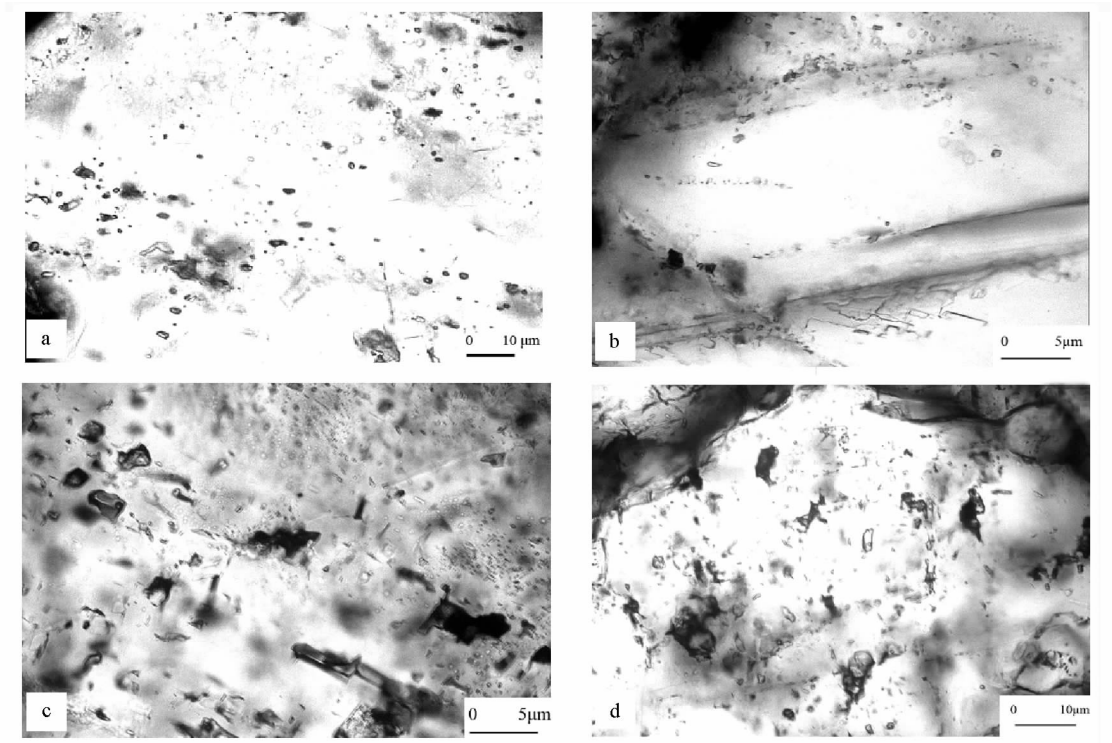


图 2 典型包裹体电镜照片
a-房 29 井,石英裂隙中串珠状分布的包裹体; b-太 12 井,亮晶方解石解理缝中的包裹体; c-太 13 井,交叉亮晶方解石脉中的包裹体; d-太 15 井,方解石晶体中的包裹体。
Fig.2 Elecform microscopic pholos of typical inclusions. (a): Well F29. The inclusions distributed clusters along microfractures of quartz; (b): Well T12. The inclusions occur in the cleavage crack of the sparry calcite; (c): Well T13. The inclusions occur in the crossing calcite vein of the sparry calcite; (d): Well T15. The inclusion occur in the calcite

表1 黄骅坳陷港西断裂带包裹体特征

Table 1 Characteristics of the fluid inclusions in Gangxi Fault Belt, Huanghua Depression

井号	层位	深度(m)	岩性	包裹体数	包裹体特征							
					宿主矿物	产状	大小(μm)	气液比(%)	颜色	相态	成因	均一温度(℃)*
房4	O	2214.09	灰岩	6	方解石	裂隙	2~8	5~10	淡黄色,淡褐色	有机气+盐水	次生	(145.6~178.5)/162.2
太9	O	2996.27	灰岩	4	亮晶方解石	解理	2~8	5~10	黄色,淡褐色	有机气+盐水	次生	(160.5~176.3)/168.9
太12	O	1980.00	灰岩	5	亮晶方解石	解理	2~5	5~10	淡黄色	有机气+盐水	次生	(165.8~178.5)/170.5
太13	O	2065.00	灰岩	4	方解石	裂隙	2~4	2~5	淡黄色,淡褐色	有机气+盐水	次生	(158.2~172.3)/165.4
太14	O	3043.00	灰岩	5	方解石	裂隙	2~5	2~5	淡褐色,褐色	有机气+盐水	次生	(147.3~168.3)/155.8
太15	O	2618.98	灰岩	2	方解石	裂隙	2~8	10	淡褐色,深褐色	有机气+盐水	次生	(160.3~166.4)/163.4
房14	Es ₁	3084.23	砂岩	6	石英	裂隙	2~4	2~5	淡黄色	有机气+盐水	次生	(110.5~140.2)/123.9
沈10	Es ₂	2343.46	砂岩	4	石英	裂隙	2~5	5~10	淡褐色,褐色	有机气+盐水	次生	(126.2~144.5)/135.9
太16	Es ₃	3442.57	砂岩	6	石英	裂隙	2~5	5~10	淡黄色,淡褐色	有机气+盐水	次生	(142.3~155.6)/148.3
歧85	Es ₃	3024.45	砂岩	4	石英	裂隙	2~5	2~5	淡黄色,黄色	有机气+盐水	次生	(158.7~173.2)/168.1
房29	Es ₃	3014.29	砂岩	6	石英	裂隙	2~4	5~10	淡黄色	有机气+盐水	次生	(147.8~162.5)/157.4

* 均一温度的分子项为变化区间,分母项为平均值

表2 港西断裂带包裹体组分特征

Table 2 Compositions of the fluid inclusions in Gangxi Fault Belt, Huanghua Depression

井号	层位	深度(m)	岩性	组分(mol%)															烷烃质量
				CO ₂	H ₂ S	SO ₂	H ₂ O	CO	N ₂	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₆	C ₆ h ₆	分数比
房4	O	2214.09	灰岩	3.73	4.00	4.00	77.14	0.00	0.00	0.00	4.66	0.00	0.00	5.69	0.00	0.52	0.00	4.28	0.72
太9	O	2996.27	灰岩	18.66	0.44	0.00	66.22	2.16	0.00	0.00	0.47	0.00	0.00	5.80	4.00	2.27	0.00	0.00	0.68
太12	O	1980.00	灰岩	35.49	0.32	4.18	42.47	2.54	0.00	0.14	8.35	0.00	0.17	0.00	0.00	6.46	0.00	0.00	0.99
太13	O	2065.00	灰岩	1.25	0.32	0.00	82.93	1.50	0.44	0.00	9.54	3.80	0.00	0.00	0.17	0.00	1.40	0.00	0.64
太14	O	3043.00	灰岩	10.29	0.28	0.00	76.86	2.61	0.49	0.00	6.58	1.52	0.00	1.33	0.00	0.00	1.10	0.00	0.75
太15	O	2618.98	灰岩	34.68	0.00	0.00	49.78	0.00	0.00	0.30	8.57	0.00	0.00	2.21	4.16	0.00	0.00	0.32	0.71
房14	Es ₁	3084.23	砂岩	29.05	0.68	4.85	50.54	0.00	0.00	0.00	4.27	0.55	0.00	1.03	6.00	3.05	0.00	0.00	0.56
沈10	Es ₂	2343.46	砂岩	22.80	0.00	0.00	62.61	0.00	0.00	0.00	4.23	3.76	0.00	0.00	1.62	0.00	0.00	0.00	0.44
太16	Es ₃	3442.57	砂岩	27.50	0.00	0.19	61.47	1.38	0.00	0.00	0.34	0.15	0.00	5.63	0.00	0.00	2.30	3.14	0.52
歧85	Es ₃	3024.45	砂岩	2.89	0.00	0.97	56.43	0.00	0.00	0.00	9.12	0.29	20.62	4.85	0.00	0.00	0.00	4.85	0.35
房29	Es ₃	3014.29	砂岩	0.00	15.11	0.00	71.51	0.00	0.00	0.52	4.18	0.00	0.00	0.00	1.33	4.37	0.00	2.99	0.66

量为0.47%~9.54mol%。除CH₄外,绝大部分样品还具有其他的烷烃气组分,包括C₂H₂到C₆H₆;C₂H₂的组分在0.15%~3.80mol%之间;C₂H₄存在T12和Q85井中,含量分别为0.17mol%和20.62mol%;C₃H₆含量在0.17%~6.00mol%之间;C₃H₈含量在0.52%~6.46mol%之间;C₄H₆含量在1.10%~2.30mol%之间;C₆H₆含量在0.32%~4.85mol%之间。

包裹体气相组分中还包括了H₂S、SO₂、CO、H₂、N₂等组分,含量通常都小于1mol%,除了F4井的4.00mol%和F29井的15.11mol%的H₂S,以及F29井中含量在1.38%~2.61mol%之间的CO。还原性气体(如CO与H₂S)的含量与

氧化性气体(如SO₂)呈反比关系,比如在F29井中H₂S的含量高达15.11mol%,而SO₂未检测到。在F14井中情况恰恰相反,H₂S的含量为0.68mol%,而SO₂达到了4.85mol%。这说明如果包裹体中的流体形成与还原性环境,那么还原性气体如CO、H₂S会占主导地位,反之相反。表2显示奥陶系灰岩中的包裹体中普遍含有CO、H₂、H₂S等还原性气体,说明流体普遍形成于一个还原环境。而古近系沙河街组中不同取样井不完全相同:如T16井、F14井和F29井含有CO、H₂、H₂S等,处于还原性环境,而Q85、S10等不含还原性气体,处于氧化环境。

液相组分以H₂O(44.7%~86.2%)和CO₂(9.5%~

32.4%)为主,除了液态的碳氢化合物外,还含油少量的络阴离子团HS⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、CO₃²⁻、HCO₃⁻等,表明液相流体为盐水溶液。

4.4 有幔源气侵入

氦作为天然气中的稀有元素之一,具有化学性质稳定,扩散性和渗透性强的特点,氦同位素的组成特征可以作为判别伴生组分气成因的辅助指标。氦元素在自然界中有两种稳定的同位素,其中³He主要是地球形成时来自于宇宙星云,性质稳定(王先彬,1989)。而⁴He主要来自于地壳中的U,Th等元素的放射性蜕变。由于地壳氦(³He/⁴He=0.01~0.05R_a,R_a为大气³He/⁴He值)和地幔氦(³He/⁴He=6~9R_a)的³He/⁴He存在高达近1000倍的差异(Stuart *et al.*, 1995; Burnard *et al.*, 1999),即使地壳流体中有少量幔源氦的加入,用氦同位素也易于判别,因此在氦同位素的研究中主要是通过样品的³He/⁴He(R)和大气的³He/⁴He(R_a)比值,即R/R_a,来表征氦的来源:如果R/R_a>1,通常认为有幔源氦的加入;而如果R/R_a<1,则表明氦是以壳源成为为主的(仍可能有少量比例的幔源氦的加入)(Allègre *et al.*, 1995)。

从表3可以看出,港西断裂带奥陶系灰岩包裹体的³He/⁴He数值在1.7×10⁻⁶~3.44×10⁻⁶之间,远大于壳源氦的表征值2.0×10⁻⁸。空气中R_a值取国际公认值(1.40±0.03)×10⁻⁶,计算所得R/R_a值在1.21~2.45之间,平均为1.83。如果R/R_a>1,通常认为有幔源氦的加入。所以港西断层奥陶系灰岩包裹体中普遍具有幔源氦的贡献。可以

表3 港西断裂带包裹体氦同位素特征

Table 3 Helium isotopic characteristics of the fluid inclusions in Gangxi Fault Belt

井号	层位	深度 (m)	岩性	³ He/ ⁴ He (×10 ⁻⁶)	R/R _a	幔源氦 侵入份 额(%)
F14	Es ₁	3084.23	砂岩	1.84±0.08	1.32	15.85
F29	Es ₁	3014.29	砂岩	9.54±0.37	0.68	0.68
S10	Es ₂	2343.46	砂岩	3.13±0.25	0.22	2.55
F15-1	Es ₃	3128.65	砂岩	8.25±0.44	0.59	7.01
T16	Es ₃	3442.57	砂岩	1.11±0.06	0.79	9.49
Q85	Es ₃	3024.45	砂岩	4.31±0.88	0.31	3.58
F6	Es ₃	2467.00	灰岩	2.70±0.08	1.93	23.34
F7	Mz	2314.00	灰岩	2.44±0.09	1.74	21.08
T11	e	2868.00	灰岩	1.51±0.05	1.08	12.98
F4	O	2214.09	灰岩	2.09±0.06	1.49	18.03
T9	O	2996.27	灰岩	2.94±0.08	2.1	25.44
T12	O	1980.00	灰岩	3.19±0.08	2.28	27.61
T13	O	2065.00	灰岩	1.70±0.05	1.21	14.63
T14	O	3043.00	灰岩	2.08±0.07	1.48	17.94
T15	O	2618.98	灰岩	3.44±0.09	2.45	29.74

用壳-幔二元复合模式(1)计算幔源氦加入的份额(Burnard *et al.*, 1999):

幔源氦(%) = $\frac{(^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{样品}} - (^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{壳}}}{(^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{幔}} - (^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{壳}}} \times 100$ (1)

幔壳端元值分别取1.15×10⁻⁵和2×10⁻⁸,可以求得港西断裂带奥陶系灰岩包裹体中最大的幔源氦混入份额为T15井的29.74%,最低的T13井也有14.63%的幔源氦的混入(表3)。

新近系沙河街组砂岩和粒屑灰岩包裹体中³He/⁴He数值在3.13×10⁻⁷~2.70×10⁻⁶之间,也远大于壳源的表征值,说明有幔源氦的贡献,根据(1)式计算所得最大的幔源氦混入份额为T6井的23.34%,最小为S10井的2.55%(表3)。

作者同时选取了寒武系灰岩和中生代灰岩样品各一个作为参考,同样发现幔源氦混入的特征。其中取自寒武系灰岩的T11井和取自中生代灰岩的F7井的样品中幔源氦的侵入份额分别为12.98%和21.08%。

5 讨论

5.1 流体包裹体捕获时间为新近纪

近年来利用包裹体均一温度来确定包裹体流体充注历史得到了广泛的应用。成岩成藏过程中形成的流体包裹体是当时地温条件下的产物,因此包裹体的均一温度可以代表当时的古地温(Maurice *et al.*, 1997)。根据盐水包裹体均一温度,结合盆地古地温史、沉积史可以确定盐水包裹体形成时间(Karlsen *et al.*, 1993; 肖贤明等., 2002; Ding *et al.*, 2005)。

黄骅坳陷板桥-北大港地区古近系平均地热梯度为3.4℃/100m(田克勤等,2000),而该区奥陶系平均地温梯度为3.0℃/100m(朱炎铭等,2001)。取地面平均温度为20℃,根据推算公式 $H = (T_h - T_o)/PGT$ (H为形成深度;T_h为样品盐水包裹体的均一温度;T_o为古地表温度;PTG为古地温梯度),可以计算出Es₁段包裹体被捕获时的深度平均约在3110 m左右,Es₂段包裹体在3476 m左右,而Es₃段3口井在3841~4434 m之间,奥陶系包裹体在4183~5183 m之间。根据沉积-埋藏曲线,Es₁段包裹体流体的充注时间主要为Nm时期(约3 Ma以前),Es₂段主要为Nm时期(约6 Ma以前),Es₃段主要为Ng末期到Nm(约14~6Ma以前)(图3),奥陶系主要为Ng—Nm之间(约20~3Ma以前)(图4),由此可以得出整个沙河街组砂岩、粒屑灰岩和奥陶系灰岩包裹体流体充注的时期均在新近纪。

5.2 幔源氦的侵入受到断层活动控制

根据研究区不同层位幔源氦的侵入时间均为新近纪这一特征,作者根据所有样品包裹体中幔源氦的数值绘制了研究区的R/R_a等值线图(图5)。从图中可以看出,黄骅坳陷

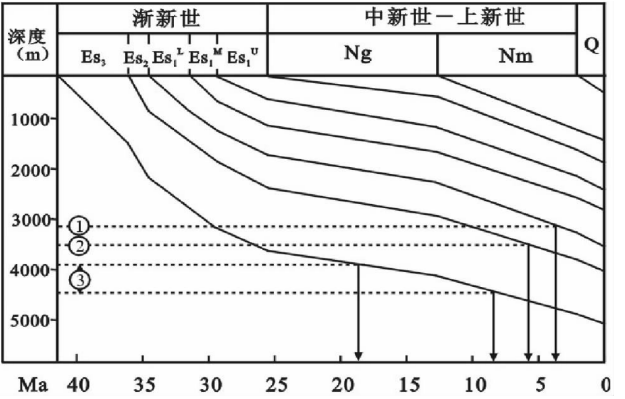


图3 沙河街组包裹体流体充注时期划分(①Es₁段包裹体捕获时间;②Es₂段包裹体捕获时间;③Es₃段包裹体捕获时间;沉积埋藏史演化图取自中石油大港油田资料)

Fig. 3 Trapping time of the inclusions in Shahejie Formation. (①Es₁ Section; ②Es₂ Section; ③Es₃ Section; The buried-history curve of the Shahejie Formation according to the Dagang Oil field of CNPC)

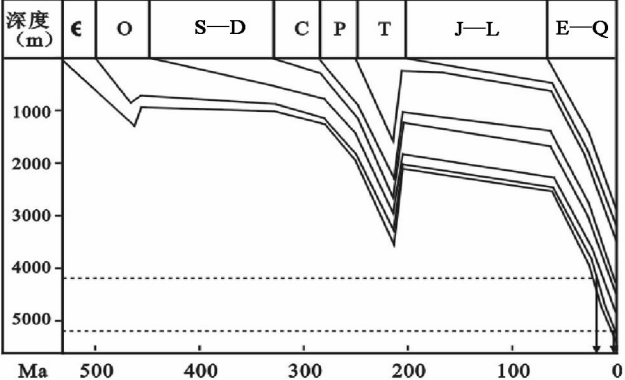


图4 奥陶系灰岩包裹体流体充注时期划分(沉积埋藏史演化图取自中石油大港油田)

Fig. 4 Trapping time of the inclusions in Ordovician (The buried-history curve of the Ordovician according to the Dagang Oil field of CNPC).

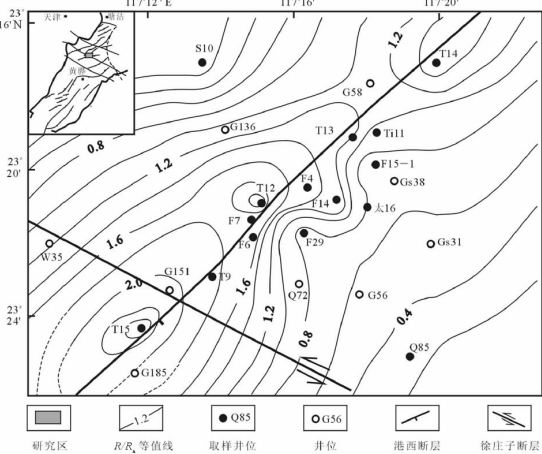


图5 港西断裂带氦同位素 R/R_a 等值线图

Fig. 5 R/R_a isoline map in Gangxi Fault Belt

港西断裂带地区幔源氦的混入与研究区的两条断裂: NE 向的港西断层和 NWW 向的徐庄子断层密切相关。沿着港西断层 R/R_a 值普遍较高,显示了较多的幔源氦的侵入,而异常中心均位于港西断层和徐庄子断层的交汇处,如 T15 井 R/R_a 值达到了 2.45, T12 井 R/R_a 值达到了 2.28。从沿港西断层 R/R_a 曲线图可以看出, R/R_a 值自交汇中心沿着港西断面向 NE 方向下降,从 T15 井的 2.45 下降到 T14 的 1.48 (图 6)。同样,从垂直港西断层 R/R_a 曲线图可以看出,自港西断面向围岩由 T16 的 2.28 分别下降为 SE 方向 S10 的 0.22 和 NW 方向 Q85 的 0.31 (图 7)。SW 方向没有样品控制,根据其他方向的变化趋势推测也为减低的趋势。

含油气盆地中幔源氦的侵入有两个基本的条件:第一需要有地幔的上拱和相应的岩浆活动,岩浆是幔源-岩浆气上升的主要载体;第二是需要存在能让深部幔源-岩浆气向上运移的深大断裂作为通道(戴金星等, 1995),这说明构造和岩浆活动对幔源氦的释放起到了主导作用。研究区域位于渤海湾盆地的中区,该区软流圈强烈隆起,地幔上拱导致地壳减薄,并伴随着强烈的岩浆活动,具备了幔源氦的物源条件。而且该地区自新生代以来处于拉张性的应力环境,伸展性断裂发育,为幔源氦上升提供了通道(Ren *et al.*, 2002)。研究区内 NE 向港西断层伸展活动强烈,贯通性和开启性好,但向深部的延伸性差;而 NWW 向的徐庄子断层属于基底断层,切割深度大,长期活动,新近纪以走滑运动为主。两组方向断层的交汇处综合了两者的优点,往往为幔源气上升提供了有利的通道。幔源氦在港西断层和徐庄子断层的交汇处侵入份额最大,由中心向四周区域减少。

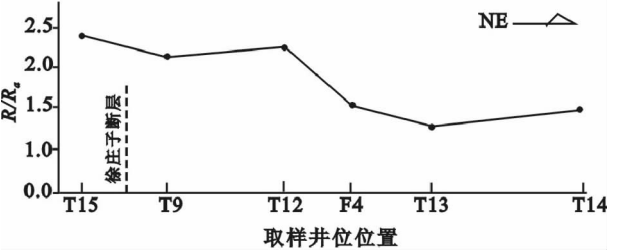


图6 沿港西断层氦同位素 R/R_a 曲线图

Fig. 6 R/R_a curve along the Gangxi fault

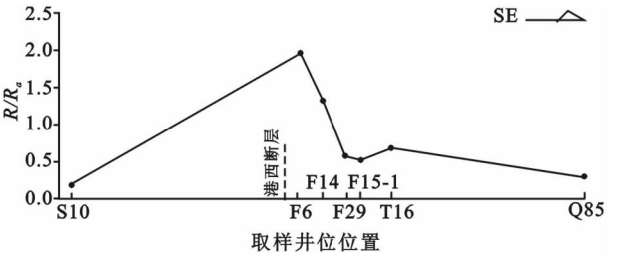


图7 垂直港西断层氦同位素 R/R_a 曲线图

Fig. 7 R/R_a curve vertical to the Gangxi fault

5.3 烃类组分油气演化程度与断层活动关系

1950 年以来进行了大量的油气演化模拟试验对在短期高温条件下有机质氧化和油气形成过程进行模拟 (Hawkes *et al.*, 1972; Simoneit *et al.*, 1990; Behar *et al.*, 1992; Price *et al.*, 1997), 结果表明烃类成熟的过程实际上是一个不断加氢的过程, 使得多种组分向烷烃转化。所以将烷烃 ($\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_6 + \text{C}_3\text{H}_8$) 与总有机组分的含量比值 (烷烃质量分数比), 可以反映油气的演化程度, 越高则油气演化程度越高 (杨惠民等, 1997)。文中所研究包裹体的烷烃质量分数比如表 2 及图 8 所示。较高的烷烃质量分数比值在徐庄子断层和港西断层的交汇处, 而垂直于港西断层方向, 数值向两侧逐渐减小, 由 T12 井的 0.99 减小到 S10 井的 0.44 及 Q85 井的 0.35。

在伸展过程中, 深大断裂不仅是深部幔源性气体的通道, 同时也是深度热流上涌的通道 (Stiros, 1998; Wang, 1984; Jonathan, 2004)。图 9 显示最大的地温值位于断层附近, 而高温是促进烃类成熟的关键因素 (Ismail and Shamsuddin, 1991; Harry and George, 1986), 这使得在徐庄子断层和港西断层交汇带附近的烷烃气具有较高的成熟度。

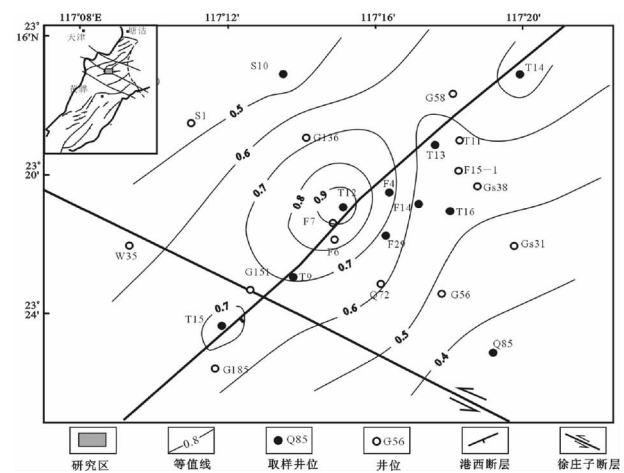


图 8 港西断裂带烷烃成熟度等值线图
Fig. 8 The distribution of hydrocarbon maturity of fluid inclusion in the Gangxi Fault Belt

6 结论

(1) 港西断裂带奥陶系灰岩和第三系沙河街组砂岩中流体包裹体均为次生成因, 气液比在 5% ~ 10% 之间。H₂O 为主要组分, 剩下的组分主要为 CO₂ 和 CH₄。对于流体包裹体均一温度的研究, 结合埋藏史和古地温梯度, 表明奥陶系灰岩和新近系沙河街组砂岩中流体包裹体流体充注的时间均在新近纪。

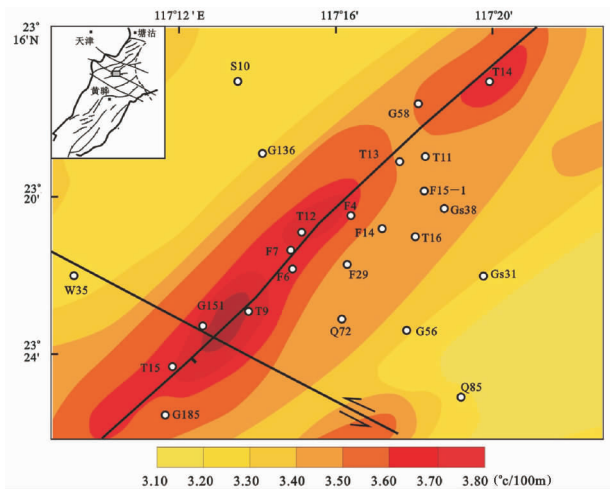


图 9 港西断裂带地温梯度图
Fig. 9 Geothermal gradient in the Gangxi Fault Belt

(2) 港西断裂带奥陶系灰岩和新近系沙河街组砂岩中均发现具有幔源氦的侵入, 幔源氦的侵入份额受到 NE 向港西断层和 NWW 向徐庄子断层的控制。高的 R/R_a 比值表明了强烈的地幔脱气活动。

(3) 研究区断层的活动不仅有利于幔源气的上升, 同时也有利于烷烃气的成熟。深部地热流沿着这些断层形成的通道上涌, 形成高地热区域, 促进了烷烃气的演化。

References

Aplin AC, Macleod G, Larter SR, Pedersen KS, Soenhsen H and Booth T. 1999. Combined use of Confocal Laser Scanning Microscopy and PVT simulation for estimating the composition and physical properties of petroleum in fluid inclusions. *Marine and Petroleum Geology*, 16: 97 – 110

Allègre C, Moreira M and Staudacher T. 1995. ⁴He/³He dispersion and mantle convection. *Geophys. Res. Lett.*, 22(17): 2325 – 2328

Burnard PG, Hu R, Turner G and Bi XW. 1999. Mantle, crustal and atmospheric noble gases in Ailaoshan Gold deposits, Yunnan Province, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63 (10): 1595 – 1604

Behar F, Kressmann S and Rudkiewicz JL. 1992. Experimental simulation in a confined system and kinetics modelling of kerogen and oil cracking. *Organic Geochemistry*, 19(1 – 3): 173 – 189

Cao J, Yao SP, Jin ZJ, Hu WX, Zhang YJ, Wang XL, Zhang YQ and Tang Y. 2006. Petroleum migration and mixing in the northwestern Junggar Basin (NW China): Constraints from oil-bearing fluid inclusion analyses. *Organic Geochemistry*, 37(7): 827 – 846

Doğan T, Sumino H, Nagao K and Notsu K. 2006. Release of mantle helium from forearc region of the Southwest Japan arc. *Chemical Geology*, 233(3 – 4): 235 – 248

Dai JX, Song Y, Dai CS *et al.* Conditions governing the formation of abiogenic gases and gas pools in Eastern China. Beijing: Science Press, 1995, 71 – 77 (in Chinese)

Dallai L, Magro G, Perucci E and Ruggieri G. 2005. Stable isotope and noble gas isotope compositions of inclusion fluids from Larderello geothermal field (Italy): Constraints to fluid origin and mixing precesses. *Journal of Volcanology and Geothermal Rseearch*, 148:

152–164

- Ding WW, Dai JX, Chen HL *et al.* 2004. Cenozoic tectonic control on the abiogenic CO₂ gas deposits, Huanghua Depression. *Geological Journal of China Universities*, 10(4): 615–623 (in Chinese with English abstract)
- Ding WW, Dai JX, Yang CY, Tao SZ and Hou L. 2005. Helium isotopic compositions in fluid inclusions of the Gangxi fault belt in the Huanghua Depression, Bohai Bay Basin. *Chinese Science Bulletin*, 50(2): 2621–2627
- England WA, Mackenzie AS, Mann DM and Quigley TM. 1987. The movement and entrapment of petroleum fluids in the subsurface. *Journal of the Geological Society London*, 144: 327–347
- Editorial Committee of Petroleum Geology of Dagang Oilfield. 1991. *Petroleum Geology of Dagang Field*. Beijing: Petroleum Industry Press, 74–95 (in Chinese with English abstract)
- Feely M and Parnell J. 2003. Fluid inclusion studies of well samples from the hydrocarbon prospective Porcupine Basin, offshore Ireland. *Geochemical Exploration*, 78–79: 55–59
- Fan JG, Ni P, Su WC *et al.* 2000. Characteristics and significance of rare earth elements in quartz of Sidaogou hydrothermal gold deposit. Liaoning. *Acta Petrologica Sinica*, 16(4): 587–590 (in Chinese with English abstract)
- Gao YQ, Ou GX, Tan SQ and Liu L. 2003. Research on the charge times and stages of oil and gas reservoir in Lower Es1 of Baishuitou structure at west slope in Qikou depression. *Acta Petrologica Sinica*, 19(2): 359–365 (in Chinese with English abstract)
- Graupner T, Niedermann S, Kempe U, Klemm R and Bechtel A. 2006. Origin of ore fluids in the Muruntau gold system: Constraints from noble gas, carbon isotope and halogen data. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. In Press, Corrected Proof
- Hoke L, Poreda R and Reay A. 2000. The subcontinental mantle beneath southern New Zealand, characterized by helium isotopes in intraplate basalts and gas-rich springs. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(14): 2489–2507
- Hu RZ, Burnard PG and Bi XW. 2004. Helium and argon isotope geochemistry of alkaline intrusion-associated gold and copper deposits along the Red River-Jingshajiang fault belt, SW China. *Chemical Geology*, 203: 305–317
- Hawkes HE. 1972. Free hydrogen in genesis of petroleum. *AAPG Bull.*, 56(11): 2268–2277
- Harry BM and George TFJ. 1986. High temperature simulation of petroleum formation-IV. Stable carbon isotope studies of Gaseous hydrocarbons. *Organic Geochemistry*, 9(4): 183–192
- Ismail M and Shamsuddin AHM. 1991. Organic matter maturity and its relation to time, temperature and depth in the Bengal Foredeep, Bangladesh. *Journal of Southeast Asia Earth Sciences*, 5(1–4): 381–390
- Jonathan ML. 2004. Scattering from a fault interface in the Coso geothermal field. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 13(1–2): 61–75
- Kelly J, Parnell H and Chen H. 2000. Application of fluid inclusions to studies of fractured sandstone reservoirs. *Journal of Geochemical Exploration*, 69–70: 705–709
- Kendrick MA, Burgess R, Patrick RA and Turner G. 2001. Fluid inclusion noble gas and halogen evidence on the origin of Cu-porphry mineralizing fluids. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 65: 2651–2668
- Karlsen DA, Nedkvitne T and Larter ST. 1993. Hydrocarbon composition of authigenic inclusions: Application to elucidation of petroleum reservoir filling history. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 57(15): 3641–3659
- Liu L, Sun XM, Dong FX, Ma F and Ma YP. 2004. Geochemical characteristics and fluid inclusion in calcite veins of lower part of member 1 of Shahejie Formation, offshore area, Dagang Oilfield: a case study of well Gangshen 67. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 34(1): 49–54 (in Chinese with English abstract)
- Maurice P and Jean-Bacques B. 1997. Thermal history constraints from studies of organic, clay minerals, fluid inclusions and apatite fission tracks at the ardeche paleo-margin. *Journal of Sedimentary Research*, 67(1): 235–240
- Muramatsu Y, Sawaki T and Arai F. 2006. Geochemical study of fluid inclusions from the western upflow zone of the Matsukawa geothermal system, Japan. *Geothermics*, 35(2): 123–140
- Moore JN, Norman DI and Kennedy BM. 2001. Fluid inclusion gas compositions from an active magmatic-hydrothermal system: A case study of the Geysers geothermal field, USA. *Chemical Geology*, 173: 3–30
- Oxburgh ER and O’Nions RK. 1987. Helium loss, tectonic and the terrestrial heat budget. *Science*, 237: 1583–1588
- Pang LSK, George SC and Quezada RA. 1998. A study of the gross compositions of oil-bearing fluid inclusions using high performance liquid chromatography. *Organic Geochemistry*, 29(5–7): 1149–1161
- Polyak BG, Prasolov EM and Cermak V. 1985. Isotopic compositions of noble gases in geothermal fluids of the Krusne Hory Mts., Czechoslovakia, and the nature of the local geothermal anomaly. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 49: 695–699
- Price LC and McNeil R. 1997. Thoughts on the birth, evolution, and current state of petroleum geochemistry. *Journal of Petroleum Geology*, 20: 118–123
- Qi JF, Zhang YW and Lu KZ. 1995. Extensional pattern and dynamic process of the Cenozoic rift basin in the Bohai Bay. *Experimental Petroleum Geology*, 17(4): 316–323 (in Chinese with English abstract)
- Ren JY, Kensaka T and Li ST. 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, 344: 175–205
- Stiros SC. 1998. The 1953 seismic surface fault: Implications for the modeling of the Souda (Corinth area, Greece) geothermal field. *Journal of Geodynamics*, 20(2): 167–180
- Stuart FM, Burnard PG and Taylor RP. 1995. Resolving mantle and crustal contributions to ancient hydrothermal fluids: He-Ar isotopes in fluid inclusions from Dae Hwa W-Mo mineralisation, S. Korea. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59: 4663–4673
- Sun ML and Chen JF. 1998. Study on the salt deposit crushing by the Vacuum-Electric-Magnetic-Breaker and measurement of noble gas isotope composition. *Acta Sedimentologica Sinica*, 16(1): 103–106
- Simoneit BRT. 1990. Petroleum generation, an easy and widespread process in hydrothermal system: An overview. *Applied Geochemistry*, 5(1/2): 17–28
- Tao MX, Xu YC and Shen P. 1997. Tectonic and geochemical characteristics and reserved conditions of a mantle source gas accumulation zone in Eastern China. *Science in China, Ser. D*, 40(1): 73–80
- Thiery R, Pironon J, Walgenwitz F and Montel F. 2002. Individual characterization of petroleum fluid inclusions (composition and *P-T* trapping conditions) by microthermometry and confocal laser scanning microscopy: Influences from applied thermodynamics of oils. *Marine and Petroleum Geology*, 19: 847–859
- Tian KQ, Yu ZH, Feng M *et al.* 2000. Paleogene Deep-Seated Hydrocarbon’s Geology and Exploration in Bohai Bay Basin. Beijing: Petroleum Industry Press, 121 (in Chinese with English abstract)
- Wang XB. 1989. *Geochemistry and cosmochemistry of rare gas isotope*, Beijing: Science Press, 7–22 (in Chinese)
- Wolfgang B, Naumann D and Erzinger J. 1999. A helium, argon and nitrogen record of the upper continental crust (KTB drill holes, Oberpfalz, Germany): Implications for crustal degassing. *Chemical*

- Geology, 160: 81 – 101
- Wang TF. 1984. Recent tectonic stress field, active faults and geothermal fields (hot-water type) in China. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 22(3–4): 287 – 289
- Xiao XM, Liu ZF, Liu DH *et al.* 2002. Dating formation of natural gas pools using fluid inclusion data from reservoirs. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(12): 957 – 960
- Yang XY, Zheng XF, Liu D *et al.* 2001. Chemical and carbon isotope compositions of fluid inclusions in peridotite xenoliths and eclogites from Eastern China: Geodynamic implications. Phys. Chem. Earth, 9 – 10: 705 – 718
- Yang HM. 1997. Application of types and composition of inclusions on stud of oil-gas migration and reservoir evaluation: A case history of Chishui Gas Field. Marine Origin Petroleum Geology, 2(3): 16 – 21 (in Chinese with English abstract)
- Zou HF and Xu XC. 2001. The features of the compositions of fluid inclusions in Dagang Oil Field and its application. Journal of Changchun University of Science and Technology, 31(3): 251 – 256 (in Chinese with English abstract)
- Zhong NN, Zhang ZH and Sun XM. 2002. History analysis of petroleum reservoir fluids: Taking Sanma area in Huanghua depression as an example. Petroleum Exploration and Development, 29(3): 13 – 16 (in Chinese with English abstract)
- Zhu YM and Qin Y. 2001. Hydrocarbon-generation evolution of Paleozoic source rocks in the Konggu-3 well in Huanghua Depression. Acta Petrologica Sinica, 22(6): 30 ~ 33 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 戴金星, 宋岩, 戴春森等. 1995. 中国东部无机成因气及其气藏的形成条件. 北京: 科学出版社, 71 – 77
- 大港油田石油地质志编辑委员会. 1991. 大港油田石油地质志. 北京: 石油工业出版社, 74 – 95

- 丁巍伟, 戴金星, 陈汉林等. 2004. 黄骅坳陷新生代构造活动对无计成因 CO₂ 气藏控制作用的研究. 高校地质学报, 10(4): 615 – 623
- 范建国, 倪培, 苏文超等. 2000. 辽宁四道沟热液金矿床中石英的稀土元素的特征及意义. 岩石学报, 16(4): 587 – 590
- 高玉巧, 欧光习, 谭守强, 刘立. 2003. 歧口凹陷西坡白水头构造沙一段下部油气成藏期次研究. 岩石学报, 19(2): 359 – 365
- 刘立, 孙晓明, 董福湘, 马锋, 马艳萍. 2004. 大港滩海区沙一段下部方解石脉的地球化学与包裹体特征: 以港深 67 井为例. 吉林大学学报(地球科学版), 34(1): 49 – 54
- 王先彬. 1989. 稀有气体同位素地球化学和宇宙化学. 北京: 科学出版社, 7 – 22
- 杨惠民. 1997. 包裹体类型和成分特征在油气运移研究和油气储层评价中的应用-以赤水气田为例. 海相油气地质, 2(3): 16 – 21
- 漆家福, 张仪伟, 陆克政. 1995. 渤海湾盆地新生代裂陷盆地的伸展模式及其动力学过程. 石油实验地质, 17(4): 316 – 323
- 田克勤, 于志海, 冯明等. 2000. 渤海湾盆地地下第三系深层油气地质与勘探. 北京: 石油工业出版社, 121
- 孙明良, 陈践发. 1998. 真空电磁破碎机粉碎盐岩颗粒及稀有气体同位素测量的试验研究. 沉积学报, 1998, 16(1): 103 – 106
- 肖贤明, 刘祖发, 刘德汉等. 2002. 应用储层流体包裹体信息研究天然气气藏的成藏时间. 科学通报, 47(12): 957 – 960
- 邹海峰, 徐学纯. 2001. 大港探区流体包裹体组分特征及其应用. 长春科技大学学报, 31(3): 251 – 256
- 朱炎铭, 秦勇. 2001. 黄骅坳陷孔古 3 井古生界烃源岩的生烃演化. 石油学报, 22(6): 30 – 33
- 钟宁宁, 张枝焕, 孙晓明. 2002. 成藏流体历史分析: 以黄骅坳陷三甲地区为例. 石油勘探与开发, 29(3): 13 – 16