

松辽盆地含 CO₂ 火山岩气藏的形成和分布*

张庆春¹ 胡素云¹ 王立武² 李建忠¹ 董景海³ 王颖² 郑曼¹

ZHANG QingChun¹, HU SuYun¹, WANG LiWu², LI JianZhong¹, DONG JingHai³, WANG Ying² and ZHENG Man¹

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

2. 中国石油吉林油田分公司, 松原 138000

3. 中国石油大庆油田有限责任公司, 大庆 163000

1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

2. Jilin Oilfield Company, PetroChina, Songyuan 138000, China

3. Daqing Oilfield Company Ltd, PetroChina, Daqing 163712, China

2009-08-13 收稿, 2009-11-11 改回.

Zhang QC, Hu SY, Wang LW, Li JZ, Dong JH, Wang Y and Zheng M. 2010. Formation and distribution of volcanic CO₂ gas pools in Songliao basin. *Acta Petrologica Sinica*, 26(1):109–120

Abstract The unique tectonic setting and rift evolution of Songliao basin resulted in the formation and enrichment of volcanic CO₂ gas pools. Mesozoic-Cenozoic volcano-magmatic activities developed in Songliao rift basin, with characteristics of multi-phase eruption, wide distribution and good reservoir condition. Volcanic activities were generally central vent eruption, mainly developing medium-basic and acidic volcanic assemblages, rhyolite, tuff and other rock types, two types of explosive facie and effusive facie. Mesozoic volcanic rocks are widely distributed in the basin, including Upper Jurassic Huoshiling Formation, Lower Cretaceous Yingcheng Formation constituting favorable reservoir of deep level of the basin, while Cenozoic volcanic rocks more exposed outside the basin and less drilled in the basin. Highly-enriched CO₂ in the basin is of mantle-derived inorganic origin caused by mantle-derived magma degassing during Qingshankou and Cenozoic volcanic activity period. The formation of volcanic CO₂ gas pools are mainly controlled by the background of deep structure, deep-large faults and Mesozoic-Cenozoic volcanic rocks. Discovered volcanic CO₂ gas pools are mostly distributed in volcanic rocks of Yingcheng Formation in ancient central uplift and its adjacent faulted depression, characterized with point-belt distribution and local enrichment. Based on the controlling factor analysis, five CO₂ accumulation plays were predicted.

Key words Volcanic rock reservoir; CO₂ gas pool; Origin; Distribution; Songliao basin

摘要 松辽盆地特有的深部构造背景和裂谷演化特征,造成盆地内含 CO₂ 火山岩气藏的形成和富集。松辽裂谷盆地中新世代火山岩岩浆活动发育,总体上具有多期喷发、分布广泛和储集条件良好的特点。火山活动以中心式喷发为主,主要发育中基性-酸性火山岩,发育流纹岩、凝灰岩等多种岩石类型,爆发相和溢流相2种火山岩相。中生代火山岩在盆地内分布广泛,营城组构成深层有利储层,新生代火山岩在盆地外围出露较多,而在盆内出露较少。盆地高含量的二氧化碳为无机幔源成因,由青山口期和新生代幔源岩浆脱气形成。含 CO₂ 火山岩气藏的形成主要受深部构造背景、深大断裂和中新生代火山岩控制。已发现含 CO₂ 火山岩气藏主要分布于古中央隆起带及其两侧断陷的营城组火山岩中,具有点状、带状分布,局部富集的特点。根据主控因素分析,预测了5个 CO₂ 富集区带。

关键词 火山岩储层; CO₂ 气藏; 成因; 分布; 松辽盆地

中图法分类号 P618.13

* 本文受中国石油“十一五”重大专项(07-02Z-01-01)和国家973项目(2009CB21930X)联合资助。

第一作者简介: 张庆春,男,1964年生,博士,教授级高工,主要从事含油气盆地分析与资源评价, E-mail: zqc@petrochina.com.cn

1 引言

火山岩油气藏作为一类重要的岩性油气藏,近年来已成为国内外油气勘探新领域。随着松辽盆地深层天然气勘探的不断深入,在烃类气含气规模不断扩大的同时,发现了较丰富的 CO_2 资源,尤其是长岭断陷发现了规模巨大的高含 CO_2 气藏,北部徐家围子断陷也相继发现多个含 CO_2 气藏(图1)。从已发现的地质储量分析,高含 CO_2 气藏90%以上分布在中生代营城组火山岩储层中,其次是泉四段碎屑岩地层。因此,营城组火山岩不仅是深层烃类气勘探目的层,也是 CO_2 气藏的主要赋存领域。前人对松辽盆地 CO_2 的成因机理作了大量工作,多数认为 CO_2 是幔源岩浆成因(戴金星等,1995;霍秋立等,1998,2004;付晓飞和宋岩,2005;谈迎等,2005;米敬奎等,2008),也不排除盆地深部石炭-二叠系碳酸盐岩热变质作用的贡献(邵明礼等,2000;郭占谦等,2006),并开展了典型 CO_2 气藏成藏模式研究(霍秋立等,2004;付晓飞和宋岩,2005;刘德良等,2006;鲁雪松等,2008;魏立春等,2009);对松辽盆地深层火山岩的岩相和储层特征也作了较为深入的研究(王璞珺等,2003;刘万洙等,2003;杨双玲等,2007;王力等,2008;侯启军等,2009)。但是,松辽盆地深层 CO_2 主控因素和分布规律尚不清楚。本文通过松辽盆地裂谷演化特征和 CO_2 成藏主控因素分析,揭示含 CO_2 火山岩气藏的形成和分布特征,以便为今后 CO_2 气藏的勘探开发,以及松辽盆地深层烃类气勘探有效规避 CO_2 气藏提供参考依据。

2 松辽盆地火山岩分布与储层特征

作为环太平洋火山岩带的一部分,松辽裂谷盆地中新生代火山岩岩浆活动频发,具有多期喷发、分布广泛和储集条件良好的特点。

2.1 火山岩气藏形成的地质背景

松辽盆地大地构造地处东北裂谷系环太平洋构造域北段,是在晚古生代海西褶皱基底上发育起来的大型陆缘裂谷盆地。

松辽裂谷盆地的演化经历了断陷、拗陷两大旋回,具有早期裂陷、中期拗陷和晚期抬升褶皱的特点,形成了断拗复合的二元结构。晚侏罗世开始,受太平洋板块向欧亚板块俯冲及印度板块向欧亚板块俯冲作用控制,东北亚地区地幔物质上涌,大陆拱起,大规模的断裂活动伴随大规模火山喷发。在断裂的作用下,在松辽盆地区域形成36个不同规模相互分割的晚侏罗世(火石岭组)-早白垩世(营城组)含煤碎屑及火山碎屑断陷(侯启军等,2009)。总体上具有中隆侧拗、隆拗相间的构造格局(图1)。自早白垩世登娄库组开始,松辽

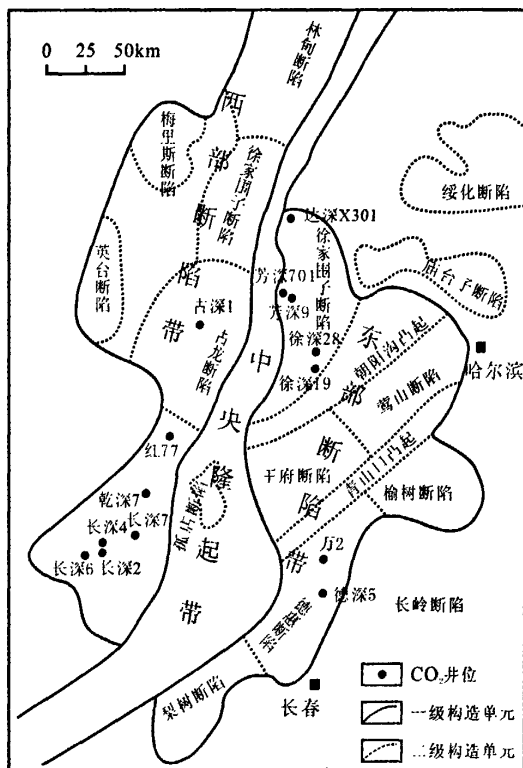


图1 松辽盆地深层断陷格局与已发现 CO_2 气藏分布

Fig. 1 The sketch map of deep level fault depression and discovered CO_2 gas pools in Songliao basin

盆地进入拗陷沉积阶段,形成了登娄库组-嫩江组湖相碎屑岩沉积。

晚白垩世以来,由于日本海的扩张和太平洋板块向欧亚大陆俯冲,北亚地区剪切-挤压应力场形成,盆地进入萎缩抬升和构造反转阶段,形成中浅层局部反转构造带。至古近纪盆地全面上升,沉积中心西移。此期,东北及东南部隆起褶皱抬起,仅在西部接受上白垩统及第三系粗碎屑沉积。

2.2 火山岩分布与岩石学特征

钻井、地震和重磁、航磁等资料研究表明,松辽盆地中、新生代均有火山岩发育。中生代火山岩主要分布在火石岭组(J_1h)、沙河子组(K_1s)、营城组(K_1y)和青山口组(K_2q)。其中,以火石岭组-营城组火山岩在盆地内分布最为广泛(图2),青山口组基性玄武岩局部钻遇。营城组火山岩在各断陷分布广泛,厚度大,盆地南部以营城组一段为主,北部以营城组三段为主。仅在长岭断陷就发育查干花、黑帝庙、乾安、孤店和大安5个主要火山岩系,分布范围达到断陷面积65%;每个火山岩系包含多个火山岩带,每个火山岩带又包含多个独立的火山岩体,为形成烃类气藏和 CO_2 气藏圈闭奠定了基础(侯启军等,2009)。

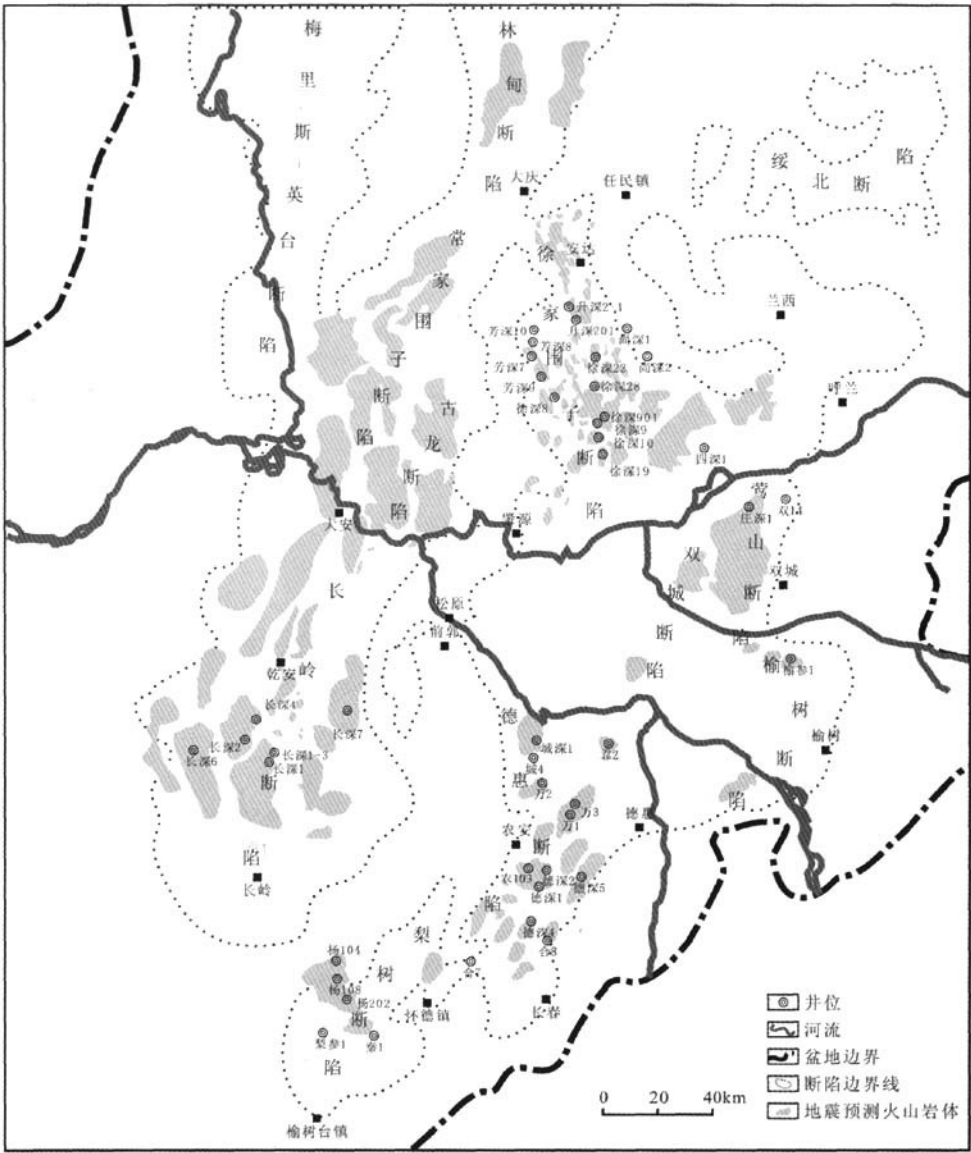


图2 松辽盆地地震预测火山岩分布图
Fig.2 Volcanic distribution from seismic prediction in Songliao basin

根据火山岩岩石薄片、化学成分分析和测井解释等分析,松辽盆地中生代火山岩岩性复杂多样,从基性到酸性均有产出,但以中基性到酸性为主(图3)。典型岩石类型有玄武岩、安山玄武岩、安山岩、粗面岩、英安岩、流纹岩、凝灰岩及火山碎屑岩8类。火石岭组岩性主要为基性、中性和中酸性火山岩,岩石类型主要有玄武质安山岩和流纹岩、安山岩、英安岩和安山质碎屑岩等;营城组一段岩性主要为中酸性火

山岩岩石类型主要有流纹岩、英安岩和酸性火山碎屑岩等;营城组三段岩性主要为中基性火山岩,岩石类型主要有玄武岩和玄武质安山岩等;青山口组岩性主要为基性玄武岩,在盆地内古龙地区的英8井、金6、金65井,以及乾安地区的乾124井均有揭露。

新生代火山岩在盆地外圈出露较多,而在盆地内出露较少,已经发现的几座火山主要是盆地北部边缘的五大连池火

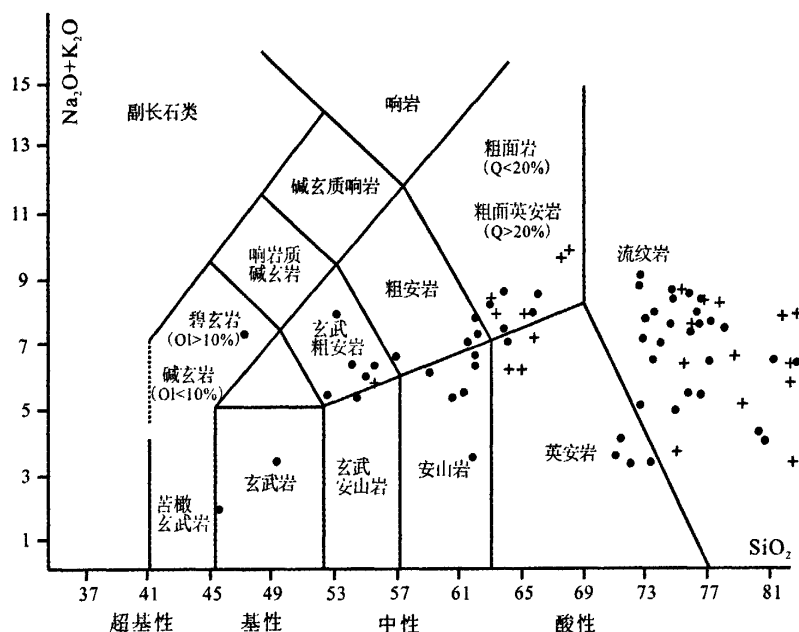


图3 松辽盆地中生代火山岩 TAS 图解

加号代表南部火山岩,圆点代表北部火山岩

Fig. 3 TAS chart of Mesozoic volcanic rocks in Songliao basin

山和克东火山,盆地南部的双辽和大屯火山。五大连池火山岩为玄武岩,伊通火山岩为碧玄岩和碱性橄辉玄武岩,双辽火山岩为碧玄岩、碱性橄辉玄武岩、过渡玄武岩和辉绿岩。根据盆地周边新生代幔源玄武岩岩浆活动特征,推测盆地内覆盖区新生带代幔源玄武岩岩浆活动区主要分布在林甸-常家围子-长岭带、徐家围子、德惠断陷东部三个断陷带(宋岩等, 2008^①)。

总体来看,松辽盆地中生代火山岩以中酸性喷发岩为主,主要来自壳源岩浆,并能提供少部分 CO_2 气源,在盆地内呈面状广泛分布;新生代基性、碱性玄武岩为上地幔的产物,为 CO_2 的主要气源,但分布范围局限,主要呈串珠状分布于深大断裂附近。

2.3 火山岩储集特征

自从升深2井、徐深1井和长深1井营城组火山岩中相继获得高产工业气流以后,火山岩及火山岩碎屑岩这些原本连通性极差的储层一直成为深层勘探的主要目标。

松辽盆地营城组是深层最主要的火山岩储层。由于火山岩受压实作用影响少,储集性能随深度变化小,因此深层火山岩仍具有较好的物性条件。火山岩的储集性能主要受岩性-岩相、成岩后生作用的控制,前者决定火山岩原始孔隙规模,后者决定次生孔隙、裂缝发育程度和原始孔隙的改造。

松辽盆地火山活动以中心式喷发为主,主要发育中基性-酸性火山岩,发育流纹岩、凝灰岩等多种岩石类型。前

人根据松辽盆地火山岩的岩性、结构、构造以及物质来源、成岩方式、储集空间类型等,划分出5种火山岩岩相、15种亚相(王璞珺等,2003)。不同岩相的储层物性差别较大,物性较好的储层一般位于火山口附近的爆发相和溢流相中,远火山口相和火山碎屑相物性较差。作者对长岭断陷的火山岩研究表明,火山角砾岩、玄武岩、流纹岩和安山岩物性最好,孔隙度一般都大于5%,英安岩和凝灰岩都比较差,孔隙度小于3%(图4);溢流相上部亚相和爆发相空落亚相物性最好(图5),其次是爆发相热碎屑流亚相和热基浪亚相,较差的是溢流相中部亚相和下部亚相。

裂谷盆地强烈的构造作用导致火山岩裂缝发育,极大地改善了火山岩的储集性能。根据测井解释成果,已经识别出了高导构造缝、高导微裂缝、高阻缝和钻井诱导缝。火山岩形成后经历的风化、淋滤作用,使得岩石破碎、矿物溶蚀等后生作用,改善了火山岩的储集性能,同时火山岩中不稳定矿物在深埋过程中,由于烃源岩产生的有机酸的注入而被溶蚀,或是在热液流体作用下发生蚀变,均可以提高火山岩的孔隙度和渗透性。当然,火山活动导致的胶结和充填作用,也会使得岩石孔隙度降低。

① 宋岩,柳少波等. 2008. 松辽盆地含 CO_2 天然气成藏机制与分布规律研究

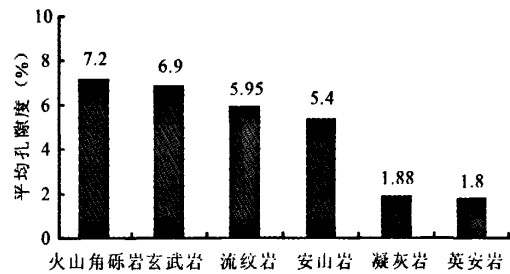


图4 长岭断陷不同火山岩孔隙度分布
Fig.4 Histogram of porosity distribution of different volcanic rocks at Changling fault depression

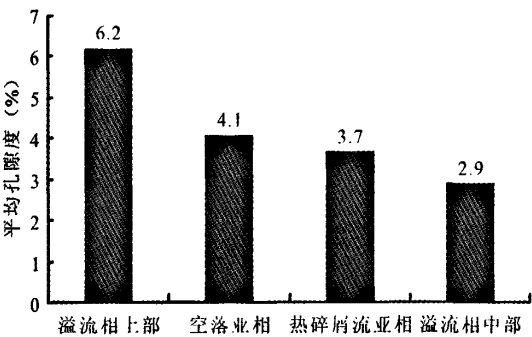


图5 长岭断陷不同岩相火山岩孔隙度分布
Fig.5 Histogram of porosity distribution of different lithofacies at Changling fault depression

3 含 CO₂ 火山岩气藏成藏主控因素

高含 CO₂ 天然气,作为一种非常规天然气藏类型,其成藏作用既有常规气藏共有的一般规律,也有自身的特殊性。松辽盆地 CO₂ 气藏的特殊性主要表现在天然气的无机幔源成因,以及成藏过程受深大断裂和火山作用控制表现出的气藏分布的强烈不均一性,这些特点导致了含 CO₂ 天然气目标预测的不确定性。

3.1 CO₂ 成因机理

天然气的成因是成藏作用的基本要素。通过天然气地球化学特征对比以及模拟实验分析,可以确定不同含量 CO₂ 气的成因类型。松辽盆地 300 多块样品的气体的组成和碳同位素分析结果表明高含量的二氧化碳是无机成因的,其 $\delta^{13}C_{CO_2} > -8\text{‰}$;同时,松辽盆地高含量的 CO₂ 伴生的氮的同位素非常重, R/R_a 均大于 1,显示出幔源氮的特征,即松辽盆地高含量的 CO₂ 应该是无机幔源成因(戴金星等,1995;米敬奎等,2008),而含量较低的二氧化碳(小于 20%)成因,既有无机成因,也有有机及混合成因。

幔源 CO₂ 气藏的形成与幔源岩浆的喷发和侵入活动直接相关(Wycherley *et al.*, 1999)。一般认为,地幔流体尤其是碱性玄武岩浆和碱性岩浆富含大量 CO₂ 等挥发气体(Mckirdy *et al.*, 1992; Taylor and McLennan, 1995; 杜乐天, 1996, 2006; 杨晓勇等, 1999),基性岩和超基性岩包裹体中 CO₂、CH₄ 的含量明显高于酸性岩;同时岩浆中 CO₂ 的脱出量与其中 SiO₂ 含量以及岩石碱性也有着密切关系,岩石 SiO₂ 含量越高,CO₂ 的脱出量越少;岩石碱性越高,CO₂ 的脱出量越多(刘德良等,2006)。松辽盆地及其周边新生代岩浆的特点就是低 SiO₂、高岩石碱度,具有脱出大量 CO₂ 的条件。

松辽盆地及周边地区中新世发育多期玄武岩浆活动,早白垩青山口期(92Ma ±)发育一期拉斑玄武岩浆活动,新生代古近纪以来(30 ~ 0 Ma)三期玄武岩浆活动。从成藏有效性分析,早期岩浆活动由于缺乏有效盖层,加之 CO₂ 极易溶解于水中因而难以保存,而新生代火山活动则有利于 CO₂ 的成藏富集。米敬奎等(2008)所做的松辽盆地中生代火山岩 CO₂ 包裹体激光拉曼分析表明,包裹体中的 CO₂ 与储层中的 CO₂ 不同源,包裹体中包含的 CO₂ 其 $\delta^{13}C_{CO_2} < -8\text{‰}$,为有机成因,而气藏中的高含量的 CO₂ 的 $\delta^{13}C_{CO_2} > -8\text{‰}$,为无机成因(表 1),说明包裹体中以烃类气体为主的天然气与 CO₂ 不是同时进入储层的,间接说明 CO₂ 可能比烃类成藏晚。综合分析认为,松辽盆地青山口期以来的幔源火山活动提供 CO₂ 气源,晚白垩世以来 CO₂ 多期充注,晚期成藏为主。

表 1 松辽盆地部分高含 CO₂ 气井中和包裹体中天然气同位素对比

Table 1 Carbon isotope contents in wellbores and fluid inclusions of some high-enriched CO₂ gas wells in Songliao basin

井号	气体来源	CO ₂ 含量 (%)	δC_1 (‰)	δC_2 (‰)	δC_{CO_2} (‰)
长深 1	包裹体中	2.35	-22.85	-32.4	-12.71
	井中	23.45	-23	-26.3	-6.8
长深 1-1	包裹体中	1.63	-24.5	-27.38	-14.72
	井中	31.64	-22.2	-26.9	-7.7
徐深 28	井中	84	-34		-7
徐深 19	井中	98	-34.91	-35.86	-5.41

注:数据据米敬奎等,2008

3.2 CO₂ 成藏主控因素

松辽盆地业已发现 150 余口含 CO₂ 气井,主要呈点状或条带状分布于古中央隆起带及其两侧断陷,即北部的徐家围子、古龙、莺双断陷和南部的长岭、德惠断陷(图 6);层系上含 CO₂ 天然气主要分布在深层营城组火山岩和中浅层登娄库-泉 4 段砂砾岩储层中;同一断陷营城组火山岩 CO₂ 和烃气分布总体上具有东西分带性。

通过盆地 10 余个含 CO₂ 气藏刻度区的解剖研究,认为

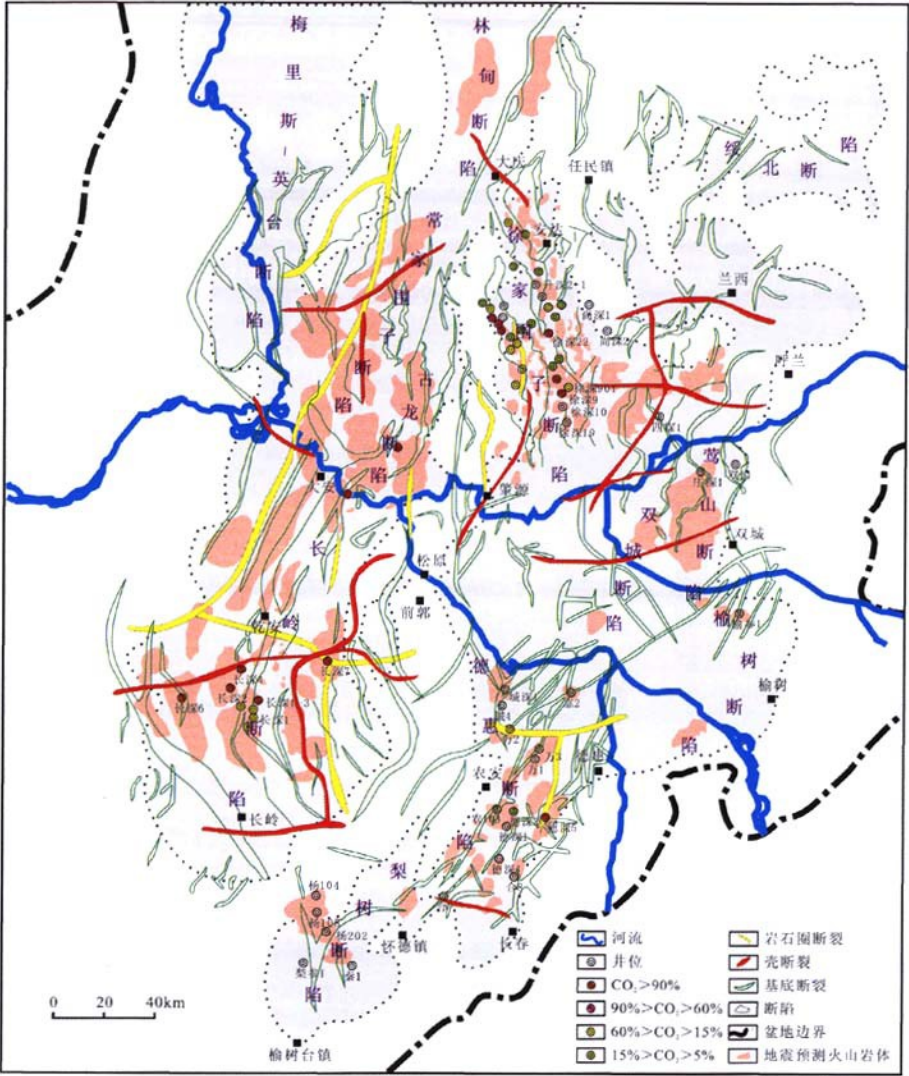


图6 松辽盆地深大断裂与CO₂井分布图

Fig. 6 Distribution of deep-large faults and CO₂ wells in Songliao basin

控制高含CO₂气藏分布的主要因素有以下三个方面。

3.2.1 深部构造背景

深部构造背景控制CO₂气藏的区域分布。高含CO₂的无机幔源成因机理表明,CO₂是通过幔源岩浆活动发生的地幔热脱气方式迁移到地壳浅部,一般都分布在深大断裂发育、幔源岩浆活动比较强烈地区。统计资料表明,松辽盆地高含CO₂和He的井位多分布在深大断裂带的附近,尤其是几条深大断裂的交汇处,充分说明深部构造控制高含CO₂气藏的形成与分布。

松辽盆地具有边缘裂谷盆地地幔上隆、高地热场特点,

高热流和高地温是深部物质及热流上涌的结果。其莫霍面埋深29~34km,热流平均值68.65mW/m²,地温场分布具有中部高、边部低,大致呈环状分布的特征,高热流区与莫霍面隆起区相对应。统计表明,松辽盆地CO₂和He气主要分布于莫霍面埋藏小于32km的地幔上隆地区(图7)和盆地内地温梯度大于3.5℃/100m的中央凹陷区。例如,松辽南部莫霍面正异常有两个,一是在大安-乾安一带,隆起最高点在乾安南部,地壳厚度为29km;另一个在德惠一带,地壳厚度为31km;在这两个异常带内,发育了红岗和万金塔两个大的浅层二氧化碳气藏带。

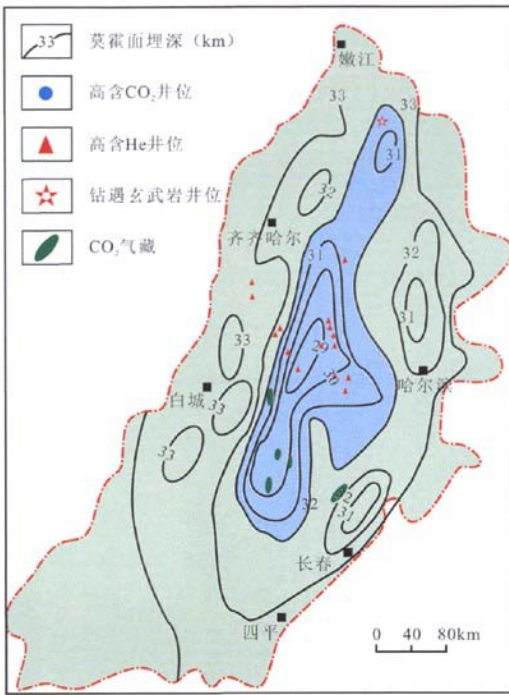


图7 松辽盆地高含 CO₂ 和 He 井位与莫霍面埋深叠合图

Fig. 7 Locations of high-enriched CO₂ and He wells and Moho depth contour map in Songliao basin

3.2.2 深大断裂

深大断裂系指规模大、切割深、发育时期很长的断裂带,按其切割深度,可分为岩石圈断裂、地壳断裂和基底断裂。深大断裂是深部地幔岩浆上涌的重要途径,也是幔源 CO₂ 向上运移的重要通道。

松辽盆地高含 CO₂ 的无机幔源成因特征,决定了岩浆脱气之后必将沿着势能降低的深大断裂带方向运移,在具有圈闭条件的场所聚集藏。岩石圈断裂和地壳断裂形成早、规模大,一般是岩浆上涌的通道,多表现为有根的岩浆侵入体,是沟通深部气源的第一接棒,控制 CO₂ 的区域分布。基底断裂是控制盆地发展演化的一类断裂,与壳断裂和岩石圈断裂有一定的成生联系。基底大断裂与深大断裂相衔接构成幔源 CO₂ 脱气和向上运移的通道。国内外 CO₂ 气藏分布表明,世界上已发现的高含 CO₂ 气藏或气苗的分布与基底断裂关系密切,基底断裂为 CO₂ 气藏的形成提供了运移通道和储集空间(朱岳年,1997)。松辽盆地规模较大的基底断裂约有 50 多条(图 6),目前已发现的 CO₂ 气藏分布均受基底断裂的控制,但不是所有基底断裂都与 CO₂ 有关。这也是断裂控制 CO₂ 分布规律的复杂性之一。

研究表明,松辽盆地控制 CO₂ 气藏分布的基底断裂多为规模较大、低角度、控陷、控制火山上涌通道的基底大断裂。这些控陷基底断裂,多为正断层(带),平面延伸距离大,最大 150km,一般为 10~40km,最大垂直断距为 5000m,一般在 500~2500m,基底大断裂向下倾角逐渐变缓,并最终近于水平的韧性剪切方式消失于拆离带内。

控陷基底大断裂控制高含 CO₂ 的富集区带。例如,如徐家围子的芳深 9 井气藏的 CO₂ 气就是沿着徐家围子控陷基底断裂,即徐西断裂,运移聚集的结果;长岭断陷前神字井(长深 2)和神北(长深 4) CO₂ 气藏分布于前神字井-大安控陷基底断裂的陡坡带上(图 8);黑帝庙(长深 6) CO₂ 气藏分布于黑帝庙控陷基底断裂陡坡带上;北四号(长深 7) CO₂ 气藏分布于孤店控陷基底断裂陡坡带上。

基底断裂的多旋回活动是连接深部气源、构成 CO₂ 运移通道的重要条件。研究表明,松辽盆地基底断裂持续形成于侏罗纪至白垩纪登娄库期的盆地裂谷发育阶段。裂后期虽然断裂活动相应减弱,但控陷基底断裂仍在继续活动,并且控制了凹陷的边界。例如,新立-大老爷府断裂、安农-万金塔断裂、伏龙泉-顾家店断裂、哈尔滨断裂持续活动至青山口期。红岗、大安、孤店等断裂持续活动至姚家期末以后,而在嫩江组沉积末期,由于日本海的扩张和太平洋板块向欧亚大陆俯冲,盆地受剪切—挤压应力场控制,形成众多正反转构造,如望奎-任民镇反转构造带、长春岭反转构造带、克山-大庆反转构造带和林甸-红岗反转构造带。这种由基底断裂控制的正反转构造带是中浅层 CO₂ 聚集和分布的有利地区,如万金塔、红岗、孤店等中浅层 CO₂ 碳气藏。

3.2.3 中生代火山岩

火山岩与 CO₂ 关系十分密切,世界上已发现的 CO₂ 气藏大都分布在地史上或现代的火山活动地带。

松辽盆地火山岩与 CO₂ 的关系表现在三个方面。首先,岩浆是无机幔源 CO₂ 气的气源载体,火山-岩浆活动期即是幔源 CO₂ 气的释放期和聚集期。前已说明,火石岭组-营城组火山岩主要以中、酸性喷发岩为主,系幔源诱导、壳源部分熔融的产物,不能成为松辽盆地幔源 CO₂ 的主要气源。而青山口期-新生代火山岩主要以基性、碱性玄武岩为主,玄武岩浆来源于深达 54~108km 的上地幔和软流圈,且由老至新,玄武岩的形成深度逐渐变深,幔源岩浆的多期活动为大量幔源无机 CO₂ 气运移至盆地地层中形成聚集提供了可能。

其次,松辽盆地主要断陷内营城组火山岩分布广泛(图 9),构成盆地深层烃类气和 CO₂ 最重要的储层。例如,长岭断陷缓坡带上主要发育火山碎屑岩和火山熔岩两种类型的储层,发育非均质性较强的原生孔隙、次生孔隙和裂缝三种类型孔隙。高含量的 CO₂ 分布与火山岩爆发相有着较为密切的关系(图 9)。除了火山岩有利储层以外,一般来说,在营城组火山岩之上普遍发育有良好的泥岩盖层,如长深 2、4、6、7 高含 CO₂ 气藏火山岩之上均有 15m~20m 的泥岩作为良好的直接盖层。

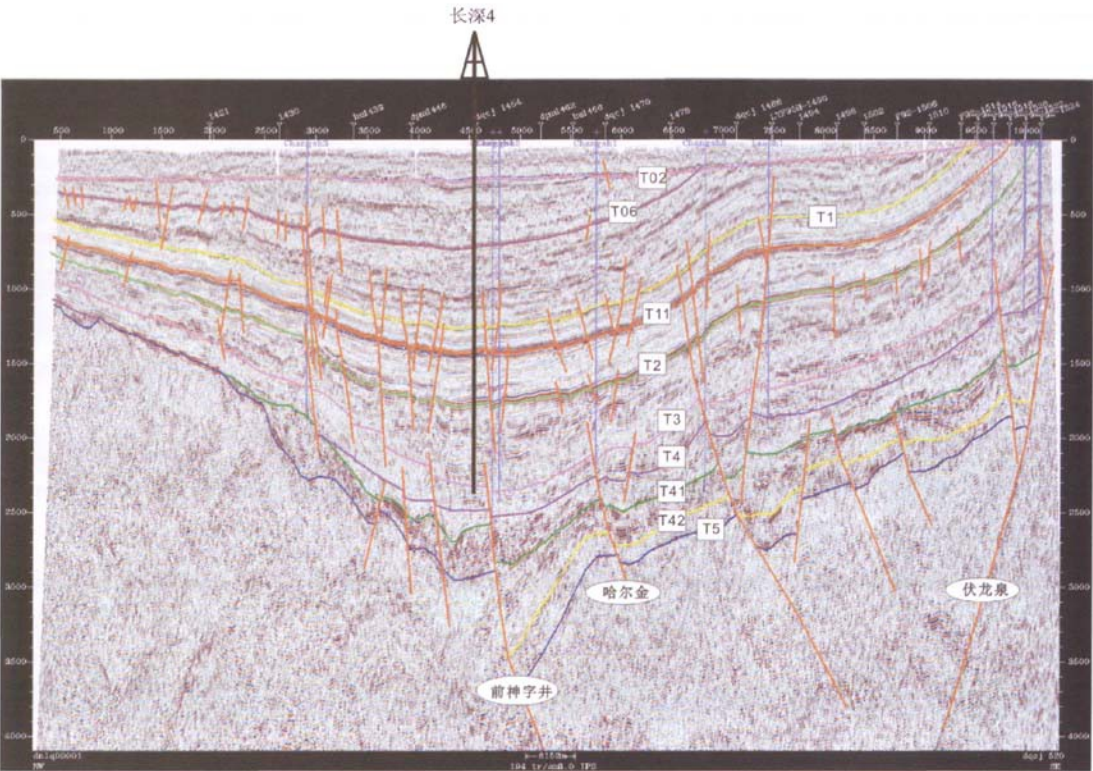


图8 长岭断陷长深4井CO₂气藏地震剖面

Fig. 8 Seismic cross section of Changshen 4 CO₂ gas pool at Changling fault depression

第三,火山活动与深大断裂具有成生关系,通常深大断裂活动伴随有强烈的火山喷发或侵入,新生代火山活动对于深部CO₂运移也起到决定性作用。目前松辽盆地已发现的几个新生代火山机构都分布在深大断裂的交汇带附近。

4 含CO₂火山岩气藏区带预测

CO₂富集区带的预测是难度很大的工作。之所以难,是因为CO₂往往与烃类气藏共享成藏要素,控制深层CO₂成藏的因素更为复杂。从深部气源和控陷深大断裂组合关系入手,结合已发现CO₂分布特征,确定松辽盆地新生代幔源玄武岩浆活动区,再结合基底大断裂的类型及分布、火山机构及火山岩分布、常规储层及圈闭分布,预测了5个CO₂的富集区带(图10)。总的来看,松辽盆地CO₂天然气具有点状、带状分布,局部富集的特点。

(1)徐家围子断陷CO₂点状富集区。该区围绕芳深9、徐深28、徐深19井存在3个局部CO₂富集区,有著名的昌德CO₂气藏。本区是地幔相对隆起的高热流区,发育徐西和徐中两条由南往北呈“S”型展布的基底断裂,营城组火山岩主

要沿徐西及徐中断裂分布,由南向北呈从老到新喷发,断陷南部局部见玄武岩,而断陷北部则主要发育玄武岩,火山机构众多,但个体规模不大。火山通道相的储层物性最好,深部CO₂沿火山口向上运移,在适宜的岩性圈闭中形成局部CO₂富集。

(2)林甸-常家围子-古龙断陷CO₂局部富集带。常家围子西缘4个火山岩体构成南北向CO₂富集带,古龙断陷深层英80井区以及林甸断陷的中南部预测为混合气富集区。本区位于松辽盆地地幔隆起带,即莫霍面上隆起区,为高热流区。常家围子-古龙断陷靠近孙吴-双辽断裂与滨州断裂的交叉部位,两条深大断裂一直处于活动期,为气源断裂;西部带由于烃源岩不发育,且靠近孙吴-双辽断裂,预测为CO₂富集区。

(3)长岭断陷西部CO₂局部富集带。长岭断陷西部深层CO₂在区域上沿控陷断裂带呈带状分布,已发现长深2、4、6井CO₂气藏和红岗CO₂气藏。长岭断陷西部斜坡带位于地幔上隆区,深部为孙吴-双辽深大断裂南延的大安深大断裂,内部有黑帝庙、前神字井等几条基底断裂,向下延伸地壳深部,沟通幔源气;沿断裂带地震解释发现10余处中基性



图9 长岭断陷营城组 CO₂ 与火山岩相分布

Fig.9 CO₂ wells and volcanic rock facie distribution of Yingcheng Formation at Changling fault depression

火山岩体,断裂附近裂缝发育,改善了火山岩的储集性能。控陷断裂陡坡带沙河子组烃源岩不太发育,相对来说 CO₂ 成藏条件较好,预测为 CO₂ 富集区。

(4)长岭断陷中部混合气富集带。指乾安断裂和哈尔金断裂所在的南北狭长带。已发现长深1气藏(长深1营城组气藏为以烃类气为主的混合气藏(CO₂含量20%左右),长深1登娄库组气藏为纯烃类气藏)和乾安富含 CO₂ 混合气藏。该区也位于地幔上隆区,基底大断裂发育,有数个大型火山岩体发育,储层主要是双重介质的流纹岩。中部地带也

是长岭断陷长期持续发育的古隆起区,加持在南部黑帝庙和北部乾安两个生烃之间,烃源岩条件优越,并有登娄库组下部10~40m稳定的泥岩盖层,早期烃类气成藏,晚期 CO₂ 充注,形成混合气富集区。

(5)德惠断陷 CO₂ 局部富集区。根据深大断裂分布特征,德惠断陷预测两个局部 CO₂ 富集区,万金塔和德深5井区。该区靠近深大断裂交汇带,也是地幔隆起区,存在一条切穿上地壳的大断裂(哈尔滨-四平断裂);预测万金塔构造深部存在岩浆底辟体,基底解释有中基性侵入体。万金塔

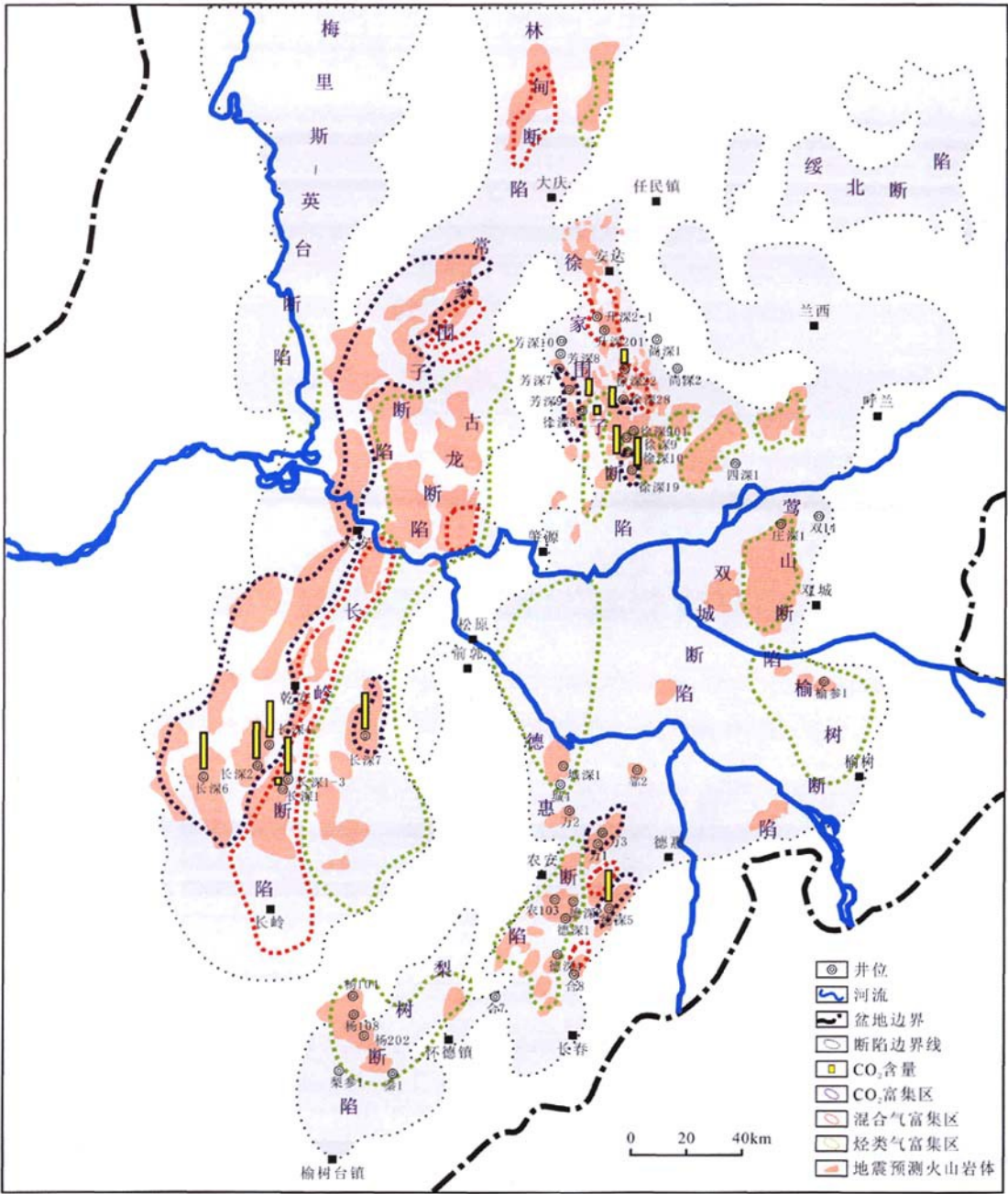


图 10 松辽盆地深层火山岩 CO₂-烃类气富集区分布预测图

Fig. 10 Prediction map of volcanic CO₂ gas pool and hydrocarbon gas pool distribution at deep level of Songliao basin

CO₂ 气藏位于农安-杨大城子走滑构造带上,为一被断层复杂化的北东向挤压斜,走滑大断裂在新生代的活导致了 CO₂ 气藏的形成。德深 5 气藏位于德惠断陷东部斜坡带上,气藏受德东基底大断裂控制,该基底大断裂是 CO₂ 气从深层幔源运移到营城组火山岩储层中的通道。

5 结论

松辽盆地特有的深部构造背景和裂谷演化特征,造成盆地内含 CO₂ 火山岩气藏的形成和富集。松辽裂谷盆地中新世代火山岩浆活动发育,总体上具有多期喷发、分布广泛和储集条件良好的特点。盆地高含量的二氧化碳为无机幔源成因,由青山口期和新生代幔源岩浆脱气形成。营城组火山岩盆内广布,构成深层有利储层。含 CO₂ 火山岩气藏的形成主要受深部构造背景、深大断裂和中新生代火山岩控制。已发现含 CO₂ 火山岩气藏主要分布于古中央隆起带及其两侧断陷的营城组火山岩中,具有点状、带状分布,局部富集的特点。根据主控因素分析,预测了 5 个 CO₂ 富集区带。

致谢 米敬奎、柳少波、刘文龙、单玄龙、付晓飞、陈恭洋、钟大康、毕海滨、袁自学、闫伟鹏等参加了相关研究工作,汪凯明清绘了部分图件,对他们的支持表示感谢;责任编辑及匿名审阅人对本文提出的修改意见使作者受益匪浅,一并致谢。

References

- Dai JX, Song Y, Dai CS *et al.* 1995. Inorganic Gas and Its Reservoir Forming Conditions in Eastern China. Beijing: Science Press, 92 - 102 (in Chinese)
- Du LT. 1996. Geochemistry of Mantle Fluids and Asthenosphere (Asthenolites). Beijing: Geological Publishing House, 1 - 466 (in Chinese)
- Du LT. 2006. The five gas-spheres of the earth and natural gas exploitation from middle crust. *Natural Gas Geoscience*, 17(1): 25 - 30 (in Chinese with English abstract)
- Fu XF and Song Y. 2005. Inorganic gas and its resource in Songliao basin. *Acta Petroli Sinica*, 26(4): 23 - 28 (in Chinese with English abstract)
- Guo ZQ, Wang LS, Liu L *et al.* 2006. The research of the origin of carbon dioxide in associated gas of Daqing placanticline. *Natural Gas Geoscience*, 17(1): 48 - 54 (in Chinese with English abstract)
- Hou QJ, Zhao ZK, Wang LW *et al.* 2009. Discussion of the particularity of deep natural gas enrichment conditions in Songliao basin. *Journal of Deep Petroleum Institute*, 33(2): 31 - 35, 67 (in Chinese with English abstract)
- Huo QL, Yang BZ and Fu L. 1998. Genesis of natural gas of eastern Changde gas pool in northern Songliao basin. *Petroleum Exploration and Development*, 25(4): 17 - 19 (in Chinese with English abstract)
- Huo QL, Fu L and Wang X. 2004. Origin and distribution of CO₂ and He in northern Songliao basin. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 23(4): 1 - 4 (in Chinese with English abstract)
- Liu DL, Li ZS, Sun Y *et al.* 2006. Degassing parameter of carbon dioxide in volcanic rocks in the northern Songliao basin and its significance in forecasting geological resource of carbon dioxide. *Geological Journal of China Universities*, 12(2): 223 - 227 (in Chinese with English abstract)
- Liu WZ, Wang PJ, Men GT *et al.* 2003. Characteristics of deep volcanic reservoirs in the northern Songliao basin. *Oil & Gas Geology*, 24(1): 28 - 31 (in Chinese with English abstract)
- Lu XS, Song Y, Liu SB *et al.* 2008. Progress in the studies of mantle-derived CO₂ degassing mechanism, degassing model and pool-forming mechanism. *Earth Science Frontiers*, 15(6): 293 - 302 (in Chinese with English abstract)
- McKirdy DM and Chivas AR. 1992. Nonbiodegraded aromatic condensate associated with volcanic supercritical carbon dioxide, Otway Basin: Implications for primary migration from terrestrial organic matter. *Organic Geochemistry*, 18(5): 611 - 627
- Mi JK, Zhang SC, Tao SZ *et al.* 2008. Genesis and accumulation period of the CO₂ in Changling fault depression of Songliao basin, northeastern China. *Natural Gas Geoscience*, 19(4): 452 - 456 (in Chinese with English abstract)
- Shao ML, Men JH and Wei ZP. 2000. The genesis type and enrichment condition of the CO₂ in the southern part of Songliao basin. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 19(4): 1 - 3 (in Chinese with English abstract)
- Taylor SR and McLennan SM. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Rev. Geophys.*, 33(2): 241 - 265
- Tan Y, Zhang CM and Liu DL. 2005. Geochemical criterion of CO₂ origin of Changdedong gas deposit in north of Songliao basin. *Offshore Oil*, 25(3): 18 - 22 (in Chinese with English abstract)
- Wang L, Wang KY, Ge WC *et al.* 2008. Methane fluid inclusions in deep level volcanic reservoir rocks in Songliao basin: Characteristics of occurrence and geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 24(9): 2171 - 2178 (in Chinese with English abstract)
- Wang PJ, Chi YL, Liu WZ *et al.* 2003. Volcanic facies of the Songliao basin: Classification, characteristics and reservoir significance. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 33(4): 449 - 456 (in Chinese with English abstract)
- Wei LC, Lu XS, Song Y *et al.* 2009. Formation and pool-forming model of CO₂ gas pool in eastern Changde area, Songliao basin. *Petroleum Exploration and Development*, 36(2): 174 - 180 (in Chinese with English abstract)
- Wycherley H, Fleet A and Shaw H. 1999. Some observations on the origins of large volumes of carbon dioxide accumulations in sedimentary basins. *Marine and Petroleum Geology*, 16(6): 489 - 494
- Yang SL, Liu WZ, Yu SQ *et al.* 2007. Pore textures and its causes of volcanic reservoir in Songliao basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 37(3): 506 - 512 (in Chinese with English abstract)
- Yang XY, Liu DL and Tao SZ. 1999. Compositions and implications of inclusions in the typical mantle rocks from East China. *Acta Petroli Sinica*, 20(1): 19 - 23 (in Chinese with English abstract)
- Zhu YN. 1997. Significance of studying CO₂ geology and the global distributive feature of high CO₂-bearing gas. *Advances in Earth Science*, 12(1): 26 - 31 (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形成条件. 北京: 科学出版社: 92 - 102
- 杜乐天. 1996. 地幔流体与软流层(体)地球化学. 北京: 地质出版社: 1 - 466
- 杜乐天. 2006. 地球的五个气圈与中地壳天然气开发. 天然气地球科学, 17(1): 25 - 30
- 付晓飞, 宋岩. 2005. 松辽盆地无机成因气及气源模式. 石油学报, 26(4): 23 - 28

- 郭占谦,王连生,刘立等. 2006. 大庆长垣伴生气中二氧化碳的成因研究. 天然气地球科学, 17(1): 48-54
- 侯启军,赵志魁,王立武等. 2009. 松辽盆地深层天然气富集条件的特殊性. 大庆石油学院学报, 33(2): 31-35, 67
- 霍秋立,杨步增,付丽. 1998. 松辽盆地北部昌德东气藏天然气成因. 石油勘探与开发, 25(4): 17-19
- 霍秋立,付丽,王雪. 2004. 松辽盆地北部 CO₂ 及 He 气成因与分布. 大庆石油地质与开发, 23(4): 1-4
- 刘德良,李振生,孙岩等. 2006. 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. 高校地质学报, 12(2): 223-227
- 刘万洙,王璞珺,门广田等. 2003. 松辽盆地北部深层火山岩储层特征. 石油与天然气地质, 24(1): 88-91
- 鲁雪松,宋岩,柳少波等. 2008. 幔源 CO₂ 释出机理、脱气模式及成藏机制研究进展. 地学前缘, 15(6): 293-302
- 米敬奎,张水昌,陶士振等. 2008. 松辽盆地南部长岭断陷 CO₂ 成因与成藏期研究. 天然气地球科学, 19(4): 452-456
- 邵明礼,门吉华,魏志平. 2000. 松辽盆地南部二氧化碳成因类型及富集条件初探. 大庆石油地质与开发, 19(4): 1-3
- 谈迎,张长木,刘德良. 2005. 松辽盆地北部昌德东气藏 CO₂ 成因的地球化学判据. 海洋石油, 25(3): 18-22
- 王力,王可勇,葛文春等. 2008. 松辽盆地深层火山岩储层中的 CH₄ 包裹体: 产状特征及其地质意义. 岩石学报, 24(9): 2171-2178
- 王璞珺,迟元林,刘万洙等. 2003. 松辽盆地火山岩相: 类型、特征和储层意义. 吉林大学学报(地球科学版), 33(4): 449-456
- 魏立春,鲁雪松,宋岩等. 2009. 松辽盆地昌德东 CO₂ 气藏形成机制及成藏模式. 石油勘探与开发, 36(2): 174-180
- 杨双玲,刘万洙,于世泉等. 2007. 松辽盆地火山岩储层储集空间特征及其成因. 吉林大学学报(地球科学版), 37(3): 506-512
- 杨晓勇,刘德良,陶士振. 1999. 中国东部典型地幔岩中包裹体成分研究及意义. 石油学报, 20(1): 19-23
- 朱岳年. 1997. 二氧化碳地质研究的意义及全球富含二氧化碳天然气的分布特点. 地球科学进展, 12(1): 26-31