

幔源 CO₂ 演化及 CO₂ 气成藏实例分析

申宝剑^{1,2} 秦建中² 胡文瑄¹ 黄智龙³

(1. 南京大学地球科学系, 江苏 南京 210093; 2. 中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214151; 3. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002)

摘要:幔源 CO₂ 是当今地球科学研究中的前沿领域之一, 具有重要的研究价值。处于超临界态的地幔流体具有很强的溶解和扩散能力, 是地球内部能量与物质向外传输的重要载体。地幔流体中的挥发分以 H₂O 和 CO₂ 为主, 全球许多 CO₂ 气藏中的气体具有幔源特征, 与地幔流体密切相关, 但地幔流体与 CO₂ 气藏之间的关系研究则显得不够。本文分析了地幔流体的组成、性质与影响因素, 结合济阳拗陷断裂构造、岩浆发育特征, 阐述地幔流体上升和演化过程, 认为地幔流体中溶解各种形式 CO₂ 气为气藏形成提供物质来源, 断裂活动则为岩浆上侵和气体的运移、聚集提供了通道和空间。CO₂ 气藏勘探的有利区块应该不仅仅局限于拗陷内, 在拗陷边缘或者外部, 新生代晚期的碱性岩浆侵入活动, 不同方向断裂发育交汇地区均是气藏勘探的有利地区。

关键词:幔源 CO₂; 超临界流体; 岩浆脱气; 断裂; CO₂ 气藏

中图分类号: P618.130.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2010)02-0495-13

地幔中存在大量的 C, 主要以 CO₂ 形式存在^[1], 地球圈层形成至今, 地幔物质一直持续不断地将其中所含的不相容组分, 包括 CO₂、H₂、H₂O、N₂、CH₄ 等通过地幔热柱上涌或扩散渗流不断地向上运移^[2], 由此产生地幔流体。地幔流体几乎影响了整个地球演化的历史^[3], 是壳幔相互作用过程中最为活跃的因素, 其参与不同金属矿床的成矿作用, 在大型矿集区以及大型、超大型矿床的成矿作用过程中都有地幔流体的参与^[4-5]。地幔流体存在着大量的富 CO₂ 流体^[6-7], 世界上已发现的高纯度 CO₂ 气藏大多分布在现代火山活动地带, 仅在中国东部盆地和大陆架上就发现了 29 个 CO₂ 气藏, 其中大多数气藏中 CO₂ 含量超过 90%, 有的甚至达到 99% 以上。许多学者通过气体同位素地球化学、包裹体特征或直接在火山口测量等手段对 CO₂ 的成因进行了分析, 国内外研究^[8-12]表明: 大多数 CO₂ 气藏与地幔流体活动有直接或间接的关系^[13]。

众多学者对 CO₂ 气藏的研究主要集中在成因

方面^[9-10, 14-15], 但对 CO₂ 来源、幔源 CO₂ 气上升演化、脱气富集过程及与 CO₂ 气藏的形成关系等方面的综合研究较少。本文在分析地幔流体挥发分组成、物理化学特性、上升运移聚集特征的基础上, 以济阳拗陷为例, 研究深大断裂、火成岩分布与 CO₂ 气藏的关系, 深入探讨济阳拗陷断裂活动与岩浆活动对幔源 CO₂ 气成藏的影响, 总结 CO₂ 气藏形成条件、富集规律, 对 CO₂ 气藏的勘探将有一定借鉴意义。

1 无机 CO₂ 来源

无机成因 CO₂ 主要为地幔脱气作用形成的幔源 CO₂^[16-17], 同时还有地壳岩石化学反应、碳酸盐岩受热分解等成因 CO₂^[18-19], 世界上许多高纯度 CO₂ 主要来源于地幔流体上升过程中脱气产生的 CO₂, 因此本文重点讨论地幔岩浆脱气来源的 CO₂。地幔流体是富含挥发分的高温和高压岩浆流体, 沿地壳张性深大断裂或裂谷, 在较高温度和氧逸度以及较小压力的热力学条件下, 地幔流体上涌发生脱气作

收稿日期: 2009-08-01; 改回日期: 2009-09-21

基金项目: 中国石油化工集团科技部 2007 年基础性前瞻年度研究项目(070902)资助。

作者简介: 申宝剑, 男, 1978 生, 博士, 工程师, 主要从事天然气及烃源岩地球化学研究; E-mail: Shenbaoj@163.com。

用,脱气主要成分是 CO_2 ^[20]。目前,地幔流体中挥发分组成主要通过3个方面进行研究:一是对现代火山喷出气体的研究,国内外一直不间断地对火山喷出的气体和流体进行监测^[21-24],现代火山气体组分证实其中含有大量的 H_2O 、 CO_2 、 SO_2 及一些烃类气体、 H_2 、稀有气体等, CO_2 气含量为 2.1%~40.9%;二是火山岩中流体包裹体的研究,火山岩包裹体提供岩浆系统喷发前的挥发分组成^[25],为结晶过程中气体成分逃逸提供证据,并可以用于岩浆放气的近似估计^[26-28]。许多幔源矿物的流体包裹体资料表明地幔存在 C-H-O 流体相^[29-32],主要为 H_2O 、 CO_2 、 H_2 、 H_2S 及一些稀有气体等^[33],包裹体气相组分中, CO_2 含量均在 80%以上,起源于地球深部的岩浆喷出地表快速冷凝形成的火山岩玻璃包裹体中也含有大量的 CO_2 ,火山岩玻璃包裹体中 CO_2 占气相组分的 43.1%~56.3%,这也间接地证实了地幔流体中存在大量的 CO_2 ;三是火山岩热解所释放出的气体,火山岩矿物裂隙中的气体、吸附的气体以 CO_2 为主, CO_2 气藏发育地区火山岩中平均赋存约 1%的吸附 CO_2 气,表明在广大火山岩分布地区存在有巨大的 CO_2 气气源,完全可以将幔源流体中 CO_2 作为无机成因气源来考虑^[34]。综上所述,幔源流体中含有大量 CO_2 。地幔中富含 CO_2 的流体主要通过两个途径形成:(1)地幔脱气。地幔本身也含有大量气体,世界各地的 65 个尖晶石二辉橄榄岩样品分析结果表明,其碳含量为 15×10^{-6} ,其中以 CO_2 形式存在的碳占大部分;Trull 等^[35]估算地幔的碳含量为 $(50 \sim 250) \times 10^{-6}$,因此,地幔是一个大的 CO_2 储库。(2)洋壳俯冲作用是地幔深部流体的重要来源,Hay 等^[35]估算: H_2O 和 CO_2 可分别占深海沉积物总量的 5%和 12%,其中以碳酸盐形式存在的碳为 14.16×10^{15} t,非碳酸盐形式的碳含量为 6×10^{15} t。后者主要以碳氢化合物的形式存在,这些深海物质进入地幔后将提供大量的 CO_2 。

2 地幔流体性质及上升演化过程

2.1 地幔流体性质及控制因素

Shmulovich^[36]认为地幔流体严格的物理化学定义为:富含地球内部原始成分,同时包含地壳再循环物质的超临界挥发分系统。地幔流体性质决定了它具有独特的溶解特性,因而是地球内部能量和质量传输最活跃的组分^[37]。地幔流体中的超临界水的介

电常数大致相当于标准状况下一般有机溶剂的值,此时的水难以屏蔽掉离子间的静电势能,溶解的离子便以离子对形式出现,超临界水更近似于非极性有机化合物^[38],能溶解大量的 CO_2 及烃类气体,同时超临界 CO_2 的温度和压力要比超临界水小很多,这就决定了超临界 CO_2 可以在地球深部地质过程更宽的温压范围内存在^[3],大量的超临界 CO_2 流体对气藏的形成具有很重要的作用,为 CO_2 气藏形成提供能量和物质基础。超临界水的粘度低,扩散性高,表面张力为零,故超临界流体向固体内部细孔中的渗透能力非常强。因此,向上运移的超临界流体极易与通道围岩发生相互作用,形成各种次生溶孔,促进 CO_2 气运移。溶有大量 CO_2 与烃类物质的超临界流体向上运移,若遇到吸附性强的地层或由于温度压强条件的改变使流体溶解、扩散、传滞性有所改变时,流体就会滞留,滞留的 CO_2 若遇到有利的圈闭条件,就会聚集成藏^[39]。

地幔流体明显受构造环境、地幔演化历史和再循环地壳组分等多种因素的控制,但其根本控制因素是氧逸度。Ballhaus^[40]指出,氧逸度(f_{O_2})决定了地幔流体的组分种类及相对比例。当氧逸度较高,地幔流体种类主要为 H_2O 和 CO_2 ;当氧逸度较低时,地幔流体种类主要为 H_2O 和 CH_4 。Matveev 等^[41]的实验结果(表 1)表明:随着氧逸度的降低,流体挥发分组成中 CO_2 和 H_2O 含量减少,而 CH_4 、 H_2 、 C_2H_6 含量增加。

氧逸度与地质构造环境有关,地幔流体挥发份组成地质环境的不同而有所差异。张鸿翔等^[42]对不同构造环境地幔捕房体中流体的研究,探讨了氧逸度与流体挥发份组成关系,并总结出地质构造环境与流体挥发份组成之间的对应关系(表 2)。众多研究表明,地

表 1 地幔流体成分(%)与氧逸度(f_{O_2})的关系^[41]
Table 1 Relationship between mantle fluids and oxygen fugacity

f_{O_2} 范围	CO_2	CH_4	C_2H_6	H_2	H_2O
$\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$	6.2	0.3	0	0	93.5
H_2O 极大值	2.2	2.3	0	0.3	95
$\text{H}_2\text{O}-\text{CH}_4$	0	22.6	0.4	1.6	75.3
$\text{CH}_4-\text{H}_2-\text{H}_2\text{O}$	0	65.4	1.5	3.7	29.3
Fe-FeO	0	81	1.9	5.4	11.7
SiC-SiO ₂ -C	0	91.9	1.9	5.9	0.3

表 2 地质构造环境对地幔流体成分的控制^[42]

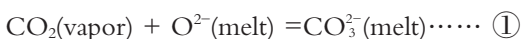
Table 2 Control of geological structure setting over mantle fluid composition

地质构造环境		f _{O₂} (相对于 FMQ,对数单位)	地幔流体成分
大陆岩石圈	大陆伸展带	-1.5~0	CO ₂ 为主,含 H ₂ O+CO ₂ 混合组分
	俯冲带	0~1.5	含 H ₂ O+CO ₂ 混合组分
大洋岩石圈	普通软流圈	-0.9~-1.28	含 H ₂ O+CO ₂ 混合组分
地幔热柱		<-2.64	含 H ₂ O+CO ₂ 混合组分,含 CH ₄ +CO

幔氧逸度在时间与空间上存在不均一性^[40,43-45]。纵向上,地幔软流圈内的氧逸度随深度增加而降低,大陆岩石圈平均氧逸度要比其之下的软流圈高约一个常用对数单位。横向上,俯冲板块附近的地幔氧逸度最高,大洋地幔比大陆地幔具有更高的氧逸度。火山活动的不同地区、不同时期以及不同类型、源自不同深度的火山其伴随的流体类型和含量变化较大;高温火山熔浆及热泉中氢气和甲烷含量较高,随温度降低其含量骤减而二氧化碳和水蒸气的含量迅增。地幔流体的气相组成除受氧逸度、构造环境影响外,再循环地壳组分对地幔流体的影响也不容忽视。张铭杰等^[46]总结了再循环地壳组分对地幔流体气相组分、稳定同位素和稀有气体含量的影响。

2.2 地幔流体中 CO₂ 溶解度

分析 CO₂ 在不同温度压力下在岩浆中的溶解度,可以了解有关岩浆中 CO₂ 含量的上限,以便探讨岩浆在上升过程中的去气行为。对大量的不同成分岩浆岩包裹体分析表明,无论是基性还是酸性岩浆中的挥发组分均以 H₂O 和 CO₂ 为主^[29-30,47]。不同的岩浆由于其形成于地幔的不同部位和不同的地球化学过程,CO₂ 含量具有明显区别。实验表明,超基性与基性岩浆中 CO₂ 含量比酸性岩浆高^[48]。深度小于 80 km 的地幔中自由流体相以富 CO₂ 为特征^[49]。一定的温压条件下 CO₂ 分子以 CO₃²⁻形式存在,具体反应的方程式为^[50]:



不同的岩浆中 CO₂ 存在的相态不同,在酸性岩浆中主要以 CO₂ 分子形态存在,碱性岩浆中存在过剩的碱金属自由离子,有利于形成较高的 CO₃²⁻/CO₂ 比值,而且其溶解度随压力增高而增大。因此,地幔熔融过程中压力越大,融于岩浆中的 CO₂ 的量就大,因而碱性岩浆中以 CO₃²⁻与 CO₂ 共存^[48,51],且主要是以 CO₃²⁻的形式存在。地幔流体随岩浆喷发及

侵入过程中随温度压力降低,这些融解的 CO₃²⁻将转变为分子形式 CO₂ 并从岩浆中析出^[52]。由于各种挥发分在岩浆中的溶解度是不同的,CO₂ 在岩浆熔体中溶解度最小^[53],当岩浆在上升过程中最先排出的挥发分几乎为纯的 CO₂^[54-56]。岩浆中有少量的水将大大提高 CO₂ 的溶解度^[57-58]。1300~1500°C,1.0 GPa 压力条件下,CO₂ 在玄武岩浆中的溶解度为 0.70 (Wt%);压力增加至 2.0 GPa,CO₂ 在玄武岩浆中的溶解度为 1.65(Wt%)^[59];还有研究认为 CO₂ 在最初岛弧玄武岩岩浆中的范围为 0.6~1.3(Wt%)^[60],相同条件下,岩浆中少量的水有利于溶解更多 CO₂,压力越大溶解度越大。就岩浆性质来讲,碱性岩浆比酸性与中性岩浆 CO₂ 溶解度大。

2.3 地幔流体的上升和演化

幔源岩浆活动伴随地幔流体活动,因而地幔流体脱气成藏作用往往伴随幔源岩浆活动,因此岩浆为研究地幔流体上升和演化机制提供了较为成熟的对象,按传统动力学观点及交代现象,可将地幔流体(或熔体/流体)的迁移划分为渗滤机制和扩散机制^[61]。地幔流体的运移途径为颗粒边界流动、孔隙渗透、沿深大断裂向上运移和沿自身的水压破裂向上运移^[62]。

根据高温高压下 CO₂ 气体在水中的溶解度实验结合不同温度下测得的火山气体和热泉气体的平均成分分析,作如下推测:在地壳深处,CO₂ 与灼热的岩浆相混溶,与岩浆一起运动。随着岩浆上升,温度、压力下降,一部分 CO₂ 从溶解状态中解析出来成为游离相,此时 CO₂ 的释放速度和释放量很小,CO₂ 可能以孤立的气泡形式发生运移;随着温、压的进一步降低,CO₂ 的释放速度和量逐渐增大,成为串珠状;只是到了地壳浅层处,更多的释放出的 CO₂ 可汇成一股股的气流,人们在地表看到的 CO₂ 喷泉就是例证^[63]。在构造活动强烈时期,由于断裂的发育沟通了地表与地下岩浆房的通道,未脱气的地幔是高温、高压和富含挥发分的岩浆熔体,其粘度

小,易于流动,它们会通过岩浆活动向上移动,在岩石圈薄弱区上拱形成地幔隆,或上涌进入中地壳形成岩浆房。当未脱气岩浆上涌进入岩浆房后,由于压力的降低使得挥发组分迅速分异,CO₂以游离态形式从岩浆中排出。在构造稳定期断层也可能处于封闭状态,深部气体不能继续沿断裂的面状通道向上运移,岩浆挥发分通过岩浆冷凝过程中形成较发育的节理和孔隙进行运移,此时,充填在火山通道中的火成岩中发育的裂缝系统,就可以充当气体继续上移的通道。气体的释放是一个缓慢过程,只要有足够的气源,它总能沿构造薄弱地带逐渐释放出来。

3 渤海湾盆地济阳拗陷实例分析

济阳拗陷的形成演化和深部构造的发育特征为无机成因 CO₂ 气藏创造了有利的地质背景条件^[64]。中新世以来多期的岩浆火山活动也反映了深部物质有不断向浅部释放的客观存在^[65]。幔源物质侵入中上地壳形成岩浆房储气库,地幔的上隆侵入造成了幔、壳物质的熔融并导致了不同性质岩浆的形成,岩浆脱气作用是无机成因天然气形成的主要方式。因此,幔源物质和岩浆房是无机成因 CO₂ 气藏的源岩。深大断裂沟通地球深部与浅部成为 CO₂ 气向上运移的通道^[66],断裂控制幔源成因 CO₂ 气藏的分布,但并非所有的断裂均能发现无机成因 CO₂ 气藏。只有与深部气源相连的断层附近才有可能存在无机成因天然气。而与深部气源直接相连的断层往往是壳断裂(与壳内岩浆房相通)和岩石圈大断裂(直接与软流圈勾通),除了与气源直接相连的气源断裂外,与气源间接相连的基底断裂、控陷断裂以及网状拆离断层都是无机成因天然气向上运移的通道,如有合适的圈闭条件则成为无机 CO₂ 气藏发育的有利地区。本文以 CO₂ 气较发育的济阳拗陷为例,进一步探讨 CO₂ 气藏与岩浆活动特别是岩浆作用的方式及火山岩种类之间的关系,同时说明断裂活动对气藏的影响。

3.1 济阳拗陷火山活动发育特征及与 CO₂ 气藏关系

济阳拗陷中新世均有火山岩发育,火山活动从早到晚有变弱的趋势。其中生代火山岩主要发育于中侏罗世和早白垩世,分布于阳信、高青、东营凹陷东部及沾化凹陷东部。新生代火山岩主要发育在中部地区,古近纪发育较厚的新生代火山岩,新近纪和第四纪地层中可见多层火山岩夹层,主要分布在

金家—草桥火成岩带、临邑—滨县火成岩带、无棣—义南火成岩带。火山岩沿构造伸展方向展布。新生代火山岩在济阳拗陷叠合面积大于 2850 km²,占济阳拗陷区陆地部分总面积的 11%,平均厚度约 100 m^[67]。全盆地范围内玄武岩基本上为碱性玄武岩,少量为亚碱性玄武岩^[68],古近纪是火山活动最强的时期。CO₂ 气田聚集的地区(阳信、平方王、平南、高青、花沟地区)主要在新生代岩浆活动的区域。并非所有类型岩浆活动都有 CO₂ 气藏的分布,CO₂ 气藏的聚集对火山岩种类、岩浆作用的方式及时代具有选择性。

济阳拗陷新生代火山活动的产物以碱性岩浆为主更有利于气藏的发育。赫英等^[69]对济阳拗陷火成岩研究结果表明:橄榄拉斑玄武岩浆初始熔体含有 0.70(wt%)左右的 CO₂,而碱性橄榄玄武岩浆初始熔体可能含有 1.65(wt%)左右的 CO₂,碱性岩浆中溶有大量 CO₂ 气体。因此,碱性橄榄玄武岩具有较有利的气源条件。基性岩浆活动较有利于 CO₂ 的迁移。伴随着地幔流体的上升演化,CO₂ 不断从岩浆中出溶上移,在合适的构造部位聚集成藏。

岩浆作用的方式主要有喷发与侵入两种,均有 CO₂ 气体的释放,而溢流相以及爆发相中 CO₂ 大部分是在地表释放,对成藏不利。岩浆侵入通过扩散作用释放气体的量更大,是主要的脱气方式^[70]。根据岩浆侵入深度不同分为浅成侵入和深成侵入。浅成侵入相及次火山岩相中 CO₂ 的释放一般是在 <3 km 的深度范围内进行的。由于岩浆结晶速度较缓慢,二氧化碳释放的速度要比火山岩浆结晶速度缓慢,二氧化碳释放的速度要比火山通道相及溢流相中慢得多,释放的气体沿岩体周围的裂隙或断层运移到有利的成藏位置而聚集成藏。世界上的一些火山活动强烈的地区(如欧洲的 Etna、Somma-Vesuvius volcano、美国中东部的加利福尼亚 Mammosse 火山与黄石地区)都是以浅层侵入扩散作用释放 CO₂ 气体^[71-74]为主。对济阳拗陷火山岩分布与气藏的关系研究也可以得出这样的结论,CO₂ 气藏与侵入岩的分布呈很好的对应关系(图 1)。济阳拗陷 CO₂ 气藏大都埋深在 2000 m 左右,也间接证明这一点。对深成侵入岩来说,尽管其中气体的释放更为缓慢,但所释放的 CO₂ 等气体会逐渐和岩体以及围岩发生反应,使岩石发生蚀变而消耗,因此除非在此过程中有深断裂沟通了气源,否则深成侵入岩对气藏的贡献是很低的。气体的释放并不仅仅在岩浆喷发的过程中进行的,在岩浆喷

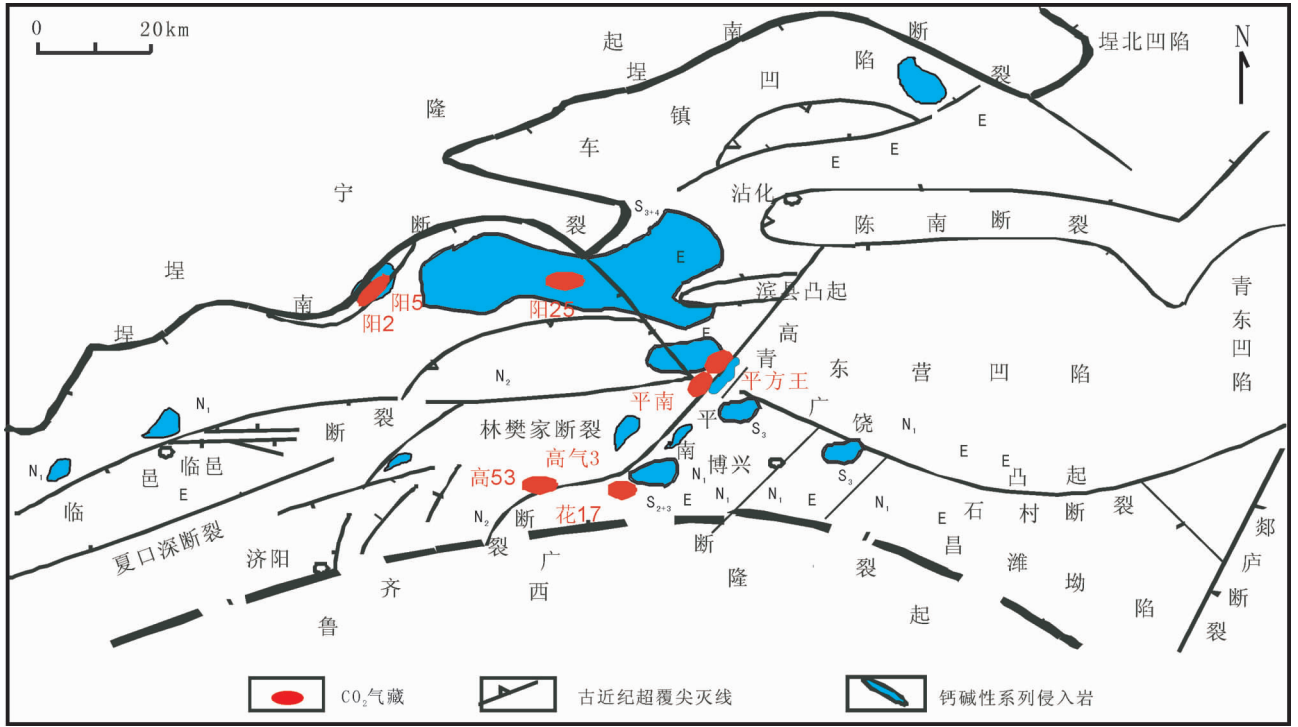


图 1 济阳拗陷新生代侵入岩及无机 CO₂ 气藏分布图

Fig.1 Distribution of Cenozoic intrusive rocks and CO₂ gas reservoirs in Jiyang depression

发以后沿火山口仍然有长时间的气体的逸出，另一方面，封存在火山岩气孔中的气体也会逐渐从岩中释放出来，高青气藏的形成可能是气体沿火山口通过断裂运移而聚集成藏。

济阳拗陷在中生代到新生代期间发育多期岩浆活动，虽然一次岩浆活动带来一次成藏机会，研究表明中生代火山岩在济阳拗陷南北均有分布，与二氧化碳气藏关系不大(图 2)，每次岩浆活动虽然有 CO₂ 气释放但不一定都能形成气藏，只有在圈闭形成后或与其同时期的岩浆活动才能形成 CO₂ 气藏。现有的 CO₂ 气藏都是以沙河街组(E₃)或以上地层为盖层的，因此，对 CO₂ 成藏起作用的火山活动，应是新近纪晚期及其以后的火山岩浆活动^[7]。新生代中晚期(E_{s3}以后)火山岩和侵入岩岩脉，尤其新近纪馆陶期和明化镇期的火山岩均分布在济阳拗陷南部的惠民凹陷和东营凹陷西部，该区恰恰是二氧化碳气藏(田)的富集区(图 2)。从火成岩分布与 CO₂ 气田的分布关系分析，两者相关性也很强。如阳 2、阳 25 气藏和高 53 气藏等在空间上都和火成岩直接相关，都分布于火成岩发育区，花沟—高青气田 CO₂ 气藏正处于青城凸起西部发育的上新世—中新世玄武岩分布

区内。以阳信洼陷为例：受古近纪—新近纪构造演化影响，阳信洼陷古近世—新近世的沙四期到馆陶期都有火山活动。大部分厚度在 300~400 m 以上，个别地区的火成岩厚度在 1000 m 以上。始新统沙四、沙三段火成岩相对富集，沙三、沙四段沉积期是火山活动相对强烈时期，导致该段地层喷发岩发育，侵入岩相对较少，中新世馆陶期岩浆活动减弱，主要以侵入岩为主。岩浆岩由亚碱性岩类变化为碱性岩类^[76]。郭栋等^[77]研究表明：阳信地区阳 25 井气藏中的 CO₂ 气与玄武岩中的 CO₂ 不具有“亲缘性”，气藏中的 CO₂ 气主要来自于侵入相的岩浆脱气。古近纪火山岩主要受北西向、北东向和近东西向断裂的控制，与 CO₂ 气藏关系不大(图 2)。

新生代火山岩活动从古近纪到第四纪均有活动，但火山活动有从早到晚变弱的趋势。一期岩浆活动作为一次成气期，但晚期岩浆活动更容易形成 CO₂ 气藏。原因如下：①晚期岩浆活动以侵入为主，岩浆侵入更有利于 CO₂ 气体释放；②晚期岩浆活动(始新世沙三期以后)的岩浆岩的岩性发生了重大的转变，岩石全面进入碱性岩发育时期，碱性岩浆中 CO₂ 的含量较高，更容易聚集成藏；③晚期岩浆活

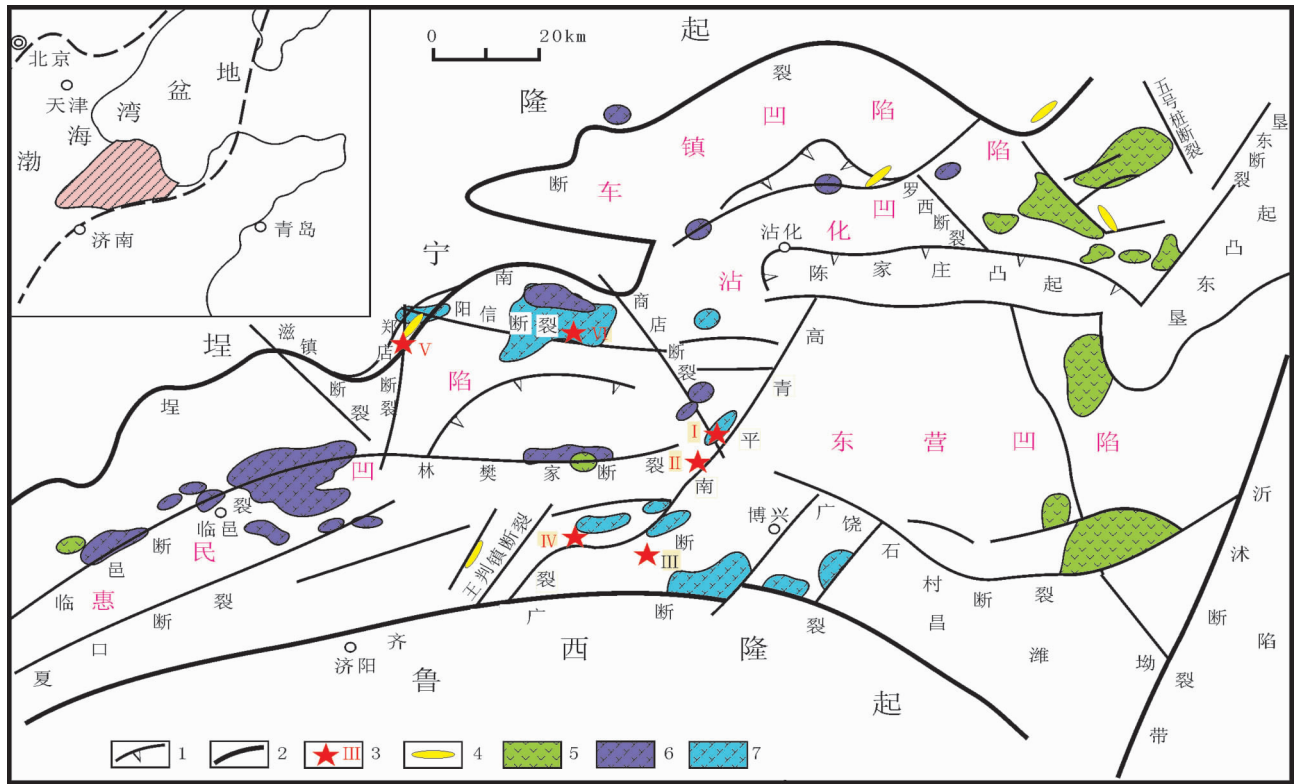


图2 济阳坳陷火山岩与无机成因气藏分布图

1—古近纪超覆尖灭线; 2—断裂; 3—CO₂气藏; 4—时代不明侵入岩; 5—中生代火山岩; 6—古近纪火山岩; 7—新近纪火山岩

Fig.2 Geological map showing volcanic rocks and distribution of CO₂ gas reservoirs in Jiyang depression

1—Paleogene overlap pinch-out line; 2—Fault; 3—CO₂ gas pool; 4—Unknown age intrusive; 5—Mesozoic volcanic rock;

6—Paleogene volcanic rock; 7—Neogene volcanic rock

动受后期强烈构造影响小,容易形成区域性储层及盖层,早期岩浆活动即使形成一些CO₂气藏,但由于储层条件和盖层条件的限制以及后期构造的破坏,CO₂很难保存。

3.2 济阳坳陷断裂活动为CO₂气藏提供运移通道

CO₂气藏与断裂分布具有很强的相关性(图3)。高青和花沟地区CO₂气田位于高青—平南基底断裂与郑店青城基底深大断裂的交汇处;平方王、平南气田与高青—平南基底断裂相邻,并且与林樊家、商店、商店东基底断裂与高青—平南断裂交汇部位很近;阳2、阳5气藏位于阳信基底深大断裂与八里泊基底断裂的交汇部位;阳25气藏在商店南与商店基底断裂交汇之处;花17井气藏可能与齐广基底深大断裂有关。

戴金星等^[14]研究发现,CO₂的生成、运移、聚集和保存等整个成藏过程均受气源断裂体系控制^[10]。根据已知的与CO₂气藏有关的深大断裂组合特征,

深大断裂对CO₂气藏的控制有两种情况:一种是深大断裂直接导气,CO₂气从深部上来直接沿深大断裂向上运移,然后把CO₂气分配到有利的储集空间中。如高青—平南断裂对CO₂气藏的控制作用主要是属于这一情况(图4)。另一种情况是CO₂气沿深大断裂上升后入侵下地壳,在下地壳构成幔源岩浆垫和幔源岩浆气初始聚集区,然后再通过与深大断裂相连的次级断层运移,将CO₂气运移到储集层中,成为幔源岩浆CO₂第二个主要来源。如阳信西部阳2、阳5气藏区,CO₂气通过阳信断裂向上运移,然后通过阳信断层的分支断层或配套断层向上运移,并在有利的储层中聚集集成藏(图5)。

从以上分析可以看出,在空间上,并不是所有的断裂都会有CO₂气藏的聚集,气藏的分布明显受深大断裂控制,济阳坳陷CO₂气藏几乎都处于NE与NW向深大断裂构造的交叉部位,或者主要受NE向断裂构造的控制。因此认为NE向和NW向

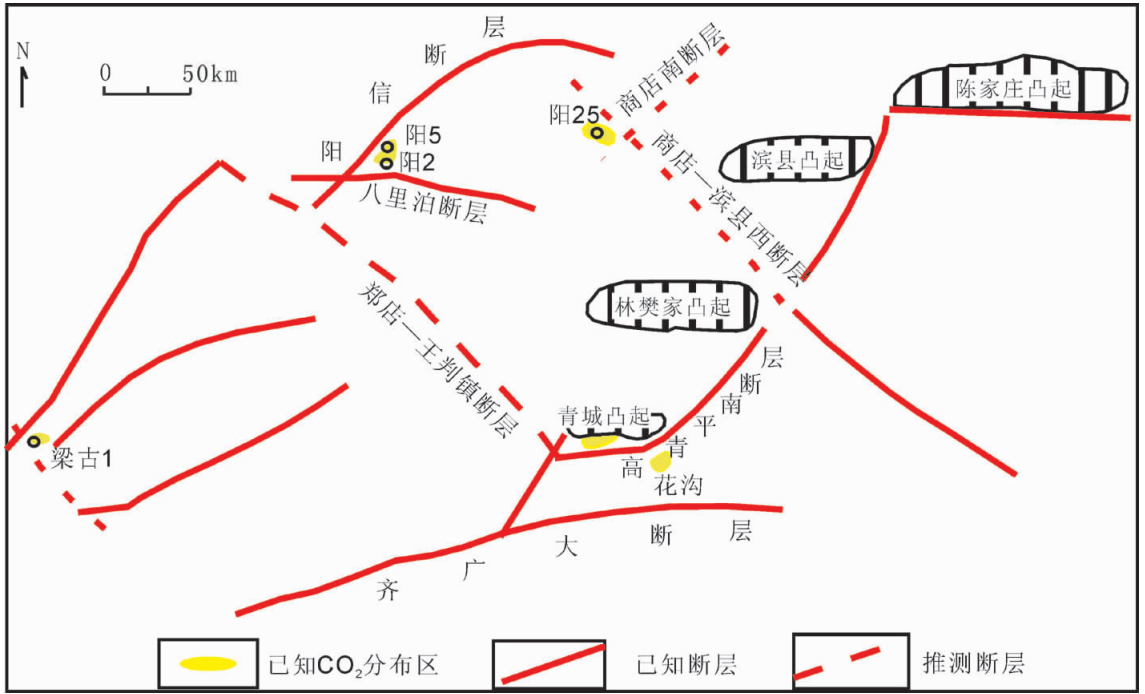


图 3 济阳坳陷深大断裂与 CO₂ 分布的空间关系

Fig. 3 Spatial relationship of deep faults to CO₂ gas reservoirs in Jiyang depression

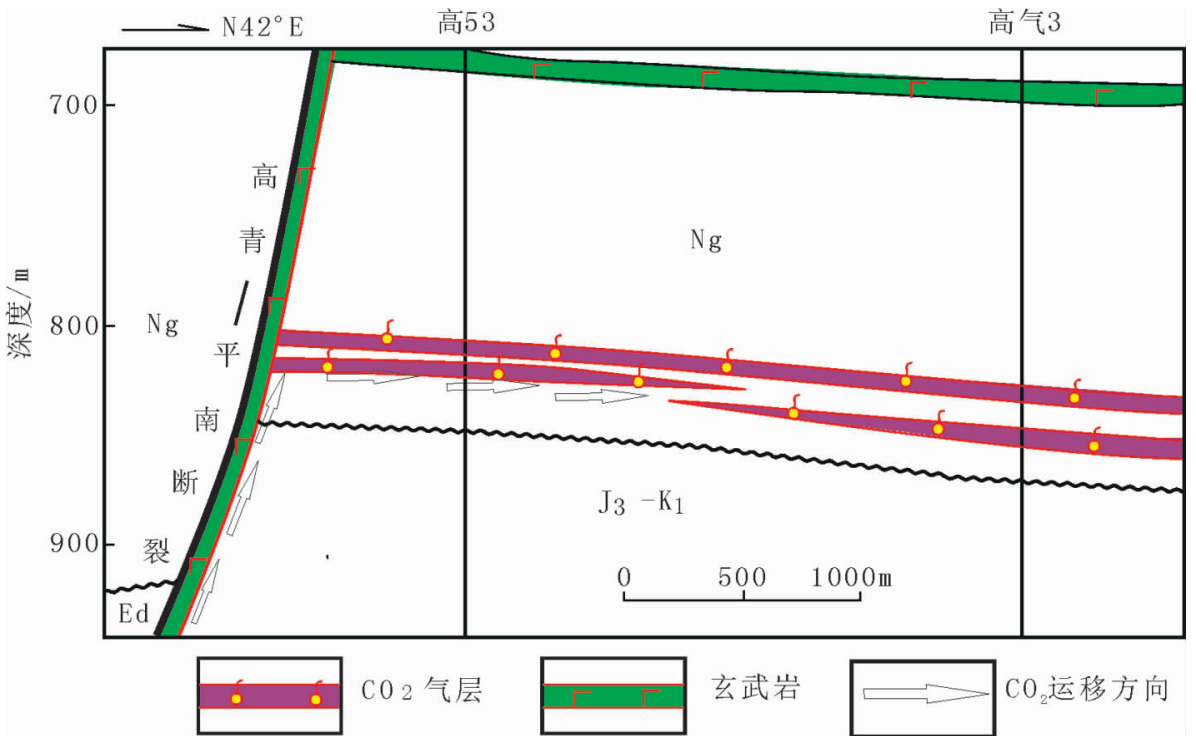


图 4 高青—平南断裂与 CO₂ 气藏的关系

Fig.4 Relationship between Gaoqing-Pingnan fault and CO₂ gas reservoirs

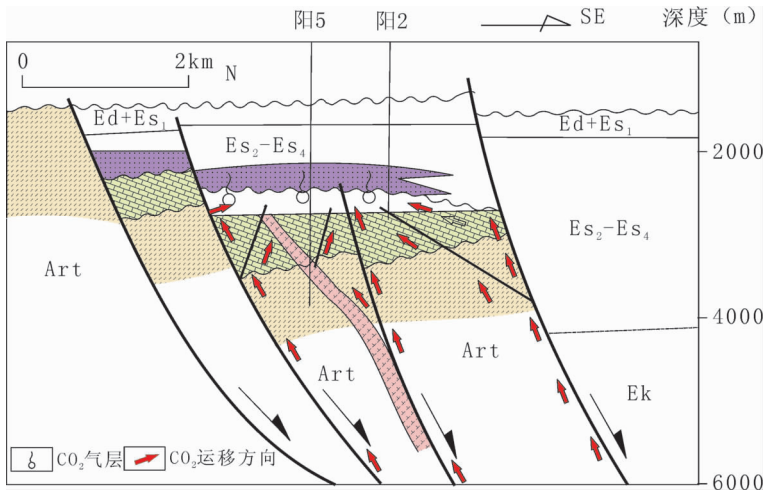
图5 阳信地区 CO₂ 气聚集模式

Fig.5 Model for the accumulation of carbon dioxide gas in Yanxin area

断裂构造,特别是2组断裂的交汇部位是控制 CO₂ 气藏形成有利部位。

具有多期岩浆活动的断裂带,由于有多次释放 CO₂ 气体的作用,CO₂ 气源充足,CO₂ 气藏的勘探不仅仅着眼于盆地内部,在盆地的边缘甚至外部只要有岩浆活动,以及断裂比较发育尤其是交汇部位应该是 CO₂ 气藏勘探的有利区块。

3.3 济阳坳陷 CO₂ 气成藏模式

国内一些学者分别对中国东部 CO₂ 成藏模式进行了总结^[78-80]。郭栋等^[81]将济阳坳陷 CO₂ 气成藏模式总结为三种模式。不同学者根据总结 CO₂ 成藏模式存在一定地区差异,但也存在一定的共性,即 CO₂ 气藏的形成与断裂及岩浆活动有密切的关系。

济阳坳陷二氧化碳气为幔源气的观点以及郯庐断裂在成气过程中的作用已经不存在大的疑问,但是对于其如何从地幔迁移到地壳盖层中聚集成藏则是尚未获得明确的答案。根据对济阳坳陷的一些认识,建立如下无机二氧化碳气藏的成藏模式:太平洋板块的俯冲后撤,使塑性状态的软流圈地幔发生对流与上涌,形成了大量的富含 CO₂ 等挥发组分的幔源碱性玄武岩浆,为 CO₂ 气成藏提供了丰富的气源岩。软流圈地幔对流与上涌造成了地幔对流上方岩石圈急剧伸展减薄,在岩石圈地幔和地壳等脆性层内可形成许多张性断裂,以及大型铲形犁式断裂系统,张性断裂是富含 CO₂ 气的碱性玄武岩浆上升的通道,并且有少部分 CO₂ 气可沿张性断裂运移至地

表浅部的有利圈闭部位而成藏。广泛发育于中、下地壳和上地壳底部的低速体,是岩浆初次脱气与储集的主要场所^[82],由于温度和压力的骤降,幔源碱性玄武岩浆中的大量 CO₂ 气体脱离其载体而储集于低速层内。伸展体制下形成的铲形犁式断层规模较大,并可直接沟通低速体中因岩浆初次脱气而形成的 CO₂ 气储库,因而使大量的 CO₂ 气被再次释放,沿犁式断裂系统运移到沉积盆地和地壳浅部,运移到盆地和地壳浅部的 CO₂ 气,便会在有利的圈闭部位聚集成藏。总之,可将 CO₂ 气的运移、聚集机理大致划分为4个阶段:富含 CO₂ 气的幔源玄武岩浆上升阶段、初次脱气阶段、二次释气阶段和二氧化碳圈闭成藏阶段。这4个阶段既具有相互连续、相互重叠的特征,又具有各自独立的特点。

4 研究展望

幔源岩浆上升到地壳的运移机制及其流体相和成分的变化则是研究薄弱环节,许多学者对流体包裹体的研究认为地幔流体的上升过程是一个多阶段的过程^[83-84]。深大断裂控制了岩浆活动与气体脱气^[85],CO₂ 来源主要有两个方面,主要是稳定的岩浆和上升的对流岩浆脱气^[86]。关于岩浆脱气则有不同的观点,一种认为岩浆通过浮力上升到 10 km 左右,在中性浮力作用下岩浆以侵入为主,这个阶段是 CO₂ 脱气的主要阶段,此后岩浆由于顶蚀作用继续上升,最后在地表喷发^[87];也有人认为在 1 km 左右是气体

脱出最强烈的时候^[88]。气体在岩浆中迁移主要有扩散和气泡运移两种途径^[90-92]。CO₂ 在岩浆中的溶解也影响岩浆的上升和脱气^[93-94]。地幔流体与气藏之间是一个相互影响、相互关联的过程,地幔流体的上升引起地质构造的变化,为 CO₂ 气藏提供物质基础,同时溶解在岩浆中 CO₂ 也会对地幔流体的上升产生影响。进一步弄清地幔流体上升、演化、脱气过程必须加强地质学、地球化学与地球物理之间的交叉和联合研究,因此,构造运动、流体作用、成藏作用的综合性研究将成为地幔流体研究前缘和热点。

参考文献 (References):

- [1] Trull T, Nadeau S, Pineau F. C-He systematic in hostspot xenoliths: implications for mantle carbon content and carbon recycling [J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 1993, 118:43-64.
- [2] 牛树银, 李红阳, 孙爱群, 等. 幔枝构造理论与找矿实践 [M]. 北京:地震出版社, 2002:11-35.
Niu Shuyin, Li Hongyang, Sun Aiqun, et al. Plume-branch Structure Theory and Exploration Practice [M]. Beijing:Seismological Press, 2002:1-243(in Chinese).
- [3] 谢鸿森. 地球深部物质科学导论[M]. 北京:科学出版社, 1997:1-64.
Xie Hongsen. An Introduction to Material Science of Earth's Depth [M]. Beijing: Science Press, 1997:1-64(in Chinese).
- [4] 刘从强, 黄智龙, 许成, 等. 地幔流体及其成矿作用—以四川冕宁稀土矿为例[M]. 北京:地质出版社, 2004:1-201.
Liu Congqiang, Huang Zhilong, Xu Cheng, et al. Geofluids in the Earth's Mantle and Its Role in Mineralization: A Case Study of the Mainning REE Deposit, Sichuan Province, China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004:1-210(in Chinese).
- [5] 毛景文, 李晓峰, 张荣华, 等. 深部流体成矿系统[M]. 北京:中国大地出版社, 2005:1-383.
Mao Jingwen, Li Xiaofeng, Zhang Ronghua, et al. Mantle-derived Fluid-Related Ore-formation System [M]. Beijing:China Land Press, 2005:1-383(in Chinese).
- [6] 路凤香. 深部地幔及深部流体 [J]. *地学前缘*, 1996, 3 (4):161-171.
Lu Fengxiang. Frontiers of research on the mantle fluid [J]. *Earth Science Frontiers*, 1996, 3 (4):161-171 (in Chinese with English abstract).
- [7] 金之钧, 张刘平, 杨雷, 等. 沉积盆地深部流体的地球化学特征及油气成藏效应初探 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2002, 27 (6):659-665.
Jin Zhijun, Zhang Liuping, Yang Lei, et al. A preliminary study of mantle-derived fluids and their effects on oil/gas generation in sedimentary basins [J]. *Earth Science——Journal of China University of Geosciences*, 2002, 27 (6):659-665(in Chinese with English abstract).
- [8] Marty B, Gunnlaugsson E, Jambon A, et al. Gas geochemistry of geothermal fluids, the Hengill area, southwest rift zone of Iceland [J]. *Chemical Geology*, 1991, 91:207-225.
- [9] Lollar B S, Ballentine C J, O'Nions R K. The fate of mantle-derived carbon in a continental sedimentary basin: Integration of C/He relationships and stable isotope signatures [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(11):2295-2307.
- [10] 戴金星, 宋岩, 戴春森, 等. 中国东部无机成因气及其气藏形成条件[M]. 北京:科学出版社, 1997:1-156.
Dai Jinxing, Song Yan, Dai Chunsen, et al. Formational Conditions of Abiogenic Origin Gas and Its Pools in Eastern China [M]. Beijing:Science Press, 1997:1-156 (in Chinese with English abstract).
- [11] Weinlich F H, Brauer K, Kampf H, et al. An active subcontinental mantle volatile system in the western Eger rift, Central Europe: Gas flux, isotopic (He, C, and N) and compositional fingerprints [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1999, 63(21):3653-3671.
- [12] 朱岳年. 二氧化碳地质研究的意义及全球高含二氧化碳天然气的分布特点[J]. *地球科学进展*, 1997, 19(1):26-31.
Zhu Yuenian. Significance of studying CO₂ geology and the global distributive features of high CO₂-bearing gas [J]. *Advance in Earth Science*, 1997, 19(1):26-31(in Chinese with English abstract).
- [13] 戴金星, 石昕, 卫延召. 无机成因油气论和无机成因的气田(藏)概略[J]. *石油学报*, 2001, 22(6):5-11.
Dai Jinxing, Shi Qi, Wei Yanzhao. Summary of the abogenic origin theory and the abiogenic Gas pool (fields) [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2001, 22(6):5-11(in Chinese with English abstract).
- [14] 戴金星, 宋岩, 戴春森, 等. 中国东部无机成因气及其气藏形成条件[M]. 北京:科学出版社, 1995:131-150.
Dai Jinxing, Song Yan, Dai Chunsen, et al. Inorganic Gases and the Formative Conditions of the Inorganic Gas Pools in Eastern China [M]. Beijing:Science Press, 1995:131-150(in Chinese with English abstract).
- [15] Ballentine C J, Schoel M, Coleman D, et al. Magmatic CO₂ in natural gases in the Permian Basin, West Texas: identifying the regional source and filling history [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2000, 69-70:59-63.
- [16] 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. *Journal of Sedimentary Research*, 1995, A65 (3):522-530.
- [17] Clayton J L, Spencer C W, Koncz I, et al. Origin and migration of hydrocarbon gases and carbon dioxide, BeÁkeÁs Basin, southeastern Hungary[J]. *Organic Geochemistry*, 1990, 15(3):233-247.
- [18] 何家雄, 夏斌, 张树林, 等. 莺歌海盆地泥底辟成因、展布特征及其与天然气运聚成藏关系 [J]. *中国地质*, 2006, 33 (6):1336-1344.
He Jiexiong, Xia Bin, Zhang Shulin, et al. Origin and distribution of mud diapirs in the Yinggehai basin and their relation to the

- migration and accumulation of natural gas [J]. *Geology in China*, 2006, 33(6):1336–1344(in Chinese with English abstract).
- [19] 何家雄, 姚永坚, 刘海龄, 等. 南海北部莺歌海盆地壳源型非生物 CO₂ 运聚成藏特征与资源潜力 [J]. *中国地质*, 2007, 34(5): 887–893.
He Jiexiong, Yao Yongjian, Liu Hailing, et al. Migration and accumulation characteristics and resource potential of crust-derived inorganic CO₂ in the Yinggehai basin, northern South China Sea [J]. *Geology in China*, 2007, 34 (5):887–893 (in Chinese with English abstract).
- [20] Kennedy B M, Kharaka Y K, Evans W C, et al. Mantle fluids in the San Andreas Fault System, California [J]. *Science*, 1997, 278 (14) :1278–1280.
- [21] Gerlach T M. Etna's greenhouse pump [J]. *Nature*, 1991, 315, 352–353.
- [22] 王先彬, 陈践发, 徐胜, 等. 地震区温泉气体的地球化学特征[J]. *中国科学(B 辑)*, 1992, (8):849–854.
Wang Xianbin, Chen Jianfa, Xu Sheng, et al. Characteristics of geochemistry hot spring gas in earthquake region[J]. *Science China (seris B)*, 1992, (8):849–854(in Chinese).
- [23] Brantley S L, Koepnick K W. Measured carbon dioxide emissions from Oldoinyo Lengai and the skewed distribution of passive volcanic fluxes [J]. *Geology*, 1995, 23 (10):933–936.
- [24] 刘嘉麒, 郭正俯, 刘强. 火山灾害与监测 [J]. *第四纪研究*, 1999, 20(5):414–421.
Liu Jiaqi, Guo Zhengfu, Liu Qiang. Volcanic hazards and monitoring [J]. *Quaternary Sciences*, 1999, 20 (5):414–421 (in Chinese with English abstract).
- [25] Johnson M C, Anderson A T Jr, Rutherford M J. Pre-eruptive volatile contents of magmas [J]. *Reviews in Mineral*, 1994, 30: 281–330.
- [26] Anderson N S, Williams S N, Drits T H, et al. H₂O, CO₂, Cl and gas in Plinian and ash flow Bishop rhyolite [J]. *Geology*, 1989, 17: 221–225.
- [27] Lowenstern J B. Evidence for a copper-bearing fluid in magma erupted at the Valley of Ten Thousand Smokes, Alaska [J]. *Contrib. Mineral Petrol.*, 1993, 114:409–421.
- [28] Wallace P J, Gerlach T M. Magmatic vapor source for sulfur dioxide released during volcanic eruptions: Evidence from Mount Pinatubo [J]. *Science*, 1994, 265:497–499.
- [29] Andersen T, O'Reilly S Y, Griffin W L. The trapped fluid phase in upper mantle xenoliths from Victoria—Implications for mantle metasomatism[J]. *Contrib. Mineral Petrol.*, 1984, 88:72–85.
- [30] Pasteris J D. Fluid inclusions in mantle xenoliths[C]//“Nixon P H, (ed.), *Mantle Xenoliths*”. John Wiley and Sons, Chichester, U K, 1987: 691–707.
- [31] O'Reilly S Y. The nature and role of fluid in the upper mantle. Evidences in xenoliths from Victoria, Australia, *Mantle: Xenoliths*. John Wiley and Sons, 1987:315–323.
- [32] Navon O, Hutcheon I D, Rossman G R, et al. Mantle-derived fluids in diamond micro-inclusions [J]. *Nature*, 1988, 335, 784–789.
- [33] Sugisaki R, Mimura K. Mantle hydrocarbons: Abiotic or biotic? *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1994, 58: 2527–2542.
- [34] 刘德良, 李振生, 刘波, 等. 火山岩吸附 CO₂ 气的成藏潜力及实例分析[J]. *地质通报*, 2005, 24(10/11):962–967.
Liu Deliang, Li Zhensheng, Liu Bo, et al. Potential to form CO₂ reservoirs through adsorption of CO₂ by volcanic rocks and case study[J]. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(10–11):962–967 (in Chinese with English abstract).
- [35] Hay W W, James L S, Christopher N. Mass/age distribution and composition of sediments on the ocean floor and the global rate of sediment subduction[J]. *J Geophys. Res.*, 1998, 93:4933–4940.
- [36] Shmulovich K I, Yardley B W D, Gonchar G G. Fluids in the Crust[M]. Chapman and Hall Press, Moscow, 1995:215–312.
- [37] Tracy N T, Green H W. Carbon solubility in olivine: implications for upper-mantle evolution [J]. *Geology*, 1987, 15:324–326.
- [38] Frank P, Lucien, Neil R, et al. Solubilities of solid mixtures in supercritical carbon dioxide: a review [J]. *Journal of Supercritical Fluids*, 2000, 17:111–134.
- [39] 孙楠, 谢鸿森, 郭捷, 等. 地球深部流体与油气生成及运移浅析 [J]. *地球科学进展*, 2000, 15(3):283–288.
Sun Qiang, Xie Hongsen, Guo Jie, et al. Fluids in deep earth and origin and migration of oil and gas [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2000, 15(3):283–288(in Chinese with English abstract).
- [40] Ballhaus C. A question of reduction[J]. *Nature*, 1993, 366:112–113.
- [41] Matveev S, Ballhaus C. Synthesis of C–H–O fluids at high pressure[C]. *Russia 6th IKC abstract*, 1995:405–407.
- [42] 张泓翔, 徐志方, 黄智龙, 等. 地幔流体基本特征及成因[J]. *地质地球化学*, 2000, 28(2):1–7.
Zhang Hongxiang, Xu Zhifang, Huang Zhilong, et al. The primary characters and origin of mantle fluids [J]. *Geology–Geochemistry*, 2000, 28(2):1–7(in Chinese with English abstract).
- [43] O'Neill H St C, Wall V G. The olivine–orthopyroxene–spinel oxygen geobarometer, the nickle precipitation curve, and oxygen fugacity of the Earth's upper mantle [J]. *J. Petrol.*, 1987, 28:1169–1191.
- [44] Wood B J, Bryndzia L T, Johnson K E. Mantle oxidation state and its relation to tectonic environment and fluid speciation[J]. *Science*, 1990, 248:337–344.
- [45] Blundy J D, Brodholt J P, Wood B J. Carbon–fluid equilibria and the oxidation state of the upper mantle[J]. *Nature*, 1991, 349:321–324.
- [46] 张铭杰, 王先彬, 李立武. 地幔流体组成 [J]. *地学前缘*, 2000, 7 (2):401–412.
Zhang Mingjie, Wang Xianbin, Li Liwu. Composition of mantle fluid [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(2):401–412(in Chinese with English abstract).
- [47] Schwab R C, Freiselben B. Fluid inclusions in olivine and pyroxene and their behavior high pressure and temperature

- conditions[J]. *Bulletin of Mineral.* 1988, 111:297-306.
- [48] Blank J G, Brooker R A. Experimental studies of carbon dioxide in silicate melts: solubility, speciation, and stable carbon isotope behavior [J]. *Rev Mineral*, 1994, 30:157-186.
- [49] 杜乐天. 地壳流体与地幔流体间的关系 [J]. *地学前缘*, 1996, 3(4):172-180.
Du Letian. The relationship between crust fluids and mantle fluids [J]. *Earth Science Frontiers*, 1996, 3(4):172-180 (in Chinese with English abstract).
- [50] Brooker R A, Kohn S C, Holloway JR, et al. Solubility, speciation and dissolution mechanisms for CO₂ in melts and the NaAlO₂-SiO₂ join[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1999, 63:3549-3565.
- [51] Fine G, Stolper E. The speciation of carbon dioxide in sodium aluminosilicate glasses [J]. *Contrib. Mineral Petrol.*, 1985, 91:105-121.
- [52] Marcus N, Dirk P, Kai S, Otto D. Carbon dioxide speciation in silicate melts: a restart [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 207:131-139.
- [53] Delemelle P and Stix J. Volcanic gas [C]//*Encyclopedia of Volcanoes* [M]. Ed. Hsigurdsson, 1999:16-803(Acadmic Press).
- [54] Dixon J E, Stolper E M. An experimental study of water and carbon dioxide solubilities in mid-ocean ridge basaltic liquids: Part II. Applications to degassing[J]. *J. Petrol.*, 1995, 36, 1633-1646.
- [55] Newman S, Stolper E, Stern R. H₂O and CO₂ in magmas from the Mariana arc and back arc system [J]. *Geochem. Geophys.*, 2000. 1.
- [56] Metrich N, Bertagnini A, Landi P, et al. Crystallization driven by decompression and water loss at Stromboli Volcano (Aeolian Islands, Italy) [J]. *J. Petrol*, 2001, 42:1471-1490.
- [57] Holloway J R, Blank J G. Application of experimental results to C-O-H species in natural melts [C]//Carroll M R, Holloway J R (eds.). *Volatiles in Magmas* Mineral. Soc. Am. *Rev. Mineral*, 1994, 30:187-230.
- [58] King P L, Holloway J R. CO₂ solubility and speciation in intermediate (andesitic) melts; the role of H₂O and composition [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2002, 66, 1627-1640.
- [59] Pan V, Holloway J R, Hervig R L. The pressure and temperature dependence of carbon dioxide solubility in tholeiitic basalt melts [J]. *Geochim. Costmochim. Acta*, 1991, 55:1587-1595.
- [60] Paul J Wallace. Volatiles in subduction zone magmas: concentrations and fluxes based on melt inclusion and volcanic gas data [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2005, 140:217-240.
- [61] Bodinier J L, Vasseur G, Vernieres J, et al. Mechanisms of mantle metasomatism: geochemical evidence from Lherz orogenic peridotite [J]. *Journal of Petrology*, 1990, 31:597-628.
- [62] Nielson J E, Wilshire H G. Magma transport and metasomatism in the mantle: a critical review of current geochemical models [J]. *American Mineralogist*, 1993, 78(11/12):1117-1134.
- [63] Kusakabe M. Geochemistry of the 1986 lake Nyons gas disaster, Cameroon [J]. *Chikyukagaku (Geochemistry)*, 2002, 36:137-147.
- [64] 邓晋福, 赵海玲, 吴宗黎, 等. 中国大陆下的地幔热柱与岩石圈运动[J]. *现代地质*, 1992, 6(3):267-273.
- Deng Jifu, Zhao Hailing, Wu Zongxu, et al. Mantle plume and lithospheric movement beneath Chinese continent [J]. *Geoscience*, 1992, 6(3):267-273 (in Chinese with English abstract).
- [65] 王宏斌, 白晶哲. 中国东部中新世火山—碎屑—凝灰岩储层研究综述[J]. *世界地质*, 1997, 16(3):34-41.
Wang Hongbin, Bai Jingzhe. A summary of the studies on volcanic-clastic-tuff rock reservoirs of mesozoic and kainozoic in eastern China [J]. *Global Geology*, 1997, 16(3):34-41 (in Chinese with English abstract).
- [66] 黄智龙. 幔源岩浆活动过程中的去气作用—以云南老王寨金矿煌斑岩为例[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2001, 20(1):1-5.
Huang Zhilong. Degassing in the process of mantle derived magmatism: As exemplified by lamprophyres in Laowangzhai gold deposit, Yunnan Province [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2001, 20(1):1-5 (in Chinese with English abstract).
- [67] 周立宏, 吴永平, 肖敦清, 等. 黄骀坳陷第三系火成岩与油气关系探讨[J]. *石油学报*, 2000, 21(6):29-34.
Zhou Lihong, Wu Yongping, Xiao Dunqing, et al. Character of the Tertiary igneous rocks and investigation of their relationship with hydrocarbon in Huanghua Depression [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2000, 21(6):29-34 (in Chinese with English abstract).
- [68] 刘中云, 肖尚斌, 姜在兴. 渤海湾盆地第三系火山岩及其成因[J]. *石油大学学报 (自然科学版)*, 2001, 25(1):22-26.
Liu Zhongyun, Xiao Shangbin, Jiang Zaixing. Volcanic rocks of Bohai Bay basin in Tertiary and their genesis [J]. *J Univ. Pet. China (Nat. Sci.)*, 2001, 25(1):22-26 (in Chinese with English abstract).
- [69] 赫英, 毛景文, 王瑞廷, 等. 幔源岩浆去气形成富二氧化碳含金流体——可能性与现实性[J]. *地学前缘*, 2001, 8(4):265-270.
He Ying, Mao Jingwen, Wang Ruitin, et al. Carbon dioxide-rich and gold-bearing fluids degassed from mantle-derived magma—reality and possibility [J]. *Earth Science Frontiers*, 2001, 8(4):265-270 (in Chinese with English abstract).
- [70] Evans W C, Sorey, M L, Kennedy B M, et al. High CO₂ emissions through porous media: transport mechanisms and implications for flux measurement and fractionation [J]. *Chemical Geology*, 2001, 177:15-29.
- [71] Farrar C D, Sorey M L, Evans W C, et al. Forest-killing diffuse CO₂ emission at mammoth mountain as a sign of magmatic unrest [J]. *Nature*, 1995, 376:8-675.
- [72] Dalessandro W, Giammanco S, Parello F, et al. CO₂ output and $\delta^{13}\text{C}$ (CO₂) from Mount Etna as indicators of degassing of shallow asthenosphere [J]. *Bulletin of Volcanology*, 1997, 58:8-455.
- [73] Werner C, Brantley S. CO₂ emissions from the Yellowstone volcanic system [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2003, 4(7).
- [74] Alessandro A, Adriana C, Cinzia F, et al. Diffuse degassing of carbon dioxide at Somma-Vesuvius volcanic complex (Southern Italy) and its relation with regional tectonics [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2004, 133:55-79.

- [75] 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 Xingmou, 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(in Chinese with English abstract).
- [76] 冯有良. 阳信洼陷构造岩浆演化与油气聚集 [J]. 石油与天然气地质, 1994, 15 (2) :173-179.
Feng Youliang. Tectono magmatic evolution of Yangxin Depression and its hydrocarbon accumulation [J]. Oil & Gas Geology, 1994, 15 (2) :173-179(in Chinese with English abstract).
- [77] 郭栋, 姚书振, 陈红汉, 等. 阳信洼陷火成岩与 CO₂ 气成藏关系 [J]. 地质科技情报, 2004, 23(4):71-75.
Guo Dong, Yao Shuzhen, Chen Honghan, et al. Relationship between igneous rock and CO₂ reservoir of Yangxin sag [J]. Geological Science and Technology Information, 2004, 23(4):71-75(in Chinese with English abstract).
- [78] 魏立春, 鲁雪松, 宋岩, 等. 松辽盆地昌德东 CO₂ 气藏形成机制及成藏模式[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(2):174-180.
Wei Lichun, Lu Xuesong, Song Yan, et al. Formation and Pool-forming model of CO₂ gas pool in eastern Changde area, Songliao Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36 (2): 174-180(in Chinese with English abstract).
- [79] 杨长清, 姚俊祥. 三水盆地二氧化碳气成藏模式[J]. 天然气工业, 2004, 24(2):36-39.
Yang Changqing, Yao Junxiang. Modes of CO₂ gas reservoir formation in Sanshui Basin [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(2): 36-39(in Chinese with English abstract).
- [80] 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(in Chinese with English abstract).
- [81] 郭栋, 王兴谋, 张金功. 山东济阳坳陷二氧化碳气成藏模式分析 [J]. 现代地质, 2006, 20 (3):441-448.
Guo Dong, Wang Xingmou, Zhang Jingong. Analysis on CO₂ reservoir -forming patterns in Jiyang depression, Shandong [J]. Geoscience, 2006, 20 (3):441-448 (in Chinese with English abstract).
- [82] 刘兴材. 胜利油气区非烃气(二氧化碳、氮)成因、成藏规律研究 [C]//刘兴材.石油地质勘探论文报告选集.北京:石油工业出版社, 2001:56-78.
Liu Xingcai. Study on formation and gas accumulation rules of non-hydrocarbon (CO₂,He) Shengli Oilfield [C]//Liu Xingcai (ed.). Selection of Papers by Liu Xingcai on Petroleum Geological Exploration. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001:56-78 (in Chinese).
- [83] Hansteen T H, Klugel A, Schminke H U. Multistage magma ascent beneath the Canary Islands, Evidence from fluid inclusions [J]. Contrib. Mineral Petrol., 1998, 107:242-254.
- [84] Yu B S. The mechanism of volcanic eruptions (a steady state approach) [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2003, 22(1/2):7-50.
- [85] Salvatore G, Sergio G, Mariano V. Fault-controlled Soil CO₂ Degassing and Shallow Magma Bodies: Summit and Lower East Rift of Kilauea Volcano (Hawaii), 1997 [J]. Pure and Applied Geophysics, 2006, 163(4): 853-867.
- [86] Harris D M, Rose W I. Dynamics of carbon dioxide emissions, crystallization, and magma ascent:hypotheses, theory, and applications to volcano monitoring at Mount St [J]. Helens. Bull. Volcanol, 1996, 58:163-174.
- [87] Saito G, Kozo U, Kohei K, Hiroshi S, et al. Petrological characteristics and volatile content of magma from the 2000 eruption of Miyakejima Volcano, Japan[J]. Bulletin of Volcanology, 2005, 67:268-280.
- [88] Yuki S, James E G, Jessica F L. Experimental constraints on syneruptive magma ascent related to the phreatomagmatic phase of the 2000AD eruption of Usu volcano, Japan [J]. Bulletin of Volcanology, 2007, 69(4):423-444.
- [89] Klug C, Cashman K V. Permeability development in vesiculating magmas: implication for fragmentation [J]. Bull. Volcano l, 1996, 58, 87-100.
- [90] Burgisser A, Gardner J E. Experimental constraints on degassing and permeability in volcanic conduit flow[J]. Bull. Volcano l, 2005, 67, 42-56.
- [91] Takeuchi S, Nakashima S, Tomiya A, et al. Experimental constraints on the low gas permeability of vesicular magma during decompression [J]. Geophys. Res. Lett., 2005, 32, L10312.
- [92] Paolo P, Margherita P. Role of carbon dioxide in the dynamics of magma ascent in explosive eruptions [J]. Bulletin of Volcanology, 1999, 68(4): 583-594.
- [93] Yoshiaki Ida. Driving force of lateral permeable gas flow in magma and the criterion of explosive and effusive eruptions [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2007, 162(3/4):172-184.

Origin and evolution of mantle-derived CO₂: A case study of CO₂ gas pool in Jiyang depression

SHEN Bao-jian^{1,2}, QIN Jian-zhong², HU Wen-xuan¹, HUANG Zhi-long³

(1. Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China; 2. Wuxi Research Institute of Oil Geology, Sinopec, Wuxi 214151, Jiangsu, China; 3. State Key Laboratory of Ore Deposits Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, Guizhou, China)

Abstract: The study of mantle-derived CO₂ is one of the frontiers in Earth science and is hence of great significance. Mantle fluids in supercritical state possess high dissolving and diffusing capacity and serve as an important transporting carrier of energy in Earth's interior, with their chemical composition being mainly H₂O and CO₂. Many scholars believe that mantle fluids play an important role in the ore-forming process, but research on their relation with the CO₂ gas pool is very insufficient. Along with the magma rising, the relatively insoluble CO₂ gas will be the first to release with the temperature and pressure reduction of the magma, and the favorable tectonic environment is likely to form the CO₂ gas pool. Many of the world's regional magmatic activities and fractures have formed CO₂ gas reservoirs. This paper analyzed properties and influencing factors of mantle fluids exemplified by the study of magma and fault characteristics of Bohai Bay basin in eastern China, and discussed the ascent and evolution process of mantle fluids. The authors believe that mantle degassing may be the main material source of CO₂, and that fault activities provide passageways and space for magma uprising and gas migration and accumulation. The favorable sites in search for potential CO₂ gas pools lie in magmatic activities on basin margin and intersections of faults of different directions.

Key words: mantle-derived CO₂; supercritical fluid; degassing of magmatic fluids; fault; CO₂ gas pool

About the first author: SHEN Bao-jian, male, born in 1978, doctor and engineer, engages in geochemistry of natural gas and source rock; E-mail: Shenbaoj@163.com.