

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

王兴谋^{1,2}, 夏斌¹, 陈根文¹, 阎汉杰², 陈海云², 郭栋²

(1. 中国科学院广州地球化学研究所与南海海洋研究所 边缘海地质重点实验室, 广东 广州 510640;
2. 胜利油田物探研究院, 山东 东营 257001)

摘要: 中国东部地区新生代存在 4 个岩浆活动期: 第一期 65 ~ 41 Ma, 第二期 41 ~ 21 Ma, 第三期 21 ~ 13 Ma, 第四期 11 Ma 至今。对研究区内火山岩地球化学研究表明, 古近纪早期火山岩以拉斑玄武岩和钙碱性玄武岩为主, 后期特别是从沙三期开始逐渐转变为碱性岩石。火山岩中 CO₂ 包裹体含量统计表明, 沙三段 (E_{s3}) 中 CO₂ 含量明显高于其它几个岩性段, 而碱性岩中 CO₂ 的含量又明显高于拉斑玄武岩中的含量。沙三期是整个东部地区一个较重要的岩浆活动期和火山活动发生重大改变的时期, 从沙三期到馆陶期形成的碱性岩具有最大的 CO₂ 成藏潜力, 沙三期及以后的火山岩与 CO₂ 在空间上存在密切关系, 因此沙三期到馆陶期是形成区内 CO₂ 的主要时期。

关键词: CO₂; 岩浆活动; 济阳拗陷; 中国东部地区

中图分类号: P588.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1552(2004)03-0338-07

CO₂ 具有广泛的应用前景, 在石油工业上, CO₂ 是一种很好的强化采油剂, 同时在清除井底污物、提高酸化效果和增强油层渗透率上具有良好的应用价值。在金属加工上, 用 CO₂ 进行焊接, 可使焊接部位机械强度大大增加。此外, CO₂ 还广泛用于化工工业、农业生产、食品加工和储存、公安消防和医药卫生等领域。同时合理利用 CO₂ 资源, 变废为宝, 对环境保护意义重大。近年来在我国含油气盆地中, 相继发现了许多无机成因的二氧化碳气藏, 主要分布在松辽、黄骅、济阳、苏北和三水等盆地或拗陷中。CO₂ 的分布与区内的火成岩不论是在空间上还是时间上具有密切的共生关系(戴金星等, 1995; 孙明良和陈践发, 1996)。对区内 CO₂ 的碳同位素和与 CO₂ 的共生的稀有气体成分及同位素研究表明, 这些 CO₂ 主要为幔源成因(赫英等, 1998; 陶明信等, 1996)。但对控制 CO₂ 形成的岩浆活动的期次, 特别是 CO₂ 形成的时间问题研究甚少。由于 CO₂

具有很强的流动性, 很难像固体矿床一样通过与围岩的关系或同位素定年来确定其形成时代, 这严重制约了对 CO₂ 成藏规律的认识和气藏的开发利用。本文将尝试通过讨论形成 CO₂ 的火山岩类型及其时代来制约 CO₂ 形成的时间范围。

1 中国东部新生代岩浆活动时空分布规律

中国东部新生代火山岩活动延续时间比较长, 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。大部分地区火山活动最强的时期是古近纪。我们通过对中国东部新生代岩浆形成年龄(刘嘉麒, 1987; 刘若新等, 1992; 陈文寄等, 1992; 朱炳泉等, 2002)的统计分析(图 1), 并参考朱炳泉等(2002)统计的华夏地块新生代玄武岩形成时代和东部地区几个拉分盆地的火山岩活动资料, 将整个东部地区新生

收稿日期: 2003-09-16; 改回日期: 2003-12-27

基金项目: 中科院重大知识创新项目(编号: KZCX2-SW-117)、胜利油田勘探管理项目部资助。

作者简介: 王兴谋(1965-), 男, 汉族, 博士生, 高级工程师, 主要从事石油勘探工作。

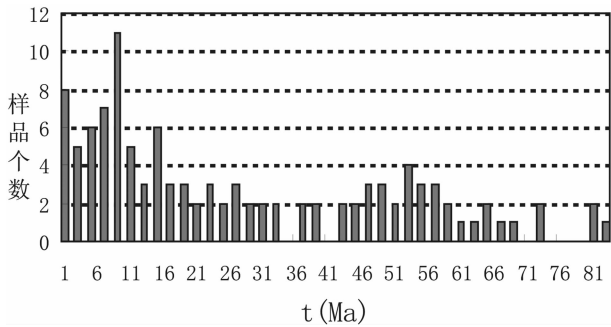


图1 东部地区新生代火山岩分布频率

[主要资料据刘嘉麒等(1987);刘若新等(1992);陈文寄等(1992)]

Fig.1 Distribution of the age of Cenozoic volcanic rocks in Eastern China

代岩浆活动分为四期:第一期 65 ~ 41 Ma, 第二期 41 ~ 21 Ma, 第三期 21 ~ 13Ma, 第四期从 11 Ma 到现在。

据杜韞华等(1990),曾广策等(1997),高知云(1986)的资料,胜利油田新生代火山岩可分为四期:一期为孔店一沙四期(相当于古新世—始新世),二期为沙三期(相当于渐新世),三期为东营期(相当于中新世早期),第四期火山活动为馆陶期和明化镇期(相当于中新世晚期)。又如下辽河盆地,这是我国早第三纪含油盆地中火山活动最频繁的地区。下辽河盆地火山活动大致可分三期:第一期火山活动发生在古近纪早期,从房身泡组沉积时期开始,至沙四段结束;第二期火山活动发生在古近纪中期,即沙三段沉积时期;第三期发生在古近纪晚期,即东营期。第四期岩浆活动在下辽河盆地内已基本停止,并已迁移到盆地外围,特别是郯庐断裂带中。

这几个时期的火山活动在空间分布上具有比较明显的规律性。第一、二期火山活动主要分布在区内较大型的裂谷盆地内。这些盆地的形成被认为与下部软流圈物质的上隆导致的地壳拉张作用有关(李有柱,1995)。而第二、三期岩浆活动主要发育在上述裂谷盆地的边缘并受郯庐走滑断裂带的控制;只有少部分第二、三期的火山岩分布在裂谷盆地中。第四期岩浆活动分布在盆地的周边地区。由此看来,中国东部不同时期火山岩分布具有一定的规律性,古近纪火山岩分布在东部大陆裂谷东西两侧,而随着时代变新,火山活动向东迁移。

2 不同时代火成岩与 CO₂ 气藏的时空关系

研究区 CO₂ 的分布与新生代岩浆岩具有密切

的共生关系。从大范围看,目前发育的中国东部 CO₂ 气藏基本上分布在前面提到的 NNE 向大陆裂谷盆地和大陆架盆地中。具体分布在松辽盆地、渤海湾盆地、苏北盆地、三水盆地和南海盆地。而这些大陆裂谷也是新生代火山岩的主要形成区(图 2)。对单个盆地而言,新生代火山岩与 CO₂ 的共生关系表现得更加明显。如济阳拗陷,CO₂ 主要分布在阳信地区和高青、平南、花沟一带,而这些地区新生代火山岩均特别发育(图 2)。CO₂ 与具深源特征的氦异常区具有较好的对应关系。黄骅拗陷新生代火山岩主要沿 NE 向断断续续分布,CO₂ 气藏分布在翟庄子、友爱村、大中旺和齐家务几个地区,而这几个地区均有新生代玄武岩分布(戴金星等,1995)。三水盆地的 CO₂ 气藏与区内古近纪玄武岩共生(曾观运,1986)。

CO₂ 与新生代火山岩具有很好的空间对应关系,表明 CO₂ 与火山岩在空间上密切相关。但是不同时期的火成岩与 CO₂ 的关系不一样。如中生代火成岩主要分布在东营凹陷和沾车凹陷中,但在这几个凹陷中并没有发现 CO₂ 气藏。另外孔店组火山岩非常发育的临邑附近也没有发现 CO₂ 气藏。CO₂ 气藏主要分布在渐新统沙河街组三段(Es₃)及后期火山岩分布的地区,从空间上表明,沙三及其以后形成的岩浆活动是控制 CO₂ 成藏的重要因素。同样的情况也存在于苏北盆地中。CO₂ 气藏主要分布在渐新统三垛组(时代相当于济阳拗陷内的沙三段)及中上新统的上下盐城组火山岩分布区(图 2)。这表明沙三期或渐新世以后的火山活动对 CO₂ 成藏至关重要。

3 东部盆地新生代岩浆岩岩性变化规律

中国东部地区新生代与 CO₂ 成藏有关的岩浆岩主要分布在东部大陆裂谷中,绝大部分为碱性火山岩。对东部地区几个裂谷盆地新生代火山岩主量元素分析(表 1)表明,早第三纪早期火山岩以拉斑玄武岩和钙碱性玄武岩为主,后期,特别是从沙三期开始转变为碱性岩石(图 3)。广东茂名—三水盆地也具有类似的分布特征,在晚白垩世—早第三纪早期,岩石以安山岩和英安岩为主,到始新世末期变为粗安岩,也从钙碱性—拉斑玄武岩向碱性玄武岩转变。苏北盆地、渤海湾盆地均在古新世出现拉斑玄武岩。古、始新世火山岩主要分布在具有较小地壳

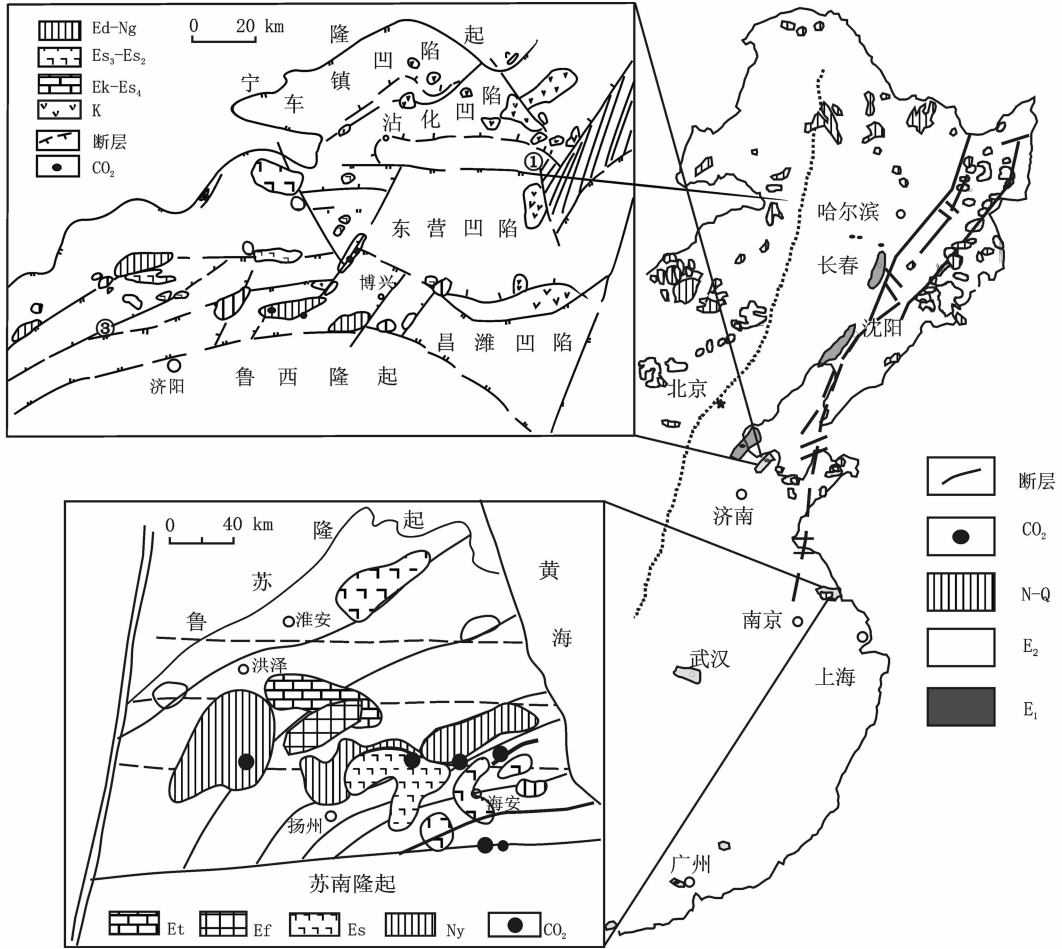


图 2 东部地区岩浆活动与 CO_2 分布的空间关系

济阳坳陷: E_k -古近纪孔店组; E_{s_4} -古近纪沙四段; E_{s_3} -古近纪沙三段; E_{s_2} -古近纪沙二段; E_d -古近纪东营组; N_g -新近纪馆陶组
苏北盆地: E_t -古近纪泰州组; E_f -古近纪阜宁组; E_s -古近纪三垛组; N_y -新近纪盐城组

Fig. 2 Spatial relation of CO_2 and magmatism in Eastern China

厚度(30 km 左右), 较高地表热流 (> 1.5 HFU) 的盆地区。根据物探资料反演的岩石圈厚度也表明, 中国东部裂谷盆地发育的地区正是莫霍面抬升的地区, 同样说明地幔上涌是控制东部裂谷盆地形成的重要因素。

4 岩浆活动类型及其与 CO_2 的关系

对济阳坳陷火山岩矿物中的包裹体成分研究表明, 区内存在不同类型、不同大小和形态的包裹体, 包裹体不论是液相还是气相组分均含有 CO_2 , 而且是主要组分。除 CO_2 外, 气相组分还包括 N_2 、 H_2S 、 CH_4 、 CO 、 SO_2 和 H_2O 。利用前人研究资料(赫英等,

1996) 统计表明, 这些组分在不同地区和不同寄主岩内的含量是不同的。主要表现为: 阳信地区火山岩中矿物包裹体 CO_2 气含量最高(CO 、 SO_2 和 CH_4 的含量较低); 其次是乐昌和纯化镇地区, 再其次是高青地区、临盘地区, 包裹体中的 CO_2 含量最低; 而沙三段(E_{s_3}) 中 CO_2 含量明显高于其它几个岩性段, 包裹体中气相组分的 CO_2 含量通常在 60% 以上(图 4)。另外, 碱性火山岩通常都具有较高含量 CO_2 的矿物包裹体(图 5)。这与碱性岩具幔源亲缘性并富 CO_2 , 及随着硅饱和程度的增加, 岩浆饱和和产生 CO_2 的能力下降, 从拉斑玄武岩向碱性玄武岩演化, 岩浆活动形成 CO_2 的能力有逐渐增高的趋势也是一致的。

表1 中国东部新生代火山岩岩石化学成分 (wt%)
Table1 Chemical compositions of the Cenozoic volcanic rocks in eastern China

序号	岩石名称	时代	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O	CO ₂
1	玄武岩	K ₁	53.0	0.71	12.2	8.21	2.6	0.09	8.96	3.37	1.9	2.81	0.32	4.76	0.35
2	玄武岩	K ₁	43.3	0.76	12.2	6.26	5.3	0.3	8.99	7.79	3.45	0.67	0.3	5.84	4.98
3	玄武岩	K ₁	47.0	0.8	12.8	7.97	3.57	0.24	9.48	5.31	3.67	1.24	0.32	6	2.17
4	玄武岩	K ₁	52.9	0.78	12.5	6.22	4.44	0.13	8.51	6.05	3.21	1.53	0.3	2.88	0.44
5	玄武岩	Es ₄	51.1	1.36	18.29	2.61	5.5	0.14	2.81	8.87	4.36	1.69	0.35	3.38	0.29
6	玄武岩	Es ₃	48.0	15.08	8.07	2.72	6.41	7.97	2.65	2.19	0.18	2.36	0.73	3.05	0.33
7	玄武岩	Es ₃	46.7	15.1	10.14	1.05	5.06	7.71	1.71	2.92	0.14	2.29	0.72	3.97	2.26
8	玄武岩	Es ₃	45.4	14.8	9.41	1.52	4.78	9.55	2.38	2.35	0.18	2.3	0.76	3.14	3.19
9	玄武岩	Es ₃	47.2	15.0	7.63	2.82	6.53	9.02	2.8	1.77	0.16	2.35	0.8	2.86	0.73
10	玄武岩	Es ₃	47.9	15.2	7.64	2.95	6.29	8.59	3.19	1.68	0.14	2.39	0.8	2.75	0.17
11	玄武岩	Es ₃	48.3	15.4	8.89	2.48	5.49	8.3	3	2.1	0.13	2.45	0.79	2.38	0.08
12	玄武岩	Es ₂	47.7	2.06	15.37	2.43	2.87	0.71	1.95	6.93	1.7	6.75	0.87	3.7	3.99
13	玄武岩	Es ₂	46.8	2.07	16.3	3.28	7.4	0.13	7.2	3.97	4.11	1.63	0.33	5.16	1.63
14	玄武岩	Ng	43.2	2.34	14.79	5.91		0.2	9.07	9.74	2.64	1.46	0.69	3.34	0.21
15	玄武岩	Ng	48.0	1.57	12.5	3.29		0.18	9.99	6.74	2.3	0.87	0.31	4.98	0.26
16	玄武岩	Es ₃	51.1	1.80	15.5	3.17	7.77	0.2	3.81	7.95	3.37	2.05	0.39		
17	安山岩	Es ₃	63.1	0.37	15.2	3.53	2.84	0.18	0.19	1.45	6.07	5.36			
18	玄武岩	Ek	45.1	1.42	13	4.65	6.86	0.17	12.9	5.46	3.5	0.9	0.3	4.76	0.46
19	玄武岩	Ek	47.7	1.70	15.2	4.56	5.04	0.15	7.97	6.47	5.1	1.35	0.4	3.52	0.52
20	玄武岩	Es	46.6	2.98	15	2	8.48	0.17	9.8	8.12	3.15	1.75	0.72	1.44	0.24
21	玄武岩	Es	45.2	3.12	14.8	2.7	7.58	0.18	9.15	8.17	4	1.35	0.54	2.41	0.21
22	玄武岩	Ed	43.8	2.88	13.9	2.95	8.77	0.2	10	8.06	3.4	2	0.82	3.15	0.28
23	玄武岩	Em	44.7	2.40	14	5.21	5.72	0.21	8.17	8.56	2.3	0.92	0.89	5.15	6.24

1-20号样品取自济阳拗陷,其中1-5、12-20号据赫英等,2001;6-11号样品为本次测定;16-23号样品取自黄骅拗陷,据高知云(1986);13、14号样品取自三水盆地,据曾观运(1986)

5 讨论

5.1 新生代岩浆活动对区域性 CO₂ 形成时间的制约

从上述地质事实表明,中国东部地区 CO₂ 与新生代岩浆岩之间存在密切的共生关系,特别是盆地内 CO₂ 气藏的分布与砂三期及以后的岩浆岩具有明显的空间共生关系。另外在时间上,中国东部新生代岩浆活动可明显分为四期,其中沙三期是一次重要的岩浆活动期。另外,从沙三期开始,区域上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,而分析表明碱性岩本身含有较高的 CO₂,因此具有较高的 CO₂ 成藏能力。再者,沙三期岩浆具有比其它活动期的岩浆岩含有更高的 CO₂,因此我们认为沙三期是中国东部地区 CO₂ 的主要成藏期,但这并不排除其它时期的成藏潜力,特别是馆陶和明化镇期。考虑到区内新生代岩浆活动具有从早到晚逐渐减弱、从裂谷盆地中心向周边,特别是沿走

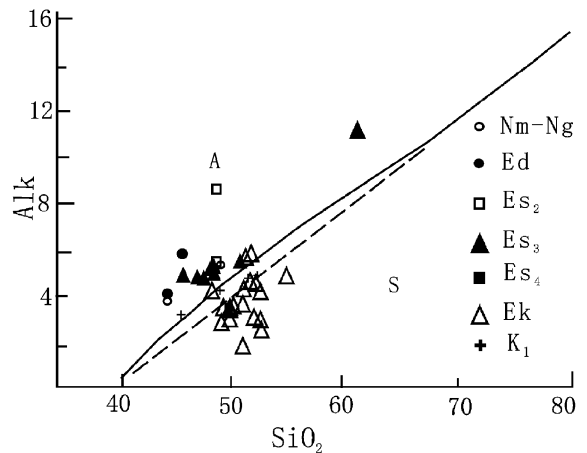


图3 济阳拗陷新生代火山岩硅—碱图解

据杜植华等(1990);曾广策等(1997);高知云(1986);赫英等(1996);曾观运(1986)及本文资料

A-碱性岩区;S-亚碱性岩区;K₁-早白垩世;Ek-古近纪孔店期;Es₄-古近纪四期;Es₃-古近纪三期;Es₂-古近纪二期;Nm-新近纪明化镇期;Ng-新近纪馆陶期;Ed-古近纪东营期

Fig.3 Na₂O + K₂O vs SiO₂ diagram of Cenozoic volcanic rocks in Jiyang depression

滑断层分布的趋势,这将导致 CO_2 成藏能力的下降。主要原因是在走滑断裂发育的地区,虽然不断有 CO_2 从深部输入,但由于储层条件和盖层条件的限制, CO_2 很难保存,即使已形成的 CO_2 也会由于构造的破坏而释放掉。

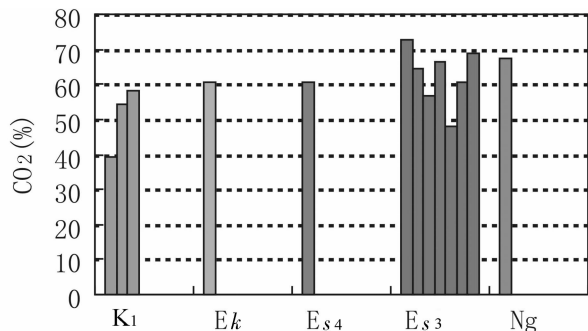


图 4 济阳拗陷不同时代火山岩矿物流体包裹体中 CO_2 的含量

K₁-早白垩世;E_k-古近纪孔店期;E_{s4}-古近纪沙四期;E_{s3}-古近纪沙三期;N_g-新近纪馆陶期

Fig. 4 Histogram of the CO_2 contents in enclosures from the volcanic rocks in different periods

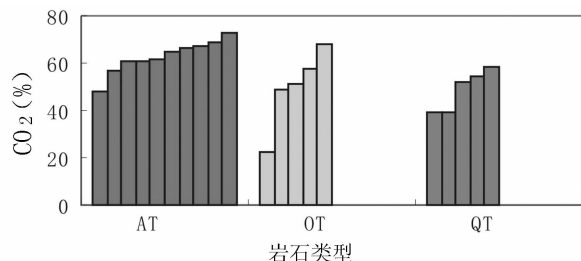


图 5 不同岩性内矿物中流体包裹体 CO_2 含量

AT-碱性玄武岩;OT-橄榄拉斑玄武岩;QT-石英拉斑玄武岩

Fig. 5 Histogram of the CO_2 contents in enclosures of different rock types

5.2 东部地区裂谷盆地 CO_2 成藏的有利条件

地幔中富含 CO_2 的流体主要通过两个途径形成:(1)洋壳俯冲作用是地幔深部流体的重要来源。Hay 等(1998)估算,深海沉积物总量为 1.4×10^{17} t,其中碳酸盐软泥占 72%,红色粘土和硅质泥分别占 19% 和 9%。按质量计算, H_2O 和 CO_2 可分别占深海沉积物总量的 5% 和 12%,其中碳酸盐形式的碳为 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 。俯冲过程中,大部分的孔隙水在地壳浅部被释放出来,俯冲的中深部释放出的流体对上覆地幔楔进行交代,同时流体的注入降低了固相线温度产生熔融。俯冲带内水

的质量平衡计算表明,通过岩浆作用返回地表的水仅占俯冲板块含水总量的一小部分。Peacock (1990)估算大约每年有 8.7×10^{11} kg H_2O 进入地幔,而只有 1.4×10^{11} kg H_2O 通过岩浆活动返回地表,大部分水及其共生的 CO_2 加入到地幔楔中或被带到地幔更深处。(2)地核、地幔脱气。地核及地幔本身也含有大量气体。据估计,地幔水的含量约占 0.1% ~ 0.14%,按太阳系多阶段增生模式计算出的地幔含水量为 $400 \times 10^{-6} \sim 1000 \times 10^{-6}$ (Thompson, 1992),占地球总含水量的 10%。由于 C 易溶于铁中,且某些铁陨石中含有较高的 C,因此地核可能是 C 的大型储集库。对全球 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。

中国具有与美国西部盆岭区相似的构造背景,都是在远离岩浆弧并在大陆一侧发育起来的裂陷盆地。与之类似的地区还包括科安第斯中部的阿根廷 Puna 高原更新世—现代的玄武—安山质弧后火山作用、地中海的 Alboran 及西班牙南部的 Betic 造山带、特提斯—喜马拉雅构造带。最近,我国一些学者(邓晋福等,1996;郭锋等,2002)提出中国东部地区从中生代以来发生了造山带的崩塌和岩石圈减薄,其直接结果是造成地幔物质的上涌、区域热流值增高和地表碱性火山岩的喷发,并形成裂陷盆地。中国东部地球化学研究表明(周新华和朱炳泉,1992),中国东部新生代玄武岩大多数铍同位素分布在高铍低镭区域内,反映出它们主要来自亏损环境。另一方面,本区玄武岩又具有轻稀土元素及不相容元素富集的特殊性征,出现同位素和其作为微量元素的母子体元素的解耦现象。近期地幔富集事件是大陆玄武岩成因的一种流行的理想解释。中国东部部分样品中存在地幔交代作用的地球化学证据(周新华和朱炳泉,1992),如在黄椅山、大椅山、伊通大孤山、小孤山、吉林汪清等地的玄武岩中均发现有具交代结构的二辉橄榄岩地幔岩包体,并普遍含有金云母、韭闪石等地幔交代矿物,并在这些地幔包体中发现含有丰富的 CO_2 。曹荣龙等(1996)发现浙江西堍石榴石二辉橄榄岩包体存在有丰富的 CO_2 和其它气体组分。中国东部地区可能经历过上述两种地质过程:一是前述的岩石圈拆沉作用,把俯冲板块或下地壳岩石带入地幔中,形成具有高 CO_2 含量的源区物质;另一种情况是在本区发育有来自在地幔深处的底辟体,从而形成了富含 CO_2 的地幔源区,为我国东部 CO_2 的形成提供了重要条件。

6 结 论

上述分析表明,中国东部地区 CO₂ 与新生代岩浆岩之间存在密切的共生关系,沙三期不仅是一次重要的岩浆活动期,而且是岩性发生转变的重要时期,沙三期岩浆岩大部分具碱性岩特征,而碱性岩本身含有较高的 CO₂,因此具有较高的 CO₂ 成藏能力。因此我们认为沙三期是中国东部地区 CO₂ 的主要成藏期,但这并不排除其它时期的成藏潜力,特别是馆陶和明化镇期。中国东部地区存在广泛的地幔交代作用,具有形成 CO₂ 的构造背景。

参考文献:

- 曹荣龙,朱寿华.1996. 地幔流体与金属成矿作用. 见:杜乐天主编. 地幔流体与软流层(体)地球化学. 北京:地质出版社,436-459.
- 陈文寄,李大明,李齐.1992. 下辽河裂谷盆地玄武岩的年代学与地球化学. 见:刘若新主编. 中国新生代火山岩年代与地球化学. 北京:地震出版社,44-80.
- 戴金星,宋岩,戴春森,陈安福,孙明良,廖永胜.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,62-77.
- 邓晋福,赵海玲,莫宣学.1996. 中国大陆根-柱构造——大陆动力学的钥匙. 北京:地质出版社,110.
- 杜韞华,代贤忠,刘继昌.1990. 鲁北新生代隐伏火山岩及石油地质意义. 岩石学报,6(3):43-52.
- 高知云.1986. 黄骅拗陷第三系隐伏火山岩及其形成的大地构造环境初探. 岩石学报,2(4):14-30.
- 郭锋,范蔚茗,王岳军,林舸,李晓勇.2002. 华北陆块东部晚中生代基性岩浆作用的地球化学研究. 大地构造与成矿学,26(3):225-228.
- 赫英,王定一,冯有良,刘洪营,宋来亮.1996. 胜利油田火山岩中流体包裹体成分及其意义. 地球化学,25(5):468-473.
- 赫英,朱兴国,徐培苍.1998. 胜利油田火山岩单个包裹体碳同位素. 地质科学,33(3):380-382.
- 李有柱.1995. 中国东部新生代火山岩的地质特征及火山岩作用发育的某些共同规律. 矿物岩石,15(3):1-7.
- 刘丛强,黄智龙,李和平,苏根利.2001. 地幔流体及成矿作用. 地学前缘,8(4):231-244.
- 刘嘉麒.1987. 中国东部地区新生代火山岩的年代学研究. 岩石学报,3(4):21-31.
- 刘若新,陈文寄,孙建中等.1992. 中国新生代火山岩的 K-Ar 年代与构造环境. 见:刘若新主编. 中国新生代火山岩年代与地球化学. 北京:地震出版社,1-43.
- 孙明良,陈践发.1996. 济阳拗陷天然气氩同位素特征及二氧化碳成因与第三纪岩浆活动的关系. 地球化学,25(5):475-479.

- 陶明信,徐永昌,沈平,刘文汇.1996. 中国东部幔源气藏聚集带的大地构造与地球化学特征及成藏条件. 中国科学(D辑),26(6):531-536.
- 曾观运.1986. 广东省非烃气体的分布与产状. 石油天然气地质,7(4):404-411.
- 曾广策,王方正,郑和荣,付瑾平.1997. 东营凹陷新生代火山岩及其与盆地演化、油藏的关系. 地球科学—中国地质大学学报,22(2):158-163.
- 周新华,朱炳泉.1992. 中国东部新生代玄武岩同位素和地幔化学区划. 见:刘若新主编. 中国新生代火山岩年代与地球化学. 北京:地震出版社,366-391.
- 朱炳泉,王慧芬,陈毓蔚,常向阳,胡耀国,谢静.2002. 新生代华夏石圈减薄与东亚边缘海盆地构造演化的年代与地球化学制约研究. 地球化学,31(3):213-219.

References:

- Chao Yunlong and Zhu Shouhua. 1996. Mantle fluid and metal mineralization. In: Du Letang ed. Mantle fluid and asthenosphere geochemistry. Beijing: Geological Publishing House,436-459.
- Chen Wenji, Li Daming and Li Qi. 1992. Geochronology and geochemistry of basalts in lower Liaohe rift. In: Liu Rouxing ed. Geochronology and geochemistry of the Cenozoic volcanic rocks in Eastern China. Beijing: Earthquake Publishing House,44-80.
- Dai Jinxing, Shong Yan, Dai Chungsheng, Chen Anfu, Sun Mingliang and Liao Yongsheng. 1995. Genesis and forming condition of inorganic gas in Eastern China. Beijing: Science Press, 62-77.
- Deng Jinfu, Zhao Hailing and Mo Xuanxue. 1996. The continental root-plume structure in China: A key to geodynamics. Beijing: Geology Publishing House,110.
- Du Wenghua, Dai Xiangzhong and Liu Jichang. 1990. The concealed Cenozoic volcanic rocks and its petroleum geological implication. *Acta Petrologica Sinica*, 6(3):43-52.
- Gao Zhiyun. 1986. The Tertiary volcanic rocks and its tectonic setting in Huanghua depression. *Acta Petrologica Sinica*, 2(4):14-30.
- Guo Feng, Fan Weiming, Wang Yuejun, Lin Ge and Li Xiaoyong, 2002. Geochemistry of the late Mesozoic mafic magmatism from the eastern North China block: A comparative study. *Geotectonica et Metallogenia*, 26(3):225-228.
- Hay W W, James L S and Christopher N. 1998. Mass / age distribution and composition of sediments on the ocean floor and the global rate of sediment subduction. *J Geophys Res*, 93:4933-4940.
- He Ying, Wang Dingyi, Feng Youliang, Liu Hongyin and Song Lailiang. 1996. Compositions of fluid inclusions and impli-

- cations in volcanic rocks, Shengli Oil Field. *Geochimica*, 25(5): 468 – 473.
- He Ying, Zhu Xinguo and Xu Pechang. 1998. Carbon isotope of single inclusion in Shengli Oil Field. *Scientia Geologica Sinica*, 33(3):380 – 383.
- Leo E, Harris D M and Anderson Jr A T. 1983. Alteration of oceanic crust and geologic cycling of chlorine and water. *Geochem et Cosmochim Acta*, 47: 1613 – 1624.
- Li Youzhu. 1995. The geological characters of Cenozoic volcanic rocks, some patterns of Cenozoic volcanism and their petrological interpretation in eastern China. *J Mineral petrol*, 15(3): 1 – 7.
- Liu Congqiang, Huan Zhilong, Li Heping and Su Genli, 2001. Mantle fluid and mineralization. *Earth Science Frontiers*, 8(4):231 – 244.
- Liu Jiaqi. 1987. Geochronology of the volcanic rocks in eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 3(4): 21 – 31.
- Liu Rouxing, Chen Wenji, Sun Jiangzhong *et al.* 1992. K-Ar geochronology and tectonic setting of the Cenozoic volcanic rocks in China. In: Liu Rouxing ed. Geochronology and geochemistry of the Cenozoic volcanic rocks in Eastern China. Beijing: Earthquake Publishing House, 1 – 43.
- Peacock S M . 1990. Fluid processes in subduction zone. *Science*, 748:329 – 337.
- Sun Mingliang and Chen Jianfa. 1996. Helium isotopic characteristics, genesis of CO₂ in natural gases and distribution of Tertiary magmatism in the Jiyang depression. *Geochimica*, 25(5):475 – 479.
- Tao Mingxing, Shu Yongchang, Shen Ping and Liu Wenhui. 1996. Tectonics, geochemistry and gas – forming condition of congregation zone of mantle-deriving gas in the Eastern China. *Science in China (Series D)*, 26(6):531 – 536.
- Thompson A B. 1992. Water in the earth's upper mantle. *Nature*, 358:295 – 302.
- Zeng Guanyun. 1986. Non-hydrocarbon gas in Guangdong province. *Geology of Oil and Gas*, 7(4): 404 – 411.
- Zeng Guangce, Wang Fangzheng, Zheng Herong and Fu Jinping. 1997. Cenozoic volcanic rocks and their relations to basin evolution and oil accumulation in Dongying sag. *Earth Science Journal of China University of Geosciences*, 22(2):158 – 163.
- Zhou Xinhua and Zhu Bingquan, 1992. Isotope and mantle district of the Cenozoic volcanic rocks in Eastern China. In: Liu Rouxing ed. Geochronology and geochemistry of the Cenozoic volcanic rocks in the Eastern China. Beijing: Earthquake Publishing House, 366 – 391.
- Zhu Bingquan, Wang Huifen, Chen Yuwei, Chang Xiangyang, Hu Yaoguo and Xie Jing. 2002. Geochronological and geochemical constraint on the Cenozoic extension of Cathaysian lithosphere and tectonic evolution of the border sea basins in East Asia. *Geochimica*, 31(3):213 – 219.

CONSTRAINTS ON FORMATION TIME OF CO₂ FROM CENOZOIC MAGMATISM IN EASTERN CHINA

WANG Xinmou^{1,2}, XIA Bin¹, CHEN Genwen¹, Yang Hanjie², CHEN Haiyun² and GUO Dong²

(1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry & South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, GD 510640, China; 2. Shengli Oil Field Ltd., Dongying, SD 257001, China)

Abstract: There are four periods of magmatism in Eastern China, they are 65 ~ 41 Ma, 41 ~ 21 Ma, 21 ~ 13 Ma, and 11 ~ 1 Ma, respectively. The magmatic rocks for the first and second periods erupted within the rift basins. The magmatic rocks for the third and fourth periods occurred on the margins of the basins or along the Tanlu fault belt. The CO₂ derived from magma in Eastern China mainly formed in the pull-apart basins, and are consistent with the magmatic rocks formed during the first and second periods in space. The geochemical data of volcanic rocks from Jiyang depression indicate that magmatic rocks of early Tertiary are mainly tholeiitic and calc – alkali. The rocks formed after Es₃ are all alkali rocks. The contents of CO₂ enclosure in volcanic rock from the Shengli Oil Field indicate that the contents of CO₂ in the volcanic rocks from Es₃ are observably higher than those from other rock units, and the CO₂ contents in the enclosures of alkali basalt are markedly higher than those of tholeiite. So the magmatism from Es₃ to Ng is the main period for the formation of CO₂.

Keywords: CO₂; magmatic activity; Jiyang depression; Eastern China