

莺歌海盆地 DF1—1 底辟断裂系统 及其对天然气成藏的控制

殷秀兰¹, 李思田², 杨计海³, 张启明³, 童传新³

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074;

3. 南海西部石油公司, 广东湛江 524057)

摘要: 莺歌海盆地的巨厚充填、高地温梯度及大规模的超压流体活动等特殊的地质背景, 造就了 DF1—1 底辟构造的独特性, 其内天然气的总体特征与底辟区的断裂系统存在着密切的联系. 底辟区内的超压流体活动使其上覆地层产生众多的断裂和裂隙, 这些垂向上的断裂和裂隙既构成了异常压力体系能量释放的主要通道, 同时也形成了天然气运移的垂向输导体系. 在断裂开启过程中上升的活动流体主要取决于断裂下延的深度及断裂上延所连通的 中深—浅层的渗透性砂体, 因此由断裂与砂体的相互配置所构成的输导体系在 DF1—1 气田的成藏中起着重要的作用. 根据 DF1—1 的成藏特点, 强调断裂系统与天然气运聚的相互促进关系, 建立了断裂系统与天然气成藏关系模式.

关键词: DF1—1 底辟; 断裂系统; 天然气成藏; 天然气运聚.

中图分类号: P542; P618.130.2

文献标识码: A

文章编号: 1000—2383(2002)04—0391—06

作者简介: 殷秀兰(1968—), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为盆地构造与流体.

E-mail: xlyin@yin.com.cn

莺歌海盆地目前主要的储层埋深多在 2 000 m 以上, 但所含天然气类型皆是以高成熟气为主(相当 R_o 为 2.0±), 天然气来源于深部^[1,2]. 天然气运移的方式主要是通过断裂系统垂向运移到高孔隙率的海相砂岩层中. 本次研究选择底辟区典型的 DF1—1 构造为代表, 研究其断裂系统的分布特征及其形成机制, 以期揭示莺歌海盆地内天然气运移的规律.

莺歌海盆地的主要构造区划为中央底辟区、西部斜坡、东部斜坡、南部潜山等多个构造单元, 主要构造特征是底辟构造十分发育.

1 中央底辟构造带断裂分布

底辟区断裂的分布不仅受基底断裂的控制, 底辟构造活动对它的影响也十分重要^[3,4]. 首先, 右旋剪切作用形成近南北向的张性破裂, 从而诱导了底辟活动, 所以底辟构造呈有规律的近南北向雁行式

排列^[5]; 其后的底辟活动形成了新一期的断裂, 这一期断裂的展布样式严格受底辟活动的控制. 同时, 底辟活动对先期断裂有促进作用.

所以将中央底辟构造带的断裂分为控制底辟发育的先期断裂及底辟活动所造成的断裂. 对于控制底辟发育的断裂, 这里主要强调的是断裂的总体展布及其在剖面上的特征. 目前已发现的底辟构造, 总体呈北西—南东向展布, 除了可细分为 5 排相互平行的近南北向雁列式分布外, 每个底辟体的长轴走向均为近南北向, 而且由北西向南东底辟体内的断裂由近南北向转为北西向(图 1). 在过地中央底辟带的地震剖面上, 随处可见地震反射模糊带^[6]. 这主要是由于深部底辟活动时, 在上覆负载层中产生断裂、破碎带和垂向裂隙, 并伴有流体的释放, 地震反射波的传播受到严重的干扰造成的. 经钻井证实, 地层成层性好, 横向可对比, 图 2 显示了某地震剖面上这类断裂的特征, 该断裂在在浅部使地层明显错断.

由底辟活动所造成的断裂, 主要分布在底辟体的上部或两翼. 其中一部分断裂是沿先期构造的薄弱处发展起来的, 或者使早期断裂再活动, 不断地向

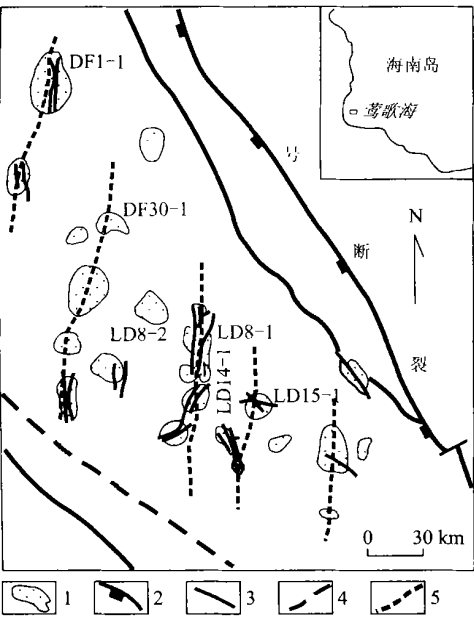


图 1 莺歌海盆地底辟体分布及其断裂特征
Fig. 1 Distribution of diapirs and characters of faults in Yinggehai basin
1. 底辟体; 2. 盆缘断裂; 3. 底辟内部断裂; 4. 推测断裂; 5. 底辟体展布方向

上延伸, 甚至达到地表, 所以其总体的展布主要为继承性的近南北向, 如 DF1-1, DF29-1, CN18-1, CN12-1 等构造. 还有一部分断裂, 是由于底辟在上隆过程中, 顶部形成局部的张性应力场造成的, 这些断裂在无论剖面或平面上均呈放射状, 如 LD8-1, LD15-1.

2 DF1-1 的断裂系统特征

DF1-1 构造位于莺歌海盆地中央底辟带的北部海区, 是莺歌海盆地中最典型的构造之一, 也是盆地主要的含气构造. 其内断裂系统的特征在莺歌海盆地中具有一定的代表性.

2.1 DF1-1 底辟体特征

与莺歌海盆地中其他底辟构造相比, DF1-1 底辟上隆幅度较低, 呈低缓波状, 长轴约 21 km, 短轴 12 km. 深层构造幅度明显大于浅层, 地层顶薄冀厚, 而且具有东陡西缓的特征.

(1) 底辟体的物质基础. 底辟体的主要物质来自中新世以来的泥质岩沉积. 由于莺歌海盆地沉积巨厚, 尤其是 10 Ma 以来, 平均年沉积速率约 0.5 mm/a, 沉积厚度最大可达 10 000 m, 现今 DF1-1

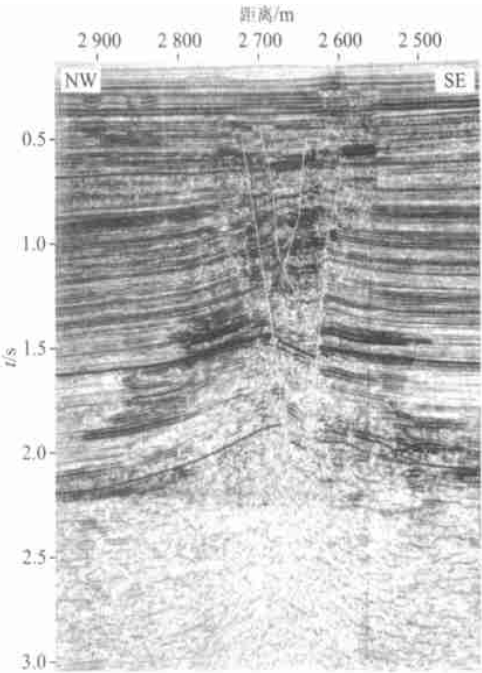


图 2 莺歌海盆地地震剖面断裂特征
Fig. 2 Characters of faults from seismic profile in Yinggehai basin

底辟区当时又位于盆地沉积中心, 长期处于浅海和半深海环境, 形成厚层泥源岩^①. 随着海平面的频繁升降, 曾出现多次深浅水环境交替变化, 其中 T₅₁-T₅₂ (三亚组中部)、T₄₁-T₅₀ (梅山组下部)、T₂₇-T₃₀ (莺歌海组下部) 就代表不同时期最大海侵期沉积. (2) 底辟体内的气层划分. 根据电测资料结合岩石的组合物证和含气特征, 将 DF1-1 上浅层自上而下分为 G₁, G₂, G₃, G₄, G₅ 5 个组. 每个组的上部为储层, 下部为泥岩. 可进一步将 G₂, G₃ 气组划分为 G₂^上, G₂^下 和 G₃^上, G₃^下 4 个亚组.

2.2 断裂系统的分布

DF1-1 区由于底辟活动的影响, 断裂相对较密集. 主要集中于底辟体的上部及翼部, 随远离底辟体, 断裂逐渐减少.

(1) 平面展布. 由于底辟活动的应力集中在构造中心部位, 而且其活动具有幕式特征, 晚期形成的断裂叠加并改造了早期断裂, 因而形成了断裂复杂带. 断裂带基本上呈南北向展布, 而且在不同界面上, 断裂的数量及特征均有差别. T₂₇ 顶界面的断裂分布见图 3. 为方便描述, 将断裂按从西向东的顺序给予编号, 其中规模最大的为 1 号断裂. 该断裂长约 10 km.

① 吕明. 莺歌海盆地中深层储层条件 (内部资料), 1997.

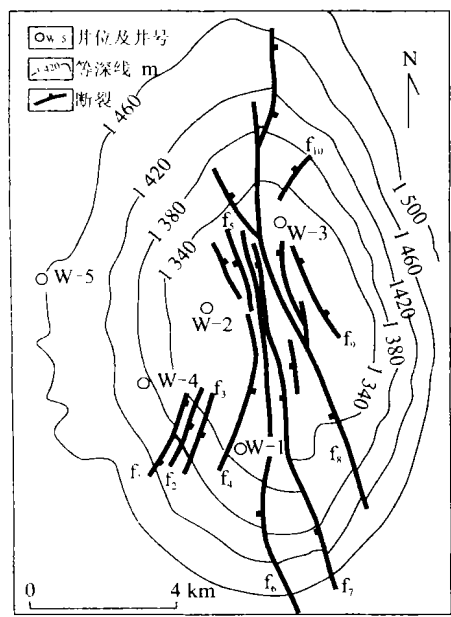


图 3 DF1-1 底辟 T₂₇界面断裂分布
Fig. 3 Faults distribution of T₂₇ in DF1-1 diapir

向北延伸有 4 条派生断裂,使断裂的形态呈树枝状. f₈ 断裂南北向贯通,将 DF1-1 划分为东、西两区. 东部断裂相对较密集,包括了 f₁~f₇ 断裂,勘探程度较高,有 7 口井控制. f₁, f₂ 及 f₃ 断裂均呈 NNE 向,长 2.6~3 km. f₄ 断裂北部走向为 NW18°,南部转为 NE20°,总长度为 7.3 km. f₅ 断裂分布于北部,走向 NW19°,延伸较短,仅 2.3 km. f₆ 断裂规模较大,可达 11.3 km,北部走向 NW16°,中部为南北向,向南又转为 NW 向,所以 f₆ 断裂总体呈反“S”形. f₇ 断裂与 f₆ 断裂规模相近,但呈南北向延伸. f₈ 断裂以西仅有一口井 W-3 控制,断裂较少,仅 f₉ 和 f₁₀ 两条断裂,而且规模都比较小. f₉ 号断裂长 3.2 km,走向 NW23°,而 f₁₀ 断裂仅 1.6 km,呈 NE40°延伸.

(2)剖面特征. DF1-1 底辟构造断层最大的特点是断距小但具有分隔作用. 除上述 T₂₇界面的盆地边缘断裂落差达 42 m 外,其余均小于 20 m. 尽管如此,这些断层由于塑性泥流或后期沉积的充填,都能够起到分隔的作用,造成了断层两翼压力系统、气水界面及天然气组份的明显差异:①压力系统的差异. DF1-1 底辟构造压力资料表明:T₂₇界面的 f₈ 断裂所划分的东、西断块是不连通的. 纵向上 G₁, G₂, G₃ 气组也不属同一压力系统,但均属正常压力系统,压力系数 1.03~1.14. 据 W-1 井 DST 取得的压力资料计算,在 2 563 m 测压为 52.8 MPa,压

力系数 2.6,温度为 129.5℃,温度梯度 4.36℃/100 m,属超高压高温地层,这是因为受底辟上隆所引起的压力传递结果. 而 W-3 井在 1333.5~1372.5 m 处 DST 测压为 13.93 MPa,压力系数 1.05. 推测这一压力系数的变化是由于上述 T₂₇界面的断裂的向下延伸致使物质上隆造成的. ②气水界面的差异. DF1-1 底辟构造纵向上 G₁, G₂, G₃ 气组之间有厚层泥岩封隔,平面上被南北向分布的上述 T₂₇界面的 f₈ 断裂分成东、西两个断块,气水分布比较复杂,不同断块不同层组都是独立的气藏. 气水分布纵向上分层,在高分辨率剖面上表现得十分清楚. 测井压力资料显示,不同层位具有各自的气水界面(表 1),东、西断块的气水界面分别相差近 20 m. 因此, G₂, G₃ 气组气水分布主要受构造、断层控制. ③气组分的差异. 不同断块、不同层天然气组分差别较大,可能与断层的发生、发展、开启、封闭及天然气运移、聚集的不同阶段有关. CO₂ 在 DF1-1 底辟区内分布清楚,主要受南北向分布的断裂控制. 断裂东区 G₂, G₃ 气组 CO₂ 含量高,分别为 55.1%, 71.1%,而断裂西部 G₂ 气组 CO₂ 的含量低,一般不超过 1%. 何家雄等^[7]通过对莺歌海盆地浅层气藏富 CO₂ 气深入研究,认为 CO₂ 属壳源无机成因,有极少量壳幔过渡型混合成因. 来自于深部的 CO₂ 及其他气体组分主要通过各种断裂和裂缝系统向上运移,由于断裂和裂缝的开启程度及其封堵作用造成东、西断块的差异.

表 1 DF1-1 底辟构造气水界面对比				
Table 1 Contrast of gas-water interfaces in the DF1-1 diapir				
	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄
东部	1 387	1 375	1 378	
西部	1 400	1 396	1 385	1 436

3 断裂系统对底辟成藏的控制作用

断裂作为油源和储层之间的垂向通道,应具备以下特征:(1)断裂为长期或多期活动的继承性断裂;(2)断裂切割超压的烃源岩;(3)断裂延伸至生烃门限之下;(4)断裂与储层连通^[5]. 其中,断层切割超压生烃岩尤为重要. 莺歌海盆地中,超压的生烃岩是一种活跃的生烃岩,它能不断通过各种渠道排泄其中的流体,而且

超压带对油气向上运移产生的推动力要比浮力大得多,因此能有效地克服运移中的阻力,使油气不断地向上渗流或快速运移^[7~10].在断裂断层切割到超压体中的砂体或裂缝带时,由于断层为能量释放的主要通道,而砂体和裂缝带则为超压体中聚集油气的空间,对油气的运移更为有利.在断层闭和期间,这些空间大量吸收超压带中的油气,随着聚集能量逐渐增大,再次达到界限压力时,造成断裂开启,发生油气快速运移^[11].如此反复,便形成油气的多次运移.

莺歌海盆地发育着底辟,这些底辟构造是异常高温高压地质体的具体表现,它是深部极高的异常压力和高温体释放本身能量的一种方式.靠近底辟构造的异常高压相对较浅,如 LD14-1 某井 1 480 m, LD8-1 某井 1 680 m 钻遇高压地层,而远离底辟构造的 LD30-1 某井,虽然从渐新世开始一直处于沉降中心和沉积中心部位,但其高压顶面在 3 200 m,这进一步说明底辟构造将深部的高压高温流体携带至浅层.

从已钻井浅层气样干燥系数和碳氢同位素分析,基本反映出天然气为成熟和高成熟阶段的产物,相当于 R_o 范围在 1.1%~1.8% 之间,形成温度需达 200 °C 以上,深度应大于 4 000 m.以上资料也说明,浅部的异常高压高温流体是底辟带上来的.

4 断裂作用下的成藏模式

DF1-1 气田成藏主要的通道就是由断裂与砂体的相互配置所构成的纵横交错的输导体系.这一输导体系的主要特征是分布在底辟体的上方及周围.连通方式有两种:断裂连通砂体及砂体连通断裂.

4.1 断裂连通砂体

开启的断裂从底辟带深部延伸到上部,切穿渗透性砂岩层,来自深部天然气主要沿开启的断裂面,进入不同深度的砂体,并继续沿渗透性的砂体进行侧向运移,在浅层一中深层的圈闭中不断的聚集起来.这种输导体系以垂向运移为主,天然气的主要活动时间为断裂的开启阶段.先前的断裂闭合面构成天然气运移的遮挡面,是形成气藏的有力因素.

4.2 砂体连通断裂

超压流体所携带的大量的天然气快速地沿开启断裂通道上升,通过浅部渗透性砂体与另一个开启的断裂相连通^[12~14].在此过程中流体所携带和析出的各种天然气以自身的浮力沿孔渗性较大的砂体

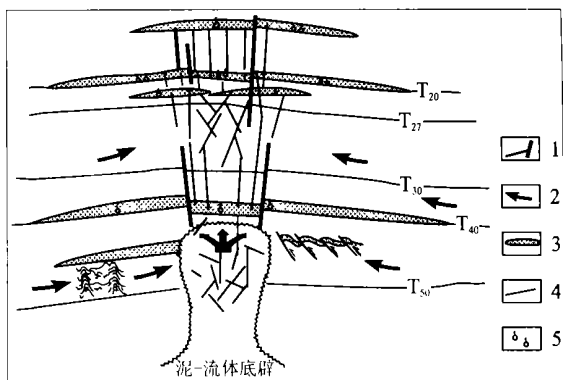


图 4 DF1-1 底辟断裂系统与天然气成藏关系模式

Fig. 4 Model of fault system and gas accumulation in DF1-1 diapir

1. 断裂及裂隙; 2. 天然气/流体运移方向; 3. 砂体; 4. 层序界线;
5. 含气层

进行一定距离的侧向运移,也可能会滞留在砂体中形成天然气藏.以上两种连通方式只是断裂作为输导体系中的两个极端类型,实际的输导体系由这两种连通和以任一种方式为主而介于其间的各种状态组成.尤其是 DF1-1 底辟形成时期较晚(中新世中晚期以后),现今尚在活动,即地层流体的压裂作用至今仍在进行,且不断出现新的运移通道. DF1-1 底辟构造正好处于盆地的主要生烃区,现今三亚组顶镜质体反射率大于 1.0%,已处于主生烃窗.该带在平面上局部圈闭分布区与主要生烃区基本一致,纵向上烃源岩、储集岩和封闭岩配置好,由早期超压流体活动产生的断层和裂缝为天然气的垂向运移提供通道,超压流体作为天然气运移的载体,对天然气的成藏非常有利,从而构成了 DF1-1 底辟气藏的特色.根据 DF1-1 的成藏特点,强调断裂系统与超压流体活动的相互促进关系,建立了断裂系统与天然气成藏关系演化模式(图 4).

参考文献:

- [1] 龚再升,杨甲明,郝芳,等.莺歌海盆地与琼东南盆地成藏条件的比较及天然气勘探方向[J].地球科学——中国地质大学学报,2001,26(3):286-290.
GONG Z S, YANG J M, HAO F, et al. Difference in natural gas accumulation conditions between Yinggehai and Qiongdongnan basins and its implications for natural gas exploration [J]. Earth Science — Journal of China University of Geosciences, 2001, 26(3): 286-290.
- [2] 张启明,胡忠良.莺—琼盆地高温高压环境及油气运移机制[J].中国海上油气,1992,6(1):1-10.

- ZHANG Q M, HU Z L. High-temperature, overpressure and mechanism of oil/gas migration in Yinggehai-Qiongdongnan basin [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 1992, 6(1): 1-10.
- [3] 殷秀兰, 李思田, 杨计海. 底辟构造分析及热流体运移模拟——以莺歌海盆地 DF1-1 为例[J]. *地学前缘*, 2000, 7(3): 81-89.
- YIN X L, LI S T, YANG J H. Study on fault system and simulation of driving fluid migration in DF1-1 diapir, Yinggehai basin, South China Sea [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(3): 81-89.
- [4] 殷秀兰, 李思田, 马寅生, 等. 莺歌海盆地构造演化的三维模拟实验及其动力学意义[J]. *地质论评*, 2001, 47(5): 535-541.
- YIN X L, LI S T, MA Y S, et al. Three-dimensional tectonic modeling of the Yinggehai basin in the Late Tertiary and its geodynamic significance [J]. *Geological Review*, 2001, 47(5): 535-541.
- [5] 龚再升, 李思田. 南海北部大陆边缘盆地分布与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- GONG Z S, LI S T. Continental margin basin analysis and hydrocarbon accumulation of the northern South China Sea [M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [6] 王槐基. 莺歌海盆地地震异常体特征及其地震地质解释[J]. *中国海上油气*, 1997, 11(2): 131-138.
- WANG H J. Characteristic of seismic abnormal blocks and their seismic geological interpretation [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 1997, 11(2): 131-138.
- [7] 何家雄, 陈伟煌, 李明兴. 莺一琼盆地天然气成因类型及气源剖析[J]. *中国海上油气*, 2000, 4(6): 398-405.
- HE J X, CHEN W H, LI M X. Genetic types of natural gas and source rock in Ying-Qiong basin [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2000, 4(6): 398-405.
- [8] 解习农, 李思田, 董伟良, 等. 热流体活动示踪标志及其地质意义——以莺歌海盆地为例[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 1999, 24(2): 183-188.
- XIE X N, LI S T, DONG W L, et al. Trace marker of hot fluid flow and their geological implications — a case study of Yinggehai basin [J]. *Earth Science — Journal of China University of Geosciences*, 1999, 24(2): 183-188.
- [9] Perez B F, Alonso S, Ercilla G. History of mud diapirism and trigger mechanisms in the Western Alboran Sea [J]. *Tectonophysics*, 1997, 282: 399-422.
- [10] Lewis J C, Byrne T. Deformation and diagenesis in an ancient mud diapir, Southwest Japan [J]. *Geology (Boulder)*, 1996, 24(4): 303-306.
- [11] 陈建渝, 牛瑞卿. 断陷盆地多次运移成藏的有机地球化学研究[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2000, 25(3): 253-259.
- CHEN J Y, NIU R Q. Organic geochemistry research into multi-phase petroleum migration and accumulation in rift-subsidence basin [J]. *Earth Science — Journal of China University of Geosciences*, 2000, 25(3): 253-259.
- [12] Antonellini M, Aydin A. Effect of faulting on fluid flow in porous sandstone: geometry and spatial distribution [J]. *AAPG Bulletin*, 1995, 79(5): 642-671.
- [13] Van Balen R, Cloetingh S. Tectonic control of the sedimentary record and stress-induced fluid flow: constraints from basin modeling [A]. In: Parnell J, ed. *Geofluids: origin, migration and evolution of fluids in sedimentary basins* [C]. Geological Society Special Publication, 1994, 78: 9-26.
- [14] Powers M C. Fluid release mechanisms in compacting marine mudstones and their importance in oil exploration [J]. *AAPG Bulletin*, 1967, 51: 1240-1254.

Fault System and Its Control over Gas Accumulation in DF1-1 Diapir, Yinggehai Basin

YIN Xiu-lan¹, LI Si-tian², YANG Ji-hai³, ZHANG Qi-ming³, TONG Chuan-xin³

(1. Institute of Geomechanics, CAGS, Beijing 100081, China; 2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. China Offshore Oil Nanhai West Corp, Zhanjiang 524057, China)

Abstract. Yinggehai basin has peculiar sedimentary, tectonic and evolution model and is abundant in hydrocarbon resources. As the main and typical structure in diapir area, DF1-1 diapir develops a lot of faults and cracks, virtually related with gas accumulation. The process of formation, opening and closing of the

faults in the top of the diapirs basically display the progression of the fluid/gas migration. When overpressure reached such a critical value with oil/gas accumulating and pressure increasing, faults open as the pathway of oil/gas migration. It will be more favorable if the fault cut the sandstone bodies or fractures in the overpressure area, which might result in oil/gas accumulating into these sandstone bodies (reservoirs). Therefore, faults are the fluid-released pathway and sandstone bodies and fractures as reservoirs of oil/gas in DF¹⁻¹ diapir. The spatio-temporal match of vertical source rocks, reservoir and seals, combined with fault system provided by diapirism, result in the formation of large DF¹⁻¹ gas field. The models about fault system and gas accumulation have also been presented and discussed.

Key words: DF¹⁻¹ diapir; fault system; gas accumulation; gas migration.

九岭地体东缘一次重大地质事件的发现及意义

蔡雄飞, 章泽军, 顾延生, 秦松贤, 王德琿

(中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074)

长期以来, 华南前震旦系基础地质研究普遍认为, 九岭地体与相距不远的怀玉地体为相互独立的块体, 它们在构造发展阶段上、岩性组合上各具特色. 九岭地体具大陆地壳的亲缘性, 发育巨厚的原始沉积构造保存完好的砂、板岩, 为被动大陆边缘的沉积组合, 而相距不远的怀玉地体, 则具大洋地壳的亲缘性, 为火山岩及火山碎屑岩系组合, 沿断裂带, 蛇绿岩断续分布, 并已遭受强烈的变质和变形, 构造侵位特征十分明显, 原始层序残缺不全, 为活动大陆边缘沉积组合, 也是华南前震旦系历来十分关注的热点地区^[1].

地质事件发现在九岭地体东缘的游城乡东南部中元古界下部夹层中. 夹层为熔岩层, 似层状, 与围岩截然不同, 出露面积约 1 km². 熔岩标本和薄片经岩石学专家多人鉴定, 为具片理化、安山质似斑状熔岩. 熔岩的同位素年龄由我校教育部壳幔实验室, 使用直接蒸发单颗粒锆石年龄方法, 测定为(1 037 ± 8) Ma, 可代表熔岩喷发形成的时代. 这一岩浆喷发的重大地质事件的年龄与咫尺之距的赣东北怀玉地体的中、新元古代碰撞年龄 900~1 000 Ma 不谋而合.

九岭地体东缘的安山质熔岩的首次发现, 不但为寻找岩源区的火山喷发口提供了线索, 更为重要

的是, 在前震旦系华南构造演化阶段具有重要意义. (1)表明九岭地体在中、新元古代构造发展阶段, 并不是风平浪静, 而是有着“突变”发展演化阶段的特点. (2)表明本区与赣东北的怀玉地体并不是各成体系, 独立发展的块体, 而是在空间上相互响应的、有着紧密的关系.

九岭地体东缘的安山质熔岩的发现, 给华南一直关注的赣东北中、新元古代之际的构造运动提出了一个新问题, 就是在厘定本地区的构造运动时, 不能仅仅从本区的尺度出发, 就地论事, 而需要整体分析, 把本区的尺度放在一个大区域构造格架去认识问题, 这样也许对重大地学问题认识会更全面和更深刻.

参考文献

[1] 马长信, 项新葵. 赣东北前寒武纪变质地层钨模式年龄初步研究[J]. 地质科学, 1993, 28(2): 145—150.
MA C X, XIANG X K. Preliminary study of the Nd isotopic model ages of the Precambrian metamorphic stratum in northeastern Jiangxi Province[J]. Scientia Geologica Sinica, 1993, 28(2): 145—150.