

王璞珺,张功成,蒙启安等.地震火山地层学及其在我国火山岩盆地中的应用.地球物理学报,2011,54(2):597~610,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.039

Wang P J, Zhang G C, Meng Q A, et al. Applications of seismic volcanostratigraphy to the volcanic rifted basins of China. Chinese J. Geophys. (in Chinese). 2011, 54(2):597~610,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.039

地震火山地层学及其在我国火山岩盆地中的应用

王璞珺¹,张功成²,蒙启安³,鲁宝亮¹,朱德丰³,孙晓猛¹

1 吉林大学地球科学学院,长春 130061

2 中海油研究总院,北京 100027

3 大庆油田勘探开发研究院,大庆 163712

摘要 火山地层,物源来自于地下,搬运和分散方式有岩浆流、碎屑流、空落堆积及它们的再搬运,是不同于所有沉积地层的“异化地层”。与层序地层学研究沉积地层类似,火山地层学着重研究火山岩系的层序界面和内部充填样式,通过地震层序分析刻画成因地层单元和地层对比关系。应用地震火山地层学在南海北部陆缘带识别出向海倾斜反射(SDR)、向陆流、外高和供给岩墙等表征火山裂谷陆缘的地震-地质单元;在松辽盆地识别出组-段-旋回三级层序界面,和垂向加积、侧向前积、披盖沉积、造丘和穿切五种充填样式。目前,火山地层学研究分为陆内和陆缘两个方向。陆内盆地的中小尺度地震相-火山岩相的研究精度高;而陆缘盆地大尺度地震-地质单元的成果更具普适性。二者取长补短、互为借鉴,将成为今后地震火山地层学研究的重要方向。

关键词 异化地层,地震火山地层学,南海盆地,松辽盆地,向海倾斜反射(SDR)

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.039

中图分类号 P631

收稿日期 2010-07-20,2010-09-09 收修定稿

Applications of seismic volcanostratigraphy to the volcanic rifted basins of China

WANG Pu-Jun¹, ZHANG Gong-Cheng², MENG Qi-An³, LU Bao-Liang¹,
ZHU De-Feng³, SUN Xiao-Meng¹

1 College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

2 Beijing Research Center of CNOOC, Beijing 100027, China

3 Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield Company Ltd., Daqing 163712, China

Abstract Materials comprising volcanogenic successions are derived from erupted components and transported by lava/pyroclastic flows and fallout as well as reworking processes. Their buildups are substantial allostratigraphy and quite different from all kind of sedimentary sequences. The same with sequence stratigraphy for sedimentary rocks, volcanostratigraphy focuses on filling patterns confined by sequence boundaries, and depicts geological features and correlation of the successions in a volcanic basin. Some volcanic seismic facies units, including inner seaward dipping reflectors (SDR), landward flows, outer high and feeder dikes, were recognized in northern margin of the South China Sea based on the concepts of seismic volcanostratigraphy, indicating volcanic rifted margin. For volcanogenic successions of the Songliao Basin, it was realized that there are three types of sequence boundaries, in descending order of formation, member, and volcanic cycle, and that there are five patterns of basin filling i. e. aggradation, progradation, draping, mounding and cutting. Inland basins and continental

基金项目 国家科技重大专项(2008ZX05025)和国家“973”项目(2009CB219303)联合资助。

作者简介 王璞珺,男,1959年生,博士、教授、博士生导师,从事盆地火山岩和油气地质勘查研究与教学。E-mail:wangpj@jlu.edu.cn

margins are two branches concerning the applications of seismic volcanostratigraphy. By comparison, intrafacies components/components associations (4th tier) and facies associations (3rd tier) were three-dimensionally described in inland basins. On the other hand, seismic facies (2nd tier) like SRD and landward flows were globally developed in the marginal basins (cf. first tier heterogeneity is on the scale of graben). Optimizing combination of the two branches will make seismic volcanostratigraphy more fruitful.

Keywords Allostratigraphy, Seismic volcanostratigraphy, South China Sea Basin, Songliao Basin, Seaward dipping reflectors (SDR)

1 引言

火山地层学的起源可以追溯到莱伊尔在 1830~1866 年间,对维苏威等欧洲第四纪火山的研究^[1]. 至 20 世纪中叶随着对火山研究的深入,人们越发认识到火山成因序列有其自身的规律性,需要专门的术语及其理论体系加以描述^[2]. 有火山物质充填的盆地即为火山岩盆地. 在我国,无论是东部的中生代盆地还是西部的古生代盆地,其下部断陷层序中常为火山成因序列,多属火山岩盆地范畴. 继碎屑岩和碳酸岩^[3],火山岩正成为油气勘探的重要接替领域. 地震火山地层学(seismic volcanostratigraphy)是在火山岩盆地研究的过程中形成和发展起来的一门新兴学科,它是在火山地层学基础上,用地震资料识别火山岩盆地的地层形态、地层结构、组合样式、充填模式,及其所反映的构造背景. 其方法是基于地震层序分析和地震相分析^[4,5]. 地震火山地层学在国际上处于形成和发展阶段,在我国还处在起步阶段. 但由于它着眼于火山岩地层发生和发展的自身规律,而不是把火山序列当作沉积地层的附属物对待,是从全新的视角认知火山岩盆地,因此被认为是研究火山岩盆地的新途径,并显示出勃勃生机和强劲的发展势头.

2 从层序地层学到火山地层学和地震火山地层学

Einsele(2000)^[6]在回顾层序地层学发展历史时认为,关于异化地层(allostratigraphy)及其穿时界面(diachrones)的认识,是导致层序地层学兴起的主要动因. 所谓异化地层,是指地层中的岩性、岩相界面与等时地层界面不一致、相互穿插(图 1),不能直接用地层序列律(即,先者在下、后者在上)分析这类地层的时空关系. 层序地层学是“研究某一年

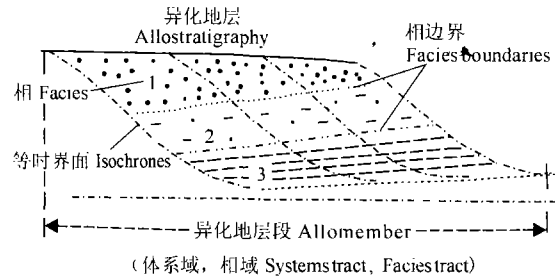


图 1 异化地层段(段是异化地层的基本单元),此处表现为一个相域、包含三个被穿时界面围限的相类型(标识为 1,2,3)^[6]

Fig. 1 Allomember represented by a facies tract, consisting of facies types 1, 2, 3, bounded by diachrones^[6]

代地层格架内,被剥蚀面或无沉积面及其相关整合面所围限的,具有重复性且通常具有成因联系之地层的岩石间相互关系”(Sequence stratigraphy: The study of rock relationships within a chronostratigraphic framework of repetitive, genetically related strata bounded by surfaces of erosion or nondeposition, or their correlative conformities)^[7]. 其基本思想方法可概括为“由表及里、逐一刻画”,即,首先识别层序界面,然后划分这些界面所围限沉积体的充填类型并进行物理刻画,进而建立充填类型(各种体系域)与基准面变化的关系,通过地震层序分析再造等时地层格架.

层序地层学的理论和方法主要是针对沉积层序,对火山岩序列并不适用. 但在这样一种研究地层学问题的基本思路的启发下,孕育了火山地层学(volcanostratigraphy)这一新兴的地层学分支. 火山成因序列,其物质来源是地下火山活动的地表产物,其搬运和分散方式有岩浆流、碎屑流、空落堆积及其它的改造和再搬运产物^[8],所形成的地层具有其自身的发生和发展规律,是不同于所有沉积地层的特殊类型“异化地层”. 与层序地层学的思想方法和研究问题的切入点类似(表 1),火山地层学着重研究火山岩系的(1)层序界面,(2)界面内的地层基本类

表 1 层序地层学/地震地层学与火山地层学/地震火山地层学关系与比较

Table 1 Relationships amongst sequence stratigraphy/seismic stratigraphy and volcanostratigraphy/seismic volcanostratigraphy

对比条目	问题提出	切入点	核心思想	实现途径	直接目标	成果延伸
层序地层学	异化地层 (沉积层序)	划分地层的基本形态和类型	先识别等时界面,再刻画充填类型	地震地层学方法(地层充填样式和终止方式,地震层序和地震相分析)	建立等时地层格架和地层对比关系	盆地充填和生储盖组合分析
火山地层学	异化地层 (火山成因序列)	划分地层的基本形态和基本类型,组合类型与充填类型	先识别等时界面,再刻画充填类型	地震火山地层学方法(地层充填样式和终止方式,地震层序和地震相分析)	建立成因地层单元和地层对比关系	盆地充填和生储盖组合分析

型、组合类型和充填类型,(3)地层充填样式和终止方式等物理地层学特征的地震识别,即,地震层序和地震相分析(地震火山地层学),(4)通过地质属性-地震响应特征之间的关系,建立成因地层单元和地层对比关系.在此基础上,火山地层学着重研究火山岩盆地中火山作用与构造-沉积作用的关系,火山作用在盆地形成演化中的位置,火山作用与成盆、成烃、成藏的相关性,从而更加有的放矢地指导火山岩盆地油气勘探.类似于地震地层学,地震火山地层学是实现火山地层学研究目标的地震方法学.

地震火山地层学主要基于地震相分析,即,地震相单元的成像和地质解译.然而,火山成因序列通常用地震反射资料难以清晰成像,因为它们在地震上很不均匀,岩石单元内的反射多半是干扰现象或相干噪声,如转换波和短多次波.因此按照常规方法难以直接解释火山岩系内部反射的地质含义.但另一方面,地震相单元的反射轮廓能够在某种程度上提供成像地质体地质属性的内部信息.地震火山地层学就是力图通过一一建立火山成因堆积单元与地震相单元的响应关系,然后基于地震相单元的反射轮廓进行地震-地质解译,从而在一定程度上规避火山岩系内部成像差的问题.在理想状况下,通过钻探特征地震相单元,就能够逐一建立各类火山成因岩系的地震-地质属性关系,以此为解释模板就能建立起全区的火山成因序列等时地层格架和对比关系.然而,无论盆地的勘探程度如何,也不可能把所需要的地震相单元都有效钻穿.因此实际研究中,需要运用火山岩系发生和发展的过程分析(包括现代火山知识)、露头剖面和区域研究等相关结果,以提高成像单元的火山地层学解译精度.

3 地震火山地层学的两个主要研究方向(国外)

火山地层学主要源于现代火山和内陆盆地研

究,而地震火山地层学主要源于大陆边缘盆地研究.二者起源不同、应用方向也不同,但又互不可分、相互补充.它们分别侧重于火山岩系的地质相和地震相研究,是同一问题的两个侧面,因此目前既显示出逐渐融合的姿态,又保持了两个主要研究方向,即,陆缘盆地和陆内盆地.

3.1 大陆边缘盆地地震火山地层学研究

如欧洲北海等被海水所覆盖的大陆边缘盆地,相对于陆地盆地其勘探难度更大、且地震资料精度偏低.但另一方面,由于这类盆地中单井钻探费用特别高,必须保证足够高的钻探成功率才会有经济效益,因此对地下地质研究就提出了更高的要求.而客观上,这些火山岩大陆边缘盆地的地质条件又是十分复杂的,这就迫使人们用新的视角去认知这些盆地.地震火山地层学正是在这种产业需求的推动下产生和发展起来的.在火山岩大陆边缘盆地研究中,地震火山地层学的主要任务是,通过综合研究现代和古代大型火山岩省的露头剖面、火山岩建造、地质模式和地震解译结果,(1)描述和论证特征火山地震相单元的代表性实例(典型解剖);(2)论证这些典型火山单元的代表性地震和岩石物理特征;(3)指出这些火山地震相单元的建造过程.此外,通过地震资料进行区域构造解释和古火山学研究^[4,5].

Planke 等(2000)^[4]和 Berndt 等(2001)^[5]通过对大西洋两岸和澳洲西海岸大陆边缘火山岩盆地的系统研究指出,具有一定规模的玄武质火山喷发岩建造,往往具有其独特的形态和地震属性.这些取决于喷发和就位环境,包括岩浆性状及其所含挥发份多少、运移过程中和就位时与水遭遇情况,还包括盆地裂隙条件、盆地轮廓和火山岩系被剥蚀情况等.藉此他们总结出一整套称之为地震地层学子集(subset of seismic stratigraphy)的地震火山地层学术语,用以解译地震反射数据所成图像的火山堆积单元的地质含义.该方法重在建立地震相单元与火山岩相单元的响应关系.已经在火山岩陆缘建立起

的 16 种特征性火山地震相单元分别为:(1)向陆流(Landward Flows)、(2)熔岩三角洲(Lava Delta)、(3)内流(Inner Flow)、(4)内向海倾斜反射(Inner SDR, Seaward Dipping Reflectors)、(5)外高(Outer High)、(6)外向海倾斜反射(Outer SDR)、(7)外平原(Outer Plain)、(8)转换边缘熔岩流(Transform Margin Flows)、(9)罗弗敦陆缘熔岩流(Lofoten Margin Flows)、(10)凝灰岩席(Tuff Sheet)、(11)浅层侵入体(Shallow Intrusions)、(12)火山突起(Volcanic Protrusions)、(13)穹隆(Dome)、(14)岩床侵入体(Sill Intrusions)、(15)莫霍面(Moho)、(16)底垫顶部(Top Underplating). 16 种地震相与火山岩相关关系见表 2.

火山陆缘构造岩浆模型的建立,是这些地震相-火山岩相响应关系应用的成功范例. 该模型将裂谷陆缘火山活动划分为 5 个阶段(地震相单元参见图 2):(1)湿沉积物和广盆背景中的爆炸式火山作用;这是在湿盆或浅海环境进行的初始小体积火山作用. 该阶段的火山堆积物位于向陆流之下.(2)陆上溢流火山作用,沿着古海岸线形成吉尔伯特型熔岩三角洲;这是火山中心向海拓展过程中火山作用形成的大体量溢流熔岩,构成向陆流. 同时,向陆流的陆侧边缘带会遭受同生剥蚀作用,形成吉尔伯特型火山碎屑与熔岩三角洲;该三角洲体发育于早期裂谷的峡谷之中、处于断崖与薄层玄武岩流/火山碎屑物(内流)之间.(3)接续的陆上溢流火山作用,充填于窄的裂谷盆地中;中心裂谷带向海拓展过程中持

续沉降形成了楔形可容纳空间,溢流火山作用物正好充填于其中、形成内 SDR.(4)浅海爆炸式火山作用,喷发轴已沉入水下. 随着沉降继续火山喷口将最终沉入海平面以下,气水岩浆相互作用式喷发导致玻璃质火山碎屑建造、形成外高. 而外高迅速剥蚀会引起其周围盆地中的火山碎屑充填.(5)深海片流或枕状玄武质火山作用. 由于不断增加的水压会阻止爆炸式火山作用,最后的火山地震相单元又变回到熔岩流,构成以枕状熔岩和片流熔岩为主体的外 SDR. 然后,由于正常洋壳的海底扩张使火山作用继续进行.

该模式中强调了剥蚀和再搬运在陆上及浅海阶段的重要性. 在这里,地震火山地层学提供了裂谷陆缘演化的基本框架,限定了前火山盆地的轮廓、各个构造岩浆事件的相对时间、火山岩的总量、古海岸线位置和陆缘沉降史. 这些参数基本上能够完整表述火山陆缘和大型火山岩省的形成过程. 图 2 为火山陆缘断面示意图,指出了火山陆缘的主要火山地震相单元,具有一定的全球普适性. Rey 等(2008)^[9]基于该模式、综合运用重磁震资料在西澳洲的印度洋陆缘,识别出与火山喷出作用有关的向陆流、SDR(向海倾斜反射)和火山隆起等 3 个火山地震相单元,另外,还识别出与陆缘构造岩浆演化有关的 4 个地震相单元,即,穹隆、莫霍面、底垫顶面和岩床侵入体. 由此进一步说明,虽然火山陆缘盆地中火山岩系发育会具有各自特点,但它们还保持了某些共性的东西(如,SDR 和向陆流等).

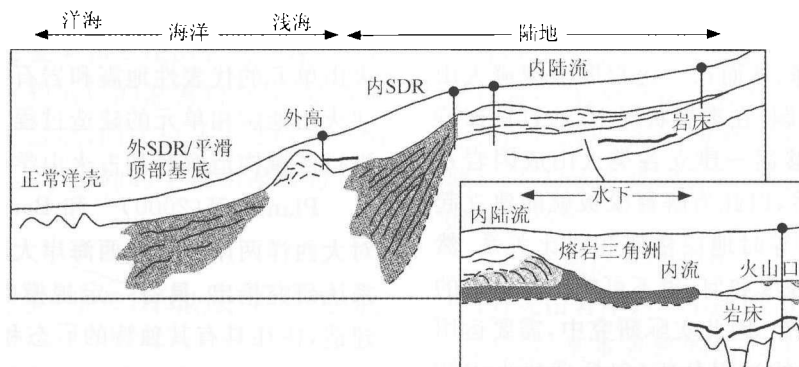


图 2 火山陆缘横断面示意图,表示火山喷发地震层序(阴影)分为四个地震相单元^[4]. 内插图表示在大西洋东北岸识别出的额外地震相单元. 双箭头范围表示推测的就位环境. 黑点及其下垂线表示钻井位置及其所揭示的地震相单元深度. SDR 向海倾斜反射.

Fig. 2 Schematic volcanic margin transect showing the volcanic extrusive sequence (shaded) divided into four seismic facies units^[4]. Inset shows additional facies units commonly identified in the northeast Atlantic. Proposed emplacement environment is shown by arrows. Wells (solid circle with vertical line) schematically located where drill holes penetrate corresponding seismic facies unit. SDR, seaward dipping reflectors.

表 2 裂谷型火山陆缘主要火山成因序列的地质相单元及其地震反射特征
Table 2 Dominant geological characteristics and seismic facies successions on rifted volcanic margins

地震相单元	岩相	喷发和就位环境	岩浆来源和建造过程	分布特征	地震反射特征		资料来源
					形态	内部	
(1) 向陆流 Landward Flows	洪泛玄武岩, 无 或薄沉积夹层;	陆上喷发/ 陆上就位	沿初始裂开轴的窄裂谷带, 供给岩墙输 导; 广盆充填或平原上层叠状堆积	非向尖而 是与熔岩三角 洲合并	片状 平行至亚平行; 高 幅, 断线状	其他 对于厚度大于 5 m 的单元 P 波从顶部 2~ 3 km/s 系统增加至内部的 5.5~6 km/s; 平 均~4 km/s	[4,5,9]
(2) 熔岩三角洲 Lava Delta	厚层和碎裂玄武 岩, 火山碎屑岩	海岸带	岩浆源同向陆流; 与向陆流的喷发裂隙 位于同区域; 相当于熔岩三角洲的前积层	增生向陆流前 缘的向外加积	堤状 前积; 断线状	流速变化大, 见 2.5~4 km/s 和 3.5~ 5 km/s, 最大 6 km/s; 平均~4.4 km/s	[4]
(3) 内流 Inner Flows	厚层和碎裂玄武 岩, 火山碎屑岩	水下	岩浆源同向陆流; 相当于吉尔伯特型三 角洲的底积层	陆侧, 位于熔岩 三角洲和向陆流 之下, 宽 60 km 土	片状 杂乱或断线状; 丘 状; 亚平行	该反射特征代表厚层和碎裂玄武岩与火山 碎屑岩的混合	[4,5]
(4) 内 SDR 内向海倾斜反射	洪泛玄武岩	陆上	裂隙式洪泛熔岩流, 沿断裂侵入的供给 岩墙输导; 洋底扩张的陆上阶段或裂谷 盆地的同构造充填层, 叠状堆积	下伏为伸展的 陆壳; 可垂直于 火山陆缘的裂 谷带	楔状 分叉-弓形, 断线状; 非系统性削截	弓形分叉反射代表向裂谷轴带熔岩流变多 变厚, 可容纳空间变大; 下部向海部位常见 短的分割的向陆倾斜反射	[4,5,9]
(5) 外高 Outer High	玻璃质火山碎 屑熔岩和火山碎 屑岩及凝灰岩	浅海裂瓣式喷 发; 浅海就位	浅海裂瓣环境, 当扩张中心置于水下时 的浅海火山作用; 原始就位的熔岩和火 山碎屑岩与在搬运火山碎屑沉积岩互层	常位于内 SDR 的向海终止处 附近	朵状 杂乱	内部杂乱反射源于单个玻璃质火山碎屑流 内部厚层状与碎裂玄武岩之间侧向粗糙、高 阻抗界面反射的能量干涉	[4,5]
(6) 外 SDR	洪泛玄武岩混 有枕状熔岩、沉 积物和岩床	深海	类似于内 SDR, 为裂谷盆地火山充填, 漂移早期高流速的大体量火山作用形 成海底洪泛玄武岩, 裂隙式喷发; 下部 可见侵入断层(表现为向陆倾斜反射)	陆壳与洋壳边 界向海一侧	楔状 分叉-弓形或板状; 断 线状; 非系统性削截	地震成像是类似于内 SDR, 顶部低速, 内部高 速, 但连续性差(枕状熔岩所致), 顶部连续 反射平滑过渡到正常洋壳	[4,5,9]
(7) 外平原 Outer Plain	熔岩流	海底	火山物质非层叠状聚集, 与洋壳的主要 区别在于其厚度。内 SDR 附近的真平 面暗示其就位后有隆升, 其下伏可能为 洋壳。	内 SDR 向海一 侧; 区域上其顶 部向正常厚度 洋壳缓倾	片状 杂乱, 高幅, 不透明	顶部常表现为强基底反射, 伴有若干相似形 态的断阶, 内部低频; 重力正异常	[5]
(8) 转换边界熔 岩流 Transform Margin Flows	熔岩流	海底	海底喷发岩系; 比向陆流和内 SDR 薄	与磁异常低和 高幅正自由空气 重力异常共生	倾斜 片状 不透明	很少有内部反射, 与向陆流相比缺少内部反 射, 与内流相比顶部反射更连续并缺少外平 原的断阶	[5]

续表 2

地震相单元	岩相	喷发和就位环境	岩浆来源和建造过程	分布特征	地震反射特征			资料来源	
					形态	边界(上覆,顶,底)	内部		其他
(9) 罗弗敦陆缘熔岩流 Lofoten Margin Flows	熔岩流	海底	海底溢流式喷发和就位,顶部粗糙,无剥蚀面,位于凝灰岩席之下,与外 SDR 处于近乎相同的地层水平	向陆终止于大断崖,向海终止于外 SDR,由陆向海延伸 50~100 km	片状	顶:高幅,断层; 底:低幅	亚平行为主,不透明	偶见正常洋壳的相似形态断阶	[5]
(10) 凝灰岩席 Tuff Sheet	凝灰质沉积	浅海	位于罗弗敦陆缘熔岩流之上;推测为水浅、压力低,爆炸式喷发产生大量火山碎屑	位于过渡带向陆部分	薄片状	顶:很平滑,高幅; 底:平滑	层状	弱而连续的底部反射,缺乏内部反射	[5]
(11) 浅层侵入体 Shallow Intrusions	侵入体	浅层(火山)堆积物中	虽不属于火山喷发层序的一部分,但与火山喷发作用密不可分	于火山岩系中呈近平、断续、阶梯状分布	复杂	高幅	n. a.	与内流区别在于其台阶状、突然终止和强反射	[5]
(12) 火山突起 Volcanic Protrusions	厚层玄武岩	海底就位	海底裂隙式喷发的厚层或玻璃质玄武质熔岩流;其主体构成过渡壳之上的枕状脊	侵入到顶部玄武岩 TB 面之上	块状	顶:高幅,平滑 或粗糙; 底:很少确定	杂乱到亚平行(短),低到中幅	地震剖面上状如海山,有时会刺穿裂谷后沉积盖层,连串出现	[9]
(13) 穹隆 Dome	变形构造	n. a.	由于底垫隆起作用或挤压应力造成的变形构造;与火山突起区别在于其隆起较缓;但有些包含或部分构成其他相单元	位于陆壳和过渡壳上	穹隆	顶:高至中幅; 底:很少确定	平行至亚平行	拱形构造,构成长脊或较小的隆起;起伏 0.1~1 s	[9]
(14) 岩床侵入体 Sill Intrusions	侵入体	较浅层侵入就位	玄武质岩床侵入体(次火山岩)	位于伸展陆壳之上	单反射	高幅,经常侵入式并切割岩层;经常抑制较深部同向轴的成 像	n. a.	高幅,连续性多变、突然终止;常为碟状和/或冲刷沉积层	[9]
(15) 莫霍面 Moho	n. a.	n. a.	壳幔边界(Moho)	位于洋壳或过渡壳;常见于 SDR 之下	带状	从高幅、单反射到弱带状	带状反射	位于 10~11 s 或玄武岩顶以下 2.3~5.5 s	[9]
(16) 底垫顶部 Top Underplating	岩浆侵入体	深层就位	就位于陆壳之下的岩浆体的顶部	位于伸展陆壳域	带状	顶:高幅、低频反射	带状反射	特征类似 Moho,通常位于 9~10 s 处,反射带可超过 1 s	[9]

注:n. a. not applicable 该项描述在此不适用.

3.2 内陆盆地或大型火山岩省的地震火山地层学研究

盆地火山岩是一个复杂的异质多相体系,地震火山地层学研究的着眼点是划分构成火山岩系的基本类型、组合类型和充填类型,即,把复杂体剖析成简单体、并加以整体研究.这有如从元素到单质、再到化合物研究化学物质的思路. Single 等(2004)^[10]按观测尺度将火山堆积物分为 5 级异质多相序列.一级为火山岩省;二级为地震相单元;三级为火山岩相和相组合;四级为可于剖面尺度加以研究的异质多相最小单元;五级为显微镜下可观察的特征.这种关于火山岩类异质多相体系级别的划分,是借鉴层序地层学的层序分级思想.较为成功的范例表现在洪泛玄武岩研究中,它把复杂的火山堆积体分解成 15 种亚相单元(基本类型)和 13 种单元组合(组合类型). 15 种亚相单元(intrafacies components)包括:(1)隐晶质边缘(用英文 aphanitic margin 首字母表示为[a],以下同);(2)红玄武土[b];(3)同心环状条带[c];(4)前积状(碎屑)熔岩[f];(5)注入构造[i];(6)重荷构造[l];(7)柱状节理[j];(8)厚层熔岩[m];(9)斑状结构熔岩[p];(10)碎石面或松散层[ra];(11)绳状面[rp];(12)倾斜岩片[si];(13)凝灰质层[t];(14)气孔带[v];(15)中粗晶熔岩[xl]. 13 种单元组合(component associations)包括:(1)风化壳,包含的亚相单元为[b, i, l, m, ra, t, v],即在熔岩风化壳界面及其附近发育有红玄武土[b]、熔岩侵入到沉积层中的注入构造[i]、厚层熔岩[m]、碎石面或松散层[ra]、凝灰质层[t]和气孔带[v],以下同;(2)火山通道/岩浆供给管道[c, m, i, j, v, xl];(3)岩脉/网状岩脉[a, i, j, p, si];(4)熔岩流底面[a, i, l, ra, v];(5)指状分叉熔岩流[a, c, i, l, m, v];(6)熔岩流核心[i, j, m, p, xl];(7)熔岩流顶(未风化)[a, ra, rp, v];(8)碎玻质火山角砾岩[a, b, f, ra];(9)含气孔片状熔岩流[a, i, j, l, m, v];(10)厚层状熔岩被[a, i, j, l, m, v];(11)枕状熔岩[a, c, i, m, v];(12)岩床[a, i, j, p, si, xl];(13)火山碎屑[b, i, l, p, t].

然而在宏观尺度上,盆地内火山充填类型的研究更具实际意义. Jerram(2002)^[11]把洪泛玄武岩分为 11 种岩相或相组合(即,充填类型):(1)平坦经典熔岩流相,扁平、侧向延伸宽、厚层(~50 m),流动距离几到几十公里,亦有达几百公里的.(2)复合辫状熔岩流相,交织绳状片泛熔岩流,厚达数米.(3)倾斜玻璃质碎屑熔岩,加积式前积层,几米到几万米厚,代表喷发物于湖或海水中就位.(4)池塘流,大陆

洪泛玄武岩(CFBs, continental flood basalts)常见,熔岩流充填先前洼地,厚度>100 m.(5)岩床相,常见于 CFBs 底部与沉积层接触面附近,似阶梯状、碗状.(6)席状岩墙,常见于 CFBs 岩浆中心部位,密集的薄层岩墙切割先期地层.(7)低角度下超或上超,由不同源、不同方向的熔岩流叠置而成.(8)火山不整合,见于不同期次的平坦经典熔岩流相之间;代表源于不同喷发中心的熔岩流,先期已被剥蚀,后期超覆其上,但若上下岩相相同则难以识别.(9)上超或埋藏不整合,见于不同期次平坦经典熔岩流相与复合辫状熔岩流相之间的上超面.(10)盾状火山,常与复合辫状熔岩流相有关,多见于 CFBs 的底或顶(火山活动开始或结束期).(11)沉积夹层,夹于火山岩系中的沉积岩,常见于 CFBs 底部(此时的火山与沉积作用都活跃).

上述火山地层的 15 种基本类型、13 种组合类型和 11 种充填类型,是关于火山堆积物不同级别异质多相体的成因-形态描述(图 3). 前两者间的包容关系是清晰的,而充填类型与前两者的关系以及三者与地震相单元的关系尚在进一步探索中.由此可见,内陆盆地地震火山地层学在国际上也还处于形成和发展阶段.尽管如此,上述三级描述已初步构成了基性火山岩系物理火山学研究的基本概念框架,为认识火山岩系本身及其盆地充填特征奠定了一定基础.目前它们的应用主要体现在以下四方面.首先,在限定火山岩顶底面和不整合面之后,详细刻画这些界面所限定的火山岩系的充填类型,从而可以建立研究区火山岩系的三维展布模式.第二,通过各火山岩单元岩石物性测量(V_p 和密度等)把上述火山岩系的三级刻画结果用作为地震解释的模板.第三,根据火山地层的垂向序列关系,建立地层单元与火山演化的关系,进而揭示成因地层序列.例如,根据火山堆积物与火山口发育的关系划分出前火山口、后火山口和后期三套地层单位^[12],从而揭示了看似孤立的火山堆积物之间的内在联系.第四,根据火山成因地层序列建立区域对比关系,例如,从火山岩系形成过程分析、确定其所属的三种可能对比关系,即可直接对比、复杂对比关系或不可对比^[13].

4 地震火山地层学在南海盆地和松辽盆地应用初探

4.1 南海盆地地震火山地层学研究尝试

南海盆地北部陆缘带迄今已有 30 余口井钻遇

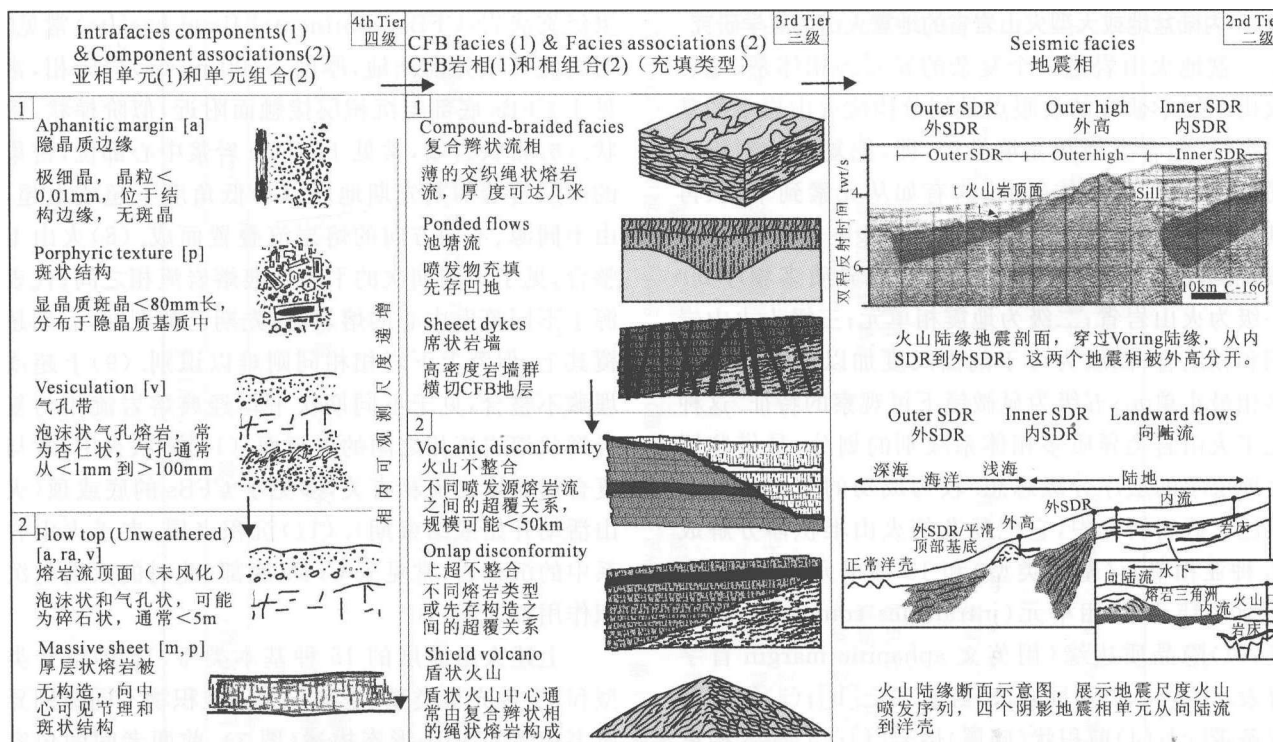


图3 大陆洪泛玄武岩(CFBs)相变尺度^[10]. 左列表示最小级别异质多相(四级),可在野外剖面进行研究;给出了亚相及其组成单元. 中列:火成岩序列公里级架构属性的洪泛玄武岩相和相组合. 右列:地震尺度相,几十公里架构尺度,被认为是二级异质多相. (一级异质多相是关于火成岩省规模的洪泛玄武岩架构分析. 五级观测是显微水平)

Fig.3 Scales of facies variation in continental flood basalts (CFBs)^[10]. Left column shows the smallest level of heterogeneity (fourth tier) that can be studied in the field. The scales of intrafacies and their constituent components are given. Middle column: flood basalt facies and facies associations from kilometre-scale architectural features of the igneous sequence. Right column: seismic-scale facies cover architectural scales of tens of kilometres and are considered to be second tier heterogeneities. (First tier heterogeneity is the analysis of flood basalt architecture on the igneous province scale, and fifth tier observations are at the microscopic level)

中、新生代火山岩;露头剖面和钻井共同约束的重磁震综合解释识别出火山岩体 80 余个;它们自陆向海时代变新、基性火山岩显著增多、岩体规模也明显变大¹⁾. 图 4 是对钻遇火山岩井段的岩性和时代统计结果. 从时代看,中生代火山岩以酸性岩为主,古新统和始新统中基性组分渐增但总体以成分多样为特征,中新世及以后均为单一成分玄武岩. 火山作用与中-新生代构造演化、成盆作用及盆地充填(珠江口盆地),表现出显著性对应关系. 四期火山作用之间有三个转折点,它们分别对应于南海北部陆缘从活动向被动转化、南海扩张一期和二期. 自晚白垩世末至新生代初,南海北部大陆边缘性质由挤压向伸展转化,火山作用方式表现为中基性组分增多. 成分单一的大规模玄武岩浆喷发(恩平组),对应于南海盆地第一次扩张,即,初次出现洋壳,并表现为裂谷作用从陆相过渡为海相. 玄武岩浆活动高峰期对应于南海盆地第二次扩张、洋壳范围扩大,同时表现为盆

地大规模拗陷和主造礁期开始.

Menzies 等 (2002)^[14] 指出火山型裂谷陆缘 (volcanic rifted margins) 的形成是个演进过程,是侵入玄武岩浆作用、侵入岩浆作用、伸展、隆升和剥蚀共同作用的结果. 影响这些过程间时空关系的因素包括板块构造体制,先存岩石圈的厚度、组成和地温梯度,上地幔的温度和性状,岩浆产率和优势气候系统. 从大陆洪泛玄武岩浆作用(或大火成岩省的形成)到洋脊过程(或洋中脊玄武岩)的过渡,标志着从前裂谷到同裂谷的转变,同时形成陆上和/或海水下的向海倾斜反射系列,并沿着大陆裂谷边缘产生显著加厚的(达15 km)新生、高速下地壳. 由以上表述并结合表2,可知SDR的基本地质属性包括:①岩

1)王璞娟,孙晓猛,唐华风等. 2010 南海北部深水区及邻区基底构造与火山作用研究. 国家科技重大专项课题子课题研究报告和图册. 2010 年 12 月

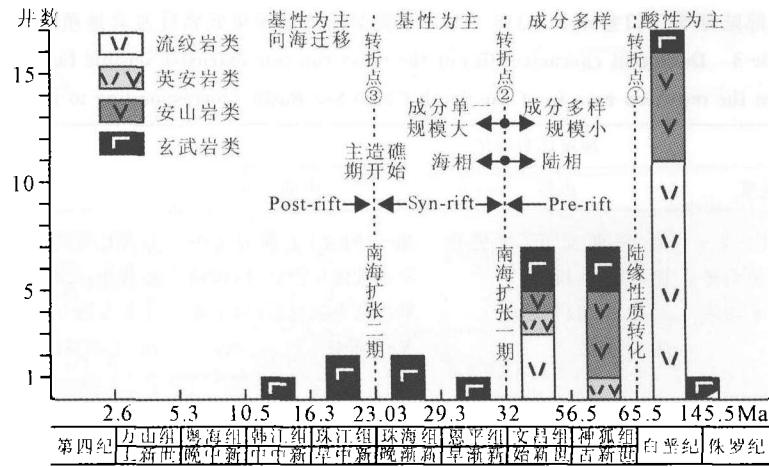


图4 南海北部陆缘带火山岩分布特征及其与构造演化和盆地充填的配置关系, 据此可将新生代盆地演化分为前裂谷、同裂谷和后裂谷三个阶段。

直方图依据中海石油研究中心钻井资料(其中钻遇火山岩37口井)统计得出^[1];地层划分据中海石油研究中心勘探资料和文献[26~28]编制;火山岩年代据岩石测年和中海石油钻井层位的标定,源自中海石油研究中心资料和文献[22, 28];沉积相据文献[29,30],主造礁期据文献[31,32];南海扩张一期和二期据文献[33],陆缘性质转化据文献[34];火山岩规模和迁移特征据过井剖面火山岩体重磁震综合解释和平面填图结果^[1]。

Fig. 4 Time and space associations between volcanic rocks and basin dynamics/fillings on South China Sea margin, the Cenozoic basin evolution can be accordingly classified into pre-, syn- and post-rift stages.

性,是一套厚层-楔状玄武质火山作用堆积物,可以含各种沉积夹层;②岩相,以陆上喷发/就位为主的爆发相和溢流相组合;③充填特征,属裂谷盆地断陷式充填或发育于洋底扩张的陆上阶段^[15];④喷发方式和类型,沿超岩石圈断裂裂隙式喷发为主,但其类型可多样从夏威夷式温和溢流型到气水岩浆相互作用的猛烈爆炸型均有;⑤构造-火山作用,陆壳持续伸展、断裂切割不断加深、火山作用持续加强并达到陆上火山作用的高峰阶段,火山喷发中心轴逐渐沉没海底;⑥沉积环境,陆相及其向浅海相过渡。

苏格兰、纳米比亚和哥伦比亚河大陆洪泛玄武岩的研究结果显示^[11],许多CFBs都是双峰式的,即,它们由铁镁质火山岩(玄武岩、玄武质安山岩及其火山碎屑岩)和酸性火山岩(流纹岩、英安岩、凝灰岩等)共同组成。然而,随着裂陷作用的持续,大陆洪泛玄武岩逐渐过渡为洋中脊玄武岩,基性组分成为主导。南海陆缘新生代火山作用变化特点表明(图4),古新世和始新世为多成分陆相火山岩;渐新世以后喷发中心轴逐渐浸没到海平面之下(浅海环境),单一成分玄武岩浆作用占据了统治地位。始新世与渐新世之间,火山作用特征发生了最显著的变化,同时沉积相也由陆相为主变为海相为主,这些通常被认为是陆缘盆地演化从前裂谷期进入同裂谷期的标志^[14]。从火山作用与成盆和盆地充填的关系,可将南海陆缘盆地演化分为前裂谷(pre-rift)、同裂谷(syn-rift)和后裂谷(post-rift)三期。这些特点与火

山型裂谷陆缘的构造-火山作用特点相符。另外,39口钻井揭示火山岩的岩性、岩相和喷发类型研究结果^[1],也与上面讨论的SDR的地质属性相符。

笔者在南海陆缘带选取104条21 000 km骨干地震剖面^[1],尝试用地震火山地层学的概念框架进行重磁震-地质综合研究。在南海地区珠江口盆地,初步识别出类似于向海倾斜反射(SDR)、向陆流、外高以及玄武质火山岩顶面(TB)和供给岩墙等地震反射特征。这些地震相单元的地震特征及其地质解释列于表3。图5是过HJ15-1-1钻井的地震剖面。该井钻进火山岩系顶面以下249 m。其中上部172 m为火山成因序列,岩石组合为玄武岩、玄武质火山碎屑岩/凝灰岩、火山沉积岩和沉积岩夹层(砂岩、粉砂岩和泥岩);岩相特征为溢流相>爆发相~火山沉积相;沉积相为陆相河湖环境。下部77 m为砂岩、粉砂岩、泥岩夹煤和泥炭,以沼泽相沉积为主。于钻井火山岩系顶面见到明显的风化壳/剥蚀面特征(图5e),表现为岩性和岩相突变,高伽马、低密度和低声波。钻井揭示的地层序列关系暗示,火山作用先经过湿沉积物-岩浆相互作用阶段(下部的沼泽环境),然后进入陆上火山喷发阶段。这与Planke等(2000)(文献[4]中图10)所描述的火山陆缘演化5个阶段中的前3个阶段相吻合(参见本文3.1节)。

4.2 松辽盆地地震火山地层学研究尝试

松辽盆地火山岩勘探取得了令世人瞩目的成就^[16],但也遇到了前所未有的困难。就盆地火山岩

表 3 南海北部陆缘珠江口盆地过 HJ15-1-1 井地震剖面地震相单元特征及其地质解释(与图 5 对应)

Table 3 Dominant characteristics of the main volcanic extrusive seismic facies units on the northern margin of the South China Sea Basin (corresponding to Fig. 5)

地震相单元	地震反射特征			地质-地震响应关系
	形态和规模	边界	内部	
内 SDR	似楔状;厚 1~2 s (4500 m±),侧向延伸 15 km±;平均倾角约 12°	顶:强-弱交互,粗糙顶面,模糊削截; 上覆:上超/和谐; 底:不明显	强-弱间互;上部为整体不连续的片段状,同向轴断线状中强反射;向下分叉-扫帚状	顶部是遭剥蚀的凝灰岩被上覆沉积岩超覆的界面,二者物性差较小(与熔岩比),故为中弱反射.内部断续强反射可能为熔岩流夹层.下半部的涨隆应为后期构造改造所致
向陆流	片状或缓上拱平台状;厚 1 s (2000 m±),侧向延伸 10 km±	顶:高幅、平滑; 上覆:整合; 底:中低幅,似向陆前积状	强-中-弱间互,一个强轴之下依次变弱,重复出现;亚平行、较连续	一套强-中-弱序列可能代表一个火山活动旋回,强轴代表溢流相熔岩,其下为爆发相火山碎屑岩;向海与断层或供给岩墙焊接,向陆由于断层改造界线不清楚;断阶状正断层使向陆流位置降低
外高	缓上凸垛状复合堆积体;厚 1~2 s (4500 m±),侧向延伸 20 km±	顶:高幅、断线状,见削截; 上覆:模糊披覆-上超; 底:与下伏基岩顶部的反射界面清晰-模糊	弱反射间夹高幅、断线、强反射,整体见层、亚平行,局部杂乱	向海终止于断层,向陆与内 SDR 融合;该外高为发育于基岩之上的堆砌体,之后与基底一起发生掀斜-块断作用,致使其靠近断层一侧顶部被剥蚀削平,同时在其右侧形成小型断陷(拉分)盆地
供给岩墙				影像不明晰,表现为岩层被扰动、反射较杂乱的窄带;其两侧岩层倾向相反,沿该带可见一系列高角度(正)断层;向下界线不清楚,但总体有变缓趋势.通常认为这些岩墙起初可能是近直立的片体,后续的盆地沉降使其倾斜 ^[4]

而言,先期侧重于火山岩相研究,认识到岩相对储层的控制作用是显著性的^[17].但在与地震结合中发现,与储层密切相关的火山岩亚相的地震识别通常比较困难,因此提出火山机构-岩相组合的划分和地震识别问题^[18].地层对比是火山岩储层预测的基础,但由于火山岩系的建造方式明显不同于沉积岩类,除垂向和侧向等类似于沉积岩的加积方式外,还有造丘和穿切等特殊建造方式.因此,火山岩序列等时界面的性质及其确定和识别,都有别于沉积岩系,也更加复杂和困难.为此,笔者近年尝试用火山地层学方法,刻画松辽盆地营城组火山岩序列.其基本思路是先找等时界面,再区分充填类型,最后进行成因地层对比.现将初步研究结果叙述如下.

松辽盆地营城组火山岩序列的等时地层界面包括四种类型,即,组、段、旋回和期次.它们的关系是组内划分段,段内划分旋回,旋回内包括期次和冷凝单元(冷凝单元是火山岩系中级别最小的等时界面,但由于其范围小、通常只限于剖面尺度、难以对比,故在此不作讨论).其中,组和段的界面属于地层界面;而期次及冷凝单元的界面发育范围局限、难以大范围侧向追踪.所以,盆地火山地层学研究和对比,主要是研究旋回界面.在旋回界面内部,划分充填类型.在松辽盆地营城组火山成因序列中已经识别出

5 种主要充填类型,即,垂向加积、侧向前积、披盖沉积、造丘和穿切.前两种充填类型与沉积岩系类似,垂向加积指地层向上叠置,侧向前积指向上和向外的建造同时进行.后三种充填类型为火山岩系所特有.披盖沉积(或堆积)指火山物质在相对低洼和相对隆起的地方均有堆积,但低洼的地方较厚、隆起的地方较薄,这通常反映的是火山碎屑流或基浪沉积^[6].造丘是指火山熔岩及其碎屑(熔)岩在火山口附近堆积成的火山岩复合体穹窿.穿切是指火山通道或火山输导系统,在向上运移火山物质的同时,对原有地层进行切割和改造以及新生火山物质的再堆积的综合结果.

图 6 是松辽盆地徐家围子断陷营城组过井地震剖面(b)和火山地层解释结果(a).从火山地层学角度分析该套火山岩系,可识别出两类等时界面,一是组段顶和底界面,二是旋回界面.其中的旋回界面由钻井标定.在此基础上,识别出 5 种火山岩相和 5 种充填类型.充填类型与岩相/亚相的相关性明显,主要表现为以下规律性.①垂向加积:主要为爆发相热基浪亚相和火山沉积相;②侧向前积:以爆发相热碎屑流、热基浪和空落亚相为主;③披盖沉积:以爆发相热基浪亚相为主亦见火山沉积相;④造丘:仅见于近火山口相组合,以火山通道相和侵入相为主;⑤穿

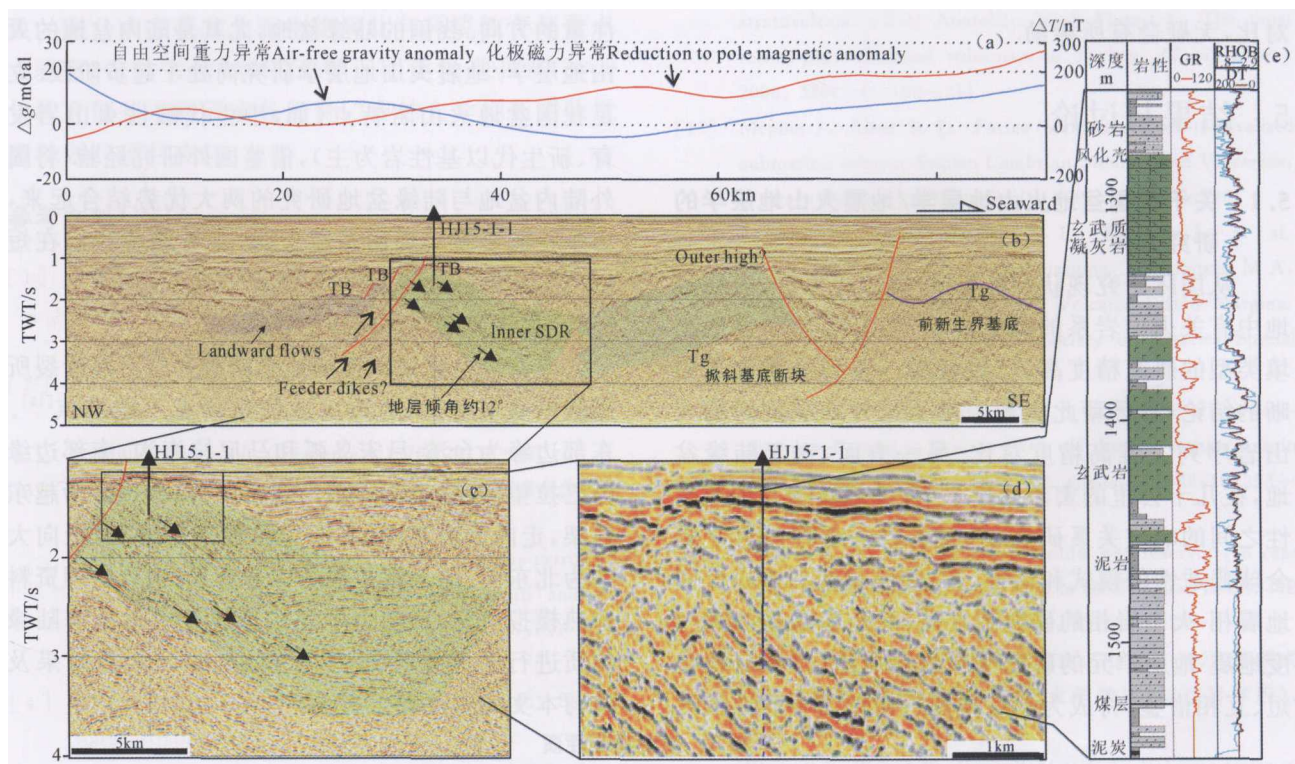


图 5 珠江口盆地 NW-SE 向地震火山地层综合解释剖面

(a)沿测线重磁异常。(b)过井地震剖面。其中 TB-火山岩系顶面反射; Inner SDR-内向海倾斜反射; Landward flows-向陆流; Outer high-外高; Feederdikes-供给岩墙; Tg-前新生界顶面。(c, d)局部放大地震剖面。其中 SDR 内部箭头指向高振幅反射。(e)钻井综合图, 恩平组。其中 GR-伽马测井; RHOB-密度测井; DT-声波测井。

Fig. 5 Seismic profiles, gravity-magnetic anomaly and well-logs showing facies units across the northern margin of the South China Sea Basin

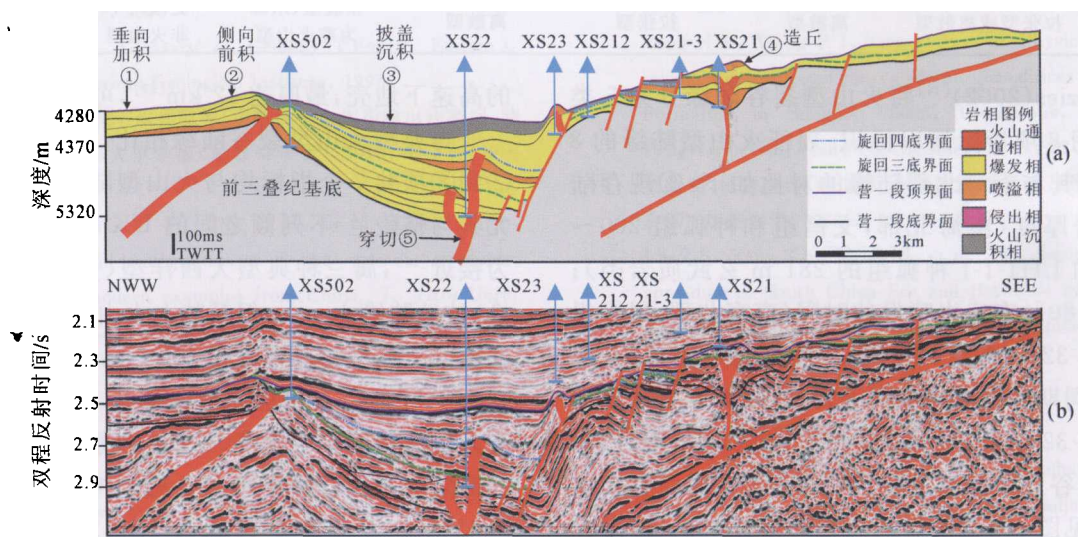


图 6 松辽盆地营城组一段火山岩系充填类型和旋回对比(a)和对应地震剖面(b)

Fig. 6 Volcanic facies associations and cycle correlation of the Yingcheng Formation in northern Songliao basin (a, interpretation; b, seismic profile)

切;仅见于火山口中心相带下部,多为火山通道相次火山岩亚相及火山颈亚相。穿切充填具有穿时性,即,可切过先存等时界面(旋回界面)。通过等时界

面、充填类型、岩相/亚相,及其相互关系分析,使得复杂火山岩系之间的叠置关系和对比关系变得较为清晰了。这对于理解火山岩系的成因序列和储层

对比,无疑会有所帮助。

5 结果与讨论

5.1 关于我国盆地火山地层学/地震火山地层学的研究方向

从国际研究现状和陆缘-陆内比较来看,内陆盆地中有关火山岩系的基本类型、组合类型和盆地充填类型的研究精度高,已经获得一系列地质含义明晰的结论,且已藉此实现了基于过井地震剖面的火山岩序列三维高精度对比。另一方面,对于陆缘盆地,在几十公里的宏观尺度上,有关地震相与地质属性之间的响应关系研究,已经形成一系列具有一定全球普适性的模式和认识。即,陆内盆地的中小尺度地震相-火山岩相的研究精度高;而陆缘盆地的大尺度地震-地质单元的研究成果更加成熟。二者取长补短、互相借鉴,将成为今后地震火山地层学研究值得

注重的方向。我国的陆缘盆地,尤其是陆内盆地的火山地层学/地震火山地层学研究尚处于起步阶段。立足我国盆地火山岩特点(如,中生代酸性火山岩发育、新生代以基性岩为主),借鉴国外研究经验,将国外陆内盆地与陆缘盆地研究的两大优势结合起来,力争一起步就实现两条腿走路,有可能使我们在短期内赶超国际先进水平。

5.2 关于南海北部陆缘的性质

南海海盆是被四周的地壳断裂和岩石圈断裂所围限的菱形盆地,边缘构造性质具有不同特点^[19]。东部边缘为台湾-吕宋岛弧和马尼拉海沟;南部边缘为巴拉望海槽,走向大致为北东向;西部边缘为越东陆架,走向为南北向;北部边缘为华南陆架,走向大致为北东向。前人基于板块构造背景、地球物理资料和热模拟研究,从动力学及构造属性上对南海陆缘性质进行了系统论述^[19~23, 35~38],部分划分结果及其与本文的对比列于表 4。

表 4 南海陆缘性质

Table 4 Interpretations of South China Sea continental margin

	刘昭蜀 ^[19] (1983)	刘以宣 ^[20] (1994)	姚伯初 ^[21] (1996)	龚再升 ^[22] (1997)	李家彪 ^[23] (2008)	郝天珧 ^[24] (2009)	本文
东部陆缘	挤压型	聚敛型	挤压型	俯冲汇聚型	俯冲汇聚型	—	—
南部陆缘	挤压型或聚敛型	聚敛型	挤压型	陆-陆碰撞聚敛型	挤压型	—	—
西部陆缘	剪切拉张型	转换平移型	拉张走滑型	转换型	转换型	—	—
北部陆缘	拉张型或离散型	离散型	拉张型	离散型	张裂型、东部 为准火山型	更倾向于 非火山型	(准)火山型裂谷 大陆边缘

Menzies(2002)^[14]将火山型裂谷陆缘分为 5 类 8 型,并用 8 项指标加以标识。表征火山型陆缘的 8 项指标及其与南海北部陆缘的对比如下:①现存陆上火山岩厚度(南海北部,文昌组和神狐组 200~300 m,如 LH1-1-1 神狐组的 281 m 玄武岩类);②70%~80%玄武岩喷发的时限(南海北部,恩平组到珠江组 32~16.5 Ma);③酸性火山岩年龄(玄武岩期前、同期和期后)(南海北部,只发育在玄武岩期前 65.5~32 Ma);④火成作用与构造(前裂谷、同裂谷和后裂谷)(南海北部前、同和后裂谷期均有火山岩发育,见图 4);⑤前岩浆隆起的估计规模(南海北部,不清楚,但新生界底界 Tg 反射层于 LF35-1-1 井见 0.5 s 约 500~625 m 的中生界厚度被剥蚀^[25]);⑥向海倾斜反射序列存在与否(南海北部,于珠江口盆地局部可见,如图 5);⑦高速(~7.4 km/s)下地壳存在与否(南海北部存在,以 7.1~7.4 km/s 为主^[23]);⑧大于 10 km 厚的新生铁镁质壳存在与否(南海北部,可能存在,李家彪等(2008)称之为底侵

的高速下地壳,最厚达 12 km^[23],可能属于此类)。

与典型火山型裂谷陆缘相比,南海北部的上述②到⑧项共 7 个指标均与火山型陆缘的特征相似,尤其与格陵兰-不列颠之间的 UK 一侧火山陆缘更为接近^[14],属三种典型大西洋型(火山、非火山、转换)被动陆缘之一^[6]。但其陆上火山岩厚度(指标①)偏薄,即,典型的通常大于 1000 m,而南海北部的通常小于 500 m。其可能原因有两点,一是其陆上洪泛玄武岩原始就不很发育,二是后期剥蚀量较大。南海北部陆上玄武岩浆作用主要见于神狐组和文昌组,这时期本区经历了神狐运动和珠江运动一、二幕^[23]。因此推测,差异块断导致陆上玄武岩序列的普遍和不均匀剥蚀,可能是造成陆上玄武岩残余厚度薄的重要原因。由类比可见,南海北部陆缘东段,总体上具备火山型裂谷大陆边缘特点。但考虑到陆上洪泛玄武岩的已识别厚度(偏薄)和现有地震资料精度(偏低)等因素,暂且称其为准火山型裂谷大陆边缘较为适宜。

致谢 本文获东北亚生物演化与环境教育部重点实验室、吉林大学“211”工程三期建设项目和 2009 年教育部基本科研业务经费(“吉林大学创新团队发展计划”)项目支持。

参考文献(References)

- [1] 莱伊尔 C. 地质学原理. 徐韦曼译. 北京: 科学出版社, 1959
Lyell C. Principle of Geology (in Chinese). Translated by Xu W M. Beijing: Science Press, 1959
- [2] Kasama T, Yoshida H. Volcanostratigraphy of the late Mesozoic acid pyroclastic rocks of the Arima Group, Southwest Japan. *J. Geosciences*, 1976, **20**:19~42
- [3] 刘光鼎, 陈洁. 中国前新生代残留盆地油气勘探难点分析及对策. *地球物理学进展*, 2005, **20**(2):273~275
Liu G D, Chen J. Analysis of difficulties in gas-petroleum prospecting in Chinese pre-Cenozoic relic basin and the corresponding solutions. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2005, **20**(2):273~275
- [4] Planke S, Symonds P A, Alvestad E, et al. Seismic volcanostratigraphy of large-volume basaltic extrusive complexes on rifted margins. *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, 2000, **105**(8):19335~19351
- [5] Berndt C, Planke S, Alvestad E, et al. Seismic volcanostratigraphy of the Norwegian Margin; constraints on tectonomagmatic break-up processes. *J. Geol. Society*, 2001, **158**(3):413~426
- [6] Einsele G. Sedimentary Basins. Berlin Heidelberg New York: Springer, 2000
- [7] Jackson J A. Glossary of Geology (Fourth Edition). Virginia: American Geological Institute, 1997
- [8] 王璞珺, 印长海, 朱如凯等. 中性火山作用喷出物类型、特征与成因. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2010, **40**(3):469~481
Wang P J, Yin C H, Zhu R K, et al. Classification, description and interpretation of the volcanic products; ancient and modern examples from China. *J. Jilin Univ. (Earth Sci. Edition)* (in Chinese), 2010, **40**(3):469~481
- [9] Rey S S, Planke S, Symonds P A, et al. Seismic volcanostratigraphy of the Gascoyne Margin, Western Australia. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2008, **172**(1-2):112~131
- [10] Single R T, Jerram D A. The 3D facies architecture of flood basalt provinces and their internal heterogeneity: examples from the Palaeogene Skye Lava Field. *J. Geol. Society*, 2004, **161**:911~926
- [11] Jerram D A. Volcanology and facies architecture of flood basalts. In: Menzies M A, Klemperer S L, Ebinger J eds. Volcanic Rifted Margins. Boulder, Colorado: Geological Society of America Special Paper 362, 2002. 121~135
- [12] Özdemir Y, Karaoglu Ö, Toluoglu A O, et al. Volcanostratigraphy and petrogenesis of the Nemrut stratovolcano (East Anatolian High Plateau): The most recent post-collisional volcanism in Turkey. *Chem. Geol.*, 2006, **226**(3-4):189~211
- [13] McPhie J, Allen R L. Facies architecture of mineralized submarine volcanic Sequen Cambrian Mount Read Volcanics, Western Tasmania. *Econ. Geol.*, 1992, **87**:587~596
- [14] Menzies M A, Klemperer S L, Ebinger J, et al. Characteristics of volcanic rifted margins. In: Menzies M A, Klemperer S L, Ebinger J eds. Volcanic Rifted Margins. Boulder, Colorado: Geological Society of America Special Paper 362, 2002. 1~14
- [15] Mutter J C, Talwani M, Stoffa P L. Origin of seaward-dipping reflectors in oceanic crust off the Norwegian margin by "subaerial sea-floor spreading". *Geology*, 1982, **10**:353~357
- [16] Feng Z Q. Volcanic rocks as prolific gas reservoir; a case study from the Qingshen gas field in the Songliao Basin, NE China. *Mar. Petrol. Geol.*, 2008, **25**:416~432
- [17] 王璞珺, 吴河勇, 庞颜明等. 松辽盆地火山岩相: 相序、相模式与储层物性的定量关系. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2006, **36**(5):805~812
Wang P J, Wu H Y, Pang Y M, et al. Volcanic facies of Songliao basin: sequence, model and the quantitative relationship with porosity & permeability of volcanic reservoir. *J. Jilin Univ. (Earth Sci. Edition)* (in Chinese), 2006, **36**(5):805~812
- [18] 唐华凤, 王璞珺, 姜传金等. 松辽盆地白垩系营城组隐伏火山机构物理模型和地震识别. *地球物理学进展*, 2007, **22**(2):530~536
Tang H F, Wang P J, Jiang C J, et al. Physical model and seismic recognition of concealed volcanic edifices of Yingcheng Formation in Songliao Basin, Cretaceous, NE China. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2007, **22**(2):530~536
- [19] 刘昭蜀, 杨树康, 何普谋等. 南海陆缘地槽系及边缘海的演化旋回. *热带海洋*, 1983, **2**(4):251~259
Liu Z S, Yang S K, He S M, et al. The continental margin spreading of South China Sea and the cycle of evolution of marginal seas. *Tropic Oceanology* (in Chinese), 1983, **2**(4):251~259
- [20] 刘以宣, 钟建强, 詹文欢. 南海及邻域新构造运动基本特征. *海洋地质与第四纪地质*, 1994, **14**(4):1~14
Liu Y X, Zhong J Q, Zhan W H. Basic characteristics of neotectonism in South China Sea and its adjacent regions. *Mar. Geol. Quaternary Geol.* (in Chinese), 1994, **14**(4):1~14
- [21] 姚伯初. 南海海盆新生代的构造演化史. *海洋地质与第四纪地质*, 1996, **16**(2):1~13
Yao B C. Tectonic evolution of the South China Sea in Cenozoic. *Mar. Geol. Quaternary Geol.* (in Chinese), 1996, **16**(2):1~13
- [22] 龚再升, 李思田, 谢太俊等. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集. 北京: 科学出版社, 1997

- Gong Z S, Li S T, Xie T J, et al. Continental Margin Basin Analysis and Hydrocarbon Accumulation of the Northern South China Sea (in Chinese). Beijing: Science Press, 1997
- [23] 李家彪. 中国边缘海形成演化与资源效应. 北京: 海洋出版社, 2008
- Li J B. Evolution of China's Margin Seas and Its Effect of Natural Resources (in Chinese). Beijing: Ocean Press, 2008
- [24] 郝天尧, 徐亚, 赵百民等. 南海磁性基底分布特征的地球物理研究. 地球物理学报, 2009, **52**(11): 2763~2774
- Hao T Y, Xu Y, Zhao B M, et al. Geophysical research on distribution features of magnetic basements in the South China Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(11): 2763~2774
- [25] 王嘹亮, 程日辉, 李飞等. 南海北部陆缘中生代沉积层序、对比和油气地质意义. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, **39**(2): 175~182
- Wang L L, Cheng R H, Li F, et al. The Mesozoic sedimentary sequences, correlation and geological significance for petroleum of the north margin of South China Sea. *J. Jilin Univ. (Earth Sci. Edition)* (in Chinese), 2009, **39**(2): 175~182
- [26] 朱伟林, 张功成, 高乐. 南海北部大陆边缘盆地油气地质特征与勘探方向. 石油学报, 2008, **29**(1): 1~9
- Zhu W L, Zhang G C, Gao L. Geological characteristics and exploration objectives of hydrocarbons in the northern continental margin basin of South China Sea. *Acta Petrolei Sinica* (in Chinese), 2008, **29**(1): 1~9
- [27] 朱伟林, 张功成, 杨少坤等. 南海北部大陆边缘盆地天然气地质. 北京: 石油工业出版社, 2007
- Zhu W L, Zhang G C, Yang S K, et al. Natural Gas Geology of Northern South China Sea Continental Margin (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 2007
- [28] 何家雄, 刘海龄, 姚永坚等. 南海北部边缘盆地油气地质及资源前景. 北京: 石油工业出版社, 2008
- He J X, Liu H L, Yao Y J, et al. Petroleum Geology and Resource Potential of Northern South China Sea Marginal Basin (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 2008
- [29] 沿海大陆架及毗邻海域油气区石油地质志编写组. 中国石油地质志(卷十六). 北京: 石油工业出版社, 1992
- Writing Group of the Continental Shelf and Adjacent Sea of China. Petroleum Geology of China (Volume 16) (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 1992
- [30] 邵磊, 雷永昌, 庞雄等. 珠江口盆地构造演化及对沉积环境的控制作用. 同济大学学报(自然科学版), 2005, **33**(9): 1177~1181
- Shao L, Lei Y C, Pang X, et al. Tectonic evolution and its controlling for sedimentary environment in Pearl River Mouth Basin. *J. Tongji Univ. (Natural Science)* (in Chinese), 2005, **33**(9): 1177~1181
- [31] 陈国威. 南海生物礁及礁油气藏形成的基本特征. 海洋地质动态, 2003, **19**(7): 32~37
- Chen G W. Basic characteristics of formation of bioherm and reef oil-gas pools in the South China Sea. *Mar. Geol. Letters* (in Chinese), 2003, **19**(7): 32~37
- [32] 邱燕, 王英敏. 南海第三纪生物礁分布与古构造和古环境. 海洋地质与第四纪地质, 2001, **21**(1): 65~73
- Qiu Y, Wang Y M. Reefs and palaeostructure and palaeoenvironment in the South China Sea. *Marine Geol. Quaternary Geol.* (in Chinese), 2001, **21**(1): 65~73
- [33] 陈忠, 刘昭蜀, 陈森强等. 南海围区中-新生代古地磁特征与南海地质构造演化. 热带海洋, 1987, **6**(3): 21~29
- Chen Z, Liu Z S, Chen S Q, et al. Meso-Cenozoic paleomagnetic characteristics of South China Sea environs and the tectonic evolution of South China Basin. *Tropical Oceanography* (in Chinese), 1987, **6**(3): 21~29
- [34] 丘元禧, 李平鲁, 梁慧娟. 南海北部及台湾海峡晚白垩世-新生代大陆边缘构造演化和构造性质. 广东地质, 1996, **11**(3): 10~16
- Qiu Y X, Li P L, Liang H X. Late Cretaceous-Cenozoic tectonic evolution and nature of continental margin in the northern South China Sea and Taiwan Strait. *Guangdong Geology* (in Chinese), 1996, **11**(3): 10~16
- [35] 孙嘉诗. 南海北部及广东沿海新生代火山活动. 海洋地质与第四纪地质, 1991, **11**(3): 45~67
- Sun J S. Cenozoic volcanic activity in the Northern South China Sea and Guangdong coastal area. *Mar. Geol. Quaternary Geol.* (in Chinese), 1991, **11**(3): 45~67
- [36] 阎贫, 刘海龄. 南海及周缘中新生代火山活动时空特征与南海的形成模式. 热带海洋学报, 2005, **24**(2): 33~41
- Yan P, Liu H L. Temporal and spatial distributions of Meso-Cenozoic igneous rocks over South China Sea. *J. Trop. Oceanogr.* (in Chinese), 2005, **24**(2): 34~41
- [37] 张健, 宋海斌, 李家彪. 南海西南海盆构造演化的热模拟研究. 地球物理学报, 2005, **48**(6): 1357~1365
- Zhang J, Song H B, Li J B. Thermal modeling of the tectonic evolution of the southwest subbasin in the South China Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(6): 1357~1365
- [38] 刘光鼎. 中国大陆构造格架的动力学演化. 地学前缘, 2007, **14**(3): 39~46
- Liu G D. Geodynamical evolution and tectonic framework of China. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2007, **14**(3): 39~46