

南海北部陆坡区沉积与天然气水合物成藏关系

沙志彬^{1,2},郭依群²,杨木壮³,梁金强²,王力峰²

(1 中国地质大学 资源学院,武汉 430074; 2 广州海洋地质调查局,广州 510760;

3 广州大学 地理科学学院,广州 510006)

摘要:截止 2007 年底,世界上已直接或间接发现水合物的矿点共有 132 处。另外,许多地方见有生物及碳酸盐结壳标志。世界上取得天然气水合物样品的地区表明,其形成与分布除了需要特定的温压条件外,还与沉积条件有较为密切的关系。2007 年 5 月,我国在南海北部海域成功钻获天然气水合物实物样品,证实了南海北部蕴藏有丰富的水合物资源。通过对南海中北部陆坡区地层的地震相和沉积相分布特征、层序地层和沉积体系的综合分析,总结其沉积层序的特征,并对该区域沉积条件与水合物聚集成藏的关系进行了探讨。

关键词:沉积;天然气水合物;成藏;南海北部

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2009)05-0089-10

南海海盆自晚中新世张裂结束以来,新洋壳逐步冷却,盆地发生热沉降作用,构造上以垂向运动为主,出现大规模的海侵活动,形成了上中新统—第四系的区域披覆层^[1]。该沉积期距今约 10.2 ~ 1.9 Ma。在晚中新世早期未发生大规模海退、陆架遭受剥蚀的基础上,发生了广海沉积,逐渐形成了陆架陆坡,期间至少发生了 6 次海平面变化,在陆架边缘形成了一系列低水位三角洲,在陆坡下形成了许多低水位扇或低水位重力流水道砂岩沉积^[1]。在此沉积背景条件下,南海北部陆坡区成为天然气水合物广泛发育的地区。2007 年 5 月,我国在南海北部海域成功钻获天然气水合物实物样品,证实了南海北部蕴藏有丰富的水合物资源^[2]。

本文通过对南海中北部陆坡区(图 1)所采集的高分辨率地震资料详细解释^[3],以及对该研究区地层的地震相和沉积相分布特征、层序地层和沉积体系的分析^[4],研究该区域的沉积层序特征,探讨其沉积条件与天然气水合物聚集成藏的关系。

1 区域地质背景

中中新世末,南海发生了强烈的区域性构造运动,导致南海北部陆缘中中新世晚期至晚中新世早

期之间的沉积间断,在西部的琼东南盆地表现最为强烈:隆起部位上全部或局部缺失含超微化石 N₁₅-N₁₇ 带的地层或含 N₁₀-N₁₁ 带的下部地层^[3]。这次沉积间断之后,南海北部进入构造沉降阶段,继续遭受海侵,海平面呈快速上升的趋势,使得一直隆起于水面的东沙、神狐——统隆起也遭海水波及而接受沉积。南海北部陆缘除了东沙群岛、神狐——统隆起一带为滨浅海环境外,其余地区以浅海—半深海相沉积环境为主^[3-5]。

晚中新世中晚期时,南海北部再度发生海侵,其规模和范围要比晚中新世早期海侵更大,并一直持续到上新世早期,这期间研究区大部分地层具有深水环境的沉积特征。据钻井资料显示,在上新世早期,研究区浅海陆架的沉积范围和水深均超过现代,东沙、神狐——统隆起也淹没于水下,沉积了一套台地碎屑岩^[5-6]。

上新世晚期,南海北部发生海退,一直持续到更新世早期,更新世晚期又有一次较大的海侵,随后由于里斯和玉木冰期的影响,海平面再次下降^[5]。全新世时,因再度发生海侵形成南海北部目前的面貌。据广州海洋地质调查局与美国哥伦比亚大学拉蒙特-多尔蒂地质观察所合作取样的资料来看,南海北部大陆坡第四纪地层的岩石性质较单一,为深灰色粉砂质黏土夹火山灰。晚更新世以来一直都是处在半深海的沉积环境,时有浊流和火山喷发,对沉积环境有影响^[4-7]。

2 地震相及沉积相

基金项目:国家自然科学基金项目(40746028);国家重点基础研究发展规划项目(2009CB219508);国土资源部公益性行业科研专项项目(200811014)

作者简介:沙志彬(1972—),男,教授级高级工程师,主要从事石油地质和天然气水合物研究,E-mail:shazb2008@163.com

收稿日期:2009-04-16;**改回日期:**2009-06-30。周立君编辑

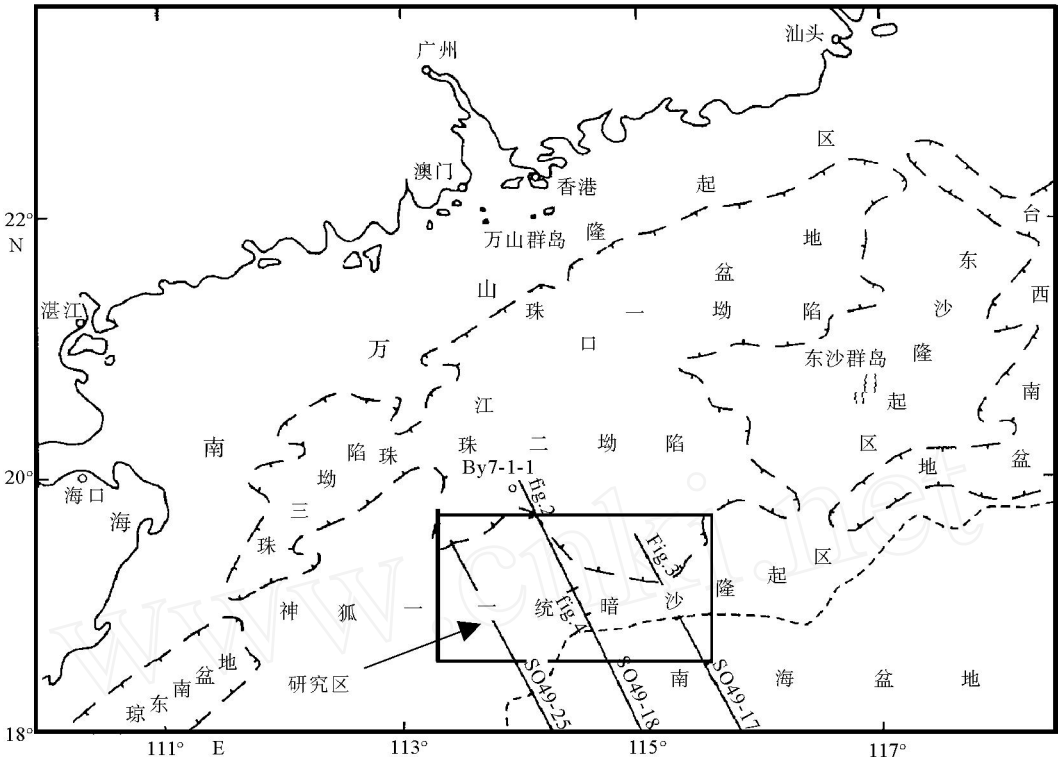


图 1 研究区位置(据文献[3]、[4]修改)

Fig. 1 The location of the study area (After references [3] and [4])

2.1 地震相划分及特征

研究区由于缺乏岩心或露头资料,因而在沉积相的综合分析过程中,对地震信息的综合研究显得特别重要。通过对研究区所采集的高分辨率地震资料进行综合分析,从地震反射属性(频率、振幅、连续性)、内部反射结构和外部形态三个方面对研究区的地震相进行了划分和分类,综合分析地震反射波组特征后,认为本研究区晚中新世以来的地层层序主要发育 11 类地震相,其反射特征见表 1。

2.2 沉积相分析

沉积相分析建立在地震相划分的基础上,主要是通过通过对区域地质特征、海平面变化特征及各层序的地震相、地震速度-岩性分析结果与各相序之间的关系研究,综合分析其形成的水动力条件、沉积环境的差异及其特定的沉积作用,确定其沉积相。在一个地震层序内,由于时代的变迁,沉积相在纵、横向上有所变化,在相图中只标示主要的沉积相。

2.2.1 层序 C

从层序 C 中的地震相分布位置来看(表 1),除了研究区中北部振幅较强外,其余大部分地区均为弱振幅反射,由北向南连续性逐渐变差,振幅和波形较稳

定,横向上缓慢变化,内部主要为平行-亚平行结构,反映了以开阔海为主、水体相对宁静的沉积环境。

砂岩百分含量(Ps 值)分析显示,研究区东部和南部 Ps 值较高,为 40 %~70 %,西北部 and 东北部较低,小于 25 %,其余地区 Ps 值都在 30 %左右,砂岩百分含量所反映的物源方向与区域上的物源方向相反。据 ODP 在调查区东南部的 1146 和 1148 钻井资料揭示,上中新统这套地层的碳酸盐岩含量较高,沉积物大约有 50 %碳酸盐组分,沉积物特性反映出上中新统是典型的陆坡深水沉积。这可能是导致其 Ps 值偏高的原因。

根据地震相分布特征和 Ps 值,结合 ODP 钻井及区域地质资料分析,认为研究区西北和东北部广泛发育三角洲相沉积,局部三角洲前缘地区发育滑塌扇;研究区中部发育斜坡扇沉积;除研究区西南部发育小范围的深海相沉积外,其他地区主要为浅海-半深海相沉积(图 2)。

2.2.2 层序 B

从层序 B 中的地震相分布来看(表 1),层序 B 主要为一套振幅较弱的中—高频的反射层,坳陷内连续性较好,隆起上逐渐变差,内部主要为平行—亚平行结构,反映了水体相对宁静的低能沉积环境。

该层序的发育基本继承了 C 层序的特征,不论

表 1 南海北部陆坡区地震相类型及特征

Table 1 Types and characteristics of seismic facies in the northern slope of South China Sea

地震相类型	分布层序	位置	振幅	连续性	视频率	内部结构	几何外形	沉积相
楔状地震相	A、B	北部	中-弱 中-强	中-好	中-高	平行-微发散	楔状	三角洲
S 型/ 帚状前积地震相	A、B、C	北部斜坡	上强 下弱	中-好或 较差	中	S 型/ 斜交前积或 丘状反射结构	透镜状、丘状	三角洲
波状/ 丘状地震相	A、C	斜坡处	中-弱	低	中-高	波状或园丘 状反射结构	丘状	滑塌扇 斜坡扇 浊积扇
丘状杂乱地震相	B	斜坡处	中-弱	较差	中-高	杂乱、波状或 园丘状反射 结构	丘状	滑塌扇 斜坡扇
弱振幅-空白 平行地震相	C	中部隆起	弱	低	高	平行	席状、席 状披盖	浅海-半深海
弱振幅连续-中 连续平行地震相	B、C	西南部	弱	中-好	中-高	平行-亚 平行	席状	浅海- 半深海
中强振幅连续中 高频平行地震相	A、B、C	西部和北部	中-强	高	中-高	平行	席状	浅海-半深海
中振幅杂乱地震相	A、B、C	南部	中	差	中	杂乱	丘状	火山岩
中振幅连续低频 平行地震相	A、B、C	西北部	中	高	低	平行	席状披盖	水下高地
中弱振幅连续中 连续平行地震相	A、B、C	西南深海盆	中-弱	中-好	中-高	平行-亚平行、 微发散	席状	深海
强振幅中连续中高频 平行-杂乱地震相	A	东南部	强	中	中-高	平行-杂乱	席状	浊积扇

是沉积厚度的变化还是 Ps 值的分布,都与层序 C 基本一致,只是 Ps 值更低,为 20 % ~ 60 %,沉积中心依然位于研究区北部,最大厚度可达 1 200 m。

地震相分析认为层序 B 由北向南依次发育三角洲、滑塌扇、浅海—半深海、深海相沉积,研究区中部还发育斜坡扇(图 3)。层序 B 除继承性发育水下高地沉积外,与层序 C 相比,三角洲范围有所减小,滑塌扇发育更为广泛,深海相沉积范围扩大。上述现象反映了海平面上升、水体逐渐加深及沉积相向陆推进的特点。滑塌扇发育更为广泛,反映了上新世陆坡区的构造活动有所增加,水动力条件较强。

2.2.3 层序 A

从层序 A 中的地震相分布来看(表 1),层序 A 总体为一套层次密集、振幅较弱、较连续的反射层,波形较稳定,横向上缓慢变化,主要为平行—亚平行反射结构,席状—席状披盖外形。层序 A 的 Ps 值较层序 B 更低,为 15 % ~ 50 %。上述现象反映了层序 A 总体上为水体相对宁静的低能沉积环境。

根据对层序 A 地震相分析,认为层序 A 由北向南依次发育三角洲、滑塌扇、浅海—半深海相沉积。层序 A 除继承发育了水下高地沉积外,与层序 B 相比,层序 A 北部三角洲范围略有扩大,斜坡扇的范围较层序 B 也有所增加,与此相反,滑塌扇沉积范围迅速减少。该现象反映第四纪时期海平面略有下降,沉积相整体向海推进的趋势(图 4)。滑塌扇范围减小也表明第四纪以来陆坡区构造活动相对微弱,水动力条件有所减弱。

3 层序地层分析

研究区在晚中新世以来处于区域热沉降阶段,构造活动相对微弱,地层的形成发育及分布模式主要受相对海平面变化的制约^[4-6],与 Haq 等人(1992)建立的全球层序地层表中的二级层序 TB3 相对应,其形成明显地受到一个较大级别基准面变化旋回(二级)的控制。根据研究区地震资料,在二

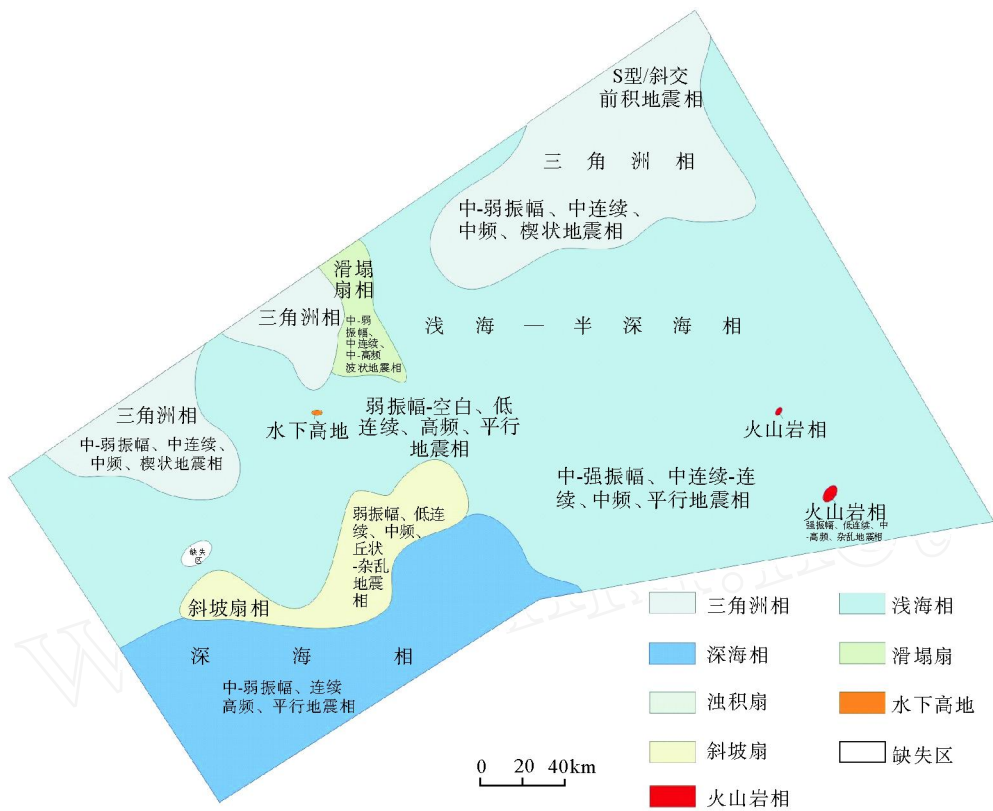


图 2 南海北部陆坡区层序 C 地震相-沉积相分布

Fig. 2 Distribution of seismic facies and sedimentary facies of sequence C of study area

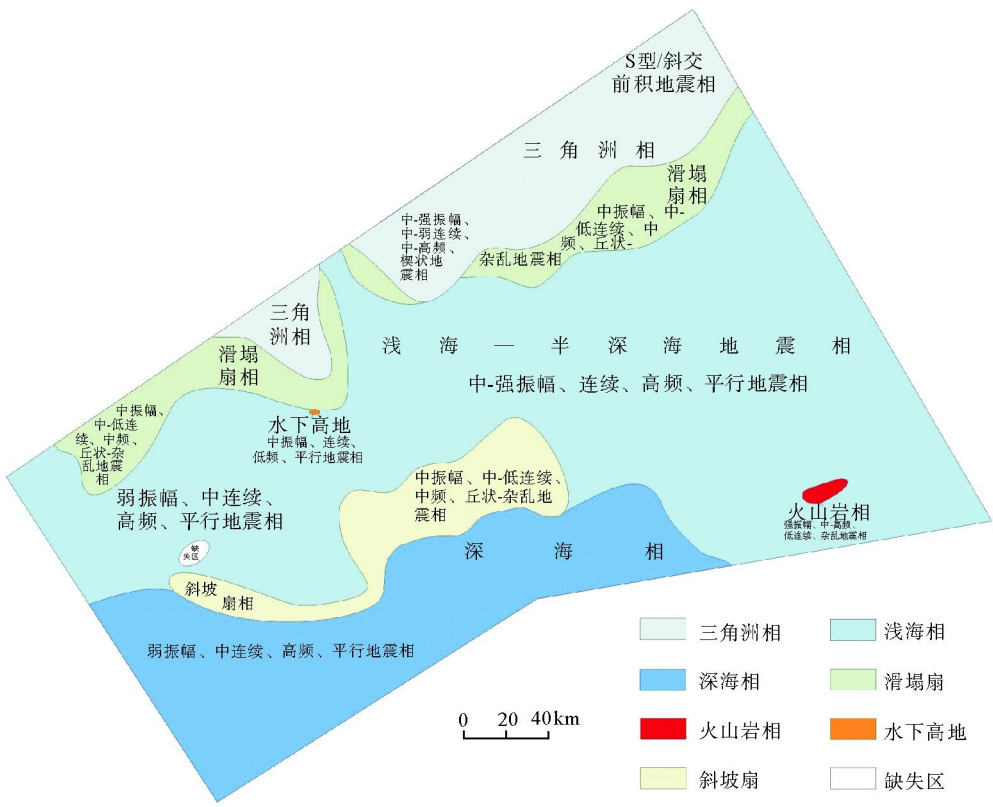


图 3 南海北部陆坡区层序 B 地震相-沉积相分布

Fig. 3 Distribution of seismic facies and sedimentary facies of sequence B of study area



图 4 南海北部陆坡区层序 A 地震相-沉积相分布

Fig. 4 Distribution of seismic facies and sedimentary facies of sequence A of study area

级层序的基础上,可以进一步划分出 A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 和 C_1 、 C_2 六个中级基准面旋回(三级层序)(图 5、6),与全球及珠江口盆地的中级基准面变化具有较好的对应关系。其中 C_1 、 B_1 、 A_1 、 A_2 分别对应于 TB3. 1、3. 4、3. 9、3. 10, C_2 相当于 3. 2 和 3. 3 的叠加, B_2 相当于 3. 5、3. 6、3. 7 和 3. 8 的叠加(表 2)。

3.1 层序 C_1

形成于晚中新世早期,在二级海平面加速上升初期形成,地震剖面显示为一套中连续、弱振幅的楔状反射层,从滨岸向海盆方向,厚度逐渐减薄,反映了由补偿沉积 $A/S \geq 1$ 向非补偿性沉积 $S \rightarrow 0$ 的变化过程,由低位体系域、海进体系域组成。低位体系域主要为一些发育于凹陷底部的扇体,地震剖面上表现为中弱振幅、中—差连续、上超充填外形。海进体系域由一系列向滨岸上超的中—弱振幅准层序叠加而成。

3.2 层序 C_2

形成于晚中新世晚期,在二级海平面加速上升中期形成,为一套中连续—连续、强弱振幅交替反射层,反射振幅从滨岸向海盆方向逐渐变弱,连续性逐步变好。该层序主要由海进体系域和高水位体系域

组成,低位体系域不太发育,只在凹陷底部发育一些小规模的低位扇体,高水位体系域由一套中强振幅、连续的以垂向加积为主的准层序组成。

3.3 层序 B_1

形成于上新世早期,在海平面加速上升末期形成,为一套连续的强弱振幅交替的楔状反射层,从滨岸至海盆方向,沉积厚度逐渐减薄。该层序具有双层结构,上部为海进体系域,下部为低水位体系域,其中海进体系域具有明显的向陆推进特点,向海下超于层序底界之上,低位体系域主要为低位扇等沉积。

3.4 层序 B_2

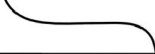
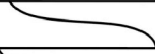
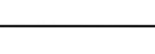
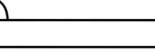
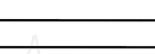
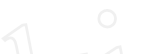
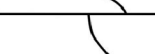
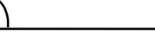
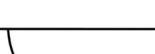
形成于上新世中晚期,为一套在二级海平面缓慢上升—缓慢下降阶段形成的中连续—连续、中—强振幅楔状反射层,从滨岸至海盆方向,沉积厚度逐渐减薄。主要由海进体系域和高水位体系域组成,在斜坡带发育小规模的低水位扇体。地震剖面显示在陆坡区发育有大型波状或丘状的反射层,推测为三角洲前缘的滑塌扇沉积。

3.5 层序 A_1

形成于全新世早期,在二级海平面加速下降阶

表 2 南海北部陆坡区晚中新世—全新世层序地层划分

Table 2 Classifications of Sequence stratigraphy since late Miocene to Holocene in study area

时代		研究区 层序划分		全球层序地层划分 (Haq, 1989)		全球相对海平面变化曲线 (Haq, 1989)		珠江口盆地相对海平面 变化曲线(许世策, 1996)				
		二级	三级	二级	三级	陆	海	100	150	200km		
新 近 纪	全新世	A	A ₂	TB3	3.10							
	更新世		A ₁		3.9							
	上新世	B	B ₂		3.8							
					3.7							
					3.6							
					3.5							
					3.4							
	晚中新世		B ₁		3.3							
			C ₂		3.2							
					C ₁	3.1						
												

段形成,为一套连续—中连续、中—弱振幅反射层,在陆架边缘一带沉积最厚,向滨岸和海盆方向同时减薄。由低位体系域和海进体系域组成,层序底界下切河谷非常发育,低位体系域由一系列中—强振幅、向海进积的准层序叠加而成,在陆坡区发育代表重力流沉积的大型波状波痕层理,海进体系域由一组中弱振幅、向陆上超的准层序叠加而成。

3.6 层序 A₂

形成于全新世,在二级海平面加速下降阶段形成,为一套连续—中连续、强弱振幅交替的反射层,在陆架边缘一带最厚,向滨岸和海盆方向同时减薄,由海进体系域和高水位体系域组成,在陆坡区发育大型波状波痕层理。

总体来看,这 6 个层序宏观上为一套楔状地层,从陆架至陆坡到海盆方向,厚度逐渐减小,这与研究区离北岸物源区较远,总体上物源供给不足有关,层序的组合具有如下特点(图 7):层序 C₁、C₂ 和 B₁ 在二级海平面加速上升阶段形成,以向陆退积组合为特征,地震剖面(图 5、6)显示 3 个层序的沉积厚度均从陆架至陆坡到海盆方向逐渐减薄,形成一套楔状地层,其成因是由于海平面的持续上升,最大有效可容空间向滨岸方向迁移,物源的供给量(S)小于

可容空间的增长量(A),造成从滨岸往海盆方向,物源逐渐减少,由补偿沉积(A/S ≥1)向非补偿性沉积(S →0)过程变化,可容空间未能被沉积物有效充填。这种叠加方式具有沉积物向上减薄、变细,水体向上加深的正旋回特点。层序 B₂ 在二级海平面缓慢上升至缓慢下降阶段形成,其叠置方式以垂向加积为主,在形成过程中最大有效可容空间位置基本保持不变,物源供给速度与海平面变化速度大致相当,总体上该地层岩性偏细,而且垂向上岩性变化不大,水体深度、地层厚度相对稳定。层序 A₁ 和 A₂ 在二级基准面加速下降阶段形成,其叠置方式以向海进积为主,有效可容空间不断向海方向迁移,物源供给速度略大于海平面下降速度,这种叠加方式在垂向上造成沉积物向上加厚变粗,水体向上变浅,在海平面下降过程中,滨岸物质输运到陆架边缘之下沉积,从而造成了沉积厚度在陆架边缘至陆坡一带最厚,向滨岸上超减薄,向海盆区前积、下超减薄的分布特点^[1,3,5]。

4 沉积体系分析

沉积体系是指在成因上由现代或古代沉积作用和沉积环境联系在一起的岩相三维组合(Fisher和

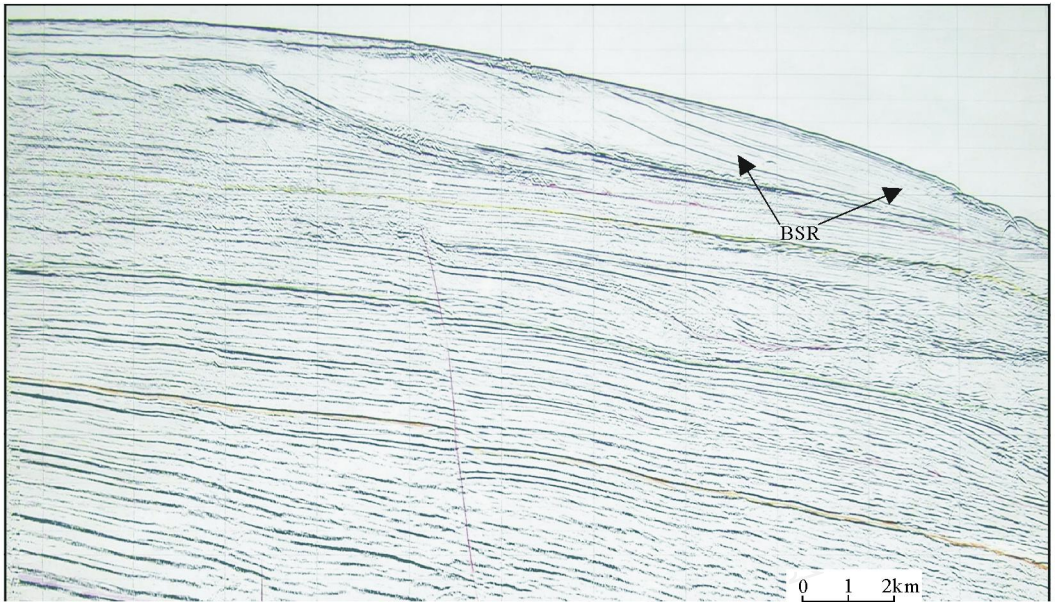


图 5 南海北部陆坡 A 测线上中新统—第四系地震反射特征

Fig. 5 Seismic reflection characteristics from upper Miocene to Quaternary in survey line A

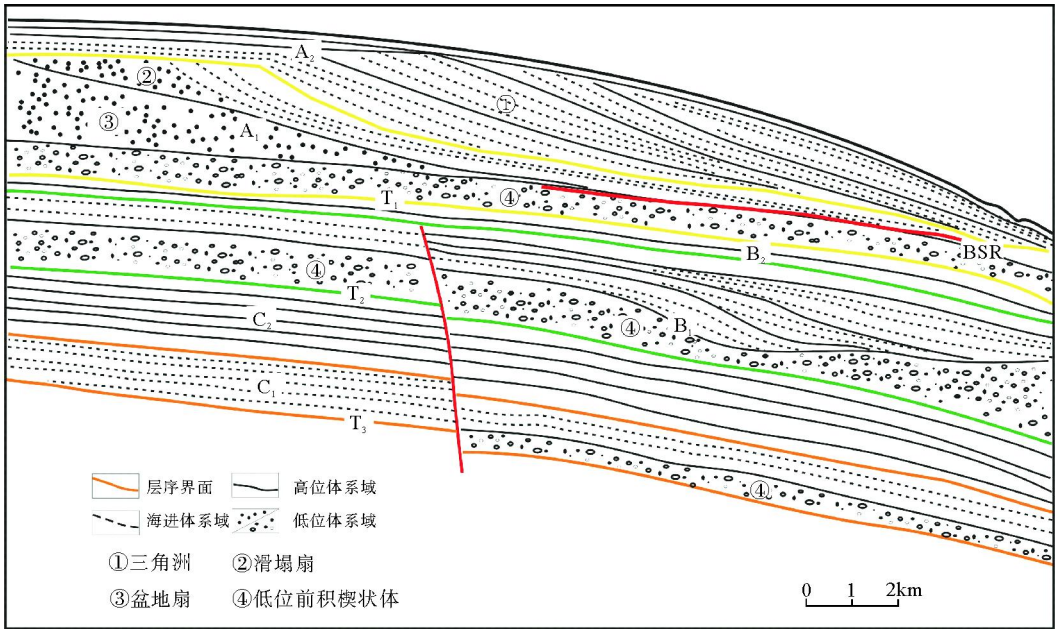


图 6 南海北部陆坡 A 测线层序地层分析

Fig. 6 Analysis of sequence stratigraphy in survey line A

McGoven, 1967), 掌握了不同沉积体系的特征及其在不同盆地内的分布规律, 就可以利用已知的资料预测盆地内不同沉积相分布及形态^[3-5]。

4.1 层序 C

层序 C 早期, 全球海平面下降最大, 海平面最低(据 Haq 等, 1987), 河流的下切作用较强, 能延伸到较远的陆坡区, 在层序 C 的底部(低位体系域), 广泛发育斜坡扇沉积。随着海平面上升, 水

体逐渐加深, 形成了过渡体系域的过渡相(如在研究区中北部发育三角洲沉积体系)和高位体系域的浅海—半深海相地层, 发育浅海—半深海沉积体系^[1,4]。

层序 C 的沉积受盆地的区域沉降作用控制, 以填平补齐为主要沉积特征, 物源主要来自于研究区北部。沉积中心位于研究区中北部, 最大沉积厚度超过 1 800 m, 研究区南部较薄, 最薄处不到 200 m。

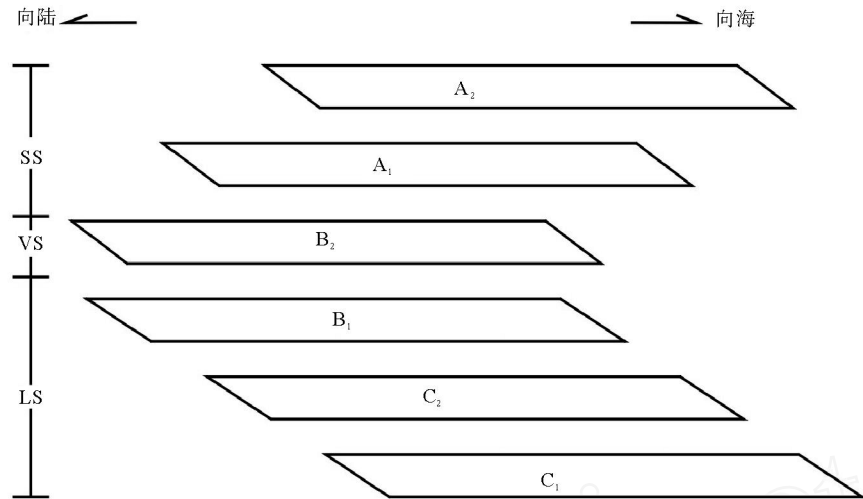


图 7 南海北部陆坡区上中新统—第四系三级层序组合模式(SS向海进积组合;VS垂向加积组合;LS向陆退积组合)

Fig. 7 Composite model of 3rd-order sequence from upper Miocene to Quaternary of study area
(SS-Progradation composite towards sea; VS-Aggradation composite vertically;LS-Retrogradation composite towards land)

4.2 层序 B

上新世早期再度发生海侵,其规模和范围要比层序 C 时期都大,海平面上升至新生代以来的最高位,在这期间研究区大部分地层具有深水环境的沉积特征,沉积了一套半深海—深海相地层。北部陆坡尽管发育三角洲沉积体系,但三角洲范围有所缩小,滑塌扇及高水位体系域的范围进一步扩大,显示了水体向陆推进,海平面上升的趋势。

层序 B 沉积时的水体比层序 C 明显加深,沉积序列呈现向陆推进的格局,平均沉积厚度 500 ~ 900 m,沉积中心位于研究区中北部,最大沉积厚度超过 1 800 m。

4.3 层序 A

全新世至今,南海北部处于海平面开始缓慢下降的高水位期。除研究区北部三角洲范围进一步扩大以外,研究区南部的浊积扇、斜坡扇的范围较层序 B 有所增加,浅海、半深海相整体向海推进。

层序 A 沉积中心位于研究区中北部,最大沉积厚度超过 1 500 m。

5 天然气水合物成藏的沉积条件

沉积环境对天然气水合物的聚集成藏有明显的控制作用。具体而言,不同构造背景下的沉积环境、沉积相类型、砂泥比甚至控制了天然气水合物的发

育及赋存^[2-8]。从沉积相类型来看,海底重力流沉积,尤其是等深流和浊流沉积,由于其沉积速率高、含砂率适中、孔隙空间较大,有利于天然气水合物的发育^[9]。砂泥比是影响水合物发育和赋存的另一个重要因素。砂泥比直接影响储集空间和孔隙水的发育,从而影响天然气水合物的发育。大量的岩心资料表明:砂泥比值过高或过低均不利于水合物的发育。地层中含砂率过低,储集空间小,孔隙水少,不利于天然气水合物的形成;反之,如果含砂率过高,封闭性随之减弱,同样不利于水合物的形成。

此外,较高的沉积速率也有利于水合物的生成和聚集^[7]。沉积速率高的区域聚积了大量的有机碎屑物,由于迅速埋藏在海底未遭受氧化作用而保存下来,在沉积物中经细菌作用转变为大量的甲烷,并且,快速堆积的沉积体易形成欠压实区,从而可构成良好的流体输导体系,有利于水合物的形成与成藏^[10-12]。

从沉积相分布来看,研究区的北部三角洲较为发育,在陆坡的转折端,还发育滑塌扇沉积,这些沉积体的沉积厚度大,具有较高的沉积速率,有机质含量丰富,能为天然气水合物的形成提供充足气源^[13-14]。对比研究区上新世以来沉积相与 BSR 分布范围表明,三角洲前缘的滑塌扇为天然气水合物发育和赋存的有利沉积相^[15]。此外,在研究区中西部,斜坡扇的发育也为天然气水合物的发育和赋存提供了极为有利的沉积环境:斜坡扇较高的沉积速率和丰富的有机质含量^[11],不仅有利于气体的生成,而且有利于天然气水合物的富集^[16]。总之,上

新世以来沉积相分析表明,研究区位于三角洲前缘的滑塌扇及位于构造转折处的斜坡扇为天然气水合物发育和赋存的有利相带^[17-19]。

6 结论

在岩心或露头资料较少的情况下,通过对南海中北部陆坡区地层的地震相和沉积相分布特征、层序地层和沉积体系的综合分析,研究其沉积特征,并对该区沉积条件与水合物聚集成藏的关系进行了分析、探讨,得出如下结论:

(1) 南海中北部陆坡区地层的地震相和沉积相类型多样,通过分析得出了研究区地震相-沉积相分布特征,并对晚中新世以来的层序地层和沉积体系进行了分析;

(2) 沉积环境对天然气水合物的聚集成藏有明显的控制作用。具体而言,不同构造背景下的沉积环境、沉积相类型、砂泥比及沉积体的沉积速率均影响和控制了天然气水合物的发育和赋存;

(3) 从沉积相类型来看,海底重力流沉积,尤其是等深流和浊流沉积,由于其沉积速率高、含砂率适中、孔隙空间较大而有利于天然气水合物的发育;

(4) 从沉积相分布来看,研究区位于三角洲前缘的滑塌扇及位于构造转折处的斜坡扇为天然气水合物发育和赋存的有利相带。

参考文献(References)

- [1] 刘昭蜀,赵焕庭. 南海地质[M]. 北京:科学出版社,2002:21-68. [LIU Zhaoshu, ZHAO Huaning. Geology of the South China Sea[M]. Beijing: Science Press, 2002:21-68.]
- [2] 金庆焕. 海底矿产[M]. 北京:清华大学出版社,2001:74-100. [JIN Qinghuan. Gas Hydrate: A New Future Energy[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001: 74-100.]
- [3] 金庆焕. 南海地质与油气资源[M]. 北京:地质出版社,1989:84-111. [JIN Qinghuan. Geology and Oil Resource in South China Sea [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989: 84-111.]
- [4] 黎明碧,金翔龙,初凤友,等. 神狐——统暗沙隆起中部新生代地层层序划分及沉积演化[J]. 沉积学报,2002,20(4):545-550. [LI Mingbi, JIN Xianglong, CHU Fengyou, et al. Sequence division and sedimentary evolution of Cenozoic in the Middle Shenhur Yitong Ansha Uplift[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(4): 545-550.]
- [5] 邵磊,李献华,韦刚健,等. 南海陆坡高速沉积体的物质来源[J]. 中国科学D辑,2001,31(10):828-833. [SHAO Lei, LI Xianhua, WEI Gangjian, et al. The chief provenance of high-deposition-rate sediment drift in the northern slope of the South China Sea [J]. Science in China (Series D), 2001, 31(10): 828-833.]
- [6] 汪品先. 十五万年来的南海[M]. 上海:同济大学出版社,1995. [WANG Pinxian. The South China Sea Over the Past 150 Ka[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1995.]
- [7] 郝诒纯,徐钰林,许仕策,等. 南海珠江口盆地第三纪微体古生物及古海洋学研究[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1996:33-65. [HAO Yechun, XU Yulin, XU Shice, et al. Research on Micropalaeontology and Paleoceanography in the Pearl River Mouth Basin in South China Sea[M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 1996:33-65.]
- [8] 吴能友,蔡秋容. 南海大洋钻探 184 航次初步成果简介[J]. 海洋地质,1999(4):9-52. [WU Nengyou, CAI Qiurong. Introduction of preliminary report of Leg184 in the South China Sea [J]. Marine Geology, 1999(4): 9-52.]
- [9] 姚伯初. 南海北部陆缘天然气水合物初探[J]. 海洋地质与第四纪地质,1998,18(4):11-17. [YAO Bochu. Preliminary exploration of gas hydrate in the northern margin of the South China Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1998, 18(4): 11-17.]
- [10] 姚伯初. 地球上的水合物[J]. 海洋地质,2000(2):9-49. [YAO Bochu. Hydrate on the earth[J]. Marine Geology, 2000(2): 9-49.]
- [11] 张光学,陈邦彦. 南海甲烷水合物资源研究与找矿前景[J]. 海洋地质,2000(3):1-9. [ZHANG Guangxue, CHEN Bangyan. The research and prospecting of gas hydrate in the South China Sea[J]. Marine Geology, 2000(3): 1-9.]
- [12] 于兴河,张志杰,苏新,等. 中国南海天然气水合物沉积成藏条件初探及其分布[J]. 地学前缘,2004,11(1):311-315. [YU Xinghe, ZHANG Zhijie, SU Xin, et al. Primary discussion on accumulation conditions for sedimentation of gas hydrate and its distribution in South China Sea [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(1): 311-315.]
- [13] 姚伯初. 南海的天然气水合物矿藏[J]. 热带海洋学报,2001,20(2):20-28. [YAO Bochu. The gas hydrate in the South China Sea [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2001, 20(2): 20-28.]
- [14] Kvenvolden K A. A review of the geochemistry of methane in natural gas hydrate[J]. Organic Geochemistry, 1995, 23(11-12):997-1008.
- [15] Naehr T H, Rodriguez N M, Bohrmann G, et al. Methane-driven Authigenic Carbonates Associated with Gas Hydrate Decomposition and Fluid Venting above the Blake Ridge Diaper[C]// Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. 2000, 164:285-300.
- [16] Pierre Henry, Michel Thomas, Ben Clennell. Formation of natural gas hydrates in marine sediments, thermodynamic calculations of stability conditions in porous sediments[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(10): 23005-23022.
- [17] Trotsyuk V Y, Nemirovskaya N A. Hydrocarbon gas hydrate formation beneath the sea floor[J]. International Geology Review, 1985, 27(11):1325-1328.

- [18] Tsarev V P, Nenakhov V A. Formation conditions, genetic features, and methods of developing gas and gas hydrate deposits[J]. Soviet Geology and Geophysics, 1985, 26(10): 21-28.
- [19] Waseda Amane. Organic carbon content, bacterial methanogenesis, and accumulation processes of gas hydrates in marine sediments[J]. Geochemical Journal, 1998, 32(3): 143-157.

RELATION BETWEEN SEDIMENTATION AND GAS HYDRATE RESERVOIRS IN THE NORTHERN SLOPE OF SOUTH CHINA SEA

SHA Zhibin^{1,2}, GUO Yiqun², YANG Muzhuang³, LIANG Jinqiang², WANG Lifeng²

(1 School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2 Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China;

3 School of Geographical Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract : Until the end of 2007, 132 gas hydrate sites have been directly found or inferred worldwide with many locations showing biological markers and carbonate mass. In the gas hydrates bearing sediments, formation and distribution of gas hydrates are mainly controlled by specified pressure and temperature, and they are also often associated with sedimentary conditions. In May 2007, gas hydrate cores were successfully recovered in the northern slope of South China Sea, conforming the existence of vast gas hydrate resources. Through the studies of distribution characteristics of seismic facies and sedimentary facies, together with data of sequence stratigraphy and sedimentary system in the sediments of central northern slope of South China Sea, we identify features of sedimentary sequences and further analyze and discuss relation between sedimentary conditions and accumulation of gas hydrate reservoirs in this region.

Key words : sedimentation; gas hydrates; reservoirs; the northern slope of South China Sea