

# 美国石油地质学家协会 1996年年会学术动态综合评述

张晓宝<sup>①</sup>

(中国科学院兰州地质研究所, 兰州 730000)

1996年 5月 19日至 5月 22日, 位于大洋彼岸美国加利福尼亚州美丽的海滨城市——圣地亚哥, 以她那金色的海滩和凉爽的气候迎来了来自五大洲 40多个国家的 4000多名石油地质工作者。一年一度的美国石油地质学家年会在这里如期举行。会议学术活动丰富多彩, 包括学术交流、展览、会前会后地质旅行、短期学术讲座和教学录像等多项内容。

学术交流包括口头发言和展版两种形式。与会代表围绕与石油勘探与开发有关的 40多个议题, 开展了学术交流。内容主要包括: 世界气田特征, 煤、煤层甲烷和其它替代能源, 层序地层学在勘探中的应用, 碳酸盐层序地层学, 构造活动盆地层序地层学, 层序地层学在油田开发中的应用, 储层描述与预测, 低渗透裂隙储层, 地震地层学, 3-D/4-D模拟和透视技术在勘探开发中的应用, 流体、活动构造与大陆边缘, 复杂构造形式的勘探与模拟, 走滑断层样式, 盆地演化过程中的热动力学等内容。值得一提的是与油气田开发相关的环境治理问题也已被列入会议议程。展览项目是 AAPG年会特有的项目, 来自 40多个国家的 209家石油勘探开发公司、石油地质研究机构、大学和计算机技术开发公司在会上展示了自己的石油勘探与开发和计算机技术, 内容包括航空雷达遥感、计算机产品与服务、计算机绘图、勘探与远景评价计算机软件、计算机软件与咨询、测井数字化、岩芯分析、数据服务、环境水文地质咨询与研究、地球化学服务与咨询、地质图像信息系统、地质与地球物理工作站、地质模拟、地质研究与咨询、地球物理产品与服务等。

我国共有十余人参加了这次盛会, 代表分别来自石油天然气总公司、海洋石油总公司、中国地质大学和中国科学院。作为与会者之一, 本人也有幸参加了这次学术交流, 并耳闻目睹了这个国际性会议的最新学术动态。

## 1 天然气地球科学

与石油勘探理论研究相比较, 天然气地球科学研究起步较晚, 也许正因为如此, 作为优质的替代能源, 天然气受到了世界各国石油地质学家的普遍重视, 其研究势头方兴未艾, 新发现、新领域、新理论层出不穷。1996年 AAPG年会以大会发言和展版两种方式交流了“世界气田特征”和“煤层甲烷”两个议题。从提交论文的内容看, 主要有以下新认识。

### 1.1 天然气多阶段运移理论

随着天然气勘探成果的不断积累, 天然气成因理论的总结似乎有区域化和全球化的趋势。比如, 波兰学者 Kotarba和我国学者戴金星分别总结了本国天然气的成因类型和分布特征。尤其值得一提的是美国学者 Schoell提出了天然气阶段性运移理论, 并认为它是气田动力成藏过程中的一种全球性现象, 受到了与会代表的高度重视。天然气是在漫长的地质时期中有机物质经过生物和热成因转变形成的。甲烷及乙烷以上重烃同位素特征受温度热动力分馏(热成因)、运移和气藏内混合作用的控制。在气田形成过程中, 活动性较强, 并反复充填的气藏的气体组分和同位素特征将受到以不同比例混入的天然气的影 响, 墨西哥湾某气田由于生物成因和热成因气的广泛复合, 引起了同位素指纹的变化。该气田的形成过程是在一个快速下沉的小盆地内首先形成生物成因气, 并向上运移至盐丘构造和活动性生长断层附近的储层中聚积; 然

① 作者参加会议费用得到美国石油地质学家协会 1996年度研究生奖学金资助。

而,随着热演化程度提高热成因气形成,并多次注入已形成的气藏,以不同的比例与生物成因气复合。安哥拉卡宾达气田盖层与气井中的天然气具有不同的同位素特征,反映了源于成熟到过成熟源岩热成因气的多阶段运移。中国崖城气田从西到东甲烷组分和同位素指纹是变化的。气田垂向上稀有气体的化学变化也说明了富  $\text{CO}_2$  气体的晚期注入。意大利南部 Apulian 盆地气藏是热成因气和细菌成因气复合而成的。甲烷碳同位素和氮含量是气藏中热成因组分混入的直接示踪指标。单一砂岩气藏中气体组分变化表明气体注入分多个阶段。

### 1. 2 非常规生物气藏——一种新的天然气藏类型

一种新的天然气藏类型——非常规生物气藏引起了与会代表的极大兴趣。Martin 等研究了美国密执安州泥盆系 Antrim 页岩非常规气藏微生物甲烷形成的地球化学条件。上泥盆统 Antrim 页岩是一个自生自储的高裂隙型气藏,该气藏隐伏于密执安盆地边缘冰积物的下面,冰积物为向该气藏供水提供了通道。Antrim 页岩富含有机质(总有机碳大于 10%),富氢(I 型干酪根),并且未成熟( $R^o = 0.4 - 0.6$ )。根据热成因理论推算,储量约为 4-8 亿万立方英尺。区域地层水化学和同位素特征变化很大,这或许与受断层网络控制的液体流动带有关。溶解非有机碳  $^{14}\text{C}$  测定表明从未次冰期到现今曾发生过淡水的注入。Antrim 气藏甲烷碳同位素  $\delta^{13}\text{C}$  为  $-4\text{‰} - 5\text{‰}$ ,有人理解为早期热成因气,但伴生的  $\text{CO}_2$  气体碳同位素  $\delta^{13}\text{C}$  约为  $+22\text{‰}$ ,极为偏重,与卤水有关的  $\text{DIC}$   $\delta^{13}\text{C}$  为  $+1\text{‰} - +3\text{‰}$ ,与微生物分馏作用一致。甲烷  $\delta\text{D}$  为  $-20\text{‰} - -26\text{‰}$ ,比伴生水( $\delta\text{D} = -20\text{‰} - -90\text{‰}$ )偏轻,表明这种微生物甲烷是经过气藏内  $\text{CO}_2$  还原途径形成的。当产层深度增加时,气体同位素和组分也显示了热成因气的特征(份额达 25%)。密执安盆地 Antrim 页岩地下水供给的时间、水文地球化学与天然气产量关系的研究成果也可用于其它类似气田。今天,在油田注水过程中往往可以观察到生物成因甲烷。当地下水注入油藏时,微生物也被带入,从而可能产生有工业意义的甲烷。该研究拓宽了非常规资源研究的视野,并为生物成因天然气藏的判识提供了新的依据。

### 1. 3 生物成因气研究

生物成因气已有较长的研究历史,但这次会议又重新受到重视,有关大会发言被安排到了最前面,究其原因可能在于(1)非常规生物气藏的发现,(2)深水细菌甲烷研究,(3)对西伯利亚超大型气田又有新认识。关于非常规生物气藏,前面已有论述,以下主要介绍深水细菌甲烷和有关西伯利亚超大型气田的新认识。

#### 1. 3. 1 深水细菌甲烷研究

Wagner 等对比研究了产于陆棚和斜坡环境的细菌甲烷形成和聚积条件。1980 年以来,勘探已证实细菌成因甲烷占近海 GOM 陆棚上新世至更新世天然气资源量和产量的 80%。这些气藏储层和源岩沉积于陆棚边缘三角洲体系。该区沉积速率高,地温梯度低,为生物气形成与聚积提供了十分有利的条件。从事 GOM 海洋学研究的有关人员已报道了深水沉积物和冷油气苗中存在细菌甲烷。最近,深水勘探已发现斜坡环境储集砂体中储存了大量生物成因甲烷。这些储集体的沉积环境明显不同于陆棚。深水沉积环境中甲烷的发现对于资源量评价和天然气产量预测均具有十分重要的意义。

#### 1. 3. 2 西西伯利亚气藏甲烷成因新解

西西伯利亚是世界天然气产量最丰富的沉积盆地。然而,这些大气田的成因问题至今悬而未决,目前主要存在两种看法,其一认为是侏罗系地层(埋深一般 3500 m 或更深)形成的晚期热成因气,其二认为是源于上白垩统森诺曼阶至阿普第阶的早期热成因气或生物气。Cramer 等共对 150 个岩芯样品进行了有机地球化学分析,对 120 个气样进行了组分和同位素分析。森诺曼阶气藏甲烷占绝对优势( $\text{CH}_4$  平均含量 98.6%),甲烷碳同位素轻达  $-55\text{‰}$ ,而下白垩统纽康姆阶和侏罗系气藏碳同素偏重,具典型高成熟特征。森诺曼阶和侏罗系天然气混合线性模式与观察到的组分变化趋势十分吻合。该模式说明大约 90% 的甲烷形成于森诺曼至阿普第阶。

### 1. 4 煤层气 (CBM) 勘探与开发

煤炭是仅次于石油和天然气的一种能源。世界上许多国家煤炭资源储量十分丰富。因此,与煤炭密切

相关的煤层气受到了普遍重视。美国学者 Scott 在预测科罗拉多盆地煤层气资源量时考虑到盆地中地形的差异,使用了两种方法。第一种方法是根据深度与含气量的关系计算的。这种方法过高地估计了地形起伏较大地区煤层气资源量。第二种方法主要考虑煤阶而不考虑地形的影响,但却过低的估计了盆地中由于运移造成气体含量较高地区的煤层气资源量。Mavor 等认为煤层气地质储量与煤层厚度、平均密度和平均含气量成正比。根据每个气藏的钻井和密度测井资料设计了评价其地质储量的 GRI 程序,该程序分为八个步骤:(1)在储层温度条件下测量常规钻井取芯样品的气体释放量;(2)利用直接损失气体方法估算每个样品的气体总量;(3)研究样品成分与总含气量的关系;(4)研究样品成分与密度的关系;(5)根据平均湿度确定地层条件下样品的水份含量;(6)根据测井资料确定煤层总厚度和地层条件下的平均密度;(7)根据平均储层密度和湿度估算地层条件下的含气量;(8)计算地质储量。Mavor 等还认为由于以下原因该方法会引起误差:(1)煤层厚度估算不准确,密度下限值偏低;(2)利用经验法估算平均密度;(3)在环境温度下测量气体释放量;(4)利用岩屑样品而不是岩芯样品。

Scott 认为掌握了一个盆地的地层和水文特征,并不意味着它的煤层甲烷生产能力就确定了,因为煤层甲烷生产能力受多种水文地质条件的综合控制。Piceance 盆地 San Juan 和 Sand Wash 次级单元的详细研究成果表明影响甲烷生产能力的水文地质条件包括沉积环境、煤层分布、构造背景、煤阶、气体成因、水动力条件、渗透率和气体含量。此外,高产率的煤层甲烷还需要渗透率高、侧向延续性好、气体含量高的煤层,通过煤层中地下水的流动,二次生物气的形成,热成因和生物成因气的运移和捕集等条件。较高煤层甲烷产率通常出现在与渗透障壁相关的流体向上流动的区域内。流体横穿垂直于渗透障壁聚积区的运移和二次生物成气使煤层气富集,含量增高。煤层甲烷产量低与渗透率非常低,不存在常规和水动力圈闭,煤层薄,煤阶低于热成因气生气门限等因素有关。高渗透率泻水区会形成过量的水和十分有限的煤层甲烷产量。因此,高渗透率对煤层甲烷产率的影响可能象低渗透率一样有害。

发人深思的是美国学者 Murray 对中国的煤层气勘探十分关注。他认为中国的石炭、二叠系煤层是煤层气勘探的主要目标。中国是世界上最大的煤炭生产国,人口也最多,国民生产总值增长很快。中国能源需求的四分之三依靠煤炭。煤炭生产的 80% 来源于石炭二叠系。石炭、二叠系煤阶范围为沥青煤到无烟煤。中国煤炭资源估计在 7.7 到 12.1 亿万吨,是世界上最大的。石炭、二叠系硬煤在地质资源量中占了很大的比例。中国煤层甲烷资源量估计在 1000 至 2800 亿万立方英尺。大量有价值的能源储集在石炭、二叠系煤中。中国政府在开发和利用煤层甲烷方面寻求国际技术与投资,旨在促进国民经济发展,改善矿山安全条件,减少煤层甲烷的浪费和对大气的污染。中国政府尤其强调对华北盆地煤层气的开发,华北盆地石炭二叠系煤炭储量最丰富,煤阶最高。通过中美双方的合作和努力,最近,已从河南和陕西省渗透性烟煤气藏中发现了大量煤层甲烷气流。

### 1.5 沉积盆地异常压力与天然气分布

焦尊生等认为在 Laramide 盆地中心深部正常压力 (0.43–0.96 psi/ft) 和异常压力 ( $< 0.43$ – $0.46$  psi/ft) 流体聚积状态边界的确立是该盆地烃类勘探,尤其是天然气勘探的基本条件。为了详细研究这个边界,开发了 3-D 压力状态模拟技术。计算的压力、产量、温度和这项 3-D 模拟技术为掌握压力状态和气体聚积的关系提供了一条良好的途径。利用计算机数据库,做出了 Powder River Bighorn Wind River Waskakie 和 Denver 等盆地大气田的技术图件。这些图件包括 2-D 和 3-D 压力/气体饱和状态模拟图、压力与温度关系图、累积气体产量与深度关系图、压力梯度与聚集气体产量关系图、异常压力带顶部到气藏距离与聚集气体产量关系图。异常压力带顶部根据欠压实声波测井确定。

研究表明,如不考虑 Laramide 盆地的深度、温度和岩性,烃类气体趋向于主要聚积在区域异常压力带顶部附近,距边界 1500 英尺范围以内。约 75% 的天然气产量来自于这个带。在该点以下随压力和温度增加,气藏聚积减少。

### 1.6 天然气成分演化——生成、排烃、运移和圈闭的三维模拟

Chang 认为从经济角度研究天然气富集和污染对资源评价和生产十分重要。这包括由反应和运移过程叠加而产生的许多复杂现象。气体的纯化或被  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{N}_2$ , 甚至非石油组分污染会引起天然气与氧

化铁之间的相互作用或其它矿化以及流体之间的相互反应。这种现象在天然气生成运移或在气藏中均可能发生。本研究通过反应迁移模拟研究这些现象,提出了评价经济资源潜力和确立预测天然气质量所需的关键因素。实验涉及天然气生成、排烃、运移和与圈闭有关的非线性叠加现象。这些现象包括由氧化铁矿化引起的  $H_2S$ 和甲烷的氧化。复合因素包括多相流体的成岩反应、缝隙破坏以及油气从气藏中周期性的渗出。模拟是三维的,并解释了渗透率、毛细作用、气藏内外相态、有机与无机反应以及相平衡的建立与移动(气、水、油和  $CO_2$ 系统)

## 2 层序地层学

有些学者认为层序地层学的问世是继板块构造理论之后地学发展的又一里程碑。然而,围绕层序地层学基本理论展开的讨论却从未停止过。诸如,相对海平面变化是否为控制层序演化的唯一因素,全球海平面变化是否一致等问题一直困扰着层序地层学的倡导者,甚至有不少学者对层序地层学的生命力表示怀疑。在我国,自90年代初期开始引入层序地层学理论以来,似乎是喜忧参半。我国学者创造性地吸收了层序地层学的合理内核,将其应用于陆相盆地的石油地质勘探,并取得了一定成效,同时,层序地层学理论确实在很多情形下不能较准确地刻划陆相盆地的充填过程与样式,难怪有人惊呼层序地层“热”快过去了。然而,在大洋彼岸的美国层序地层学研究不但没有降温,反而有升温的趋势。这次会议与层序地层直接相关的议题有“层序地层学在石油勘探与开发中的应用”、“活动构造盆地的层序地层学”、“碳酸盐层序地层学”、“层序地层学在储层描述和油田开发中的应用”等四个议题,此外,与层序地层学直接相关的议题尚有“勘探与开发过程中的3-D/4-D模拟和透视”、“地震地层学”、“综合储层描述”、“储层的地震地层学描述”、“AVO分析和4-D地震实例研究”等。与层序地层学有关的议题几乎占了会议内容的四分之一。此外,会前会后地质旅行、短期学术讲座、教学录相等也大多于层序地层学有关。

### 2.1 “深切谷”及其在石油勘探和开发中的意义

深切谷是海平面下降期间在广海陆棚上形成的窄长峡谷。深切谷是海平面下降的显著标志,其间可为滨浅海相、海湾相、潮坪相、河流相和三角洲相粗粒碎屑物质充填,是良好的储集层。深切谷下伏地层往往存在海进体系域、高位体系域或陆棚边缘体系域烃源岩,上部经常出现海进体系域烃源岩。深切谷往往又与充当层序界面的不整合相联系,烃类生成、运移条件十分优越。国外具备深切谷发育的地质条件,已发现了许多以深切谷为储集层的油田。深切谷理论和经济意义都十分巨大,因此,成为本次会议讨论的焦点之一。讨论的内容包括:低位海底过路作用,深切谷内海湾沉积物的识别,深切谷内层序地层及其构造控制,深切谷的石油勘探模式等。

Kamola等研究了尤他盆地布克科利福斯 Mancos页岩低位海下过路作用面和它们对分离的低位体系的意义。滨海相上白垩系 Mancos页岩内一个侵蚀面被解释为低位海下过路作用形成的水道,该水道为浅海相沉积物充填。冲刷事件代表海平面低位时期。由于滨线向盆地方向移动在滨岸沉积中发生了由河流引起的冲刷作用。冲刷面可沿露头追塑一英里以上,充当沉积物主要过路作用面。然而,低位沉积继续向盆地沿伸,而非在本区暴露。冲刷充填至少发生过三期,由海进体系域沉积物组成,每一期被解释为一个准层序,代表海平面上升时,海水逐步加深的过程。冲刷充填以粗粒沉积为主,而不是周围的 Mancos页岩,并含有递变层理,无定向波浪改造流水波浪和原地生长的叠瓦蛤属。高位滨线和低位沉积分离的距离至少30 km,这样大的距离两种沉积物不可能直接对比,或解释为相关的沉积。与最近低位体系与陆棚相连的认识相比较,低位水下过路沉积体系的意义是某些低位体系出现在从高位滨线向盆地方向延伸10 km以上的位置。那么,所有的海滩在哪儿呢?该实例表明低位沉积物确实存在,但不是与高位沉积物相连的低位沉积物,而与高位沉积物不相连,并向盆地中沿伸几公里的分离的沉积物。

Shanley等认为深切谷内海湾沉积物的识别是油气勘探的关键所在。切入浅海准层序上部的巨厚河道砂体储集层,过去常被解释为分枝水道或切入同期滨岸相沉积的潮坪入口沉积。近几年,许多这样的储层单元(尤其是美国内陆的白垩系、北海的侏罗系以及墨西哥湾的渐新统)被重新解释为基准面下降期间切

出的深切谷以及随后基准面上升期间形成的深切谷。在单个露头或钻井岩芯上,这两种解释的差异相对很小,但当在野外范围扩大时,这两种解释之间在几何形态的预测和侧向关系等方面均存在显著差异。大多数分枝水道沉积是单层的,具有以泥岩为主的特征,其中含有与相邻滨岸沉积同期的侵蚀面。深切谷沉积物是多层的,含砂岩水道沉积,向上海湾的影响加强。由于深切谷充填物在年代和岩性上与下伏海相地层存在明显差异,地层层序界面上下的储层物性往往存在较大差异。深切谷内海湾沉积物的识别具有以下重要意义:(1)深切谷一般显示出由切割和加积重复进行形成的复杂充填体系,深切谷内的加积作用反映了基准面的长期上升,而广泛分布的侵蚀面反映了沉积物供给的变化或地层基准面的向下倾斜。(2)由于海湾沉积物反映了沉积物供给和基准面上升之间的平衡,海湾沉积物往往标志着河流相砂体从下部连续性好到上部连续性差的显著变化。

Sullivan等探讨了怀俄明盆地 Hartzog Draw 地区 Shannon深切谷层序地层和构造控制。怀俄明州 Powder River 盆地上白垩系 Shannon砂岩被解释为充填于北西南东走向深切谷内的相互叠置的潮坪砂坝。Shannon深切谷的方向和分布是构造和海平面变化相互作用的结果。在低位深切谷发育期间切入陆棚的河流体系的方向受该盆地内先前存在的北西南东向构造单元强烈控制。在接之而来的海平面上升阶段岸线向陆地方向后退。岸线也逐步从低位期东西方向向高位期间的南北方向旋转。最终高位海岸线位于距低位海岸线向陆 160 km 的地方,与低位深切河谷近于平行。

Donovan等讨论了 Kuparuk River 油田层序地层及其对阿拉斯加北坡勘探的意义。Kuparuk River 油田主要层序古地理图表明:(1) Kemik 高位体系域是沿弧形低能波控岸线沉积的,岸线距西南更近,距东北较远;(2) Kemik 深切谷的走向一般为东北西南,并且向东北加厚;(3) Kuparuk A 储层不象 Kemik 那样进积,物源来自于北部。

## 2.2 构造活动盆地层序地层学

由美国艾克森公司 80 年代末期首创的经典的层序地层学理论是基于构造活动相对稳定的大西洋西海岸被动大陆边缘背景之上的。经典层序地层学理论认为相对海平面变化是控制层序地层学格架的主因,并以此为主线,提出了一系列概念和模式,编制了全球海平面变化的曲线。然而,随着层序地层学资料的不断积累,理论研究的日益深入,人们逐步认识到经典层序地层学理论并不能完全解释千差万别的沉积盆地的充填样式。人们也愈来愈认识到除了相对海平面变化以外,构造活动在盆地演化中的作用不可低估,在某些背景下,构造活动可能起主导作用。因此,本次会议设立了“构造活动盆地层序地层学”议题,内容包括:褶皱和断层发育对层序的影响,前陆盆地的层序地层演化,构造掀斜运动对层序地层叠置样式和地层界面的影响,构造反转背景下的层序地层,弧前盆地的层序格架,扩张背景的层序样式和走滑盆地的层序地层学解释等。

Gamthorpe等在会上交流了褶皱和断层发育对层序的影响,在盆地演化的活动时期,盆地上升和下降速率以及发育在断层和褶皱周围的变形对盆地可容空间的形成、盆地地貌特征、物源和沉积物的搬运途径均有影响。

Grotzinger等介绍了加拿大西北 Kilohiyok 盆地下 96Ga Rifle 组地层——一个前陆盆地边缘突起的层序演化。Rifle 组层序具有沉积物欠补偿的特征,从而,使层序界面、海进面和凝缩段叠加在一起,反映了克拉通边缘物源区(边缘凸起)坡度很缓,范围很小,物源供给十分有限。

Donovan等深入研究了阿拉斯加北坡一级到二级沉积层序的成因。阿拉斯加北坡一级旋回时限与艾克森公司旋回图解的对比表明一级旋回与长期海平面变化之间没有对应关系。事实上,阿拉斯加沉积旋回一般与海平面变化旋回在相位上差  $180^\circ$ ,反映了区域构造对北坡一级旋回的控制,但 7Beaufortian 和 4Brookian 二级旋回分析表明 7B 中的 4 和 4B 中的 3 号二级旋回与旋回图上的长期海平面变化可以对比。对比结果表明阿拉斯加二级旋回可能受到了长期海平面变化的叠加。

Catunearu等研究了加拿大南部美国北部西侧内陆前陆盆地石炭二叠系层序的重复性构筑过程。应用斑脱岩填图和孢粉学研究成果建立了区域层序对比和叠置样式,揭示了一个由弯曲下沉和松弛驱动的往复沉积作用的历史。层序是穿时的,层序边界上部年代侧向变化为  $800_{yr}/km$ 。邻近造山带沉降和沉积的

周期与前凸起隆升和侵蚀的周期可以对比。

Hall等讨论了构造掀斜及其对西班牙 Ainsa盆地 Sobrarbe组相叠置样式和地层界面形成的影响。他们认为地层构筑的主要控制因素是构造。侵蚀的海退面标志着掀斜阶段的开始。

Marzo等建立了东 Pyrenean盆地三级欠补偿到过补偿盆地层序,每个层序发育在盆地连续缩短和沉降速率均一的条件下。因此,欠补偿到过补偿条件的形成与间隙性的静止和构造活动无关,但与造山楔的连续增长有关,欠补偿反映了盆地地形平缓和腹地碎屑供给速率低,过补偿期,地形变陡碎屑供应量增加。这些层序的旋回特性与连续冲断席的侵位引起重新活动的负载弯曲有关。

Emmet讨论了印度尼西亚东爪哇新生代反转构造由构造和海平面变化形成的地层构架的鉴别问题。早中新世沉降和沉积速率的增大反映了压力作用的开始。古新世扩张盆地逐步转变为中新世厚层的楔状体和聚积在它们周围的为更年轻的钙质泥岩。中新世盆地北部边缘强烈进积,反映了相对构造稳定性和海平面变化对地层的影响,而南部边缘由于与反转构造有关的更强烈的构造沉降而引起退积。在更深的盆地中,反转构造生长阶段形成的地层与盆地边缘海平面控制的不整合可以对比。构造生长束的几何形态(楔或披盖)及其海平面变化层序的叠置样式受局部构造的控制。

此外,Sakai等阐述了日本中部上新世更新世 Kakegawa群构造和沉积物供给对一个弧前盆地三级海平面层序的控制。Armentrout等研究了西 Oregon和 Washington弧前盆地构造层序地层。Phillips等探讨了加里福尼亚南部 San Joaquin盆地中三叠统层序地层,构造与烃类圈闭以及形态的关系。Anderson等研究了挪威西部一个扩张盆地的层序地层学。Spencer等用层序和地震地层学原理检验了北海挪威扩张构造、盐丘构造和海平面变化的关系。Eliet等开展了希腊 Spedios盆地活动裂谷晚第四纪高精度层序地层研究。Csata等进行了以色列死海南部陆内走滑盆地的层序地层学解释。

### 2.3 层序地层学在储层描述和油田开发中的应用

层序地层学不但阐明了沉积体系形成的时空演化,而且也澄清了沉积体系形成以后经历的成岩作用的历史。成岩事件做为盆地地质事件的一部分,必然也要受盆地演化的控制。正是从这一点考虑,层序地层学在储层描述和油田开发中的应用成为大会的议题之一。该议题讨论的一个显著特征是提出了“储层分隔体”(compartment)概念。讨论内容还包括相对海平面变化对储层非均质性的影响,层序地层学概念在储层描述中的应用,层序地层对“储层分隔体”的控制,高精度储层格架和储层的三维建造等内容。

Jennette等讨论了英国中侏罗统 Brent群相对海平面变化对相叠置样式和储层非均质性的影响。Hamilton等研究了非海相成因地层学概念在澳大利亚 Eromanga盆地河流-湖相 Westbourne组储层描述中的应用。V. D. Rahmanian等探讨了美国南德克萨斯州 Vicksburg Trend层序地层学对储层分隔体、烃类分布和油田开发过程最优化的控制问题。Knox等研究了德克萨斯州南部渐新统 Frio组可溶空间对河流-三角洲储层分隔体的控制。Tiller等应用高精度地质资料和零星钻井控制模拟浊积岩储层的三维建造。Goldhammer等研究了德克萨斯州东部 Gladwater油田上侏罗统 Haynesville斜坡碳酸盐高精度储层格架。Thomas等讨论了加拿大阿尔伯达中西部 Cardium组低位/海进上白垩统 Gravelly三角洲体系。Krystinik等探讨了怀俄明州西南部 Almond组海进层序中储层分隔体的层序和同沉积构造控制。Macurda等论述了层序地层学在储层地质中的应用。

### 2.4 非海相层序地层学新模式

Van Wagoner等从非海相层序地层学角度提出了河流沉积构成新模式。为了建立非海相层序地层新模式,研究了 Blackhawk组 Desert段和 Castlegate砂岩,从中识别出两个主要层序边界,并将其划分为三个层序。层序边界以区域性的深切谷,向盆地方向的相转换面和异常水下暴露为标志。高位体系由以进积样式叠置的前滨和滨岸相组成。晚期高位体系域中发现了厚层混杂的,底部突变的,具丘状层理和槽模的下部海岸相地层。底部突变是进积过程中常见的正常沉积作用的结果。详细的露头研究结果表明该层序界面位于这些地层单位的上部而非下部。观察结果与这套地层的驱动式退积模式相矛盾。

低位体系域由多层充填深切谷的点砂坝(厚达10 m)和辫状河砂岩组成,这些辫状河沉积构成至少宽100 km的河流席状砂或巨大的扇。低位河流沉积向盆地方向歼灭构成向东进入交织河和决口扇体系的

终端扇,但并未进入海洋。存在非等时低位滨线砂岩。层序边界以水上暴露的、薄层湖相沉积和位于滨海地层以上的鲕状灰岩为标志。

低位体系域的几何形态取决于两个过程。由于基准面下降坡折点从高位滨线向河道迁移。低位沉积与这种迁移同时发生,在基准面下降滨线快速后退阶段,产生河流交织现象。交织决口扇体系通过暴露于水上的陆棚,形成低位体系域的远端。

## 2.5 湖相层序地层的计算机模拟

Lin等开展了华北二连断陷盆地湖相层序地层学计算机模拟。利用 backstripping 和 forward 模拟技术所进行的计算和模拟表明限制层序的主要不整合由构造下降速率变化产生。这种速率变化起因于周期性的构造扩张。该模拟还可以用来预测层序格架和盆地内的相分布。

## 2.6 海平面变化对重力构造的控制

Raillard等探讨了海平面变化对重力构造控制的概念、机制和限制。根据几个自然实例,结合地震剖面、层序地层、构造研究以及模拟实验结果,得出以下认识:

a. 由于沉积物分布和沉积负载受相对海平面变化控制,因此,海平面变化可以直接引起重力驱动变形。大规模海平面下降将使碎屑沉积物增加,从而提高重力滑动的可能性,相反,相对海平面上升期间碎屑量减少,并且均匀分布,从而阻止了变形的产生。

b. 扩张期间盐丘后退将提高海平面变化的影响效果。

c. 阶段性地壳活动和大陆边缘向西掀斜将影响这种机制。

# 3 盆地分析中的储层描述与低渗裂隙型储层研究

随着全球范围内油气勘探的萎缩,石油地质研究已经从勘探开发并重新开始向以开发为主转变,而这一转变又刺激了储层地质研究的深入。以下分储层描述和低渗裂隙型储层两个方面,简述储层地质研究的进展。

## 3.1 储层描述

储层描述部分共设立了“盆地分析中的储层描述”和“储层综合描述和全球储层预测”两个议题,内容包括:利用矿物组合预测储层埋藏史,储层中矿物成岩作用模拟,深部硬砂岩成岩作用,砂岩储层原生孔隙保存,与异常高压损失带有关的晚期次生孔隙,成岩作用对致密气藏的影响等方面。

Hathon等研究了利用矿物组合预测储层埋藏史的方法。Oxnard陆棚东端的埋深比现今大。隆起之前南部山区经历了大约 2000 m 的埋深。利用成岩矿物组合推断 Topa Topa 隆起区 Sespe 砂岩的古埋深大约为 4000-5000m 经历的温度为 130°C (270°F)。

Brosse等应用储层矿物成岩作用模拟方法研究了长石砂岩中伊利石的形成。利用新的应用于“封闭体系”的地球化学软件模拟了矿物的转变。封闭体系内溶液与矿物不平衡。另一个不平衡的原因是地层水的流动。它们的作用必须用“反应-迁移”模块评价。在储层尺度上,应用综合的方法,研究出的一个新软件“Diaphor”可解决这一问题。这一软件考虑了以下问题:(1)孔隙体积内水和化学元素的对流;(2)岩石内化学元素的质量平衡;(3)局部溶解沉淀现象;(4)矿物转变对渗透率和反应表面的侵蚀。

Thyne等应用化学平衡溶解与迁移基本原理建立了一个碎屑岩成岩作用的概念模式。对于浅埋藏而言,流体速度约为 10 m/年,温度小于 60°C。在这种条件下,矿物溶解和沉淀速率小于溶解迁移速率,应用对流迁移和动力控制的矿物反应模式是合适的。在深埋藏阶段孔隙水反应速率小于 0.1 cm/年,扩散是迁移的主要模式。假如矿物反应速率超过迁移速率,孔隙水与局部矿物组合可达到准平衡。pH值主要受硅酸盐矿物反应和碳酸盐矿物平衡的控制。结果,相邻沉积层矿物组合不同,孔隙水化学也不同,孔隙水化学差异引起不同地层之间产生质量转移引起扩散梯度。在质量扩散的情况下,在由扩散迁移确定大小的封闭体系内水是质量迁移的主要介质。

McCullough等研究了加州 San Joaquin 盆地中部深埋硬砂岩的成岩作用。次生孔隙带出现于粗粒砂

岩中,并邻近断层,断层是提高渗透率和流体运动的主要途径。次生孔隙占薄片孔隙度的50%。通过硅酸盐矿物带走的溶解物质量远大于自生粘土沉淀量,表明体系内有包括铝在内的大量物质的迁出。

Haszeldine等探讨了北海硬砂岩转变为石英砂岩过程中次生孔隙的发育过程。他们认为长石在10000英尺以下,仍然可以继续溶解。自由活动的铝不是局部沉淀的,它可以迁移至少5英里的距离(7 km),并形成粘土。沿超压流体排出带深部砂岩的孔隙度可以得到有选择性的提高。

Ferdous等分析了 Bangladesh Surma盆地上第三系砂岩储层原生孔隙的保存条件。岩石学分析表明原生粒间孔隙控制了上第三系砂岩的储层质量。这种现象发生在3000 m深处。大部分样品的原生孔隙度为20%,渗透率200MD在中细粒砂岩中大量孔隙度的保存是由于(1)由较高的下降和沉积速率引起超压造成的中等程度的压实;(2)弱胶结;(3)一般缺乏有害粘土,但存在颗粒镶边的绿泥石。

Darby等研究了北海中部 Fulmar组与异常高压漏失带相联系的晚期次生孔隙。他们认为超压释放点压力诱导产生的流体的垂向流动,带走了长石溶解物质。这个过程使孔隙度从中新统末期的15%—20%,增加到了现今的30%—35%。孔隙发育需要超压,当砂岩在上新世至更新世快速下沉期间砂岩经历超高压,孔隙度必然增加。

此外,Ctirard等综合应用钻井岩芯,成岩流体和地球化学模拟,研究了北海 Osebery砂岩储层成岩作用。Ehrenbery等讨论了北海北部 Brent群储层沉积砂岩的质量对孔渗的影响。Tang等探讨了中国西北准噶尔盆地上二叠统平底泉组储集砂岩中方沸石胶结物溶解的成岩作用和次生孔隙改善。Yin等分析了成岩作用对致密气藏物性的影响。Warren等研究了哥伦比亚 Cusiana油田深切谷内原生结构变化的成岩作用。

### 3.2 低渗裂隙型储层研究

内容包括裂隙间距研究,开启性裂隙的预测与检测,利用钻孔成像技术指示裂隙方向等。值得引起注意的是,页岩裂隙储层的研究受到了与会者的普遍重视。

Nari等开展了地下岩石平均裂隙间距研究,提出了一个估计地下裂隙间距的新方法。平均裂隙间距是根据岩芯和钻井成像资料估计的。Townsend等讨论了露头解理样式对砂岩储层模式的影响。Harthill等对尤他州尤因塔盆地 Altamont油田 Bluebell开启性裂隙进行了预测与检测。综合盆地形成历史和地球物理特征,他们认识到尤因塔盆地产油区裂隙系统出现。开启性裂隙可以用地震反射AVO异常确定。Decker等探讨了页岩储层开启性裂隙的产状与预测问题。在页岩、砂岩裂隙型储层中已找到了丰富的油气产能。利用现有地质、地球物理、遥感数据的综合勘探方法已成功地找到了 Antrim页岩中的裂隙发育带。Hamilton等利用岩芯和钻孔成像技术指示裂隙方向。Dholakia等探讨了加利福尼亚 San Joaquin谷 Monterey组 Antelope页岩烃类运移和剪切问题。Lisle等利用高斯曲率分析方法预测裂隙。Barton等分析了岩石中裂隙网络的分数比例和流体流动。Lorenz等指出了裂隙方向预测中的不足之处:非均质岩性中不同裂隙敏感性效应。Reid等研究了加利福尼亚 Elk Hill油田 Monterey组 C页岩和 D页岩储层特征。

## 4 勘探开发过程中的 3-D/4-D模拟与透视技术

以三维地震勘探和计算机技术为依托的3-D/4-D模拟和透视技术是这次会议上最引人注目的内容,尤其是互动式定向目标方法被认为是最有前途的立体模拟方法。这项技术主要用于构造与地层格架的模拟,三维储层描述,烃类排驱过程透视,高精度层序地层模拟,石油水文地质定量模拟与三维透视,综合地质解释的质量监控等。该项技术的特点是使地质过程和地质实体达到立体化、可视化和动态化。

Fisher等开发了地下地质构造和地层格架的模拟技术。他认为,构造与地层格架是地下地质模拟过程中最关键的两个元素。格架应具有拓扑学上的正确性,时空上的可参考性,地质上边界特征的有效包络和标准的可修饰过程。总体上,地下地质模拟包括两个模拟过程,一是描述性,二是预测性。描述性模拟包括构造地层单元、岩石、流体和其它特征以及动力物理化学过程的数学模型。与此相类似,预测性取决于模式标准、有效性及地质过程的模拟。为建立可靠的构造与地层格架技术,应用了互动式定向目标方法(interactive object-oriented approach),该方法在三维可视环境内应用地质学家所熟习的目标(断层、地层、不整合)

建立格架,目标模拟符合地质概念(例如,层序、侧向与时间关系、对比等),并将几何学和拓扑学用于地层学。该模拟比例可调,并且可以描述体积内特性的分布和确定模拟系数。有效格架模式可用于GIS系统(Geoscience Information Systems)地层、工程和风险分析。

Dubrule等应用3-D模拟技术研究储层地质。十几年来在定量地质模拟领域,已取得了很大的进展。这些进展对储层模拟的应用产生了巨大的影响。根据在地震解释工作站上获得的深度转换构造解释资料首先可以建立构造模式。构造和断层可以代表地质目标,并且可以互动修改。一旦获得了构筑格架,地层层面立即可以在构造面之间建立起来。在每一层内,储层特征可以用多种技术描述。研究实例表明,可以模拟相的分布,也可以把许多沉积单元(例如,浊积岩系中的水道、决口水道和叶状体等)描述为具复杂几何体的地质目标。

Elf Aquitaine与GOCAD项目有着良好的合作关系,它们正在通过开发互动功能研究使该地质模拟更接近实际。研究实例表明,与常规确定的或地质统计模拟技术不同(它们难以控制),新的3-D技术的应用允许地质学家互动地修改地质面(包括断层)和体积特性,因此,许多与地质模糊性有关的经济参数(如原油地质储量,相关体积和储量等)都可以评价。有人认为将来地质模拟技术的突破很可能发生在互动方法的开发过程中,而不是新的数学算法。

Anderson等利用4-D地震技术透视烃类排驱过程。在全球盆地分析网中,开发了4-D体积过程和分折计算方法,以分辨由于流体活动运移引起的地震振幅和连续性以及它们随时间的变化。为了透视4-D图象,开发了对同一区域实施几年,并应用以AVO为基础的多重3-D地震测量软件。正规化法、互相关法和差分法可记录随时间变化的地震属性,从而,产生排驱图象。把这种技术用于路易斯安纳海岸Eugene岛的330油田,检测了三个油藏JD,KT,尤其是LF是该油田产量最丰富的油田。在生产期间,随着气油比的增加,地震振幅增加。通过研究实例和生产史,利用脉冲中子测井,测量了这种变化与依赖于时间的含水饱和度的关系。利用重复的3-D地震测量得到的4-D地震资料,控制透视过程,可以分辨遗漏的烃类带,将来也可以提高产量控制水平。

此外,Tinker等探讨了三维储层(油藏描述)的全球实例和经济意义。Heine等进行了地质统计技术和三维模拟过程与地质现象的综合研究。Smith等建立了尼日尔三叠系浪控三角洲储层三维模拟模板。Pulham等进行了哥伦比亚Cusiana油田高精度层序地层模拟。Chateltier等利用简单方法和程序综合研究地层解释的质量控制。Person等开展了澳大利亚库伯和加罗曼旦盆地石油水文地质定量模拟和三维透视。

## 5 地震地层学在油气勘探开发中的应用

作为现代油气勘探与开发重要手段的地震地层学在本次会议上继续受到重视。与油气地质相关的盆地构造、含油气构造、盆地分析、层序地层分析、储层描述、油田开发动态监测等几乎都利用了地震地层学资料。本次会议强调了3-D/4-D地震资料处理和相干分析技术。会议交流内容包括:非连续性地质界面的3-D相干分析,滑塌构造的3-D相关分析,高阻抗砂岩储层振幅与炮间距关系研究,高性能地震追踪压缩技术,时间切片与统计切片关系研究,3-D/4-D成象,开发动态4-D成象等。

Bahorich等利用相干立体分析方法研究了断层和地层特征的3-D地震非连续性。传统上地震地层学为了地震反射成象的需要而处理地震资料,Bahorich等描述了一个以地震不连续性成象(包括断层和地层特征)为目的的地震资料处理方法。该方法的应用导致了3-D数据体或称“立体”的相干系数,其中断层呈现为数字化的分隔的几何面。三维地震非连续性解释对鉴别断层、不整合特征及其相互关系是有用的。

此外,Nissen等研究了3-D地震相干技术在滑塌构造特征上的鉴别与应用。Peddy等开展了高阻抗砂岩储层的振幅与炮间距关系分析。Marfurt研究了通过绘图获取地震层序属性指纹的方法,并已证实地震相干在描述断层、以及更复杂的地层特征,包括水道、峡谷、滑坡、天然堤和脱水样式以及Pinnacle礁都十分有效。Donoho等开发了高性能地震追踪压缩技术。Kerr等进行了时间切片与统计切片的3-D地震解释应用对比。时间切片由某一时刻产生的样品组成,不能提供完整的地震事件,而统计切片是某一特定时间

由一个窗计算的地震属性图。它们应用不同的属性和方法计算,包括 RMS 振幅、最大最小振幅、平均振幅和连续性。在一个窗内计算这些属性使得解释者统计评价一个子波而不是一个样品。不同属性可以反映在时间切片上看不到的构造和地层细节,实例包括断层模式、水道和油气接触面。Young 等开展了澳大利亚吉普斯兰盆地水下水道 3-D 成像。Lumky 等利用 4-D 地震技术监控蒸气驱动活动过程。

## 6 复杂构造方式的勘探与模拟

随着计算机和三维或四维地震数据处理等高新技术在石油地质中的应用,复杂构造方式的勘探和计算机模拟有了长足的进展,这些进展集中体现在:(1)复杂地质背景地震成像技术;(2)断层上盘体积的三维重建;(3)盐丘构造模拟;(4)冲断层可容构造的 3-D 结构分析与透视等。

Wilson 等建立了复杂地质背景下的地震成像技术。利用超大型计算机,叠前深度位移和正演模拟技术,可以提高成像解释的可靠性。随着叠前深度位移的开发,提高了勘探成功率,并正在修正构造变形的某些概念。在复杂地区应用正演技术,通过合成地震剖面与原始地震剖面的对比,可提高解释的准确性。

Duddin 等研究了断层上盘体积的三维恢复问题。该研究首先假设下盘是刚性的,上盘的体积可变,然后研究了三维空间断层上盘的体积。最近的研究集中于弯曲类型断层的构筑过程,并开发了复杂几何形态断层上盘层流的运动过程模拟。在模拟断层上盘变形过程中,应用了蠕变流动方程,而不是几何构筑技术。计算方法是三维的。恢复和变形状态的体积是守恒的。此外,Callaway 等进行了对地震解释有意义的由盐丘正断层产生的变形实验研究。Johansen 等讨论了盆地模拟结果对盐丘重建的意义。Henning 等进行了冲断席中斜冲断层可容结构的 3-D 结构分析与透视。Hudec 等探讨了断层转换结构及其对产能动态的影响。

## 7 国外石油地质学的发展趋势和由此引发的几点思考

(1) 当前,国外石油地质理论研究日趋深化,并具有多极化、区域化和全球化的特点。层序地层学研究已从初创时期的被动大陆边缘拓展到主动大陆边缘、前陆盆地、弧后盆地、反转构造盆地和走滑盆地;层序地层学的应用已从勘探模式的建立延伸到成岩作用、储层预测、油藏描述和油气田开发。天然气成因理论研究已从个别气藏的研究上升到一个或多个盆地甚至全球范围内气田特征的总结。我国的石油地质理论研究并不比国外差,在个别领域甚至处于国际领先地位,这主要得益于三个方面的原因:(1)我国现行体制中计划经济的成分,有利于组织全国范围内的科研攻关,这一点在国外很难做到;(2)我国有十分庞大的,包括产业部门,科研院所和大专院校在内的科技队伍;(3)我国地大物博,油气资源种类繁多,有利于理论上升与总结。然而,我国许多优秀的科研成果没能及时地介绍到国外,这一点非常遗憾。这次会上,美国学者提出了天然气多阶段运移理论,并认为它是一种全球现象,从而受到了各国学者的高度重视。其实,经过“六五”“七五”“八五”三个五计划的攻关,我国学者同样也认识到了这一现象,并且,已经做了较全面的总结。我国许多优秀的石油地质和天然气地质理论应该在世界讲坛上占有一席之地。

(2) 高新技术的应用已成为当今石油地质学发展的重要特征。智能化计算机的应用几乎渗透到了石油地质学研究的各个领域,包括地震资料数据处理,三维或四维地震成像、三维或四维透视技术、盆地模拟、层序地层构筑过程模拟、复杂构造样式模拟、储层特性模拟、油田开发动态监控、互动目标模拟方法、地震相干分析等。近年来,以计算机为先导的高新技术,在我国石油地质研究与油气勘探领域已经得到了广泛的应用,但其应用的深度和广度与世界发达国家相比还存在较大的差距。

(3) 当前,油气勘探范围日益萎缩,而开发工程逐步受到重视,这是一个不可逆转的发展趋势。为顺应这种潮流,国内有关的科研单位应急早动手,强化与开发有关的研究领域,比如,储层横向预测、油藏描述、储层地球化学等,寻找与开发有关的新的学科生长点。此外,油气田开发现场的环境监测与保护可能是今后一个有潜力的研究方向。