

文章编号: 1000-0550(2011)01-0199-08

沉积学与层序地层学研究新进展

——第18届国际沉积学大会综述

吴因业¹ 朱如凯^{2,3} 罗平⁴ 袁选俊¹ 候连华¹ 张天舒¹

(1. 中国石油勘探开发研究院石油地质研究所 北京 100083;

2. 中国石油天然气集团油气储层重点实验室 北京 100083;

3. 中国石油勘探开发研究院实验研究中心 北京 100083; 4. 中国石油勘探开发研究院塔里木分院 北京 100083)

摘要 从含油气盆地的油气勘探应用角度总结了沉积学与层序地层学研究新进展。内容包括三级层序和体系域类型及其石油地质意义;层序地层在非常规油气勘探中的应用;古土壤和遗迹化石在层序识别中的意义;盆地类型与沉积体系研究进展,包括不同盆地类型沉积分析如构造气候与沉积、前陆盆地沉积、断陷盆地沉积、走滑和弧前盆地的沉积等,涉及碎屑沉积的湖泊体系、冰川体系、风成体系的沉积层序;深水沉积学研究进展;盆地分析与资源沉积学,包括煤、石油和天然气、砂矿和聚合资源、烃源岩与储集层等;火山岩储层研究包括火山沉积、火山爆发和火山灰扩散和火山岩相模式;元素地球化学研究包括碎屑岩沉积物地球化学,如成岩岩石学、岩石学和地球化学研究、物源与风化作用、粘土矿物学和地球化学等;以及碳酸盐岩沉积学研究进展,包括微生物碳酸盐岩沉积学、碳酸盐岩与碎屑岩混积沉积、冷水碳酸盐岩和碳酸盐岩成岩变化与地球化学。最后指出在油气勘探中要重视露头 and 现代沉积研究,加强实验技术和沉积地球化学、沉积实验模拟和数值模拟,以及层序地层与前陆盆地分析。

关键词 沉积学 层序地层学 体系域 油气勘探 前陆盆地 门多萨

第一作者简介 吴因业 男 1964年出生 教授级高级工程师 博士后 沉积学与石油地质学 E-mail: wyy@petrochina.com.cn

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

0 引言

第18届国际沉积学大会于2010年9月26日在安第斯山脚的门多萨胜利召开。中国石油代表团一行6人于2010年9月25日—10月6日赴阿根廷门多萨市参加IAS(国际沉积学会)组织的第18届国际沉积学大会和野外地质考察。会议举办方为阿根廷沉积学会,约600多名来自五十多个国家的地质学家参会。会议有12个技术专题,6个讨论专题,分口头发言和Poster展示两种方式。会议设了8个会场。每天上午、下午各有一场主题发言(Keynote),由知名专家就其研究领域的前沿方向作综述和前瞻性发言,共有8位专家发言。9月29日进行了会间地质考察,沿门多萨河谷深入安第斯山进行10个小时的地质考察。会议共计约374个口头报告,441个粘贴专版(Poster)。12个大会专题包括:1、碎屑沉积体系与沉积层序(包括湖泊体系、冰川体系、风成体系等7个内容);2、碳酸盐岩与蒸发岩(包括海相碳酸盐岩:环境和过程,陆相碳酸盐岩:沉积过程和气候记录,微

生物:一个研究碳酸盐的地球生物学方法等8个内容);3、沉积过程及沉积实验(包括水槽实验和沉积过程);4、不同盆地类型沉积分析(包括构造气候与沉积、前陆盆地沉积、断陷盆地沉积、走滑和弧前盆地的沉积等5个内容);5、沉积学的数值模拟(数值模拟盆地填充、盆地模拟和水资源等3个内容);6、碎屑岩沉积物地球化学(成岩岩石学研究、岩石学和地球化学研究、物源与风化作用、粘土矿物学和地球化学等5个内容);7、火山沉积学(火山沉积、火山爆发和火山灰扩散和火山岩相模式);8、古生物学和沉积;9、地质灾害与应用沉积学(环境沉积学和人类对沉积旋回的影响、滑坡—液化和重力流、块体破坏事件与沉积物、遥感与沉积体系、环境灾难与沉积记录等8个内容);10、资源沉积学(包括油气沉积:煤、石油和天然气、砂矿和聚合资源、烃源岩与储集层等5个内容);11、古气候(包括第四纪气候、古湖沼学等5个内容);12、沉积学的教育交流^[1]。

第18届国际沉积学大会是沉积学界的奥林匹克盛会,大会的这些专题都是现今沉积学研究的热点

内容或前沿领域,是相关国家或国际合作地质计划(国际大陆钻探计划与海洋钻探计划)的重点研究范畴,研究水平较高。综合第 18 届国际沉积大会有关沉积储层研究论文的摘要、口头发言及展讲内容,对含油气盆地沉积学和层序地层学等方面的主要进展作一简述。

1 三级层序和体系域类型及其石油地质意义

第 18 届 IAS 国际沉积学大会,总计有 186 篇论文涉及层序地层学及油气储集层评价,在展厅也有许多专题涉及,反映近年来层序地层学研究取得的重大进展。我国层序地层学理论研究及应用的广度、深度与国外尚有一定差距。层序地层学的研究仍然是本次大会的一个议题,其中包括了层序地层与沉积环境的关系、大陆边缘盆地的沉积体系与层序地层的关系以及利用露头剖面开展层序地层划分等多个研究内容。对于利用层序地层原理开展不同地区实例研究的文章较多,比如 Robert O Salvador Francisco D'Avila 等人对巴拉那盆地石炭系 Itarare 组泥质岩、浊积岩以及冰川沉积进行了露头沉积层序研究,划分出五个沉积序列;Zelenda J Koch 等人对南极洲上古生界开展层序地层研究。而对于层序地层研究方法和未来趋势的探讨较少,多数将层序地层与沉积体系演化相结合。其实目前对于层序地层的前沿内容主要集中在层序地层标准化的建立与层序地层识别划分方法的运用。在 2009 年北美 Catuneanu O, Abre V 等 25 位著名沉积学家在 *Earth-Science Reviews* 杂志发表了“走向层序地层的标准化”(Towards the standardization of sequence stratigraphy)的文章指出层序地层标准化可能成为未来层序地层研究的重要领域^[2~5]。

1.1 运动学层序和体系域

对阿根廷 Andes 露头及对许多在挤压型、伸展型和盐构造背景下生长的地层调查发现,生长地层的同沉积变形可以构成由运动学体系域组成的“运动学层序”,其地层单元局部被不整合限定,可通过地震剖面或露头的反射终止形式来确定和识别。将运动学体系域与基于露头和地下界面系统的沉积相分布和(或)地质年代学数据对比,研究生长断层、盐构造和同生褶皱的幕式生长特征及沉积相展布,可以恢复生长地层运动学历史^[1,5]。

1.2 体系域类型及其石油地质意义

沉积体系域研究的新进展表现为 4 个方面:

1) 沉积体系域的 S2S (Source-to-Sink) 分析方法。地震地层学和层序地层学被认为是第二代和第三代的分析方法,沉积体系的 S2S (Source-to-Sink) 分析方法则认为是第四代的,主要是运用新技术新方法从源 (Source) 到汇 (Sink) 对地貌参数、古气候、水系、沉积过路区 (Bypass)、沉积面积及沉积物供给进行定量评价后,开展体系域研究的新方法。除了经典层序地层学中对沉积区和沉积物的评价外,S2S 方法还强调物源区的分析及其与沉积区的有机联系,包括物源区的面积、发育、发展和泥沙推算 (sediment routing)。事实上,这种方法可以是全球沉积体系模拟 (Earth Systems Modelling) 的延伸(据 Ole J Martinsen 2010),提供了含油气系统评价的新手段^[6~8]。2) 河流环境体系域引入低可容空间体系域和高可容空间体系域,指导我国河流体系的油气勘探,如渤海湾盆地馆陶组砂体、柴达木盆地古近系砂体。3) 下降期体系域强调深水环境的砂体沉积,对我国石油勘探的接替领域之一——深水砂质碎屑流的研究,将有重要的指导意义。下降期体系域指在滨线强制海退期间所有堆积在沉积盆地中的地层,尤其指深水地区的沉积物。4) 湖域勘探中的体系域新认识是以湖侵体系域、湖退体系域为切入点,解剖准层序和准层序组及其叠加方式,预测湖域体系的岩性地层油气藏^[9~11]。

1.3 气候变化是高频层序的主控因素

米兰柯维奇地球轨道旋回理论对分析层序很有用。有证据表明,(40×10)⁴ a 的离心率周期造成了白垩纪—古新世全球海平面变化。巴西大西洋边缘中生代裂谷沉积研究亦表明,气候变化与高频的米兰柯维奇振荡旋回关系密切。

2 层序地层在非常规油气勘探中的应用

2.1 深水页岩层序地层

深水页岩对海平面的响应及层序划分历来是高难度的课题。在晚泥盆世 Chattanooga 黑色页岩中发现了含黄铁矿的滞后沉积物,页岩中的牙形石可记录 1Ma 内的海平面波动。滞后沉积物具有波浪形成特征,反映存在海平面下降形成的剥蚀面。覆盖剥蚀面的黑色页岩记录了海平面上升,鲕绿泥石层反映海平面低位期,大量藻类孢囊充填丰富的二氧化硅和黄铁矿,与高水位条件一致,可能反映海平面的高水位期。

巴西 Paraná 盆地的泥盆系 Ponta Grossa 组是一套暗色页岩地层,含 HST 和 TST 两个体系域。微相

分析显示: TST 内的 TOC 较低(0.5%), 有强烈的破浪改造和生物扰动作用; HST 具有较强的底流改造作用, TOC 值较高。页岩微相反映了一个很有潜力的非常规页岩气藏。

2.2 层序地层与成岩作用

在意大利 Monte Camposaura 的白垩系碳酸盐岩成岩作用与层序地层研究中, 提出了成岩矿化度旋回的概念。一个完整的旋回从海水成岩作用开始, 经过混合作用、淡水作用、混合水作用和海水作用过程, 潜水面变化可能与相对海平面波动旋回有关。成岩矿化度旋回保存于海相的文石相和方解石相中, 可以根据上倾方向成岩作用预测下倾方向的沉积层序, 或据下倾方向的层序地层预测上倾方向成岩作用。

2.3 层序地层与油砂勘探

加拿大阿尔伯达的 Athabasca 油砂矿是全球最大的油藏之一, 具有复杂的内部构造和巨大的石油粘度。其白垩纪地层, 受潮汐作用的影响, 储层分布与物性特征复杂, 如潮道相常被倾斜异粒地层的不连续单元切断。这些插入的异粒地层, 对于识别流体障壁和隔板意义重大。利用层序界面(包括洪泛面)可以建立年代学模型, 有助于定义各独立的储集单元。

3 古土壤和遗迹化石在层序识别中的意义

对西班牙东部 Ebro 盆地的研究表明, 古近系河流层序中发育的古土壤, 包括含碳酸钙结核的泥岩, 在层序地层学中具有特别的指示意义。遗迹化石是指地史时期生物的生命活动在沉积物和其他底质中留下的痕迹。生物的生命活动主要包括运动、觅食、潜穴、钻孔、休息、捕食、耕作、住居、孵化、新陈代谢等, 如三叶虫的爬痕、恐龙足印、粪化石、卵化石、叠层石和微钻孔等。由于遗迹化石大都是原地埋藏, 通常保存在实体化石和其他无机沉积构造不发育的地层中, 因此, 遗迹化石在古环境、古生物、古生态和古海洋、古气候的重建, 在能源和其他沉积矿产资源的寻找和勘探中具有特别重要的作用。加强遗迹化石在海、陆相油气资源评价和储层研究中的应用; 改进遗迹化石的研究手段及其应用研究方法是值得今后进一步关注的问题。

4 盆地类型与沉积体系研究进展

4.1 前陆盆地与沉积体系

盆地与沉积关系显然是沉积学研究的一个新内

容, 愈来愈引起沉积地质学家的重视。本次大会对于盆地与沉积之间的研究出现在主题 4——盆地分析。在主题 4 里共有 5 个次级内容, 其中包括了构造、气候与沉积方面、前陆盆地沉积、裂谷盆地沉积、走滑盆地沉积以及盆地内的形成、风化与搬运过程五个内容。由于前陆盆地是我国重要的盆地类型, 特别是在我国中西部地区更是油气聚集的重要场所, 因此, 对前陆盆地沉积内容进行简要的总结。其中大会对前陆盆地沉积方面的讨论有 25 篇, 涉及的研究方向有前陆盆地沉积充填的研究、前陆盆地埋藏史对沉积体系的控制研究、构造演化对河流沉积的影响等方面, 内容广泛。这些成果将前陆盆地类型下的沉积作用与构造演化过程密切结合, 是研究前陆盆地类型与沉积作用过程的前缘领域。

前陆盆地沉积充填受控于前陆盆地局部构造与海平面升降的共同控制。据 German Bayona 等人研究认为, 始新世—上新世的哥伦比亚地区 Llanos 前陆盆地充填模式表明岩石圈尺度的局部构造和海平面控制了陆相前陆沉积充填特征。根据哥伦比亚 Llanos 盆地始新世—上新世记录的完整沉积特征揭示相邻的哥伦比亚山脉东部的增长。研究在(342 × 470) km 里利用了 170 口钻井揭示构造和海平面对沉积体系的影响。采用了地震解释、构造沉降恢复、孢粉校正层位以及岩芯测井综合分析表明, Llanos 前陆盆地由于断裂的控制, 致使前缘隆起向东迁移, 导致沉积充填产生相应的变化, 粗粒 Llanos 前陆盆地在继承前陆盆地碎屑岩后在西北角的快速沉降, 相关的共轭东部山脉和安第斯山脉梅里达垂直隆起, 控制了沉积充填特征。

4.2 盆地构造造山运动与体系域

Victoria B Ershova 等人揭示了东西伯利亚克拉通边缘 Priverkhoyansk 前陆盆地构造作用对 Lena 河流沉积的影响作用。研究者将河流相沉积的传统低位、海侵、高水位体系域的命名取代为低位和高位沉积体系域, 反映构造冲断引起的沉积条件。低位体系域是指以中至粗粒白色至浅灰色砂岩为主的连续堆叠河道。高位体系域发育河漫沉积与湖相沉积, 以及对废弃河道充填的细粒沉积。研究表明, 前陆盆地低位与高位的地层结构通常是由其相对沉降而形成差异的沉积物构成。前陆盆地构造沉降是诱发沉积充填的主要因素, 主要在冲断带由弯曲载荷的加载导致盆地迅速充填。最终认为 Priverkhoyansk 前陆盆地高构造沉降速率是产生充填低位体系沉积物的重要

因素,因而缺乏明显的冲刷面。

Frank R. Ettensohn 等人利用黑色页岩了解造山运动和前陆盆地发展。根据黑色页岩的分布与沉积特征研究前陆盆地在空间和时间的迁移,跟踪进度和造山运动的位置。认为造山运动不是单一的,长期的活动,一个相关的系列组成收敛或碰撞事件,称为构造相(tectophases)。黑色页岩易形成于前陆盆地的早期,因此根据黑色页岩的分布与沉积特征来区分不同构造相阶段的前陆盆地发育位置与时间。

5 深水沉积学研究进展

5.1 海洋深水区的深水扇

海洋深水区的深水扇(海底扇)已成为目前国际油气工业研究重要而活跃的领域。20 多年来的勘探实践也证明,深水区是油气蕴藏极为丰富的领域。近 15 年来,在南美、西非大西洋沿岸、墨西哥湾、北海、巴伦支海、喀拉海以及东南亚、澳大利亚西北大陆架等海域相继发现了许多大型油气田,勘探领域扩展到水深 3 000 m 的深海区。深水沉积理论主要分为两个学派:一是海洋沉积学学派;二是层序地层学学派。对深水研究做出重要贡献的有 Walker、Stow、Shanmugam 等沉积学家。Walker 的研究主要涉及再沉积砾岩、深水多砾石砂岩与砾岩储层等粗粒沉积。Stow 的研究重点是深海细粒沉积物。Shanmugam 的研究多涉及(砂质)滑塌、(砂质)碎屑流、滑塌和碎屑流为主的相、底流再作用、海底扇模式、发育、分类和含义等。

本次沉积学大会针对深水沉积的研究内容多样,归纳起来包括了深水沉积的各种沉积类型的实例研究(浊流、碎屑流等)、深水砂岩沉积特征、利用三维地震技术刻画深水沉积地貌特征以及利用露头伽玛仪对浊流沉积层序的划分等方面。其中来自荷兰的 Joris T. Eggenhu Isen 等学者对英国北海晚白垩统深水沉积的 Britannia 砂岩块体搬运沉积体系进行了详细研究,认为厚层碎屑沉积会发生整体搬运,呈现沉积体的整体沉积交替或掩埋前部沉积单元的大规模块体搬运,从而影响砂岩的分布与储层内部的非均质。晚白垩统的 Britannia 深海砂岩沉积在 Witch Ground 地堑,形成了主要凝析气的地层圈闭。在根据遍及钻井的 20 km² Britannia 砂岩钻探区 11 口钻井 2 000 ft (610 m) 高品质的岩芯资料与 27 口相邻钻井的详细研究发现,低位储层内部具有高度的不均质性,厚层碎屑沉积交叉或取代前部低位砂岩,从而在

块体搬运内部形成沉积单位的这种大规模的重构现象,大大影响了砂岩的分布。这种砂体的重构现象主要受到地形高低的诱发,是最终形成砂体形态的重要因素,揭示了深水砂体沉积中形态与过程之间的重要联系。

5.2 深水碎屑流沉积中的滑坡体识别研究

Emmanuel E. Adiotomre 等人通过三维地震资料的解释对安哥拉近海碎屑流沉积地貌特征开展了详细研究。重点开展深水碎屑流沉积中的滑坡体(slide)的识别研究。指出三维地震属性分析仍然是刻画深水沉积体形态的最有利技术手段。在研究中利用频谱分解、RGB 混合和变异属性刻画深水斜坡碎屑流的形态,最终发现褶皱和断裂演化改变了古海底和倾角的方向,从而控制了引起安哥拉近海碎屑流沉积体滑坡体空间分布的地貌要素,并在三维地震剖面上划分为三个滑坡地震相。Emmanuel E Adiotomre 等人研究的深水滑坡体的形态研究就是美国深水沉积学家 Shanmugam 教授指出的砂质块体搬运主要形态中的砂质滑动,后者将深水环境中砂质块体运移分为四个部分,砂质滑动(sand slide)、砂质滑塌(sand slump)、砂质碎屑流(sand Debris)与砂质浊流(sand Turbidity)。Emmanuel E. Adiotomre 等人的研究结果提供新的造成滑坡的可能原因的见解,值得在石油和天然气勘探慎重考虑和。意大利的 Domenico Capolongo 对陆上地震诱发的滑坡与斜坡剥蚀作用机制的研究可能为我们开展深水沉积诱发机制研究方面提供一些启发。文章指出中强地震可能引发从几百到几十万方滑坡作用,并且地震引起对斜坡稳定性的影响不仅限于一个强烈地震振动短暂的时期,而且在某些情况下存在延迟滑坡,会在几小时甚至发生地震后数天才会引起滑坡。特别是地震引起的山体滑坡与后期的斜坡剥蚀作用共同产生多次的滑坡现象。

6 盆地分析与资源沉积学研究进展

6.1 盆地分析

本次大会涉及的盆地分析方面的论文有 7 篇。分别介绍了欧洲南二叠盆地、埃及 El Qaa Basin 盆地、亚洲富国—贡布索姆盆地、巴西南部 Paraná State 东区的 Curitiba 盆地的盆地结构与发育演化特征。荷兰 Hubert Kiersnowski 通过对欧洲南二叠盆地(SPB)的沉积演化特征研究,提出了通过倾角测量可以确定古风向并预测古沙丘的分布位置,有助于找到目标圈闭的新认识。晚二叠世早期,由于古气候的变

化和海平面的升降, SPB 的风成沉积系统在 8 Ma 年间经历了多次扩张与收缩。快速海侵时期, 大量重力流(滑塌或滑坡)沉积在丘间地区发育; 水体的再改造导致不规则的沙质盖层形成; 盐岩和硬石膏在埋藏的沙丘顶部沉淀形成封隔层。因此在沙丘和间沙丘期间发育了巨厚的沉积盖层(可达 1 000 m)。到晚三叠世和侏罗纪, 天然气开始排烃, 运移进入地貌圈闭(埋藏的沙丘)形成 Polish Rotliegend 盆地大气田群(数平方千米, 几十至上百米厚)。沙丘的形成具有多种形式, 常发展成为复合型沙丘。

Hernán M. Reijenstein 等通过地震水平切片等技术, 识别出泰国湾水下河流与河口沉积的准确空间分布。图像表明水下河流大都具有下切谷、河道、间湾、牛扼湖、截弯取直、点砂坝等特征。泥质充填的连续河道可将储集系统(点砂坝)分隔成离散的部分。了解这种河流相的构造及其形成过程, 有助于预测砂体的展布并划分储层的区域, 对储层建模意义重大。此外, 这种河流系统也可作为深水河流勘探目标的类比模型。

Lorna J Strachan 通过对苏伊士海湾的三维地震和露头资料研究, 重新建立了埃及 El Qaa 裂谷盆地的构造—沉积模型, 提出如果裂谷盆地边缘和中心具有沉积相关性, 那么在裂谷盆地中心能够发育碎屑流砂岩和砾岩等粗粒沉积, 并形成优质储层。

阿根廷 Neuquén 盆地, 从侏罗纪的弧后裂谷发育而来, 拥有一系列拗陷和凹陷。裂谷期的快速沉降使沉积中心成为深湖, 有效保存了有机质, 而后裂谷内部营养循环使湖盆具有很高的生产率, 各凹陷发育不同品质和数量的烃源岩。盆地西南弯曲边缘带发育的河流相砂岩可作为储层。后裂谷期的蒸发岩、湖相泥岩以及与之互层的凝灰岩是良好盖层。圈闭的形成与侏罗纪的地层反转有关。

6.2 资源沉积学

本次大会涉及的资源沉积学方面的论文有 10 余篇。常规油气资源勘探研究进展介绍南美巴西、阿根廷等国的实例较多。其次是介绍油砂、页岩气等非常规资源的勘探实例, 如全球最大的加拿大阿尔伯达的 Athabasca 油砂矿形成的沉积学特征, 还有少量论文介绍水能等。

巴西 Paran盆地的泥盆系 Ponta Grossa 组是一套暗色页岩地层, 页岩微相反映了一个很有潜力的非常规页岩气藏。

波斯湾早白垩世(Sarvak / Mishrif 组) 的浅海碳酸

盐岩已勘探 40 余年, 发现了一系列大型油田。Sarvak / Mishrif 组由低能末端斜坡—中高能浅海滩相组成, 主要储层位于上部层段。深部的盐构造对中白垩世碳酸盐岩台地发展有主控作用。地震分析显示, Sarvak / Mishrif 的储层顶部有剥蚀和/或未沉积现象, 优质储积体发育在侧翼, 因此预测丘状构造的侧翼具有更好的勘探潜力。

7 火山岩储层研究进展

第 18 届国际沉积学大会上宣读和张贴展板中有关火山岩的较少, 共宣读有关火山岩论文 9 篇, 占宣读论文总数的 2.1%, 张贴展板 6 块, 占张贴展板总数的 1.2%。

关于火山岩研究内容主要集中于火山沉积学方面, 包括火山地貌学、火山沉积层序、火山地貌沉积建造、火山岩地球化学等三个方面。在地下火山岩及油气储层方面没有相关的研究论文。

火山地貌学研究主要是对不同环境、喷发强度和地面地貌条件下火山喷发形成的地貌特征的研究, 通过现代火山盆地形成的地貌特征与古火山形成的古地貌特征进行对比, 利用露头资料建立火山地貌的地质模型。

火山沉积层序主要从岩性、岩相和年龄测定(K / Ar、U - Pb、LA - MC) 等方面开展研究, 通过火山喷发期次、序列和旋回综合划分火山沉积层序。通过异体层序研究裂谷盆地的火山沉积序列, 火山喷发沉积在同生裂谷盆地火山层序中具有明显特征, 喷发形成的地层和后期剥蚀形成的地层在异体层序中有差别, 火山喷发和后期风化形成的粘土矿物搬运后形成的沉积层也是异体层序重要的标志层, 可利用露头建立 3D 模型。

火山地貌沉积建造主要从古气候、古地貌、古构造等方面开展研究, 通过大陆钻探(ICDP) 揭示火山发育区对沉积建造的控制作用, 特别是对现代沉积的控制作用, 如对有 500000 年沉积史的世界第四大湖 lake Vans 沉积的控制作用研究, 火山地貌、气候变化和构造运动相互作用对现代沉积的地化及物理指标起到关键作用。同时揭示火山喷发及并发的地震对沉积事件的控制作用, 在沉积地层中造成明显的断裂^[12, 13]。

火山岩地球化学研究方面, 在火山岩提供物源区, 提出利用 Th / Sc、Zr / Sc 等比值研究沉积物物源和搬运过程, 通过 U - Pb 年龄确定沉积时间, 通过追踪

搬运距离,最远的搬运距离可达 1 000 km,火山岩原始物质的年龄、石英及锆石可进行火山沉积区的沉积重建,这种方法要优于砂岩物质地球化学的沉积过程重建。同时还可以通过不同来源石英的阴极发光颜色,来判断物源的来源,如来源于火山岩的石英的阴极发光颜色为红色。

国外在野外露头及建模方面研究深入,值得我们学习,特别是对不同环境喷发的火山岩建模及对异体沉积的控制方面研究深入,利用大量实测资料进行分析,得到了较可靠结论,而我们在进行露头研究时主要注重于对现有地层的测量和观察,对其成因和异体沉积的控制作用研究较少,我们在今后的工作中应加强和借鉴。对露头与地下对比、火山岩储层成因及控制因素等方面的研究没有涉及,而这些研究正是油气勘探所需要的。

8 元素地球化学研究进展

元素地球化学方面的进展在本次沉积学大会上可谓内容众多,多种元素地球化学方法与手段被用于进行盆地沉积环境、物源分析、成岩特征以及构造环境分析等多个方面。其中利用岩石学与地球化学方法开展盆地物源与构造环境分析的文章有来自智利的 Paula Castillo 学者,他利用岩相学、全岩微量元素、稀土元素数据上的差异综合开展了南极半岛 Trinity Peninsula 组的物源与构造环境分析,并且充分利用砂砾岩中重矿物的组合特征进行物源分析。值得一提的是在进行物源分析时,利用电子探针分析石榴子石进行物源恢复的崭新方法可以用在以后的实际研究中。利用多元统计分析物源特征,确定断层边界对盆地形成演化控制的研究也是一个重要研究方向。巴西学者 Andre Marconato 在对巴西南部 Camaqu 盆地开展研究时发现,多元统计物源分析方法是一种开展盆地演化分析的有效方法。其先对 Ediacaran alluvial 冲积扇与 braided 继承性河流卵石成分、大小统计数据进行处理,通过对数比值变换,从而由此产生的聚类现象是用来了解源区的地理和地层变化的依据。这种卵石大小成分的聚类现象反映了流域边界高地的演进与同步沉积盆地边界断层的运动,最终恢复盆地演化的受控因素。在对成岩特征的研究方面,阿根廷的 Pamela Aparicio Gonzalez 介绍了利用成岩变质特征来表征古生代泥质单元特征的方法。依据 KI 指数表征成岩变质程度,并利用双目放大镜、光学和扫描电子显微镜(SEM)、X 衍射等方法分离测定泥质岩

中矿物结构、成分和岩性,最终确定成岩变质特征。巴西的 Marta Maria Do Rego Barros Fernandes De 研究者利用泥质沉积磁场分析开展了泥质沉积的演化特征研究。

9 碳酸盐岩沉积学进展及前瞻

9.1 微生物碳酸盐岩沉积学(Microbial Carbonate Sedimentology)

在这届大会上,微生物碳酸盐岩沉积学是一个重要的研究方向。几个主题发言中,有两位专家就这个领域发言。美国田纳西大学教授 Robert Riding 对近十年的进展进行了总结发言。同沉积的微生物碳酸盐岩包括两个方面:一种是沉积物内部发生的细菌引起了生物沉淀产物,如现代海洋中天然气海底泄漏(气苗)处的规模碳酸盐岩结核层;第二种是沉积物—水界面处的生物膜——菌藻席(通常为叠层石)在蓝细菌作用下,水体中的微晶碳酸盐岩颗粒无机沉淀(白化作用)。总体有三种微观形态:一种前寒武系大量发育的叠层石;第二种是凝块状的,发育在碳酸盐还原的条件;第三种是蓝细菌藻类的外鞘钙化作用,这种作用还能导致白化作用,形成元古界地层的“白齿”石灰岩构造,早古生界蓝细菌和其他微生物形成大量的凝块石—枝状石。奥陶纪以后,吃藻的软体动物繁盛,只有在一些严酷的环境才能看到微生物碳酸盐岩沉积,如在蒸发泻湖中才能看到叠层石;在一些礁体内部的空洞内壁发育有隐蔽微生物碳酸盐岩,同时在内陆的钙化河流、湖泊中大量出现出现泉华、钙华的微生物碳酸盐岩。这些沉积对我们认识我国三大海相盆地 ϵ 、 0 系碳酸盐岩至关重要。

9.2 碳酸盐岩与碎屑岩混积沉积

传统观点认识陆源碎屑出现对碳酸盐岩沉积是不利的。证明这一观点主要的证据是淹没了的碳酸盐岩台地常被碎屑岩所覆盖这一现象。美国迈阿密大学 Gregor P Eberli 认为实际情况是海平面变化造成陆架型沉积在垂向上出现碳酸盐岩与碎屑岩沉积的交替。在高海平面高位期,陆架边缘形成碳酸盐岩台地,而在低位期陆源碎屑在陆架边缘沉积,覆盖于碳酸盐岩沉积之上,构成了交替状态。同时沿岸流或深水等深流可以将碎屑岩搬运到碳酸盐沉积环境中去。尤其是深水部位的沿岸流,将细粒(往往是粘土大小)搬运到碳酸盐岩的台地斜坡部位,形成一些等斜沉积结构。因此,在平面上,海岸带可以是碎屑岩沉积,边缘带是碳酸盐沉积,而深水区是细粒碎屑岩

沉积区;纵向上,在陆架边缘碳酸盐岩与碎屑岩可以互相交替出现。

9.3 冷水碳酸盐岩

传统认识是碳酸盐沉积在低纬度洁净温暖的浅海海水中。经过多年的深海钻探和大洋调查,这个认识已被大大地深化了。本次大会设定了一个专题来讨论此事,有22位专家作了发言。例如在挪威的深水峡湾中,一些高纬度地区,在一些深水(>1000 m)区都发现了第四纪的碳酸盐生物沉积体,形成许多生物丘建造。目前来看,这些领域的发现都是基于第四系地质调查,对古代的论述尚处于萌芽状态,仅有两位发言涉及到上奥陶统和二叠系的例子。这些基础性研究无疑对我国三大海相盆地的研究会起引领的作用。

9.4 碳酸盐岩成岩变化与地球化学

碳酸盐岩的成岩变化研究已经紧密的与地球化学联系在一起。除了传统的微量元素分析、C、O同位素分析外,近年,Sr和S同位素也不断引入到研究中来,稀土元素和包体分析已渐成常态。分析方法已从块样分析进入到微区定点定量分析,尤其是国外先进分析技术的发展,已经能够开展微区定点同位素的分析,极大地提高了对古流体的研究水平。近年还不断开发新的分析手段,尤其是针对白云岩成因这个难题,在大会上推出了一个全新的同位素指标,即镁同位素。这是一个新的探索领域,正在成为新的白云岩判别指标。加拿大的教授认为Mg同位素是一个强有力的潜在判别白云岩成因的工具。利用MC-TCP-MS测试手段确定 $\delta^{26}\text{Mg}$ 与 $\delta^{25}\text{Mg}$ 的比值,与其他地球化学指标相结合,可以确定镁离子来源,为加拿大古生界白云岩的形成提供可靠依据。这项技术正在开发之中。

10 结 语

通过对第18届国际沉积学大会相关专题的初步总结,总体认为沉积地质学作为地球科学的研究基础,在国际上受到了越来越多的注意和重视。

10.1 重视露头 and 现代沉积研究

露头和现代沉积是观察地质现象最直观的场所,90%的沉积学家选择出露良好的露头地区开展研究,进行二维,甚至三维的露头地质调查。在关键层段,进行一厘米一厘米详细观察和取样;许多沉积地质理论就是从这种全面感知第一手材料中总结出来。新的学科命题也是来源于露头科学观察。例如,目前碳

酸盐岩研究的前沿,主要观察了澳大利亚 Shark bay 陆内的河流钙华、泉华沉积,各类蒸发湖泊的碳酸盐沉积,以及与古生界和元古界的露头沉积得出新的认识。河流沉积的进展也与现代河道中的观察有密切关系,单元坝概念的提出是一个明显的沉积学进展,这基于现代河流多年的研究观察。

10.2 实验技术和沉积地球化学

实验技术对沉积学的发展举足轻重,一些关键层位、层序的划分,重要界线厘定,都离不开对实验技术的要求。目前,发展最快的是沉积地球化学,对矿物中的同位素分析、稀土分析技术发展进展快。已经提出了对镁同位素进行研究,多种同位素综合分析,以解决实际地质问题也是一种趋势。

10.3 沉积实验模拟和数值模拟

沉积模拟是沉积学发展的重要手段,传统的物理模拟辅以数学模拟会更加精确,尤其结合盆地演化的碳酸盐台地发育的模拟更是达到了新的层次。

10.4 层序地层与前陆盆地研究

层序地层研究在国际上的进展明显。与国际上相关研究领域及研究进展相比较,在陆相层序地层与前陆盆地研究方面,中国所处的大地构造位置与沉积环境独特,研究具有一定的优势。但在其他方面还存在一定的差距,如在沉积机理、露头沉积学以及一些新技术方法等方面的研究,中国学者尽管有不同程度的涉足,但与国际研究成果相比尚有一定的不足。国际学者重视构造与沉积层序的结合,利用沉积盆地沉积物的特征反演断裂构造的演化。

参考文献(References)

- 1 第18届国际沉积学大会论文摘要集[C]. 阿根廷门多萨,IAS, 2010 [Abstracts from 18th International Sedimentology Congress [C]. Mendoza in Argentina, IAS 2010]
- 2 Catuneanu O. Sequence stratigraphy of clastic systems: concepts, merits and pitfalls [J]. Journal of African Earth Science, 2002, 35: 1-43
- 3 Catuneanu O. Principles of Sequence Stratigraphy [M]. Amsterdam, Elsevier, 2006
- 4 Catuneanu O, Abreu V, Bhattacharya J P, et al. Towards the standardization of sequence stratigraphy? [J]. Earth-Science Reviews, 2009, 92: 1-33
- 5 贾承造,刘德来,赵文智,等. 层序地层学研究新进展[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(5): 1-4 [Jia Cengzhao, Liu Delai, Zhao Wenzhi, et al. Some new achievements in sequence stratigraphy research [J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(5): 1-4]
- 6 Martinsen O J, Helland-Hansen W. Strike variability of clastic deposi-

- tional systems: does it matter for sequence- stratigraphic analysis? [J]. *Geology*, 1995, 23: 439-442
- 7 Vail P R. Sequence Stratigraphy Workbook, Fundamentals of Sequence Stratigraphy. 1988 AAPG Annual Convention Short Course: Sequence Stratigraphy Interpretation of Seismic Stratigraphy Interpretation Procedure [M]//Bally A W. AAPG At-Las of Seismic Stratigraphy, 1988: 217-259
- 8 Van W J C. Sequence Stratigraphy and Marine To Nonmarine Facies Architecture of Foreland Basin Strata, Book Cliffs, Utah, U. S. A. [C]. Sequence Stratigraphy of Foreland Basin Deposits. Outcrop and Subsurface Examples from the Cretaceous of North America. AAPG Memoir 64, 1995: 137-223
- 9 吴因业, 张天枢, 张志杰, 等. 沉积体系域类型、特征及石油地质意义[J]. *古地理学报*, 2010, 12(1): 69-81 [Wu Yin-ye, Zhang Tianshu, Zhang Zhijie, et al. Types and characteristics of depositional systems tract and its petroleum geological significance [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2010, 12(1): 69-81]
- 10 吴因业, 顾家裕, Cedric G, 等. 塔里木盆地满西区块强制海退体系域沉积模式[J]. *石油学报*, 2003, 24(4): 21-25 [Wu Yin-ye, Gu Jiayu, Cedric Griffiths, et al. The depositional model of forced regressive systems tract of Manxi Block in Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2003, 24(4): 21-25]
- 11 吴因业, 宋岩, 贾承造, 等. 柴北缘地区层序格架下的沉积特征[J]. *地质学前沿*, 2005, 12(3): 195-203 [Wu Yin-ye, Song Yang, Jia Chengzhao, et al. Sedimentary features in a sequence stratigraphic framework in the north area of Qaidam Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(3): 195-203]
- 12 邹才能, 赵文智, 贾承造, 等. 中国沉积盆地火山岩油气藏形成与分布[J]. *石油勘探与开发*, 2008, 35(3): 257-271 [Zou Caineng, Zhao Wenzhi, Jia Chenzao, et al. Formation and distribution of volcanic hydrocarbon reservoirs in sedimentary basins of China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 35(3): 257-271]
- 13 朱如凯, 毛治国. 火山岩油气储层地质学——思考与建议[J]. *岩性油气藏*, 2010, 22(2): 7-13 [Zhu Ru-kai, Mao Zhi-guo. Volcanic oil and gas reservoir geology: Thinking and forecast [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2010, 22(2): 7-13]

Advance on Sedimentology and Sequence Stratigraphy:

A Summary from 18th International Sedimentology Congress

WU Yin-ye¹ ZHU Ru-kai^{2,3} LUO Ping⁴ YUAN Xuan-jun¹ HOU Liang-hua¹ ZHANG Tian-shu¹

(1. Department of Petroleum Geology, RIPED of PetroChina, Beijing 100083;

2. The Key Lab of Oil and Gas Reservoir, CNPC, Beijing 100083;

3. Central Laboratory of Geological Sciences, RIPED of PetroChina, Beijing 100083;

4. Tarim Basin Branch Institute, RIPED of PetroChina, Beijing 100083)

Abstract Advance on sedimentology and sequence stratigraphy were summed up in view of point from oil and gas exploration in petroliferous basins. It included as follows: the third order sequence and types of systems tract and its significance of petroleum geology; sequence stratigraphic application in unconventional oil and gas exploration; palaeo-soil and trace fossils and its significance in sequence identification; basin types and depositional systems including basin fills such as tectonic, climate and deposits, foreland basin deposits, faulted basin deposits, strip-slide basin deposits etc., as well as depositional sequence of clastic system such as lacustrine, glacial and eolian system; deep water sedimentology; basin analysis and resource sedimentology including coal, oil and gas, placer mine, source rocks and reservoirs etc.; volcanic rocks reservoirs including volcanic deposits, volcanic eruption, volcanic diffusion and facies model; element geochemistry including clastic geochemistry such as diagenetic petrology, clastic petrology and geochemistry, provenance and weathering, and clay mineral geochemistry; and advance on carbonate rocks sedimentology including microbial carbonate sedimentology, mixed carbonate and clastic rocks, cold water carbonate rocks, and diagenetic changes and geochemistry of carbonate rocks. It also finally points out that future emphasis in oil and gas exploration focus on outcrops and modern deposits research, laboratory technique and sedimentary geochemistry, laboratory model and numerical simulation, and sequence stratigraphy and foreland basin analysis.

Key words sedimentology; sequence stratigraphy; systems tract; oil and gas exploration; foreland basin; Mendoza