

碳酸盐岩沉积相研究进展

李峰峰, 郭睿, 余义常

中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘要 总结碳酸盐岩沉积相研究进展及方法, 指出其中存在的问题和发展趋势。结果表明, 国外对海相碳酸盐岩沉积相划分注重碳酸盐岩沉积类型的地理分布规律和沉积能量差异, 中国则侧重于沉积相的精细划分和岩相古地理分析。中国四川盆地和南海海域的生物礁研究取得重大进展, 对生物礁的形成环境、控制因素、发育模式和表征方法等认识不断深化。湖相碳酸盐岩沉积模式多样, 微生物碳酸盐岩逐渐成为研究热点, 沉积模式不断完善。冷水碳酸盐岩的时空分布、发育机理、控制因素、沉积物特征及油气地质意义研究程度不断提高。碳酸盐岩沉积相研究方法包括地质分析法和地球物理法, 其中地质分析法包括微相分析法、实验分析法、生物相法和地球化学法, 地球物理法包括数学-测井法和地震方法。碳酸盐岩沉积相研究存在问题有: 海相碳酸盐岩分类体系缺乏统一的标准和规范; 实验分析法、生物相方法及地球化学法应用较少; 浅滩发育模式和深水碳酸盐岩研究薄弱。碳酸盐岩沉积相的发展趋势为: 研究方法不断实现定性方法和定量方法的结合, 突破碳酸盐岩混合沉积研究技术瓶颈; 不断深化深水、冷水等非常规碳酸盐岩理论认识和油气潜力分析; 相控原则应用更为广泛, 相控建模、相控成岩演化、相控储层分类等方法不断深入。

关键词 碳酸盐岩; 沉积相; 海相; 生物礁; 湖相

沉积相研究对于寻找油气藏有利区带、预测优质储层分布及剩余油挖潜等具有重要意义, 是油气田勘探开发过程中不可或缺的工作。碎屑岩沉积相研究方法和沉积演化模式已趋于成熟。碳酸盐岩为内源沉积, 其沉积机制、控制因素、相带展布及研究方法等与碎屑岩存在显著差异。碳酸盐岩沉积相不但控制了成岩作用的物质基础, 而且控制了成岩作用的演化路线。沉积相研究是深化储层非

均质性认识的基础。通过分析文献, 总结碳酸盐岩沉积相研究进展和技术方法, 明确碳酸盐岩沉积相研究中存在的问题及发展趋势。

1 碳酸盐岩沉积研究进展

1.1 海相碳酸盐岩

碳酸盐岩沉积相分类最早是基于对陆表海沉

收稿日期: 2019-04-19; 修回日期: 2019-08-21

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX05030-001)

作者简介: 李峰峰, 博士, 研究方法为油气开发地质, 电子信箱: 18810853190@163.com

引用格式: 李峰峰, 郭睿, 余义常. 碳酸盐岩沉积相研究进展[J]. 科技导报, 2021, 39(8): 128-140; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.08.015

积环境的研究。1964年, Shaw最早论述了陆表海的水体能量特征, 建立了陆表海能量分布模式和沉积物差异模式, 奠定了碳酸盐岩沉积相带划分的基础^[1]。Irwin在Shaw的基础上, 根据潮汐和波浪能量差异, 将陆表海划分为低能X带、高能Y带和低能Z带^[2]。Laport将潮汐作用与Irwin划分的能量带结合, 划分出潮上带(对应Z带)、潮间带(对应Y带), 并根据陆源碎屑是否发育将潮下带(X带)进行了二分^[3]。Armstrong通过对石炭系碳酸盐岩研究, 根据水体能量和沉积物差异特征, 自陆地向沉积盆地划分成9个相带, 将碳酸盐岩沉积相分类提高到精细化和综合化的新高度^[4]。Wilson根据沉积物的岩石学特征, 通过总结地质历史中常见的沉积类型, 构建了综合碳酸盐沉积模式, 该模式中将碳酸盐岩划分为三大沉积区、9个标准相带和24个标准微相^[5]。Read根据构造背景和台地结构差异, 基于Wilson综合沉积模式, 建立了不同边缘结构的镶边台地沉积相带, 丰富和完善了镶边台地沉积相研究^[6-7]。Schlager指出Wilson综合模式并非只适用

于镶边台地, 其建立的标准微相可以通过组合建立新的沉积模式, 同样适用于缓坡沉积相带^[8]。Flügel对Wilson综合沉积模式进行了修订, 将原来的9个标准相带修订为10个标准相带, 增加了受大气淡水影响的碳酸盐岩带, 原来的24个标准微相修订为26个标准微相, 并建立了缓坡台地沉积模式和30个缓坡微相^[9]。国内学者多沿用Wilson提出的综合沉积相模式, 并结合实际地质条件对碳酸盐岩沉积相进行细化和补充。顾家裕等综合了台地边缘性质、古地貌及水体循环条件等因素, 将碳酸盐岩台地沉积模式细分为10类^[10]。陈洪德等建立了中国西部三大盆地5类海相碳酸盐岩沉积模式, 细化并发展了碳酸盐岩沉积相研究^[11]。金振奎等在前人研究的基础上, 对碳酸盐岩沉积相的定义、类型、识别标志和沉积模式等进行了系统厘定和总结(表1), 提出了一套海相碳酸盐岩沉积相分类方案^[12]。总体来看, 国外学者对海相碳酸盐岩沉积相分类注重碳酸盐岩沉积类型的地理分布规律和沉积能量差异, 国内海相碳酸盐岩研究更侧重于沉积

表1 海洋碳酸盐岩沉积相分类^[12]

相(facies)	亚相(subfacies)	微相(microfacies)	亚微相(submicrofacies)	
潮坪	滨岸潮坪、台内潮坪、台缘潮坪	潮上带	潮上灰坪、潮上云坪、潮上云灰坪、潮上滩、潮上湖	
		潮间带	潮间灰坪、潮间滩、潮汐水道	
		潮下带	潮下灰坪、潮下滩	
台地	岸滩、障壁滩、台内滩、台缘滩	滩中、滩缘	—	
		礁核、礁前斜坡、礁后滩、礁沟	—	
		堡礁、岸礁	礁核、礁前滩、礁后滩、礁沟	—
		斑礁	礁核、礁缘滩	—
		塔礁	礁核、礁缘斜坡	—
开阔台地	—	—	—	
局限台地	—	—	—	
蒸发台地	—	—	—	
斜坡	缓坡	上部	—	
		下部	—	
	陡坡	上部	—	
		下部	—	
	陡崖	上部	—	
		下部	—	
盆地	浅盆	—	—	
	深盆	—	—	

相类型的精细化和岩相古地理分析。

生物礁油气藏巨大的油气储量和产量,一直作为油气勘探的重要目标。世界上生物礁大油田的总储量达40亿t^[13]。近些年,中国南海海域和四川盆地发现了多个生物礁油气藏。许多学者对生物礁的分类、发育环境、控制因素及储层成因等进行了研究,并建立了众多的生物礁发育模式,生物礁地质认识取得了巨大突破。刘治成等将川东北地区长兴组分为台地边缘礁和台内点礁,并对不同类型生物礁的古地理位置、礁体形态和礁岩特征进行了归纳总结^[14]。武恒志等将川东北元坝地区长兴组单礁体分为单期礁和多期礁,礁群分为纵向进积式、纵向退积式、横向迁移式、横向并列式及复合叠加式5种模式,细化了生物礁类型和发育模式^[15]。杨振等将南海南部生物礁划分为点礁、台地边缘礁、块状礁、层状礁、塔礁、环礁共6类,将生物礁划分为初始发育阶段、繁盛阶段、衰退阶段和淹没阶段4个阶段,完善了生物礁发育模式和期次^[16]。郭旭升等建立了四川盆地元坝地区生物礁“早滩晚礁、多期叠置、成排成带”的沉积模式,为深层生物礁优质储层发育模式提供了地质依据^[17]。研究发现,四川盆地生物礁的发育受海平面升降、古地貌、生物类型、水介质及构造作用等因素影响^[18-20]。地震技术是识别和表征生物礁的重要方法。吕其彪等运用岩石物理建模,以地震数据为硬约束,进行叠前地质统计学反演,得到岩性礁滩体反演剖面^[21]。吴勇等基于地貌学中的坡度理论,利用地震构造精细解释,进行高精度坡度属性计算台缘型生物礁边界,解决了生物礁边缘边界多解性问题^[22]。

1.2 湖相碳酸盐岩

湖相碳酸盐岩广泛发育于陆相含油气盆地,例如美国绿河盆地、巴西坎波斯盆地和苏联滨里海盆地等^[23-24]。中国63个油气田中的413个油气藏为湖相碳酸盐岩油气藏^[25],湖相碳酸盐岩储层的重要性日益凸显,国内外学者对湖相碳酸盐岩分类、沉积模式及储层成因等方面取得了新认识^[26-28]。湖相碳酸盐岩包括淡水湖盆碳酸盐岩、半咸水-咸水湖盆碳酸盐岩和盐湖碳酸盐岩^[29]。碳酸盐对古气候、古水介质及古水动力条件等异常敏感,陆相湖

盆本身是一个复杂多变的动力系统,几乎没有理想可靠的标志能够正确、严格地将碳酸盐沉积环境区分开来^[30]。国内外学者根据湖盆演化、构造背景、水文状况、水深和水动力条件、生物发育状况及湖平面升降旋回等因素,建立了湖相碳酸盐岩沉积模式^[31-36](表2)。周自立等建立了湖相碳酸盐岩沉积相划分方案:自盆地边缘到湖盆中心,分为滨湖、浅湖和深湖^[36]。杜韞华总结了我国渤海地区湖相碳酸盐岩沉积特征,提出了湖相碳酸盐岩综合沉积模式。该模式反映了从盆地边缘到湖盆中心碳酸盐岩岩石类型变化规律,突出了湖盆古地貌及水体条件对湖相碳酸盐岩平面分布的影响,剖析了骨架碳酸盐岩体的地貌分布和颗粒碳酸盐岩有利发育区^[33]。

伴随着巴西海域桑托斯盆地、坎波斯盆地多个大型、特大型微生物碳酸盐岩油气田的发现,湖相微生物碳酸盐岩逐渐受到关注。微生物碳酸盐岩研究最早可追溯到1825年^[37],最近20年的时间得到了快速发展。Riding提出了湖相微生物碳酸盐岩分类方案^[38]。Arenas等总结了西班牙马略卡岛湖相微生物碳酸盐岩沉积相特征^[39]。Bahniuk等明确了微生物碳酸盐岩对古环境的指示意义^[40]。王颖等研究了巴西桑托斯盆地白垩系湖相碳酸盐岩微生物礁滩的成因,指出微生物礁滩的形成受控于古环境、水体深度和藻类改造作用^[41]。朱石磊等建立了巴西坎波斯盆地湖相介壳灰岩沉积模式,为该区油气勘探提供了地质依据^[35]。国内在柴达木盆地、渤海湾盆地和四川盆地中也发现湖相微生物碳酸盐岩^[42-43]。唐鑫萍等明确了山东平邑盆地湖相微生物碳酸盐岩形成机理,深化了湖相碳酸盐岩发育的环境基础和控制因素认识^[44]。张德民等建立了湖相微生物碳酸盐岩沉积相模式,厘清了湖相碳酸盐岩微相类型及岩性叠置关系^[45]。

1.3 冷水碳酸盐岩

冷水碳酸盐岩具有狭义和广义之分,狭义的冷水碳酸盐岩指冷水-极地高纬度地区(温度通常低于5℃)沉积的碳酸盐岩,而广义的冷水碳酸盐岩泛指海水表面温度低于20℃的非暖水(凉水和冷水)沉积环境,本文所指为广义冷水碳酸盐岩。冷水碳

表2 国内外代表性湖相碳酸盐岩沉积模式^[35]

代表学者	模式名称	划分依据	研究实例
管守锐	内源和外源混合沉积型	湖盆发育阶段	中国平邑盆地
	藻滩型	—	—
赵澄林	断陷咸水湖盆边缘台地型	湖盆性质、水体咸度、湖盆地貌及位置	中国渤海湾盆地
	断陷咸水湖盆中央台地型	—	—
	断陷咸水湖盆边缘缓坡型	—	中国四川盆地
Platt & Wright	开口湖盆边缘低能台地型	水文条件、水动力条件、湖盆地貌	美国 Littlefield 湖
	开口湖盆边缘高能台地型	—	美国 Snake River 露头
	开口湖盆边缘低能缓坡型	—	西班牙 Cameros 盆地
	开口湖盆边缘高能缓坡型	—	美国 Uinta 盆地
Eugster & Hardie	水文封闭湖盆型	水文条件、湖盆位置	美国 Bridger 盆地
Williamson	砂坝湖滩及保护泻湖沉积模式	水动力环境、水介质条件	美国 Ewing 盆地
周自立	湖泊颗粒碳酸盐岩型	水深、水动力条件	中国渤海湾盆地
孟祥化	淡水湖泊礁滩型	生物发育状况、相带发育特征	中国淡水湖泊
	淡水湖泊湖滩型	—	—
	淡水湖泊湖叠层石型	—	—
杜搵华	湖泊碳酸盐岩综合沉积模式	古地貌、岛屿发育位置	中国渤海湾盆地
纪友亮	湖相碳酸盐岩垂向沉积模式	湖平面升降、物源、气候	中国柴达木盆地

酸盐岩研究最早可追溯至 1934 年 Askelsson 对冰岛南部海岸和法国西海岸非热带碳酸盐岩的描述^[46]。1967 年, Chave 最早对冷水碳酸盐岩成因进行了探究, 开启了冷水碳酸盐岩研究的新篇章^[47]。随后在新西兰、爱尔兰、澳大利亚南部、西班牙南部、昆士兰和加拿大等地相继有冷水碳酸盐岩的报导, 冷水碳酸盐岩的地理分布、沉积动力学条件、沉积物特征、形成机理及控制因素等认识不断深化, 逐渐成为碳酸盐岩沉积体系中不可或缺的一部分^[48-53]。由于冷水碳酸盐岩早期成岩作用保存了大量的原始孔隙, 可发育大规模的优质储层, 逐渐成为了碳酸盐岩热点研究领域。John 等对澳大利亚南部冷水碳酸盐早期成岩作用进行了研究, 明确了冷水碳酸盐岩孔隙的发育机理和保存条件^[54]。Pugliano 等探索了冷水碳酸盐岩的建模方法, 丰富了冷水碳酸盐岩表征的技术手段^[55]。James 对冷水碳酸盐岩的形成条件、时空分布及生物类型等进行了系统分析^[56]。贾承造等结合冷水碳酸盐岩研究最新成果, 系统总结了冷水碳酸盐岩的沉积物岩石学特征、形成环境及油气地质意义^[57]。总体来看, 冷水碳酸盐岩具有以下特征: (1) 发育于中、高纬度甚至极地环

境, 根据海水表面平均温度, 可将冷水碳酸盐岩划分为温暖-温水区 (15~20℃)、凉水-温水区 (5~15℃) 和凉水-极地区 (<5℃) 3 种类型^[57]。(2) 沉积速率较低, 通常低于 1 m/ka。(3) 生物种类较少, 以非营光型的异养生物为主, 缺乏以光合作用为主的自养生物。(4) 缺乏生物礁沉积和钙质绿藻, 主要为珊瑚藻和无脊椎动物骨骼等生物颗粒^[58]。(5) 盐度较低, 碳酸盐岩通常处于饱和-欠饱和状态。(6) 沉积水体能量较高, 冷水碳酸盐岩灰泥基质较少, 以颗粒结构为主。

2 碳酸盐岩沉积相研究方法

2.1 碳酸盐岩沉积相研究难点

与碎屑岩相比, 碳酸盐岩沉积相研究差异体现在以下方面: (1) 岩石结构组分复杂。碳酸盐岩碎屑颗粒类型复杂, 生物碎屑多样性加大了沉积相研究难度。(2) 地球物理响应复杂。测井响应特征不明显。碳酸盐岩黏土矿物含量低, 成岩作用尤其是胶结作用使岩石物理性质趋同, 伽马和自然电位测井曲线对岩性变化响应程度低。不同碳酸盐岩沉

积相与地震属性相关性较低,沉积相空间展布缺乏有效约束条件。(3) 碳酸盐岩沉积韵律不甚发育,缺乏特定的曲线形态和组合特征,难以建立有效的测井解释模型,岩心标定困难。(4) 成岩改造强度大。成岩作用导致原始沉积特征模糊,难以恢复古沉积环境。(5) 古地貌控制了宏观沉积背景。古地貌差异形成了不同碳酸盐台地,不同台地的沉积相带划分、控制因素及沉积模式等存在差异,而古地貌的恢复困难且结果难以验证。(6) 陆源碎屑快速注入,与碳酸盐岩平面上呈指状交叉,纵向上叠置形成混积岩体系。混积岩体系岩石组分及地球物理特征复杂,沉积环境判别难度大。(7) 控制因素多元化。碳酸盐岩沉积控制因素包括台地类型、海平面升降、气候、温度、水质条件、水动力强度、生物类型及古地貌等。

碳酸盐岩沉积相研究方法有两大类:地质分析法和地球物理法。根据资料差异和实现方式,地质分析法可细分为微相分析法、生物相方法、实验分析法和地球化学法;地球物理法分为数学-测井法和地震方法。

2.2 地质分析法

1) 微相分析法。

微相分析法是沉积相研究最基础、最核心的方法。微相分析法指除常规的野外直接观察露头以外,主要借助显微镜等对岩石进行观察分析,以确定岩石成因机理和形成环境及沉积作用过程信息的一种综合的沉积学分析方法和手段^[59]。微相分析法基于 Wilson^[5]和 Flügel^[9]建立的沉积模式和标准微相,以镜下薄片为基础,通过观察岩石类型、岩性组合、颗粒含量、粒度大小、结构构造、生物类型等,通过与标准微相特征对比,判断沉积相带,进而确定碳酸盐岩沉积环境。值得注意的是标准微相只适用于热带温水台地环境,冷水环境下碳酸盐岩沉积结构组分与暖水环境存在较大差异,不能用 Wilson 或 Flügel 所建的热带碳酸盐岩沉积模式和标准微相去分析冷水环境下碳酸盐岩。

2) 生物相方法。

生物相指能反映特定古环境的生物生态和沉积特征的组合^[60]。每种生物对于水质条件及水体

能量等具有特定的适应范围。群落是特定沉积环境的有机组合,群落古生态研究不仅可以恢复生态环境,还可以恢复盆地古地理,其实现方式为:通过岩心、露头获取生物化石类型、保存状态和共生状态信息,统计分析化石在时间和空间上的分布规律,通过比较得出不同群落的生态环境信息^[61]。肖传桃等在对生物群落详细划分的基础上,根据其沉积特征的组合情况,将川西地区中二叠世一中三叠世生物相划分为局限台地底栖生物相、开阔台地底栖型生物相、内缓坡底栖型生物相、外缓坡底栖型生物相、陆棚斜坡底栖生物相和深水盆地游泳型生物相^[62](表3)。生物相是判断古沉积环境的有力证据,也是识别沉积相的重要方法。需要注意的是,只有原地沉积埋藏的生物化石才具有环境指示意义。

3) 实验分析法。

碳酸盐岩成岩作用强烈,具有指示意义的相标志多已被破坏或改造严重,且岩石微观结构通过常规方法不能有效地观察和识别,实验分析法可通过应用高精尖仪器设备研究碳酸盐岩微观特征,例如晶体结构、晶格缺陷、超微化石、微孔隙、重结晶结构等。实验分析法主要用来明确岩石经历的成岩作用、恢复原始沉积状态。其地质依据是:成岩作用对沉积作用具有一定的继承性,沉积作用奠定了成岩作用的物质基础,控制了成岩作用的类型,可通过成岩相判断成岩机制,确定成岩演化后恢复原始沉积状态,进而推断沉积环境。

常用的技术方法有扫描电子显微镜、阴极发光显微镜、流体包裹体等。例如,扫描电镜主要用于细粒灰岩或微晶灰岩的组分研究,通过观察晶型、超微结构和超微化石等特征,结合宏观特征,判断陆源物质补给程度、沉积水动力强度、蒸发作用强度、生物种类及繁盛程度等^[63]。阴极发光显微镜通过电子轰击抛光薄片和抛光岩石而发光,发光特征取决于岩石化学成分、晶体结构、晶格缺陷及其他因素^[64]。阴极发光显微镜主要用于观察成岩相,如反映化学环境的矿物晶体生长环带、反映成岩环境的胶结程度和胶结物期次、矿物交代及重结晶等。流体包裹体通常与阴极发光显微镜及稳定同位素

表3 川西地区中二叠世—中三叠世生物相模式及特征^[62]

生物相类型	内缓坡底 栖型生物相	外缓坡底 栖型生物相	开阔台地底 栖型生物相	陆棚斜坡底 栖型生物相	深水盆地游 泳型生物相	局限台地底 栖型生物相
生物类别	腕足、蛭类、珊瑚	腕足、蛭类、珊瑚	腕足、蛭类、珊瑚、双壳类、有孔虫、腹足类	蛭类、珊瑚、腕足类、有孔虫	菊石	双壳类、腕足、菊石、有孔虫、层孔虫
生态类型	底栖固着型 50% 底栖移动型 50%	底栖固着型 30% 底栖移动型 70%	底栖型 100%	底栖型 100%	游泳型 100%	底栖型 100%
典型群落	<i>Hayasakaia</i> , <i>Verbeekina</i> , <i>Hayasakaia</i> - <i>Misellina</i> , <i>Neoschwagerina</i> - <i>Verbeekina</i> , <i>Tyloplecta</i> , 群落	<i>Verbeekina</i> - <i>Pseudodoliolina</i> 群落	<i>Dictyoclostus</i> , <i>Oldhamina</i> , <i>Claraia</i> - <i>Ammodiscus</i> , <i>Glomospira</i> 群落	<i>Godonofusiella</i> , <i>Palaeofusulina</i> 群落	<i>Altudoceras</i> 群落	<i>Eumorphotis</i> , <i>Glomospira</i> - <i>Ammodiscus</i> , <i>Glomospira</i> , <i>Entolium</i> - <i>Lituotuba</i> 群落
产化石岩性	厚层块状灰岩	厚层块状灰岩、 含燧石结核	厚层块状灰岩、 紫红色薄层泥 灰岩	黑色燧石灰岩、中 厚层微晶灰岩	黑色硅质岩	白云岩为主、白云 质灰岩
对应沉积相	内缓坡相	外缓坡相	开阔台地相	陆棚斜坡相	深水盆地相	局限台地相
层位	栖霞组、茅口组	茅口组	吴家坪组、长兴 组、飞仙关组	吴家坪组、长兴组	大隆组	嘉陵江组、 雷口坡组

分析等相结合,碳酸盐岩晶体中由水成液体和气体组成的雾状包裹体,可提供胶结物成岩环境信息及其热史等,如樊爱萍等指出流体包裹体均一温度和成岩体系改变导致胶结物形状存在差异,提供了成岩环境演化的信息^[65]。实验分析法对样品的要求较高,例如用于扫描电镜分析的样品必须未受风化作用影响,流体包裹体样品应用的假设前提是其发育于封闭体系,而地质时期中样品可能会处于开放体系而导致包裹体性质变化。

4) 地球化学法。

地层中元素分配、比值变化及组合指示着古气候环境的演化历程,矿物是古环境研究的信息载体,元素又是组成矿物岩石的基本单元,可以用元素地球化学特征来识别沉积环境^[66]。在碳酸盐岩沉积相研究中,地球化学法主要根据特征元素含量及其相关比值、元素异常值等指标判别古水体环境、物源方向及源区构造背景等,常见的地球化学方法有同位素分析法、微量元素法、配对元素比值法、稀土元素分析^[67-70]。Si、Al、K、 Σ REE(稀土元素的总含量)、Ti等元素主要来源于陆源碎屑,陆源组

分含量高,通常说明距离物源区较近;Ca/Mg值通常在白云岩发育的潮上带最低,指示干热气候,且常伴随Na含量高值;Sr/Ba值的高低反映了蒸发作用的强弱,蒸发环境下Sr/Ba值小,由近岸浅水区域向深水区域,Sr/Ba值通常增高。Re、Cd、Cr、Co、Cu、U和Zn等微量元素在还原环境中富集,在氧化环境中含量较低;Mn/Fe值高低反映氧化还原环境,通常近岸浅水区氧化作用较强,Fe的化合物在近岸处聚集,而Mn在深水还原区富集,Mn/Fe值的升高代表水体加深,沉积环境从氧化环境向还原环境转化。

地球化学法应选取合理的采样密度,确保数据的有效性和代表性。陆源碎屑注入对地球化学参数的影响最为严重,且后期成岩作用容易造成地球化学参数出现异常^[71],地球化学法判断沉积环境具有不确定性。应用地球化学法应首先排除陆源碎屑和成岩作用对地球化学参数造成的影响。微量元素Zr、Th元素通常来源于陆源碎屑物质,碳酸盐岩中受到陆源碎屑影响时该类元素富集;Al是典型的陆源元素,Ca通常为水成元素, Σ REE通常来

源于陆源和水成两种成因,若 Σ REE与Ca具有较高的相关性,则能排除陆源碎屑的影响;成岩作用通常改变Ce异常值,导致 δ Ce与 δ Eu、 Σ REE具有较高的相关性。胡俊杰等通过将样品元素标准化处理,Ca/Al与 Σ REE/Al表现出良好的相关性,消除了陆源 Σ REE的影响,并通过 δ Ce与 δ Eu、 Σ REE无明显的相关性消除了成岩作用对样品地化参数的影响^[72]。

2.3 地球物理学

1) 数学-测井法。

碳酸盐岩缺乏具有相指示意义的沉积韵律,难以通过测井曲线形态进行微相解释,沉积相解释通常为多曲线建立的定量方法。其基本原理为:通过岩-电精确标定,确定碳酸盐岩沉积相特征参数,建立测井响应函数,优选数学算法开展单井沉积相解释。例如,王玉玺等选取自然伽马、中子和密度3条常规测井曲线,提取曲线均值和GR曲线的离差平方和参数,建立标准井中测井相-沉积微相的定量转换关系(图1^[73]),在此基础上采用Bayes逐步判别法建立了北鲁迈拉油田Mishrif组碳酸盐岩沉积微相的测井判别模型,并利用该模型实现了对未建模井沉积微相的准确标定^[73]。付金华等基于测井曲线-岩石结构-古地貌-沉积环境的耦合关系,利用常规测井曲线,采用合成参数的方法,通过合成参数曲线变化定性表征岩石结构,进而判断沉积环境水体能量和沉积古地貌^[74]。数学-测井法要求

沉积相特征参数与沉积相类型具有较高的相关性,否则解释结果不具有可信度。此外,特殊测井资料在碳酸盐岩沉积相研究中发挥了重要作用,例如吴煜宇以成像测井为主体,结合GR(地层总自然伽马)能谱测井、岩性密度测井和其他常规测井资料识别岩石类型,明确不同沉积相的成像测井响应特征,建立了鲁迈拉油田的电成像测井解释图版,实现单井连续测井相划分^[75]。

2) 地震方法。

地震资料是沉积相空间约束的重要条件,地震资料本身没有沉积意义,地震方法主要通过岩心、露头及测井等沉积相研究结果对地震资料进行准确标定,赋予各种地震反射结构地层或沉积含义。其基本原理:通过井-震标定,建立沉积相地震响应模型,通过定性或定量方法将地震相转换为沉积相。地震-沉积相响应归结到底是岩性差异或古地貌形成不同的地震反射结构,即地震岩性学和地震地貌学^[76],例如何金海等在井-震标定和地震相精细解释的基础上,通过地震相向沉积相转换,对礁滩体的展布以及研究区的沉积相平面分布做了精细刻画^[77],为恢复沉积体系提供了一种有效方法(图2^[77])。付金华等系统总结马家沟组中组合不同岩性对应的地震响应特征,将反射振幅、反射连续性等参数与钻井标定,通过地震相分析沉积相展布特征^[74]。地震岩性学的应用前提是碳酸盐岩岩性与波阻抗具有较好相关性。地震地貌学应用基础是古地貌对碳酸盐岩沉积环境具有一定的控制,通常古地貌高地为浅水高能环境,是礁滩体发育的主要区域,而古地貌低洼地带多为低能沉积环境,沉积水动力较弱,泥质含量较高,多为局限台地或深水环境。因此通过古地貌恢复可判断古沉积环境,曾洪流等基于地震地貌学理论,根据印模法和残厚法恢复古地貌特征,并借鉴“单因素法”恢复沉积相的研究思路^[78],综合古地貌和岩相分布等两个因素,预测沉积相分布^[79]。

地震反演在储层预测和沉积相空间约束方面具有重要的作用,地震反演方法包括基于地质模型的反演、约束稀疏脉冲反演、属性反演、分频反演、地质统计反演5大类^[80]。近些年,随着计算机硬件

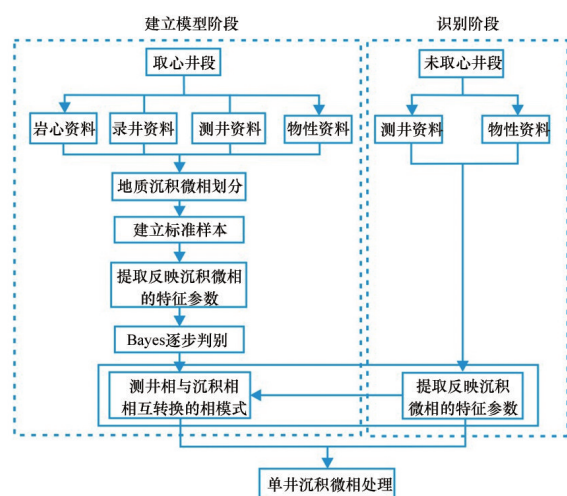


图1 Bayes逐步判别法识别沉积微相流程

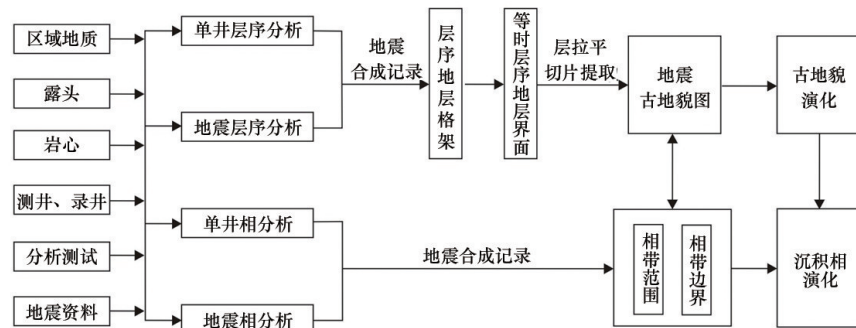


图2 碳酸盐岩地震地貌学工作流程

设备运行速度的不断提升,求解算法和波形理论的不不断发展,地震反演的技术方法和应用领域不断拓宽^[81],由叠后波阻抗反演发展到地质统计学反演,进一步拓宽了地震频带;弹性波阻抗反演实现了岩石中流体的判别;拟测井曲线反演技术大幅度提高了地震反演的分辨率,反演的多解性严重降低了反演结果的有效性;模拟退火、遗传算法、蒙特卡罗算法(Monte Carlo method)和神经网络算法(Neural Networks)等非线性算法的出现有效降低了反演的多解性;以速度随方位角变化(VVAZ)及振幅随方位角变化(AVAZ)为核心的吸收及速度发散(AVD)属性反演在裂缝性油藏识别方面具有巨大的优势。地震反演结果的精细程度、准确性及综合有效性不断提高。

地震方法进行碳酸盐岩沉积相研究具有一定的局限性,地震资料品质决定了结果的可靠性,若地震资料分辨率较低,则不能满足精细开发沉积相研究要求。例如地震资料对碳酸盐岩隆呈丘形反射体,这种岩隆通常为生物礁和生物滩沉积体,若无井资料进行标定,仅通过地震资料通常难以区分。地震岩性学研究中,上下围岩的反射特征、裂缝及流体等因素对地震分析也会造成较大的影响。

3 碳酸盐岩沉积相研究存在问题

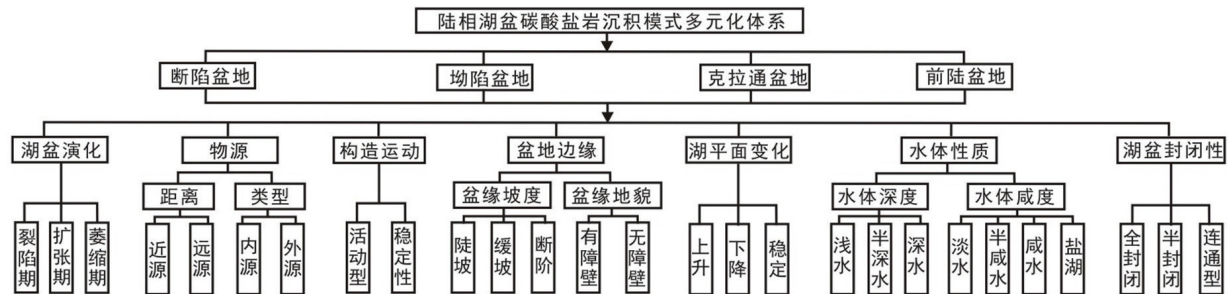
1) 海相碳酸盐岩沉积相分类较多,命名混乱,缺乏统一的标准和规范。(1) 缓坡和斜坡、潟湖和局限台地概念混用。缓坡是碳酸盐岩台地的一种

类型,而斜坡是台地的一种沉积环境,两者名称相似,但不能通用。局限台地与潟湖虽然都代表了封闭低能的水体环境,但局限台地所指范围更大,两者并非等同。(2) 国内外对“微相”的理解和定义也存在一定差异。Flügel将“微相”定义为在薄片、接片和光片中能够被分类的所有古生物学和沉积学标志的综合,标准微相是对具有相同标志微相的概括,这些标志简单,非定量或半定量,易于识别^[9]。国外微相分析更倾向于一种确定沉积环境的研究方法和手段;而国内“微相”作为沉积环境的精细单元,微相研究倾向于将沉积环境及其沉积岩特征的精细划分。冯增昭指出微相必须指明其沉积环境,否则不能称作“相”^[82-83]。而Wilson综合沉积模式中部分标准微相仅指岩石类型,如标准微相SMF2(微生物屑似球粒钙质粉砂屑石灰岩)和SMF9(掘穴生屑颗粒质灰泥石灰岩)等。(3) 开阔台地与局限台地判断标准模糊。开阔台地、局限台地通常以水体循环是否“良好”和盐度是否“正常”来区分,但“良好”和“正常”均为定性的描述,没有定量的判别标准。

2) 湖相碳酸盐岩沉积相研究程度较低。陆相湖盆控制因素的多元性造成碳酸盐岩沉积特征复杂,相比海相碳酸盐岩,湖相碳酸盐岩的划分通常限于亚相,对于微相的研究程度较低。陆相湖盆规模较小,盆地边缘多样化,物源供给方向多、地貌因素复杂等,湖相碳酸盐岩沉积模式繁多,尚无综合统一的分类体系。笔者通过总结国内外湖相碳酸盐岩沉积模式,基于湖盆演化、物源条件、构造运

动、盆地边缘性质、水体性质及湖平面升降等因素,建立了陆相湖盆碳酸盐岩沉积模式多元化体系(图

3)。湖相碳酸盐是在特定的地质背景下由一种或多种主控因素综合作用的结果。



3) 沉积相研究方法中,主要注重地质分析法、测井及地震方法,而实验分析法、生物相方法、地球化学法应用较少。碳酸盐岩成岩作用对原始沉积物的元素成分、矿物类型、溶蚀和胶结程度破坏较为严重,需要借助实验分析和地球化学的方法明确成岩演化,恢复原始沉积环境。碳酸盐岩中生物类型较多,不同生物指示了不同的沉积环境,生物相方法对沉积环境判定具有重要的作用。因此沉积相的研究需要在常规方法的基础上重视多方法的综合应用。

4) 碳酸盐岩滩体发育模式研究薄弱。生物礁的生长模式及控制因素等已有深入研究,而对于滩体的内部沉积模式研究较少。浅滩是储层发育的重要环境,滩体沉积模式和结构剖析对于储层层内非均质性研究、注水开发方案调整及剩余油挖潜等具有重要意义。

5) 低能沉积环境研究程度较低。现有研究多集中于台地边缘、潮坪及开阔台地等高能环境,而对潟湖和局限台地等低能环境的研究较少。低能沉积环境底栖生物发育、生物扰动作用对岩石结构组分和化学环境具有重要的改造作用,后期成岩作用,尤其是白云岩化作用可大幅度地提高岩石的物性。目前,对于潟湖相储层形成机理、控制因素及定量表征研究程度较低。

成岩改造不容忽视,应注重建立原始沉积-成岩作用-岩石特征-地球物理的四元素耦合关系,实验分析法、生物相及地球化学方法在成岩演化研究及恢复古沉积环境方面将会发挥更大作用。同时不断实现定量方法与定性方法的结合,例如将微相分析法与数学算法相结合,通过聚类分析的方式判定沉积环境,降低人为主观因素干扰。

2) 非常规碳酸盐岩研究程度深入。深水、冷水及混合沉积等非常规碳酸盐岩是油气勘探开发的重要接替资源,其成因机理、控制因素、沉积模式、层序构型、成藏条件及规模潜力等认识将会不断提高。深入低能沉积相研究,潟湖相储层具有巨大的油气潜力,深入低能环境沉积作用研究对于明确潟湖相储层成因和深化储层非均质性认识具有重要的作用。

3) 储层相控原则应用更为广泛。碳酸盐岩沉积相奠定了成岩改造的物质基础,沉积-成岩双重作用决定了储层品质。相控原则可以深化储层非均质性成因认识。例如中东地区孔隙型碳酸盐岩储层,其储层物性和孔隙结构主要受沉积环境控制,储层分类多采用沉积和成岩控制的成因分类;地质建模多采用岩相或沉积相控制的相控建模思路;储层改造研究也采用相控成岩演化研究。

参考文献(References)

- [1] Shaw A B. Time in stratigraphy[M]. New York: McGraw-Hill, 1964.

4 展望

1) 沉积相研究方法的突破与综合。碳酸盐岩

- [2] Irwin M L. General theory of epeiric clear water sedimentation[J]. AAPG Bulletin, 1965, 49: 445-459.
- [3] 冯增昭. 碳酸盐岩相古地理学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989.
- [4] Armstrong A K. Carboniferous carbonate depositional models, preliminary lithofacies and paleotectonics maps[J]. AAPG Bulletin, 1974, 58(4): 621-645.
- [5] Wilson J L. Carbonate facies in geologic history[M]. Berlin: Springer Verlag, 1975: 348-374.
- [6] Read J F. Carbonate platform facies models[J]. AAPG Bulletin, 1985, 69(1): 1-21.
- [7] Read J F. Carbonate platforms of passive (extensional) continental margins: Types, characteristics and evolution [J]. Tectonophysics, 1982, 81(3): 195-212.
- [8] Schlager W. On the definition of ramp[J]. Gaea Heidelbergensis, 1997, 30(4): 165-193.
- [9] Flügel E. 碳酸盐岩微相—分析、解释及应用[M]. 马永生, 译. 北京: 地质出版社, 2006: 628-696.
- [10] 顾家裕, 马锋, 季丽丹. 碳酸盐岩台地类型、特征及主控因素[J]. 古地理学报, 2009, 11(1): 21-27.
- [11] 陈洪德, 钟怡江, 许效松, 等. 中国西部三大盆地海相碳酸盐岩台地边缘类型及特征[J]. 岩石学报, 2014, 30(3): 609-621.
- [12] 金振奎, 石良, 高白水, 等. 碳酸盐岩沉积相及相模式 [J]. 沉积学报, 2013, 31(6): 965-979.
- [13] 米立军, 曾清波, 杨海长. 东沙隆起珠江组生物礁类型及勘探方向[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 24-31.
- [14] 刘治成, 张廷山, 党录瑞, 等. 川东北地区长兴组生物礁成礁类型及分布[J]. 中国地质, 2011, 38(5): 1298-1311.
- [15] 武恒志, 吴亚军, 柯光明. 川东北元坝地区长兴组生物礁发育模式与储层预测[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 645-657.
- [16] 杨振, 张光学, 张莉, 等. 南海南部北康盆地生物礁的类型及油气勘探前景[J]. 中国地质, 2017, 44(3): 428-438.
- [17] 郭旭升, 胡东风, 李宇平, 等. 四川盆地元坝气田发现与理论技术[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(1): 14-26.
- [18] 黄仁春. 四川盆地二叠纪-三叠纪开江-梁平陆棚形成演化与礁滩发育[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2014, 41(4): 452-457.
- [19] 陈辉, 郭海洋, 徐祥恺, 等. 四川盆地剑阁-九龙山地区长长期与飞仙关期古地貌演化特征及其对礁滩体的控制[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(6): 854-861.
- [20] 黄家园, 梁昆, 王玉珏, 等. 全球泥盆纪生物礁演化及其影响因素[J]. 地层学杂志, 2019, 43(2): 198-209.
- [21] 吕其彪, 吴清杰, 毕有益. 高分辨率地震解释预测礁滩相储集层[J]. 新疆石油地质, 2012, 33(5): 557-559.
- [22] 吴勇, 周路, 钟斐艳, 等. 基于坡度属性的生物礁边界精细预测方法——以四川盆地罗顶寨地区二叠系长兴组为例[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(6): 907-918.
- [23] Cohen A S, Thouin C. Nearshore carbonate deposits in Lake Tanganyika[J]. Geology, 1987, 15(5): 414-418.
- [24] Ryder R T, Fouch T D, Elison J H. Early Tertiary sedimentation in the western Uinta Basin, Utah[J]. Geological Society of America Bulletin, 1976, 87(4): 496-512.
- [25] 杨有星, 高永进, 张君峰, 等. 歧口和泌阳凹陷两种类型湖相碳酸盐岩沉积特点[J]. 现代地质, 2019, 33(4): 831-840.
- [26] Bohacs K M, Carrola R, Neal J E, et al. Lake-basin type, source potential, and hydrocarbon character: An integrated sequence- stratigraphic-geochemical framework [J]. AAPG Studies in Geology, 2000, 46: 3-34.
- [27] Warren J. Dolomite: Occurrence, evolution and economically important associations[J]. Earth-Science Review, 2000, 52(1/2/3): 1-81.
- [28] Nevolin N V, Fedorov D L. Palaeozoic pre-salt sediments in the precaspian petroliferous province[J]. Journal of Petroleum Geology, 1995, 18(4): 453-470.
- [29] 夏青松, 田景春, 倪新锋. 湖相碳酸盐岩研究现状及意义[J]. 沉积与特提斯地质, 2003, 23(1): 105-112.
- [30] 孙钰, 钟建华, 袁向春, 等. 国内湖相碳酸盐岩研究的回顾与展望[J]. 特种油气藏, 2008, 15(5): 1-6.
- [31] Eugster H P, Hardie L A. Sedimentation in an ancient Playa-Lake complex: The Wilkins Peak member of the Green River formation of Wyoming[J]. Geological Society of America Bulletin, 1975, 86(3): 319-334.
- [32] Wilkinson B H, Pope B N, Owen R M. Nearshore ooid formation in a modern temperate region Marl Lake[J]. Journal of Geology, 1980, 88(6): 697-704.
- [33] 杜韞华. 渤海湾地区下第三系湖相碳酸盐岩及沉积模式[J]. 石油与天然气地质, 1990, 11(4): 376-392.
- [34] 纪友亮, 马达德, 薛建勤, 等. 柴达木盆地西部新生界陆相湖盆碳酸盐岩沉积环境与沉积模式[J]. 古地理学报, 2017, 19(5): 757-772.
- [35] 朱石磊, 吴克强, 吕明, 等. 巴西坎波斯盆地湖相介壳灰岩特征及沉积模式[J]. 中国海上油气, 2017, 29(2): 36-45.
- [36] 周自立, 杜韞华. 湖相碳酸盐岩的沉积相与油气分布关系——以山东胜利油田下第三系碳酸盐岩为例[J]. 石油实验地质, 1986, 8(2): 123-132.
- [37] Steele J H. A description of the Oolitic Formation lately

- discovered in the county of Saratoga, and state of New York[J]. *American Journal of Science and Arts*, 1825, 9 (1): 16-19.
- [38] Riding R. Microbial carbonates: The geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms[J]. *Sedimentology*, 2000, 47(1): 179-214.
- [39] Arenas C, Cabrera L, Ramos E. Sedimentology of tufa facies and continental microbialites from Palaeogene of Mallorca Island (Spain)[J]. *Sedimentary Geology*, 2007, 197(1/2): 1-27.
- [40] Bahniuk A M, Anjos S, Franca A B, et al. Development of microbial carbonates in the Lower Cretaceous Codo Formation (northeast Brazil) : Implications for interpretation of microbialite facies associations and palaeoenvironmental conditions[J]. *Sedimentology*, 2015, 62(1): 155-181.
- [41] 王颖, 王晓州, 康洪全, 等. 桑托斯盆地白垩系湖相碳酸盐岩微生物礁滩的成因[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(1): 67-75.
- [42] 温志峰, 钟建华, 王冠民, 等. 柴达木盆地古近纪一新近纪湖相叠层石与藻礁的沉积组合特征与意义[J]. *地质学报*, 2005, 79 (4): 444-452.
- [43] 吉云平, 杨振京, 赵华, 等. 河北阳原盆地井儿洼剖面常量元素地球化学特征揭示的中更新世晚期以来气候变化[J]. *古地理学报*, 2016, 18(3): 487-496.
- [44] 唐鑫萍, 黄文辉, 邓宏文, 等. 山东平邑盆地古近系湖相微生物碳酸盐岩形成机理[J]. *古地理学报*, 2012, 14 (3): 355-364.
- [45] 张德民, 段太忠, 张忠民, 等. 湖相微生物碳酸盐岩沉积相模式研究——以桑托斯盆地 A 油田为例[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(3): 413-422.
- [46] Pedley H M, Carannante G. Cool-water carbonates: Depositional systems and palaeoenvironmental controls[M]. London: Geological Society Special Publications, 2006.
- [47] Chave K E. Recent carbonate sediments: An unconventional view[J]. *Journal of Geological Education*, 1967, 15 (5): 200-204.
- [48] Nelson C S, Hancock G E, Kamp P J J. Shelf to basin, temperate skeletal carbonate sediments, Three Kings Plateau, New Zealand[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1982, 52(3): 717-732.
- [49] Bosence D W J. Sedimentary facies, production rates and facies models for recent coralline algal gravels, Co. Galway, Ireland[J]. *Geological Journal*, 1980, 15(2): 91-111.
- [50] James N P, Bone Y. Origin of a cool-water, Oligo-Miocene deep shelf limestone, Eucla Platform, southern Australia[J]. *Sedimentology*, 1991, 38(2): 323-341.
- [51] Martín J M, Braga J C, Betzler C, et al. Sedimentary model and high -frequency cyclicity in a Mediterranean, shallow shelf, temperate-carbonate environment (uppermost Miocene, Agua Amarga basin, southern Spain)[J]. *Sedimentology*, 1996, 43(2): 263-277.
- [52] Draper J J. Permian limestone in the southeastern Bowen Basin, Queensland: An example of temperate carbonate deposition[J]. *Sedimentary Geology*, 1988, 60(1/4): 155-162.
- [53] Nelson C S, Bornhold B D. Temperate skeletal carbonate sediments on Scott shelf, northwestern Vancouver Island, Canada[J]. *Marine Geology*, 1983, 52(3/4): 241-266.
- [54] John M R, Noel P J, Kyser T K. Early diagenesis of carbonates on a cool-water carbonate shelf, southern Australia[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2008, 78(12): 784-802.
- [55] Pugliano T M, Goldstein R H, Franseen E K. Fundamental controls on modeling reservoir properties of fining-updip heterozoan carbonates: AAPG 2016 annual convention and exhibition[C]. Calgary, Alberta, Canada: AAPG, 2016.
- [56] James N P. Carbonates in a cold ocean; the evolving paradigm[R]. Calgary Canada: Department of Geological Sciences and Geological Engineering, Queen's University, 2016.
- [57] 贾承造, 张杰, 沈安江, 等. 非暖水碳酸盐岩: 沉积学进展与油气勘探新领域[J]. *石油学报*, 2017, 38(3): 241-254.
- [58] Lees A, Buller A T. Modern temperate-water and warm-water shelf carbonate sediments contrasted[J]. *Marine Geology*, 1972, 13(5): 67-73.
- [59] 包洪平, 杨承运. 碳酸盐岩微相分析及其在岩相古地理研究中的意义[J]. *岩相古地理*, 1999, 19(6): 59-64.
- [60] 肖传桃, 龚文平, 罗顺社, 等. 华南地区奥陶纪头足类生物相及其分区[J]. *沉积学报*, 2006, 24(2): 242-250.
- [61] 肖传桃, 龚丽, 梁文君. 川西地区中二叠统一中三叠统古生态研究[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(7): 819-827.
- [62] 肖传桃, 肖胜, 田宜聪, 等. 川西地区中二叠世一中三叠世生物相及其分区研究[J]. *地球科学进展*, 2015, 30 (5): 602-608.
- [63] 黄杏珍. 扫描电镜下灰泥灰岩的鉴别及其沉积环境意

- 义的探讨[J]. 沉积学报, 1984, 2(3): 91-100.
- [64] Hemming N G, Meyers W J, Grams J C. Cathodoluminescence in diagenetic calcites: The roles of Fe and Mn as deduced from electron probe and spectrophotometric measurements[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1989, 59(3): 404-411.
- [65] 樊爱萍, 杨仁超, 韩作振, 等. 鲁西地区张夏组碳酸盐岩成岩系统[J]. 沉积学报, 2015, 33(1): 67-78.
- [66] 汪凯明, 罗顺社. 碳酸盐岩地球化学特征与沉积环境判别意义——以冀北坳陷长城系高于庄组为例[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(3): 343-349.
- [67] Fruth I, Scherreiks R. Facies and geochemical correlations in the Upper Hauptdolomit (Norian) of the eastern Lechtaler Alps[J]. *Sedimentary Geology*, 1975, 13(1): 27-45.
- [68] Bhatia M R. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: Provenance and tectonic control[J]. *Sedimentary Geology*, 1985, 45(1): 97-113.
- [69] 侯恩刚, 高金汉, 王训练, 等. 西藏改则上三叠统干配错组碳酸盐岩地球化学特征及沉积环境意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(3): 556-563.
- [70] 潘明, 吕勇, 山克强, 等. 云南保山栗柴坝组碳酸盐岩地球化学特征及环境意义[J]. 地质论评, 2015, 61(2): 333-343.
- [71] Shields G, Stille P. Diagenetic constraints on the use of cerium anomalies as palaeoseawater redox proxies: An isotopic and REE study of cambrian phosphorites[J]. *Chemical Geology*, 2001, 175(1/2): 29-48.
- [72] 胡俊杰, 李琦, 李娟, 等. 羌塘盆地角木日地区二叠系碳酸盐岩元素地球化学特征及其对古沉积环境的指示[J]. 高校地质学报, 2014, 20(4): 520-527.
- [73] 王玉玺, 田昌炳, 高计县, 等. 常规测井资料定量解释碳酸盐岩微相——以伊拉克北 Rumaila 油田 Mishrif 组为例[J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1088-1099.
- [74] 付金华, 吴兴宁, 孙六一, 等. 鄂尔多斯盆地马家沟组中组合岩相古地理新认识及油气勘探意义[J]. 天然气工业, 2017, 37(3): 9-16.
- [75] 吴煜宇, 张为民, 田昌炳, 等. 成像测井资料在礁滩型碳酸盐岩储集层岩性和沉积相识别中的应用——以伊拉克鲁迈拉油田为例[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(3): 1497-1506.
- [76] 曾洪流. 地震沉积学在中国: 回顾和展望[J]. 沉积学报, 2011, 29(3): 61-70.
- [77] 何金海, 李国蓉, 彭博. 碳酸盐岩地震地貌学研究与应用——以四川盆地东北部上二叠统长兴组为例[J]. 海相油气地质, 2014, 19(4): 45-49.
- [78] 冯增昭. 单因素分析多因素综合作图法——定量岩相古地理重建[J]. 古地理学报, 2004, 6(1): 3-19.
- [79] 曾洪流, 赵文智, 徐兆辉, 等. 地震沉积学在碳酸盐岩中的应用——以四川盆地高石梯—磨溪地区寒武系龙王庙组为例[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(5): 775-784.
- [80] 隋淑玲, 唐军, 蒋宇冰, 等. 常用地震反演方法技术特点与适用条件[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(4): 38-41.
- [81] 撒利明, 杨午阳, 姚逢昌, 等. 地震反演技术回顾与展望[J]. 石油地球物理勘探, 2015, 50(1): 184-202.
- [82] 冯增昭. 岩石不是微相[J]. 古地理学报, 2017, 19(5): 754.
- [83] 冯增昭. 岩石不是岩相[J]. 古地理学报, 2018, 20(3): 452.

Progress and prospects of studies of carbonate rock facies

LI Fengfeng, GUO Rui, YU Yichang

PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China

Abstract This paper reviews the studies of carbonate facies, and analyzes related problems and prospects. It is shown that the abroad studies mainly focus on the geographical distributions of the sedimentary rocks and the difference in the sedimentary energy in the facies belt in contrast with the domestic studies, which put the emphasis on the refinement of the facies and the lithofacies paleogeography. The studies of the reefs in the Sichuan Basin and the South China Sea made a great progress, with a better understanding of the reef formation environment, the controlling factors, the developmental mode and the characterization methods. The sedimentary models of the lacustrine carbonate rocks are diverse, and the sedimentary model of the microbial carbonate rocks is continuously improved. Significant progress is made in the spatial and temporal distributions, the developmental mechanisms, the controlling factors, the sediment characteristics and the geological significance of the cold water carbonate rocks. There are two methods to study the carbonate facies: the geological method and the geophysical method. The geological method includes the microfacies analysis, the experiment analysis, the biological facies and the geochemical methods while the geophysical method includes the mathematics- logging and seismic methods. However, the classification of the carbonate facies is not yet standardized. The method of the experimental analysis, the biological facies and the geochemical are less studied. The studies of the shoal architecture are few. The studies of the low energy environment are even fewer. It is concluded that the techniques tend to be a combination of qualitative and quantitative ones. The unconventional carbonate rocks such as the deep water and the cold water ones should be further studied. The principle of the facies controlling reservoirs is widely used, and the facies controlling modeling, the facies controlling diagenetic analysis, and the genetic classification, would effectively guide the carbonate reservoirs.

Keywords carbonate rock; facies; marine; reef; lacustrine ●



(责任编辑 王志敏)