

文章编号: 1000-0550(2009) 05-0837-12

沉积盆地成岩作用的动力机制与时空分布研究若干问题及趋向¹

李 忠 刘嘉庆

(中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

摘 要 对成岩作用的物理—化学—生物过程的系统认识已经成为国际成岩作用研究的学术热点,而对沉积盆地尤其是化石能源盆地成岩作用重要性认识的加强,使得对成岩作用时空属性及其界定的精度要求愈来愈高。为此本文明确提出了在盆地动力学演化框架内,基于盆地沉积层序(岩石—矿物—化学体系配置)、埋藏、构造、流体格架分析,开展成岩作用时空分布研究的思路。进一步讨论了成岩作用的动力机制与时空分布研究若干问题和发展趋向,提出了应重视和开展地表温度变化对埋藏成岩作用,沉积结构及其矿物—化学体系对后期成岩改造的制约机理,断裂相、变形条带及其与碎屑岩储层裂缝或强压实改造关系,构造—流体活动耦合机制与流体—岩石相互作用效应等的研究建议。

关键词 成岩作用 成岩时空分布 层序格架 构造格架 流体格架 盆地动力学

第一作者简介 李忠 男 1964 年出生 研究员 博士生导师 沉积学与盆地动力学 E-mail: lizhong@mail.iggcas.ac.cn

中图分类号 P588.2 **文献标识码** A

1979 年中国沉积学、沉积地质两个专业委员会相继成立,这在中国沉积学学科研究和发展史上具有里程碑意义。也许是一种历史的机缘,沉积学(地质)专业委员会成立之前,我国沉积成岩作用(以下简称成岩作用)研究几乎是一个空白。1970 年代后期开始,国内有关学者跟踪国际学术前沿,开始系统引入成岩作用理论并结合中国实际作了开拓性研究^[1~4];近 30 年来,国内学者对成岩作用开展了多方面的探索,有关研究专著也从 1990 年代开始出现,成为我国沉积(地质)学发展新时期中较为活跃的研究领域。然而,值得注意的是,当今成岩作用研究已经具有强烈的学科交叉特点^[5~10],已经不再是以往单一的沉积岩石学学科所能包容。因此,在沉积专业委员会成立三十周年之际,回顾学科发展历史、把握国际研究动向和关键科学问题、展望发展前景并研讨我们的对策,无疑是一件非常有意义的工作。

1 成岩作用研究发展的学科背景与问题聚焦

笔者曾经将国际成岩作用的研究历史归结为四个阶段^[11]: 1890—1940 年代的“成岩现象的观察描

述阶段”、1950—1970 年代早期的“成岩作用独立研究及奠基阶段”、1970 年代中期—1980 年代的“定量化和多学科研究发展阶段”、1990 年代末期至今的“成岩过程及动力机制研究阶段”。但应该说,迄今为止在针对国际沉积学发展历史的多数总结和评述中,成岩作用的学科地位并没有得到应有的评价。

事实上,从 1970 年代中期开始成岩作用研究就已经显示了空前的快速发展,起初在深埋次生孔隙形成机理^[12~14]、成烃—成岩相互作用^[15~17]、碳酸盐岩成岩环境和白云岩化^[18,13]等理论方面取得了有代表性的重要成果,并大大推动了油气及层控矿床的勘探进展^[19~23],并成为这一时期沉积学发展的重要标志之一。而从 1980 年代中后期特别是 1990 年代开始,国际上对沉积盆地流体的研究蓬勃兴起^[23~25,5],成岩作用(流体—岩石相互作用)也被纳入盆地动力学范畴^[6]。这一研究思路的核心旨在从更高的层次上认识成岩反应、物质输运与配置特征及其驱动机理,因此已具有明显的过程研究或动力学研究的色彩^[11]。而大约从 2000 年开始,讨论生物营力对沉积物、早期成岩作用甚至中期成岩作用的影响成为国际沉积学界的热点,McKenzie^[26]甚至认为相关研究将引发碳酸

¹ 国家重点基础研究发展规划项目(批准号:2006CB202304)和国家重大专项(批准号:2008ZX05008-003)资助。

收稿日期:2009-07-22 收修改稿日期:2009-08-25

盐岩研究领域新的革命。

显然,无论在技术方法和研究思路方面,国际成岩作用研究从 1990 年代开始已经具备独特的学科体系,其大量涉及微区矿物学、地球化学(特别是与成岩矿物研究结合的同位素地球化学)、成岩年代学、流体力学、岩石物理学以及水岩反应体系数值模拟等有别于传统沉积学的研究内容和技术手段(表 1)。因此,如果说 1970 年代以来国际沉积学(沉积地质学)历史发展中,成岩作用的学科地位还没有充分显示度的话,那么 1990 年代以来成岩作用的研究发展势头已经对传统沉积学格局形成了强大的冲击。正因为如此,Wolf 等^[5]在《成岩作用 ⑤》的开篇中适时提出了“成岩学家”(diageneticist)一词,预示一个新的研究群体或“共同体”已经形成。

应该指出,成岩作用仍然是当今沉积地质学(沉积学)中不可分割的一部分,而且是亟待加强研究的领域,以上所述只是说明当前该领域研究的学科体系特点和极佳的学科发展前景,并希望得到多数沉积学家(沉积地质学家)和学生们的关注。显然当今成岩作用研究已经具有强烈的学科交叉和辐射特点,而且其学科体系正处在深刻的变革时期,其中成岩作用动力机制与时空分布等科学问题的研究已经成为主流。因此以下将主要结合国内外研究现状,对这些具有重要科学意义的方面作简要评价,并注重分析其存在问题及在当今国内的学科发展前景。

2 成岩作用动力机制与主控因素

成岩机制与主控因素是成岩作用研究最重要的理论基础和永恒的主题。从成因属性上分析,成岩作用受控于物理、化学和生物因素的演变制约,但成岩动力机制因实际地质条件与复合因素的叠加而复杂多变。伴随成岩作用的盆地动力机制与系统过程研究的兴起,有关成岩过程中盆地流体驱动、压力转换与构造应变、生物—有机质作用等因素的研究已经或正在得到关注。

2.1 盆地流体成因与驱动机制

盆地水文体制(Hydrogeologic regime)与成岩作用的成因关系较早已经受到沉积学家高度关注^[16-24],有关研究从成岩反应物质输运体系的角度逐步建立了成岩作用的系统模型,盆地流体驱动因素因此成为从盆地动力学角度研究成岩作用的重要切入点。在“水文体制”^[16]认识基础上,以往有关成岩系统中大气水、压实水、温压水的端元分类一度为多数学者接受^[27]。

目前对大气水和压实水成岩作用已经有了比较多的资料积累和共识,这其中大量实例分析不仅来自碎屑岩体系^[28-29],更多地还来自碳酸盐岩体系^[30-35]。然而,对热液(概念接近温压水)成岩作用系统出现了愈来愈多的争议。

其一,盆地中是否存在持续的、大尺度的和有效

表 1 成岩作用研究方法与技术发展阶段

Table 1 Development of research methods and analytical instruments for sedimentary diagenesis

发展阶段	成岩作用研究发展的主要标志*	研究方法	新技术手段
1990 年代至今	<ul style="list-style-type: none"> ● 盆地动力学及其流体—岩石作用体系研究兴起; ● 水—岩相互作用及其模拟走向深入; ● 出现 diageneticist 研究群体; ● 微生物成岩作用研究兴起。 	成岩作用的系统过程(物理—化学—生物)研究;盆地沉积层序与构造演变框架内的成岩作用时空分布研究。	微区取样,古流体包体组分和温压分析,成岩矿物微区定年,质量平衡计算,多组分—全组分反应数值模拟,微生物成岩作用示踪及模拟技术。
1970 年代中期—1980 年代	<ul style="list-style-type: none"> ● 深埋次生孔隙的理论认识和实践; ● 白云岩化作用的理论认识; ● 成岩有机—无机相互作用的认识。 	定量化和多学科研究(矿物学—岩石学—地球化学范畴)。	地球化学测试和微区观测分析(扫描电镜、电子探针、阴极射线发光)、物理—化学实验模拟。
1950 年代—1970 年代早期	<ul style="list-style-type: none"> ● 对早期成岩作用的认识; ● 对层控矿床的成岩作用研究改变了沉积岩成因的传统观念; ● 碳酸盐岩成岩作用研究取得突破。 	开始形成相对独立的研究领域(矿物学—岩石学范畴)。	高倍显微镜观测,粉晶 X 衍射分析。
1890 年代—1940 年代	<ul style="list-style-type: none"> ● 沉积岩岩类组构和碎屑物源分析; ● 提出 diagenesis 一词。 	成岩现象的观察描述(岩石学范畴)。	野外观测和普通显微镜观测。

* 据李忠^[11]修订

的热液流体循环活动? 这方面争议主要针对碳酸盐岩大规模深埋溶蚀及胶结(充填)作用机理存在的依据。Davies等^[9]对北美地区多个实例的流体示踪分析,证实有深部流体活动的显著影响。我们对塔里木盆地塔北以及塔中 iv 号断裂带奥陶系碳酸盐岩中成岩矿物(方解石)高⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 高均一温度流体包体以及正 δEu 异常等的认识,或者依据其中存在萤石等成岩矿物,推测有深部流体—成岩作用效应的发育,甚至认为这种流体与二叠纪岩浆活动有关。而除了对有关指标参数的解释质疑外,主要根据质量平衡考虑,一些学者对上述成岩模式提出了批评,他们认为塔里木盆地“台盆区”奥陶系碳酸盐岩的非大气水成岩系统,特别是与二叠纪岩浆活动有关的热液流体系统难于维持如此大的深部流体(水量)供给,因此不可能导致有效的碳酸盐岩深埋溶蚀作用和相关孔洞发育。

其二,影响有效成岩作用的流体活动是相对短期的突发事件还是长期缓慢的埋藏过程? 关于这一点,作者曾经从高压箱(囊)开—合作用制约盆地尺度的流体驱动方面给予讨论^[27]。尽管有关争论还将持续下去,但观测和模拟研究^[25, 36~43]说明,在高压囊发育的盆地中,可能由于存在巨大的流体和能量积聚与释放过程,短期的和/或盆地尺度的成岩作用产出的概率较大。换句话说,它们与长期的和/或小尺度的成岩作用可以共生并相互转化。至于其相对重要性和定量评价,则视盆地类型不同而异。

2.2 压力(应力)与成岩作用机制

考虑埋藏成岩过程中的热效应和压力效应是迄今为止成岩作用理论比较成熟的认识基础。由于衡量地质历史时期热指标的有关矿物学和地球化学方法已经比较成熟,因此目前对于热效应的研究认识比较深入;而由于衡量古压力(应力)的方法并不成熟甚至缺乏,因此目前对于压力效应的认识尚比较肤浅。

对于压实效应,其控制因素主要包括原始组构(继承性因素)、温压及其施压方式(动力学因素)和胶结作用(抑制性因素)^[21, 44]。正常的均衡埋藏条件下,埋藏深度或重力负载成为衡量压实效应的关键指标。而异常压力是沉积成岩过程中不可忽视的压力状态,以往对异常高压关注颇多^[45, 46],对异常高压与流体活动^[47]、有机质热演化^[48, 49]、砂岩成岩作用^[41, 50]的制约关系,已经取得诸多进展。然而,自然界除了异常高压外,还有异常低压的普遍存在^[51~53],

对于后者及其与成岩作用的关系,特别是异常高压—异常低压耦合系统演变及其对沉积盆地成岩作用的制约机理目前尚缺乏研究。

施压方式和应变是一个以往忽视但值得关注的压实动力学因素。特别是对于砂岩,以往主要注重其沉积作用和埋藏成岩作用机理的分析,即沉积非均质性和成岩非均质性,而疏于对构造应变作用和效应的研究,这与在碳酸盐岩中关注破裂作用的研究格局显然不同。高孔隙性的砂岩在应变过程中不易通过破裂或滑移面的大规模发育来调整,或者说后者在调整过程中分布范围有限,因此其应变作用和效应尽管早期也有学者研究^[54~56],但并不为多数储层地质研究者关注。不过随着砂岩应变局域化(localization)现象的揭示,特别是有关变形条带、断裂相等概念的提出和推广^[57~59],一系列有关构造应变与砂岩储层物性及其其中流体活动关系正逐步得到认识^[60~68, 59],已经或正在改变我们以往对砂岩压实演变认识。

2.3 生物—有机质作用与成岩机制

有机质热演化产物与砂岩成岩作用体系的关系在上世纪 70—80 年代曾经得到比较深入的研究^[15, 69~71, 17],不仅定量揭示了碎屑岩体系有机质热演化不同阶段(特别是 80~200°C)的产物;而且认识了长链羧酸、短链羧酸与铝硅酸盐—碳酸盐矿物等的有机—无机反应过程,特别是有机酸对碳酸盐化学体系 pH 缓冲效应的认识,在碎屑岩、碳酸盐岩成岩作用中得到有效应用。该领域的国内学者紧密跟踪国际研究趋向,在渤海湾、南海等油气盆地也开展了许多观测分析工作^[72~75],但其中对基础科学问题的原创性工作尚比较缺乏。

对生物物理与生物化学作用机制方面的研究从 1990 年代末期开始得到加强,并成为新的学术热点。这一研究实际上反映了沉积学与微生物学、(有机)地球化学、生物矿物学以及生态学的前沿交叉,并取得了若干重要进展:①充分认识到微生物在方解石、白云石、长石等矿物溶解—沉淀过程中的作用,并在微观机制方面取得诸多突破^[76~79];②对细菌硫酸盐还原及微生物降解等在深埋成岩过程中的作用有了进一步认识^[80~82];③微生物作用的实验模拟和超显微观测能力得到快速提高,对生物物理与生物化学环境和作用过程的认识取得了长足进步^[26, 83, 84]。当然目前有关微生物作用与成岩机制的研究比较多的还仅限于同生成岩作用阶段,如表 2 对微生物碳酸盐岩

类型的研究总结就可见一般。

表 2 微生物碳酸盐岩的环境分布 (据 R iling 2000)

Table 2 The environmental distribution of microbial carbonate

环境	沉积类型	种类
悬浮		海和湖中的粉末状碳酸钙*
沉积物上	半水生的	海相
		叠层石丘、柱和礁、凝块叠层石等藻—后动物礁中的表壳
	湖泊—河流	颗粒套 (似核形石、包壳)
		叠层石
地面上的	泉化和包壳	
	热泉石灰华	
	泉化丘	
沉积物中	半水生的	洞穴表壳
	土壤	粒间基质、表壳、薄膜和球粒
	成岩的	钙结壳、结核
		沉淀和转换

* 外来沉积。其他均为自源沉积。

我国在生物成岩作用领域的研究起步并不晚,但总体比较薄弱。早在 1990 年代初期,叶连俊院士及其领导的研究团队就在国内率先开展了“生物成岩作用和地质背景”(国家自然科学基金重点项目)的研究,其针对磷、锰、铅、锌、铁、金、钼、天然碱等矿床所进行的多学科研究^[86-87],其中一部分涉及对由生物—有机质降解、热解产生的成矿地球化学环境的分析,对认识成岩机理提供了一些基础性资料。但遗憾的是,由于各种原因该研究团队的工作没有进一步延续。应该说明,近年来国内外一些研究团队加强了生物—有机质与沉积作用(特别是针对黑色页岩、碳酸盐沉积)的关系研究,而这已不是本文关注的内容。

3 成岩作用时空分布及储层预测

成岩作用形成演化的地质因素复杂,从盆地尺度和盆地动力学视角说(图 1),层序结构、沉积相(体系)是决定沉积组构(物质基础)的基本过程,是由古构造、古地理、古气候和古生物等因素控制的;而沉积期后改造则是由盆地流体—岩石相互作用、岩石(层)物理改造作用和微生物—物理化学作用决定的,其除了受到沉积组构(物质基础)的影响外,主要受控于构造体制、热体制、压力体制、流体体制和时间等因素。

3.1 盆地类型与成岩作用时空分布问题

成岩作用(流体—岩石相互作用)是盆地形成演化的一个重要方面^[6]。由于大地构造位置与古地

理、古气候等条件的差异,相应的沉积盆地的物源供给、沉积体系与无机—有机物类型迥异;而不同的盆地动力学过程即构造活动、温压场及其演化历史的显著不同,必将导致各具特征的成岩演化和结果,换言之,对成岩反应、物质输运与再配置的认识必须从盆地动力学角度考察和研究(图 1)。

成岩系统的层次分析是认识不同类型沉积盆地成岩结构的重要基础,并由此划分出盆地域、层序域、亚层序域、层内域等四个层次。就盆地域而言,由于基底构造或构造热流场、物源、气候和埋藏历史的差别,其成岩作用类型(组合)和时空分布存在明显不同^[27]。在这方面 Seiver^[88]较早就针对洋中脊和大洋板内、大陆边缘、海沟、陆—陆碰撞边缘、裂谷、克拉通等不同类型盆地,从碎屑—化学组合、早期和晚期孔隙水、埋藏历史和埋藏时间等参数论述了各自的成岩作用概念模式;Moore^[33]针对碳酸盐岩,也对比分析了被动大陆边缘、主动大陆边缘以及后构造变动等三种体制下的埋藏成岩作用,推进了相关认识,但这距离全面认识成岩作用时空分布仍然有相当距离。而国内学者以及作者在沉积物认识基础上,依据“成岩场”^[89]即热流场、压力场、流体活动场以及构造应力场的差别,对比解析中国东部和/或西部不同盆地成岩作用^[90-91,27],所建立的概念模式虽然有了认识上的进步,但仍然没有很好解决成岩作用的时空分析和预测问题。

基于成岩作用的盆地动力学框架,并在大量实例分析基础上,本文提出解析成岩作用时空分布的四方面支撑要素(图 1),即层序(岩石—矿物—化学体系配置)、埋藏、构造、流体格架分析。盆地域的成岩作用时空分布问题,即研究盆地尺度的层序、埋藏、构造、流体格架,在此基础上综合解析成岩作用现象和分布。换句话说,通过解析四方面格架,就建立和揭示了认识成岩作用所赖以依托的地质基础,已知成岩作用分布就具备了特征的时空属性,对未知成岩作用的预测也就有了比较明确的时空观。

3.2 层序格架与成岩作用分布

层序格架与成岩作用的关系研究几乎伴随着层序地层学的发展历史,其中尤其表现在碳酸盐岩(早期)成岩作用的研究方面^[92-94]。这一领域关注的核心就是古气候、海平面变化如何控制层序地层框架内的同生环境、水文体制,以及它们如何影响同生和早期成岩作用的发育演化^[95-99,30-34]。其中 Moore^[33]就②级层序比较系统地提出了气候变化(对比干旱和

潮湿)和层序地层框架内碳酸盐岩成岩作用以及储层孔隙演变模式。而由于碎屑岩成岩作用较碳酸盐岩迟缓,与海平面变化无关的深埋藏过程对碎屑岩(晚期)成岩改造的烙印往往要比碳酸盐岩明显。

另一方面,海平面变化通过地表水化学—水动力学条件以及沉积物表面的温度变化(可达 20℃)而可能对浅埋藏和上千米深埋藏的成岩作用产生影响^[32]。换句话说,层序格架对同生和早期成岩作用的控制可以达到千米级,可见古气候、古地理和海平面变化等因素对成岩作用分布的复杂控制关系,因此层序格架内不同岩系早期成岩作用分布关系的共性

和个性差异研究值得关注。

值得指出,原始沉积岩系及其矿物—化学体系对后期成岩改造的制约是肯定的,即先存成岩作用(结构)不可避免地会制约后期成岩改造,但目前存在不同认识,其中尤其以早期白云岩化和后期白云岩化的叠加改造、含煤岩系的后期成岩改造、含盐层系的砂岩胶结作用等问题最为典型。如 Davies等^[9]的统计就认为热液白云岩大多与母岩为灰岩的岩石有关,而不会出现在经历过早期的白云岩化的母岩中;但相当一部分学者认为后期白云岩化发育部位与早期蒸发环境沉积及白云岩化密切关联^[100-102,33]。又如图 2

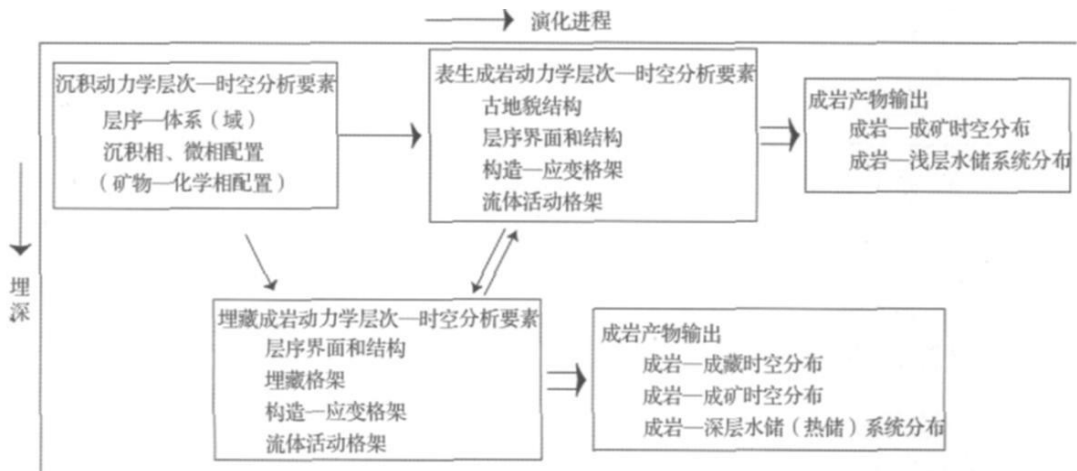


图 1 盆地动力学演化框架内的成岩作用时空分布研究层次及要素

Fig. 1 The research classification and elements of diagenetic spatio-temporal distribution, within the framework of basin dynamics evolution

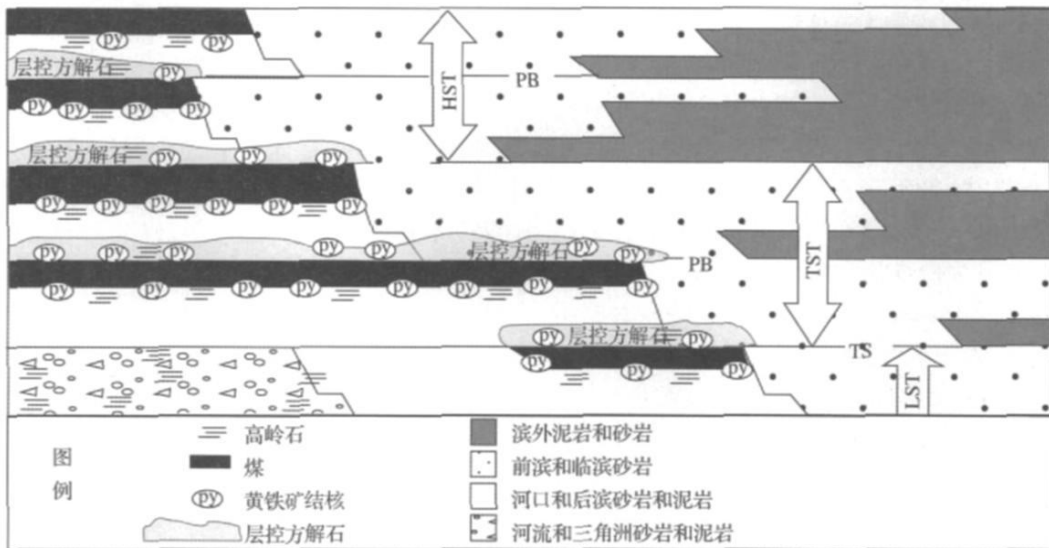


图 2 近海含煤岩系先存结构与后期成岩改造的制约关系(据 Ketzer 等^[100], 2003 修编)

Fig. 2 The constrain between pre-existing structure of offshore coal-bearing rock series and late diagenetic transformation (modified by Ketzer, et al. ^[100], 2003)

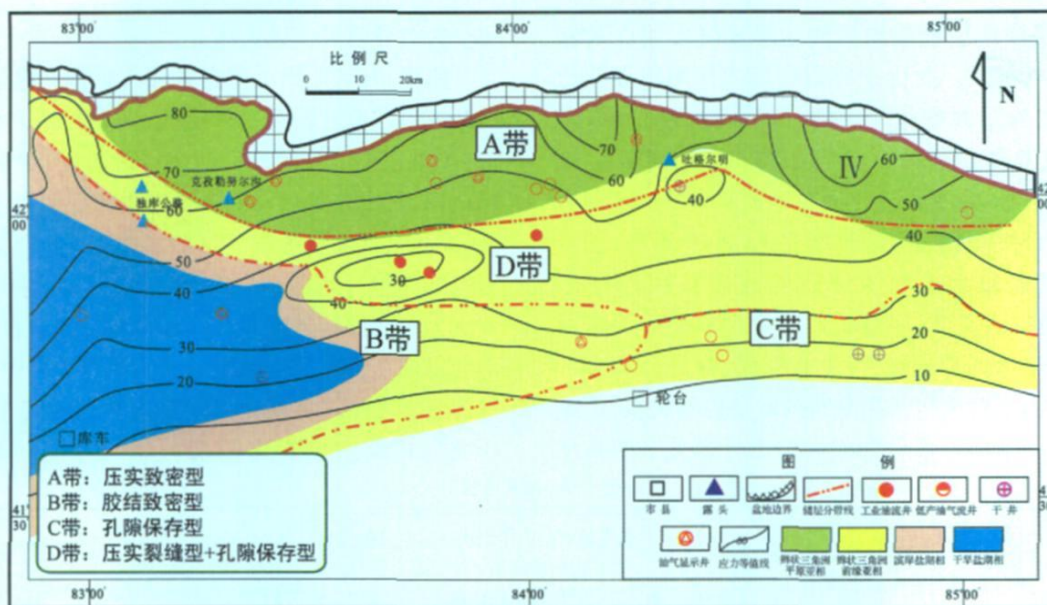


图 3 库车坳陷东部苏维依组储层成因类型与最大构造应力及沉积相带分布

Fig 3 The distribution of reservoir genetic types, the maximum fracture stress and sedimentary facies at Suweiyi formation, the eastern Kuqa Depression

所示, 自生高岭石、黄铁矿结核以及层状方解石胶结(注意其主要分布在煤层上部)的形成分布与先存煤层关系密切; 但一些观测认为含煤岩系砂岩因酸性成岩环境发育而缺乏方解石胶结^[90]。图 3 则从一个侧面反映了盐层对砂岩晚期胶结作用分带的影响。

3.3 构造活动格架与成岩作用分布

构造活动除了应变, 形成断裂、裂缝或强压实外, 还通过输导体系影响表生流体活动, 也可以作为深部流体运移的通道。

构造应变与碳酸盐岩储层裂缝改造的关系研究早已经为学界关注, 当然其分布预测仍然存在大量问题。应该指出, 与刚性、致密岩石的应变不同, 孔隙性砂岩应变最初并不以张性破裂或滑移面的发育来调整, 而是首先发生应变局域化 (localization), 并形成所谓变形条带 (deformation band)^[57], 并对砂岩储层物性及其中流体活动产生重要影响。目前有关断裂相、变形条带及其与碎屑岩储层裂缝或强压实改造的时空分布研究和讨论已经成为国际热点^[104~106, 59], 虽然有待深入, 但非常值得我们重视。

中国尤其中国西北部叠合盆地众多, 其形成演化以多期构造作用制约为特征。对我国中西部山前盆地的研究发现^[107, 108], 非渐进埋藏(或后期突变埋藏)、侧向构造挤压对埋藏压实的影响普遍存在。以天山南缘库车坳陷为例, 其后期构造变形强烈, 构造

样式受基底构造、滑脱层、调节断裂、盆山边界接触方式的控制, 砂岩储层改造的构造分带与构造非均质性非常明显(图 3)。但目前有关构造应变与砂岩储层关系的研究主要还仅限于现象观测和机理推测层次, 而针对构造应变与碎屑岩储层改造动力学机理与分布的研究尚待开展。

值得关注的是构造控制下的相关流体特别是热液流体活动与深埋藏成岩作用的分布关系。对此, 本文将在下面结合流体活动格架作相关讨论。

3.4 流体活动格架与成岩作用分布

从关注盆地水文体制与成岩作用的成因关系^[16, 24], 到盆地尺度成岩作用综合岩石学—地球化学—水文学模型的探索^[109], 以及盆地动力学的考虑^[6, 9, 59], 都说明流体活动分析是揭示盆地尺度或宏观尺度成岩作用分布的重要切入点。

与构造稳定地区的盆地不同, 活动构造背景或经历过多期构造演变的盆地的流体活动型式, 由于构造几何样式、断裂封闭性以及岩石组合的多变性而复杂化, 这也直接增加了认识相关流体—岩石相互作用分布的难度。构造破裂作用与有关流体—岩石相互作用的效应导致了岩石内在和外在各向异性的转化, 并影响岩石组构和物性预测的基础(图 4)。显然, 由于与此有关的流体—岩石相互作用对油气、固体矿产形成分布的重要性, 有关典型实例解剖与数值模拟结合

的基础性研究正成为国际成岩作用多学科研究的一个重要方向^[9, 110~114]。

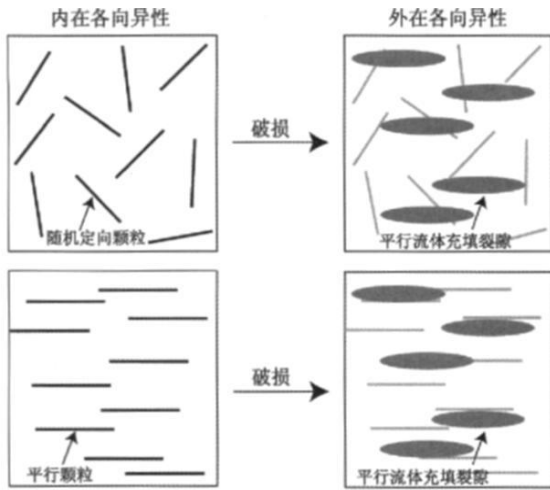


图 4 岩石内在和外在各向异性的组成和由于破裂而发生的转化 (据 Healy^[111]修改)

Fig 4 Schematic diagrams showing intrinsic and extrinsic components of an isotropy and their transformation (modified from Healy^[111])

深部构造—热流体活动对碳酸盐岩储层的溶蚀改造作用是近期关注的热点。一般认为深部热液流体是指比地层温度高 5~10℃的外部流体^[115]，近年来成为国际地学界研究的热点。一般认为深部热液流体导致了方解石的白云石化和萤石化作用，并可以改善储层物性。热液流体可以来自火山活动，也可以来自下部地层(如热化学硫酸盐还原作用)等。其作用主要表现在两个方面：^①含有大量 CO₂和 S₂等成分的深部酸性流体直接作用于碳酸盐岩并发生化学反应；^④深部热流体上涌带来大量的热能，其与盆地流体混合后，除物质成分可发生改变外，还可通过能量交换进行加温作用，从而使流体的化学侵蚀性大大增强，促进溶蚀作用的发生。

深部热液流体作用是深部碳酸盐岩优质储层分布的重要原因。研究已显示，加拿大盆地西部^[116]和西班牙西南 Cantabrian 带^[117]的优质储层是由深部热液流体改造的结果。2006 年 AAPG 以“构造控制的碳酸盐储层热液改造”为主题出版专辑，主要涉及了以碳酸盐作为主岩的硫化物矿床、热液白云岩的成因和石灰岩的溶解作用等三个方面的内容^[118]。许多研究实例对烃类储集岩的类型、几何形态、储层质量及其分布作了比较深入的研究，其中 Davies 等^[9]在大量实例分析基础上，指出热液流体倾向于活跃的构

造背景下向上流动，这些构造背景主要包括伸展大陆边缘地壳的变薄处、伸展的弧后盆地、大陆边缘聚敛活动早期的折曲处。热液改造作用似乎不会在强烈收缩的盆地和前陆盆地中发生。热液通常倾向于在以下伸展断层、张扭断层以及走滑断层中活动。他们所提出的具有预测意义的“SAG”模式目前已经受到广泛关注和讨论。而有关研究还针对传统模式提出了挑战，如对以往的混合白云岩化认识提出了新的热液作用解释^[119]。

我国古生界碳酸盐岩盆地广布，后期构造控制的热液作用改造迹象显著。以塔里木盆地下古生界碳酸盐岩为例，已有研究已经认识到，其碳酸盐岩储层类型多样，包括白云岩化储层、埋藏岩溶(内幕)储层、风化壳岩溶储层、萤石化储层、礁滩储层等，但都普遍存在断裂和裂缝改造，有效储层的形成是叠加了沉积后多期构造、流体活动改造的结果。但目前因这类盆地碳酸盐岩后期改造过程的复杂性及其流体成因认识的分歧^[120~123, 35]，其确切的储层物性改造的空间分布尚有待进一步研究。

4 前景展望与认识

沉积学(地质)专业委员会成立以来的三十年间，我国在沉积期后成岩作用方面开展了内容广泛的研究，特别是在油气盆地储层成岩作用、粘土矿物和有机质成岩演变、第四纪碳酸盐岩成岩作用以及层控矿床成岩—成矿等研究领域取得了有特色的成果。然而，随着成岩动力学研究的兴起，对成岩作用的物理—化学—生物过程的系统认识已经成为国际学术热点，并且已经有了长足进展；另一方面，对沉积盆地尤其是化石能源盆地成岩作用重要性认识的加强，使得对成岩作用时空属性及其界定的精度要求愈来愈高。

为此本文明确提出，在盆地动力学演化框架内，基于盆地沉积层序(岩石—矿物—化学体系配置)、埋藏、构造、流体格架分析，开展成岩作用时空分布研究的思路。

在层序格架方面，除了关注古气候、海平面变化控制的同生环境、水文体制对同生和早期成岩作用的影响外，对地表温度变化而可能对浅埋藏和上千米深埋藏的成岩作用产生的影响，以及原始沉积岩系(沉积结构)及其矿物—化学体系对后期成岩改造的制约机理和分布特征仍然不清，有待深入。

在埋藏格架方面，精细的埋藏历史和古温压演化

轨迹恢复尚有待方法上的突破。

在构造格架方面,有关断裂相、变形条带及其与碎屑岩储层裂缝或强压实改造的时空分布,国际上已经提出了很好的分析方法和成果,对深化研究和认识我国西部典型叠合盆地的碎屑岩储层成岩改造和分布具有借鉴意义,值得重视。

在流体格架方面,深部热流体活动对碳酸盐岩储层的溶蚀改造作用是近期关注的热点。我国古生界碳酸盐岩盆地储层类型多样,沉积后多期构造、流体活动改造显著,因此亟待开展原创性、系统性的构造—流体活动耦合机制与流体—岩石相互作用效应研究。

此外,在技术层面上应加强古流体包体组分和温压分析,成岩矿物微区定年,质量平衡计算,多组分—全组分反应数值模拟,微生物成岩作用示踪及模拟技术的探索和应用。

总之,我国沉积盆地类型多样,成岩作用既丰富多彩,又各具特色。面对国际研究的新热点和快速发展的态势,依据我国沉积盆地实际情况,我们有必要制定长远的、既有理论创新又有服务于国家目标的成岩作用及其动力学研究和教育计划。

参考文献 (References)

- 1 沙庆安. 海南岛南部一地全新世生物屑灰岩的成岩作用[J]. 海洋学报, 1977, (2): 172-178
- 2 刘宝珺. 沉积岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1980: 59-79
- 3 王英华, 杨承运, 张秀莲. 鲕粒的结构变化与成岩作用性质和强度的关系[J]. 沉积学报, 1983 1(2): 73-83
- 4 朱国华, 裘亦楠. 成岩作用对砂岩储层孔隙结构的影响[J]. 沉积学报, 1984 2(1): 1-11
- 5 Wolf K H, Chilingar G V, eds Diagenesis ⑤[M]. Amsterdam: Elsevier 1994 519
- 6 National Research Council The Dynamics of Sedimentary Basins[M]. USGC, Washington D C National Academy of Sciences 1997: 43
- 7 Burley S D, Worden R H. Sandstone diagenesis recent and ancient [J]. Blackwell Pub 2003: 649
- 8 Milliken K L. Diagenesis[C]// Middleton GV, ed Encyclopedia of Sediments and Sedimentary Rocks London: Kluwer Academic Publishers 2003 214-219
- 9 Davies G R, Smith Jr L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoirs: An overview [J]. AAPG Bulletin 2006 90 (11): 1641-1690
- 10 Pieter B, Rudy W, David L, et al. Paleoclimate controlled diagenesis of the Wesphalian C & D fluvial sandstones in the Campine Basin (north-east Belgium) [J]. Sedimentology, 55(5): 1375-1417
- 11 李忠, 陈景山, 关平. 含油气盆地成岩作用的科学问题及研究前沿 [J]. 岩石学报, 2006a 22(8): 1113-1122

- 12 Schmidt V, McDonald D A, Platt R L. Pore geometry and reservoir aspects of secondary porosity in sandstones [J]. Bulletin of Canada Petroleum Geology, 1977, 25: 271-290
- 13 Zenger D H, Dunham J B, Ethington R L. Concepts and models of dolomitization [J]. SEPM Special Publication 1980 28: 426
- 14 Curtis C D. Link between aluminum mobility and destruction of secondary porosity. AAPG Bulletin 1983 67: 380-393
- 15 Curtis C D. Possible link between sandstone diagenesis and depth-related geochemical reactions occurring in enclosing mudstones [J]. Journal of Geol Soc Lond, 1978 135: 107-114
- 16 Galloway W E. Hydrogeologic regimes of sandstone diagenesis [C]// McDonald D A, Sunlan R C, eds Clastic Diagenesis AAPG Memoir, 1984, 37 3-13
- 17 Wood D C, Hewett T A. Forced fluid and diagenesis in porous reservoirs: controls on spatial distribution [C]// Gautier D L, ed. Roles of organic matter in sediment diagenesis SEPM Special Publication 1986, 38 73-83
- 18 Bathurst R G C. Carbonate sediments and their diagenesis [J]. Developments in sedimentology 12, Amsterdam: Elsevier 1971 620
- 19 Ali S A, Friedman G M. Diagenesis of sandstones [J]. Tulsa AAPG, 1977 239
- 20 Scholle P A, Schlager P R. Aspects of diagenesis [J]. SEPM Special Publication 26, 1979: 443
- 21 Pittman E D. Recent advances in sandstone diagenesis [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences 1979 7 39-62
- 22 Chilingar G V, Wolf K H, eds Diagenesis II [M]. Amsterdam: Elsevier 1976 268
- 23 Wolf K H, Chilingar G V, eds Diagenesis III [M]. Amsterdam: Elsevier 1992 790
- 24 Bjorlykke K, Mørch P A, Palm E. Modelling of thermal convection in sedimentary basins and its relevance to diagenetic reactions [J]. Marine and Petroleum Geology, 1988, 5 338-351
- 25 Powley D E. Pressure, hydrology, and large scale seals in petroleum basins [C]// Otolava P, Hallet B, McBimey A, et al. eds Proceedings of the Workshop on Self-Organization in Geology Systems Earth Science Reviews 1990 29 183
- 26 McKenzie J. Presidential Address: Windows into the Carbonate World [R]. The Organising Committee of ISC 2006 Volume B, 2006: 1-386
- 27 李忠, 韩登林, 寿建峰. 沉积盆地成岩作用系统及其时空属性 [J]. 岩石学报, 2006b 22(8): 2151-2164
- 28 Bjorkum P A, Knud R, Bergan M. How important is the late Cimmerian unconformity in controlling the formation of kaolinite in sandstones of the North Sea? [C]// Horbury A D, Robinson G, eds Diagenesis and basin development AAPG Studies in Geology, 1993 36 261-269
- 29 Bertier P, Swennen R, Lagrou D, et al. Paleoclimate controlled diagenesis of the Wesphalian C & D fluvial sandstones in the Campine Basin (north-east Belgium) [J]. Sedimentology, 2008 55 1375-1417
- 30 Read J E, Horbury A D. Eustatic and tectonic controls on porosity e-

- volution beneath sequence-bounding unconformities and parasequence discontinuities on carbonate platforms [C] // Horbury A D, Robinson G, eds Diagenesis and Basin Development AAPG Studies in Geology, 1993, 36: 155-198
- 31 South D L, Talbot M R. The sequence stratigraphic framework of carbonate diagenesis within transgressive fan-delta deposits Sant Llorenç del Munt fan-delta complex, SE Ebro Basin, NE Spain [J]. Sedimentary Geology, 2000, 138: 179-198
- 32 Worden R H, Ruffell A H, Comford C. Paleoclimatic sequence stratigraphy and diagenesis [J]. Journal of Geotechnical Exploration, 2000, 69-70: 453-457
- 33 Moore C H. Carbonate reservoirs porosity evolution and diagenesis in a sequence stratigraphic framework [J]. Amsterdam: Elsevier, 2001: 245-290
- 34 Bower J, Tucker M E. Distribution and geometry of facies and early diagenesis: the key to accommodation space variation and sequence stratigraphy: Upper Cretaceous Congost carbonate platform, Spanish Pyrenees [J]. Sedimentary Geology, 2002, 146: 225-247
- 35 陈景山, 李忠, 王振宇, 等. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩古岩溶作用与储层分布 [J]. 沉积学报, 2007, 25(6): 858-868
- 36 Baker E T, Lavelle J W, Feely R A, *et al.* Episodic venting of hydrothermal fluids from the Juan de Fuca Ridge [J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 90A: 9237-9250
- 37 Deming D. Catastrophic release of heat and fluid flow in the continental crust [J]. Geology, 1992, 20: 83-86
- 38 Archer S G, Wyderley H L, Watt G R, *et al.* Evidence for focused hot fluid flow within the Britannia Field offshore Scotland, UK [J]. Basin Research, 2004, 16: 377-395
- 39 Chen W, Ghaith A, Ortoleva P. Diagenesis through coupled processes modeling approach, self-organization and implication for exploration [C] // Meshri I, Ortoleva P, eds Prediction of Reservoir Quality Through Chemical Modeling AAPG Memoir 49 Tulsa AAPG, 1990: 103-130
- 40 Pedersen P, Bjørlykke K. Fluid flow in sedimentary basins: model of pore water flow in a vertical fracture [J]. Basin Research, 1994, 6: 1-16
- 41 Ortoleva P. Development of diagenetic differentiated structure through reaction-transport feedback [C] // Wolf K H, Chilingarian G V, eds Diagenesis ⑤ (Developments in Sedimentology 51). Amsterdam: Elsevier, 1994: 79-94
- 42 Madhel G, Cavell P A, Patey K S. Isotopic evidence for carbonate cementation and recrystallization, and for tectonic expulsion of fluids into the Western Canada sedimentary basin [J]. GSA Bulletin, 1996, 108(9): 1108-1119
- 43 李忠. 沉积盆地大尺度成岩作用研究 [M]. 地学前缘, 1998, 5(3): 157-158
- 44 Pittman E D, R E Larese. Compaction of lithic sands: experimental results and applications [J]. AAPG Bulletin, 1991, 75: 1279-1299
- 45 Bradeley J S. Abnormal formation pressure [J]. AAPG Bulletin, 1975, 59: 957-973
- 46 Hunt J M. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74: 1-12
- 47 Sheila J Roberts, Jeffrey A Nunn. Episodic fluid expulsion from geopressured sediments [J]. Marine and Petroleum Geology, 1995, 12: 195-204
- 48 Hao Fang, Sun Yongchuan, Li Sitian, *et al.* Overpressure retardation of organic matter maturation and hydrocarbon generation: A case study from the Yinggehai and Qiongdongnan basins offshore South China Sea [J]. AAPG Bulletin, 1995, 79(4): 551-562
- 49 郝芳, 姜建群, 邹华耀, 等. 超压对有机质热演化的差异抑制作用及层次 [J]. 中国科学: D辑, 2004, 34(5): 443-451
- 50 李忠, 费卫红, 寿建峰, 等. 华北东濮凹陷异常高压与流体活动及其对储集砂岩成岩作用的制约 [J]. 地质学报, 2003, 77(1): 126-134
- 51 Russell W. Pressure-depth relations in Appalachian region [J]. AAPG Bulletin, 1972, 56: 528-536
- 52 Dickey P A, Cox W C. Oil and gas reservoirs with subnormal pressures [J]. AAPG Bulletin, 1977, 61: 2134-2142
- 53 Swarbrick R E, Osborne M J. Mechanisms that generate abnormal pressures: An overview [C] // Law B E, Umlishek G F, Slavin V I, eds Abnormal pressures in hydrocarbon environments AAPG Memoir, 1998, 70: 13-34
- 54 Pittman E D. Effect of fault-related granulation on porosity and permeability of quartz sandstones: Simpson Group (Ordovician) Oklahoma [J]. AAPG Bulletin, 1981, 65: 2381-2387
- 55 Jamison W R, Stearns D W. Tectonic deformation of Wingate sandstone: Colorado National Monument [J]. AAPG Bulletin, 1982, 66: 2584-2608
- 56 Gabrielsen R H, Koestler A G. Description and structural implications of fractures in Late Jurassic sandstones of the Trollfield northern North sea [J]. NGT, 1987, 67: 371-382
- 57 Aydın A. Small faults formed as deformation bands in sandstone [J]. Pure and Applied Geophysics, 1978, 116: 913-930
- 58 Tveranger J A, Braathen T, Skar, *et al.* Center for integrated petroleum research: Research activities with emphasis on fluid flow in fault zones [J]. Norwegian Journal of Geology, 2005, 85: 63-72
- 59 Fossen H, Bak A. Deformation bands and their influence on fluid flow [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91: 1685-1700
- 60 Antonellini M, Aydın A. Effect of faulting on fluid flow in porous sandstones: petrophysical properties [J]. AAPG Bulletin, 1994, 78: 355-377
- 61 Antonellini M, Aydın A, Antonellini, *et al.* Effect of faulting on fluid flow in porous sandstones: geometry and spatial distribution [J]. AAPG Bulletin, 1995, 79: 642-671
- 62 Beach A, Brown J L, Welton A J, *et al.* Characteristics of fault zones in sandstones from NW England: application to fault transmissibility [J]. Petroleum Geology of the Irish sea and Adjacent Areas, 1997, 124: 315-324
- 63 Antonellini M, Aydın A, Orr L. Outcrop-aided characterization of a faulted hydrocarbon reservoir: Atoyac Grande Oil Field, California USA [J]. Faults and Subsurface Fluid Flow in the Shallow Crust, 1999, 113: 7-26

- 64 Heynekamp M R, Goodwin L B, Mozley P S *et al.* Controls on fault-zone architecture in poorly lithified sediments Rio Grande Rift New Mexico: Implications for fault-zone permeability and fluid flow [J]. *Faults and Subsurface Fluid Flow in the Shallow Crust* 1999, 113: 27-49
- 65 Taylor W L, Pollard D D. Estimation of in situ permeability of deformation bands in porous sandstone, Valley of fire Nevada [J]. *Water Resources Research* 2000, 36: 2595-2606
- 66 Lothe A E, Hagen N B, Gabrielsen R H, *et al.* An experimental study of the texture of deformation bands: effects on porosity and permeability of sandstones [J]. *Petroleum Geoscience* 2002, 8: 195-207
- 67 Shipton Z K, Evans J P, Robeson K R, *et al.* Structural heterogeneity and permeability in faulted aeolian sandstone: Implication for subsurface modeling of faults [J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86: 863-883
- 68 Sample J C, Woods S, Bender E, *et al.* Relationship between deformation bands and petroleum migration in an exhumed reservoir rock, Los Angeles Basin, California USA [J]. *Geofluids* 2006, 6 (2): 105-112
- 69 Schmidt V, McDonald D A. The role of secondary porosity in the course of sandstone diagenesis [C] // Scholle P A, Schluger P R. *Aspects of Diagenesis* SEPM Special Publication 1979, 26: 175-207
- 70 Surdun R C, Boese S W, Crossey L J. The chemistry of secondary porosity [C] // McDonald D A, Surdun R C, eds. *Clastic Diagenesis* AAPG Memoir, 1984, 37: 127-151
- 71 Surdun R C, Crossey L J, Hagen E S, *et al.* Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis [J]. *AAPG Bulletin* 1989, 73: 1-23
- 72 关平. 辽河盆地第三系成岩作用与有机质成熟作用的关系 [J]. *石油与天然气地质*, 1989, 10(1): 23-29
- 73 李忠, 李惠生. 东濮凹陷深部次生孔隙成因与储层演化研究 [J]. *地质科学*, 1994, 29(3): 267-275
- 74 朱家祥, 李淑贞, 朱家蔚, 等. 超深井成烃成岩体系研究 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1995: 120-176
- 75 孙永传, 陈红汉, 李惠生, 等. 莺琼盆地崖 13-1 气田热流体活动与有机-无机成岩响应 [J]. *地球科学*, 1995, 20(3): 276-282
- 76 Rivadeneyra M A, Delgado G, Ramos-Cornenzana A, *et al.* Bimineralization of carbonates by almonas eurihalina in solid and liquid media with different salinities: crystal formation sequence [J]. *Res Microbiol* 1998, 149: 277-287
- 77 Ehrenberg S N, Jakobsen K G. Plagioclase dissolution related to biodegradation of oil in Brent Group sandstones (Middle Jurassic) of Gullfaks Field, northern North Sea [J]. *Sedimentology* 2001, 48: 703-721
- 78 Van Lith Y, Warthmann R, Vasconcelos C, *et al.* Microbial fossilization in carbonate sediments: a result of the bacterial surface involvement in dolomite precipitation. *Sedimentology* 2003, 50: 237-245
- 79 Davis K J, Neilson K H, Lutge A. Calcite and dolomite dissolution rates in the context of microbial mineral surface interactions [J]. *Geobiology* 2007, 5(2): 191-205
- 80 Behar F H, Albrecht P. Correlations between carboxylic acids and hydrocarbons in several crude oils: Alteration by biodegradation [J]. *Organic Geochemistry* 1984, 6: 597-604
- 81 Machel H G. Some aspects of diagenetic sulphate-hydrocarbon redox reaction [C] // Marshall J D, ed. *Diagenesis of Sedimentary Sequences* Geological Society Spec Pub, 1987, 36: 15-27
- 82 Spark J, Patey I, Duncan B, *et al.* The effects of indigenous and introduced microbes on deeply buried hydrocarbon reservoirs North Sea [J]. *Clay Minerals* 2000, 35: 5-12
- 83 Vasconcelos C, McKenzie J A, Bemasoni S, *et al.* Microbial mediation as a possible mechanism for natural dolomite formation at low temperatures [J]. *Nature* 1995, 377: 220-222
- 84 McKenzie J A, Vasconcelos C. The Dolomite Mountains and the origin of the dolomite rock of which they mainly consist: historical developments and new perspectives [J]. *Sedimentology* 2009, 56: 205-219
- 85 Riding R. Microbial carbonates: the geological record of calcified bacteria-algal mats and biofilms [J]. *Sedimentology* 2000, 47 (Suppl 1): 179-214
- 86 叶连俊等著. 生物成矿作用研究 [M]. 北京: 海洋出版社, 1993: 65-217
- 87 叶连俊主编. 生物有机质成矿作用 [M]. 北京: 海洋出版社, 1996: 1-230
- 88 Seiver R. Plate tectonic controls on diagenesis [J]. *Journal of Geology* 1979, 87(2): 127-155
- 89 李忠, 孙永传. 含油气盆地类型与成岩作用研究 [C] // 中国博士后论文集 (下). 北京: 国防工业出版社, 1993: 1971-1976
- 90 孙永传, 李忠, 李惠生, 等. 中国东部含油气断陷盆地的成岩作用 [M]. 北京: 科学出版社, 1996: 1-25
- 91 寿建峰, 朱国华, 张惠良. 构造侧向挤压与砂岩成岩压实作用 [J]. *沉积学报*, 2003, 21(1): 90-95
- 92 Sarg J E. Carbonate sequence stratigraphy [C] // Wilgus C K, Hastings Kendall C G S C, Posamentier H W, *et al.* eds. *Sea Level Changes: An Integrated Approach*. Tulsa, OK, SEPM Special Publication, 1988, 42: 155-182
- 93 Hind K, Tucker M E. Contrasting diagenesis of two Carboniferous oolites from South Wales: a tale of climatic influence. *Sedimentology* 1988, 35: 587-602
- 94 王英华, 黄志诚, 王国忠, 等. 中、下扬子区海相碳酸盐岩成岩作用研究 [M]. 北京: 科学技术文献出版, 1991
- 95 Stemmerik L, Larsen G B. Diagenesis and porosity evolution of Lower Permian paleoaplysinitic buildups on Bjornoyan: an example of high frequency sea level fluctuations controlling diagenesis in a transgressive sequence [C] // Horbury A D, Robinson G, eds. *Diagenesis and Basin Development* AAPG Studies in Geology, 1993, 36: 199-212
- 96 Dravis J J. Rapidity of freshwater calcite cementation: implications for carbonate diagenesis and sequence stratigraphy [J]. *Sedimentary Geology* 1996, 107: 1-10
- 97 Friedman Gerald M. Rapidity of marine carbonate cementation: implications for carbonate diagenesis and sequence stratigraphy: perspective [J]. *Sedimentary Geology* 1998, 119: 1-4
- 98 Morad S, Keizer J M, De Ros L F. Spatial and temporal distribution

- of diagenetic alterations in siliciclastic rocks: implications for mass transfer in sedimentary basins [J]. *Sedimentology*, 2000, 47 (suppl): 95-120
- 99 Moore C H, Heydari E. Burial diagenesis and hydrocarbon migration in platform limestones: a conceptual model based on the upper Jurassic of the Gulf Coast of the USA [C]// Horbury A D, Robinson G, eds. *Diagenesis and basin development*. AAPG Studies in Geology, 1993, 36: 213-230
- 100 Amthor J E, Mountjoy E W, Madhel H H. Regional scale porosity and permeability variations in Upper Devonian Leduc buildups: implications for reservoir development and prediction in carbonates [J]. *AAPG Bulletin*, 1994, 78: 1541-1559
- 101 Drivet E, Mountjoy E W. Dolomitization of the Leduc Formation (Upper Devonian), southern River-Meadow Brook reef trend Alberta [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1997, 67: 411-423
- 102 Mountjoy Marquez. Predicting reservoir properties in dolomites: Upper Devonian Leduc buildups, deep Alberta Basin [C]// Kupecz J A, Gulyas J A, Bloch S, eds. *Reservoir quality and prediction in sandstones and carbonates*. AAPG Bulletin, 1997, 69(17): 267-306
- 103 Marcelo Ketzer J, Michale Holz, Morad S, et al. Sequence stratigraphic distribution of diagenetic alterations in coal-bearing paralic sandstones: Evidence from the Rio Bonito Formation (early Permian), southern Brazil [J]. *Sedimentology*, 2003, 50: 855-877
- 104 Fossen H, Erlend T, Johansen S, et al. Fault interaction in porous sandstone and implications for reservoir management: examples from southern Utah [J]. *AAPG Bulletin*, 2005, 89(12): 1593-1606
- 105 Torabi A, Fossen H. Spatial variation of microstructure and petrophysical properties along deformation bands in reservoir sandstones [J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(7): 919-938
- 106 Braathen A, Tveranger J, Fossen H, et al. Fault facies and its application to sandstone reservoirs [J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(7): 891-917
- 107 寿建峰, 张惠良, 沈扬, 等. 中国油气盆地砂岩储层的成岩压实机制分析 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(8): 2165-2170
- 108 寿建峰, 张惠良, 沈扬. 库车前陆地区吐格爾明背斜下侏罗统砂岩成岩作用及孔隙发育的控制因素分析 [J]. *沉积学报*, 2007, 25(6): 869-875
- 109 Montañez IP, Gregg JM, Shelton K L, eds. *Basin-wide diagenetic patterns: integrated petrologic, geochemical and hydrologic considerations* [J]. *SEPM Special Publication*, 1997, 57: 302
- 110 Nicolò D P, Cristiano C, Fabio Tr, et al. A mechanical model for complex fault patterns induced by evaporite dehydration and cyclic changes in fluid pressure [J]. *Journal of Structural Geology*, 2007, 29: 1573-1584
- 111 David H. Anisotropy, pore fluid pressure and low angle normal faults. *Journal of Structural Geology*, 2009, 31: 561-574
- 112 Zhang Y, Gartrell A, Underschlutz J R, et al. Numerical modelling of strain localisation and fluid flow during extensional fault reactivation: Implications for hydrocarbon preservation [J]. *Journal of Structural Geology*, 2009, 31: 315-327
- 113 Molli G, Cortecchi G, Vaselli L, et al. Fault zone structure and fluid-rock interaction of a high angle normal fault in Carrara marble (NW Tuscany, Italy) [J]. *Journal of Structural Geology*, 2009 (in press)
- 114 Stefan H, Walker K, Robert R. Analysis of the internal structure of a carbonate damage zone: Implications for the mechanisms of fault breccia formation and fluid flow [J]. *Journal of Structural Geology*, 2009 (in press)
- 115 Machel H G, Lonnee J. Hydrothermal dolomite - a product of poor definition and imagination [J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 152: 163-171
- 116 Aagaard J, Lonnee J, Clarke J. Multiple fluid flow events and the formation of saddle dolomite: examples from middle Devonian carbonates of the western Canadian Basin [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2000: 11-15
- 117 Gasparrini M, Bechthold T, Boni M. Massive hydrothermal dolomites in the southwestern Cantabrian Zone (Spain) and their relation to the Late Variscan evolution [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23: 543-568
- 118 Smith Jr L R, Davies G R. Structurally controlled hydrothermal alteration of carbonate reservoirs: Introduction [J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(11): 1635-1640
- 119 John A, Luczaj. Evidence against the Donag (mixing-zone) model for dolomitization along the Wisconsin arch: A case for hydrothermal diagenesis [J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(11): 1719-1738
- 120 Cai C F, Franks S G, Aagaard P. Origin and migration of brines from Paleozoic strata in Central Tarim, China: constraints from $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, δD , $\delta^{18}\text{O}$ and water chemistry [J]. *Applied Geochemistry*, 2001, 16: 1269-1283
- 121 康石柱. 塔里木盆地寒武-奥陶系古岩溶特征与油气分布 [J]. *新疆石油地质*, 2005, 26(5): 472-480
- 122 金之钧, 朱东亚, 胡文瑄, 等. 塔里木盆地热液活动地质地球化学特征及其对储层影响 [J]. *地质学报*, 2006, 80(2): 245-253
- 123 张兴阳, 顾家裕, 罗平. 塔里木盆地奥陶系萤石成因及其油气地质意义 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(8): 2220-2228

Key Problems and Research Trend of Diagenetic Geodynamic Mechanism and Spatio-Temporal Distribution in Sedimentary Basins

LI Zhong LIU Jia-qing

(Institute of Geology and Geophysics Chinese Academy of Sciences Beijing 100029)

Abstract A systematic study on the physical-chemical-biological processes of diagenesis has become an international academic hot spot. However, with the strengthening awareness about the importance of diagenesis in sedimentary basin, especially in fossil energy basin, it request more and more precise definition of the spatio-temporal attributes. In view of basin geodynamics evolution, this paper propose an ideas for spatio-temporal distribution research of diagenesis based on sedimentary sequence (rock-mineral-chemical system configuration), burial evolution, structural strain pattern and fluid flow frameworks. We also discuss some key problems and research trend of diagenetic geodynamic mechanism and spatio-temporal distribution, such as the effect of surface temperature change on burial diagenesis, later diagenetic modification controlled by sedimentary lithofacies and their mineral-chemical system, fault facies, deformation bands and their influences on cracks or strong compaction of clastic reservoir, coupling mechanism between structure strain and fluid flow and the fluid-rock interaction effects, etc.

Key words diagenesis, spatio-temporal distribution of diagenesis, sequence stratigraphic framework, structural strain framework, fluid flow framework, basin geodynamics