

沉积盆地深层—超深层成岩动力学：若干研究进展与 专属问题

李忠^{1,2}

1.中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

2.中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

摘要 【意义】沉积成岩或流体—岩石作用是盆地动力学的重要内容, 但相关深层—超深层研究仍真假混淆、疑点重重, 核心科学技术问题有待凝炼。【进展】主要就含油气盆地具有深层—超深层特色的、与成岩动力学密切相关的若干研究领域进行了梳理, 包括盆地类型及物性演变、流体活动属性和效应、成岩动力体制以及高分辨成岩记录表征和判识技术等的研究现状和认识进展。【结论与展望】综合分析成岩动力学研究趋向, 认为温度、压力/应力、流体、时间耦合演变是决定盆地充填物成岩演变的基本要素, 而深层—超深层沉积成岩环境的流体相态、岩石物理属性演变、流体—岩石作用机制等专属性问题应成为目前基础研究前沿的重点。

关键词 深层—超深层盆地; 流体—岩石作用; 成岩动力学; 盆地动力学; 油气

第一作者简介 李忠, 1964 年出生, 男, 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 P512.2 P618.13 **文献标志码** A

0 引言

沉积成岩动力学, 即有关盆地沉积物埋藏成岩(或流体—岩石作用)过程与驱动机制的分支学科, 是盆地动力学的重要内容^[1], 至今方兴未艾。另一方面, 化石能源及诸多矿产资源的形成分布与成岩过程密切相关, 尤以油气资源最为典型, 相关研究吸引了大量成岩学家(diageneticist)的关注和投入, 这不仅开拓了成岩作用研究的新领域, 并由此促发了分别始于 20 世纪 70 年代中期的“现代成岩作用”和 20 世纪 90 年代的“流体—成岩动力学”研究兴起^[2-3]。

近二十年来, 盆地深层—超深层愈来愈多的发现展现出了极好的油气及相关资源勘探潜力^[4-8], 并已成为中国油气勘探开发的重要战场^[9-12]。然而, 深层—超深层涉及大量成岩动力学未知领域, 理论认识滞后, 勘探风险加剧。换言之, 与成岩相关的成烃—成储—成藏等油气形成分布的理论认识问题已经成为进一步扩展深层勘探的瓶颈^[13]。为此, 近年来相关研究持续投入, 进展显著, 但任重道远。在《沉积学报》创刊 40 周年之际, 就(油气)盆地

收稿日期: 2023-07-20; 收修改稿日期: 2023-09-09

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX05008-003); 中国科学院 A 类战略性先导科技专项专题(XDA14010201-04) [Foundation: National Science and Technology Major Project, No. 2017ZX05008-003; the Strategic Priority Research Program Grant of the Chinese Academy of Sciences, No. XDA14010201-04]

深层—超深层沉积成岩作用研究作一分析和评述，探讨研究对策及发展趋向，这无疑具有学术和应用意义。应该指出，在深层—超深层沉积成岩领域，近年来的研究工作是多方面的，以下主要结合作者及合作者的工作，针对具有深层—超深层（具体界定参见[13]和表 1）特色的、与动力学研究和认识密切相关的领域进行梳理，并对前沿问题即深层—超深层专属性问题提出我们的思考。

表 1 深层—超深层盆地叠合样式与构造—热演化效应

类型	稳定低热流深埋型	低热流深埋型	中热流深埋型	高热流深埋型
平均深度/m	深层 4 500~6 000 超深层≥6 000	深层 4 500~6 000 超深层≥6 000	深层 3 500~5 000 超深层≥5 000	深层 2 500~3 500 超深层≥3 500
上构造层	克拉通	陆内挠曲	陆内挠曲/裂陷	裂陷/被动陆缘
中构造层	克拉通	克拉通/挠曲	克拉通/裂陷	弱伸展/弱挠曲
下构造层	克拉通	克拉通/被动陆缘	克拉通/被动陆缘	克拉通
构造—流体 活动效应	垂向隆凹构造活动为主， 应变较弱，深层次构造— 流体活动不发育	中晚期侧向构造应变活 跃，构造—流体活动发育	中晚期侧向构造应变活跃， 构造—流体活动发育	中晚期垂向构造活动为 主，深层次热流体活动 发育
热体制与深 —超深层成 储—成藏	持续低热流（≤50 mW/m ² ）、慢速沉降，成 储—成藏有利，但少见	基本为低热流（35~50 mW/m ² ），晚期快速沉降 深埋，油气成储—成藏最 有利	早中期渐进深埋，中期达中 —高热流（50~65 mW/m ² ）， 弱沉降或抬升，气藏为主	中晚期高热流（≥65 mW/m ² ）并较快沉降深 埋，气藏为主

注：①下构造层一般指新元古界—下古生界，中构造层指上古生界，上构造层指中生界和/或新生界。②深层—超深层平均深度定义针对中下构造层古老层系。

1 深层—超深层油气盆地类型及源—储岩石特征认识进展

1.1 盆地类型及产出特征

统计表明（图 1），全球最具油气勘探潜力的盆地，其对应充填厚度一般较大，主要为被动陆缘、前陆/挠曲、内克拉通（叠合）盆地，这也是目前认知深层—超深层油气产出的主要盆地类型，而其他诸如裂谷/裂陷、走滑等盆地也有少量深层—超深层油气产出。

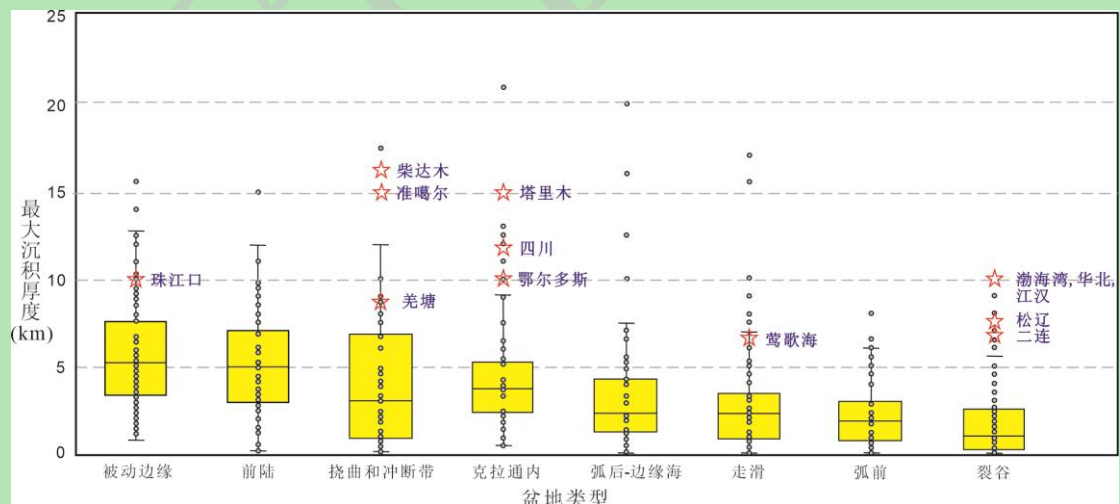


图 1 全球各类盆地最大沉积厚度分布（灰圆圈）及其与我国主要盆地（红五星）的对比

最大沉积厚度分布据[14]；注意我国主要油气盆地因其叠合属性相关归类仅供参考。

Fig.1 Distribution of maximum depositional thickness in various basin types (gray circle) and its comparison with major basins in China (red star)

总体上看，深层—超深层盆地类型和油气产层时代具有如下特征：（1）新元古界等古

老层系的深层—超深层储层，主要产出于克拉通（叠合）盆地中，极少见于前陆盆地、裂谷/裂陷盆地、走滑盆地、被动陆缘盆地；（2）古生界深层—超深层储层，主要产出于克拉通（叠合）盆地及前陆盆地中，极少见于裂谷/裂陷盆地、走滑盆地、被动陆缘盆地；（3）中—新生代的深层—超深层储层，主要产出于前陆冲断带、被动陆缘，以及裂谷/裂陷和走滑盆地；极少见于克拉通（叠合）盆地^[15]。这说明，深层—超深层油气与盆地世代和类型有关，究其本质就是有机—无机物对一定盆地温度—压力/应力—流体—时间演变耦合作用的成岩响应。

与全球不同类型盆地统计对比（图 1），我国相关盆地充填厚度总体偏大。究其原因可能与地域构造特色有关，即多期叠合理藏特征显著，盆地存在明显归类问题，如塔里木盆地并非单一的内克拉通盆地。但也正是上述叠合及其相关延迟成烃—多期成储—多期/晚期成藏特点，造就了我国部分盆地的深层—超深层存在巨大油气勘探潜力。

1.2 油气源—储岩石组构特征

碳酸盐岩、碎屑岩/砂岩、泥质岩是油气源—储岩石的主要端元类型（组成和物性演变分类），其总体组成分别对应物理（性质）稳定—化学（性质）不稳定、物理稳定—化学稳定、物理不稳定—化学不稳定特征，但实际组构或成因类型要复杂得多，并制约成岩物性演变。

对全球储集空间类型的半定量统计表明，碳酸盐岩孔、洞、缝等多介质储集结构类型发育，而碎屑岩（砂岩为主）相对单一（图 2）。相比较中浅层，深层—超深层储集空间结构类型存在特殊性。总体上，随深度增大，大孔、洞呈现明显衰减，而与裂缝（含扩溶）有关的储集结构类型增多，尤以岩溶型碳酸盐岩最为典型（图 2a）。非岩溶型碳酸盐岩储层的储集结构类型相对单一，其深埋演化与砂岩类似，只是在成因上次生溶蚀孔、裂缝及扩溶孔隙占比可能相对略高（图 2b），其压溶—蠕变相关的成岩产物丰度较高。

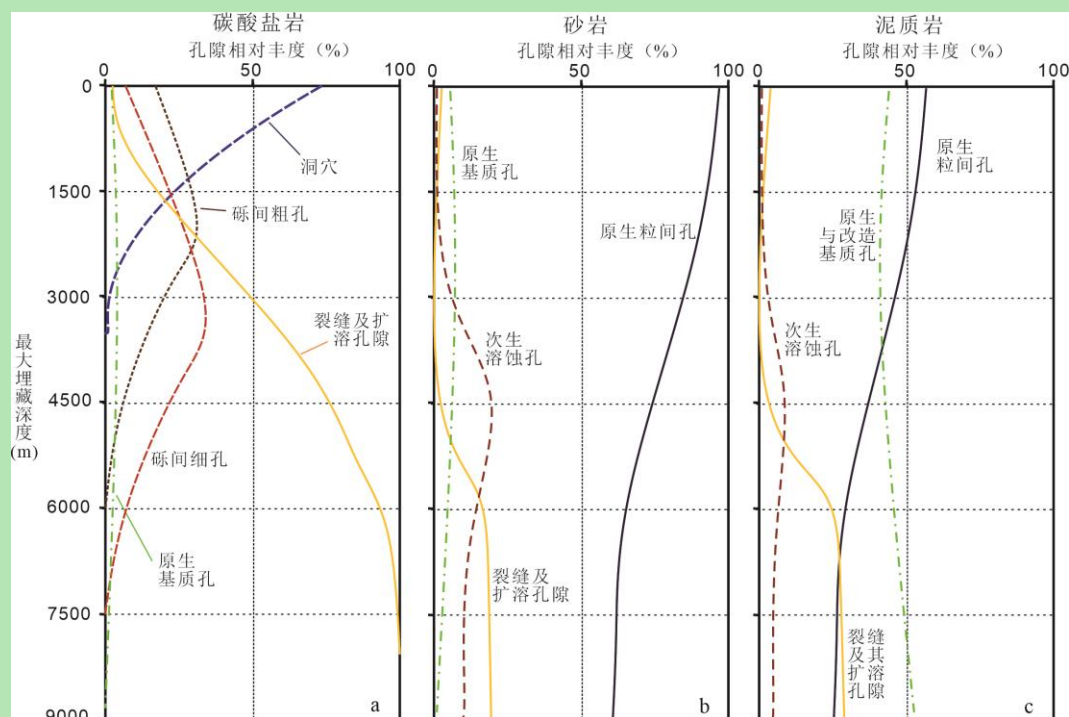


图2 岩溶型碳酸盐岩 (a)、砂岩 (b) 与泥质岩 (c) 孔隙类型和丰度的深埋演变示意图

以低地温盆地为例；砾间粗孔与细孔 (a) 的孔径分界线定为 $6\text{ cm}^{[16]}$

Fig.2 Schematic diagrams showing deeply buried evolution of pore types and abundance in (a) karst carbonate; (b) sandstone; and (c) mudstone rocks

虽然大多数深层—超深层碎屑岩始终以粒间孔为主，但与裂缝（含扩溶）有关的储集结构类型显然不容小觑（图 2b），尤其在超深层，这类储集结构类型对岩石渗透性的作用至关重要。需要说明的是，图 2 给出的孔隙相对丰度是一个半定量的、综合性的岩石大类评估，不针对特定地区的储层岩石类型（亚类或种类）。

对于不同时代的盆地而言，深层—超深层储层产出的岩石和储集空间基本类型具有如下特征：（1）新元古代等古老层系的深层—超深层储层，以碳酸盐岩为主，孔、洞、缝多介质储集类型组合发育，极少见碎屑岩类型；（2）古生代的深层—超深层储层，碳酸盐岩、碎屑岩（砂岩为主）兼有，前者多介质储集类型组合发育；但碎屑岩主要产出于克拉通（叠合）盆地及前陆盆地中，孔隙型储集类型发育；（3）中—新生代（特别是晚中生代—新生代）的深层—超深层储层，碳酸盐岩、碎屑岩（砂岩为主）兼有，前者多介质储集类型组合发育，局部克拉通、伸展盆地中可发育孔隙型储集类型；但前陆冲断带、裂谷/裂陷以及走滑盆地深层—超深层以碎屑岩储层居多，缝孔型、孔隙型储集类型发育^[15]。

另一方面，做为源—储一体的岩石类型，泥质岩/页岩已经愈来愈受到学界关注。已有大量岩石学与岩相学研究表明，泥质岩/页岩由多种源于盆外和盆内的组分构成，盆外来源的成分主要包括富含钾的黏土矿物、碎屑石英、钠长石、钾长石、云母和岩屑碎片等，其中

砂质到泥质大小的页岩碎屑（页岩岩屑）可以在数百至数千公里的推移质运输中保存下来。而盆内组分主要包括生物硅质异化粒（海绵骨针和放射虫）、凝集有孔虫、磷酸钙类球粒、富含黏土的球粒、有机矿物集合体、内壳和其他生物钙质异化粒等。值得一提的是，还有一系列成因复杂的高含水量悬浮絮体、底质凝絮体、撕裂内碎屑、成土团聚体等。显然，主要由泥质岩/页岩构成的烃源岩具有复杂的沉积机理和组构类型，不仅因此，愈来愈多的研究指出，烃源岩除了其特色的有机成岩作用外，也存在与储集岩类似的诸多无机成岩作用以及相关有机—无机成岩过程，前者是以往研究关注的焦点，后者大部分研究主要针对中浅层（多小于 3 000 m）页岩气或页岩油开展^[17-20]，对深层—超深层则认知缺乏。

泥质岩/页岩孔隙类型主要包括与原生矿物基质相关的粒间和粒内孔隙、与有机质相关的有机质孔隙、横切基质和颗粒的裂缝孔隙，以及成岩改造和/或次生孔缝，其深埋演变显然不能完全独立于碳酸盐岩和碎屑岩（砂岩为主），但也具有诸多特性：（1）与砂岩相比，更多盆内成因组分特别是（微）生物/有机组分介入了成岩作用；与碳酸盐岩相比，更多盆外成因碎屑组分介入了成岩作用，相关物质来源、交换和反应机制特殊；（2）与砂岩相比，原生基质孔隙（含有机孔）、裂缝及扩溶孔一般更为发育，但因岩石中黏土矿物组分总体偏高，抗压实性能弱，因而原生粒间孔随深埋更快速减少（图 2c）；（3）由于源—储一体，相关尺度的有机—无机成岩作用类型丰富，层内溶蚀和胶结作用较强，穿层流体—岩石作用相对偏弱。此外，深层—超深层条件即多源—多相态流体介入、高温高压对有机质演变和生烃的影响是不可忽视的，加之体系组分和边界条件的特殊性^[21-22]，相关有机—无机成岩机制和效应研究远未认识。

2 深层—超深层流体活动属性和效应认识

深层—超深层流体（含烃流体）属性？是否存在有效的流体活动？深层—超深层是否存在显著的储层成岩和物性建设性改造？这是成岩动力学研究的基本问题。

2.1 流体活动属性

盆地深埋演化中温压增大会导致地层骨架压缩，渗透率发生显著降低，从而影响地质介质的水力特性；另一方面，随地层埋深增加，温压不断上升，地质流体本身的物理属性将发生变化。就水而言，在温度和压力不断增大且共同影响的环境条件下，至少在盆地尺度将始终保持液态而无相态变化，但密度和水动力黏度显著减小，因此在深部地层环境中流体运动所需克服的黏滞力大大降低（图 3）。

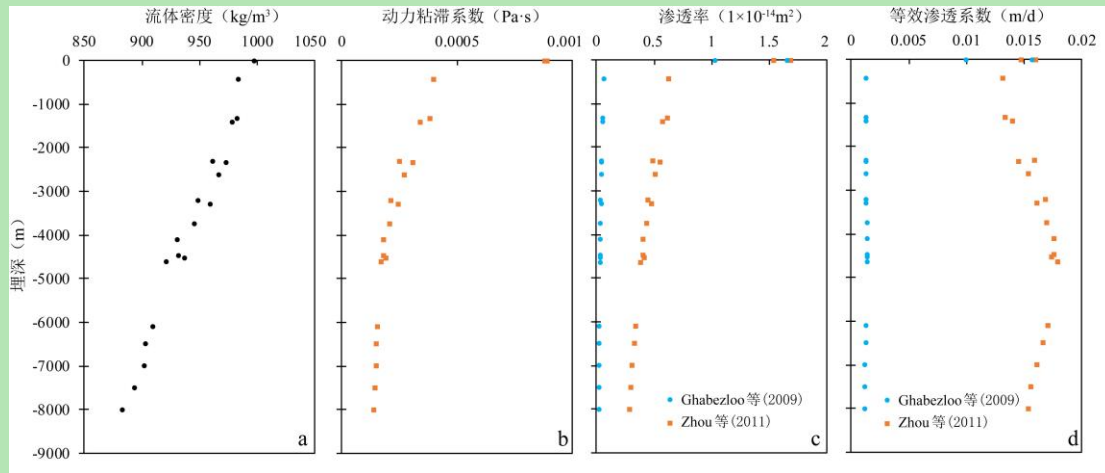


图3 塔里木盆地中部奥陶系碳酸盐岩孔隙流体物理性质随埋深的变化（数据据参考文献[15]）

(a) 流体密度变化；(b) 流体动力黏滞系数变化；(c) 渗透率随埋深变化；(d) 等效渗透系数随埋深变化。渗透率快速、慢速衰减公式分别参考文献[23-24]的经验公式

Fig.3 Changes of pore fluid properties of Ordovician carbonate rocks with burial depth in the central Tarim Basin (data from reference[15])

综合流体属性与介质特征分析不同埋藏阶段的储层流体渗流特性（图3），表明渗透率快速衰减情况下^[23]，等效渗透系数在浅埋阶段急剧降低；埋深进一步增大后等效渗透系数缓慢增加，但由于地层介质本身的渗透性很降低，因此深层—超深层中地下流体的流动性仍弱于浅部地层。而当渗透率慢速衰减情况下^[24]，深层—超深层流体等效渗透系数将在相当空间范围内出现增大趋势，即流体渗流由于运动黏滞系数的减小而增强。

应该指出，大部分砂岩等效渗透系数随埋深的变化与上述“慢速衰减”模式类似^[15]，因此其深层—超深层也不乏较强的流体活动性。

2.2 流体化学类型及其活动效应

盆地流体类型可以按照来源、活动方式、化学组分以及温压/埋深环境进行分类^[13]。就化学组分而言，深层—超深层酸性流体的产率问题一直是油气盆地关注的热点，因为它是制约成岩流体环境并导致原生孔隙（洞）深埋保持和次生孔隙生成的关键。

烃源岩中干酪根被认为是储层油田水中有机酸的主要母源，干酪根受热脱羧基是有机酸形成的主要方式。依据相关实验模拟手段^[15]，新的研究考虑了三类生烃有机质的分子结构差异，构建了分类有机酸生成模型（图4a, b）。I型和II型有机质生成有机酸高峰在生油窗晚期、凝析气—湿气生成阶段之前；III型有机质生成有机酸时间略早，远早于生气高峰。相对于 Surdam *et al.*^[25]和 Mazzullo^[26]提出的概念模型，这一研究实测数据更加真实可靠。

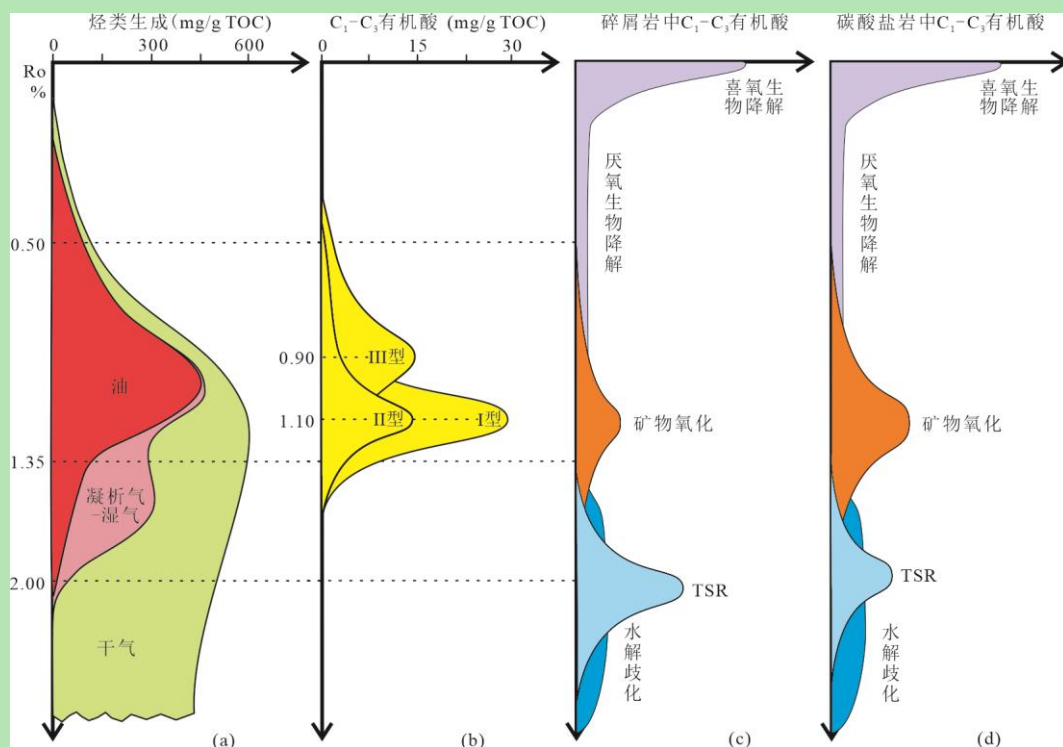


图4 烃源岩和储层内有机酸及无机酸生成的综合模式（据文献[15]修改）

（a）烃类演化定量模式；（b）烃源层有机酸演化的定量模式；（c）碎屑岩储层中有机酸及无机酸的生成演化序列；（d）碳酸盐岩储层中有机酸及无机酸的生成演化序列

Fig.4 Integrated models of organic and inorganic acid generation in source rocks and reservoirs (modified from reference [15])

除了干酪根脱羧机制，有模拟实验证实，在高温条件下烃类与砂岩中含铁氧化物的反应能将烃类氧化成小分子有机酸^[27]；热化学硫酸盐还原反应（TSR）改造原油和天然气，也可产生大量的 H_2S 和 CO_2 。此外，深层储层内还存在水解歧化反应，该反应利用水作为电子接受体，在高温环境下缓慢氧化烃类产生有机酸，使得深层有机酸产量维持一定水平^[28-29]。

研究指出，碳酸盐岩和碎屑岩的组构特征差异显著，其烃水岩反应生成有机酸存在不同序列（图 4c, d）。当储层抬升暴露地表时，喜氧细菌是控制有机酸生成的主要因素，此时烃类被大量降解成有机酸。随储层埋深增加，厌氧细菌开始发挥作用，但整体而言厌氧细菌对烃类的改造效果较弱。这两种方式在碳酸盐岩和碎屑岩储层理应没有大的差异。在深层各类烃水岩反应包括矿物氧化、TSR 和水解歧化作用主导了有机酸的生成。显然，充注原油和储层矿物的氧化还原反应主要发生在氧化性矿物丰富的砂岩储层中，热化学硫酸盐还原反应主要发生在靠近膏岩层位的碳酸盐岩储层中。而水解歧化反应从模拟实验的结果来看，反应速率受制于围岩中含铁矿物的组成和含量，其产生的有机酸及无机酸在砂岩储层中会相对较高。

另一方面，对于碳酸盐岩而言，流体—岩石作用对温压环境及封闭性条件极其敏感，因

此深层—超深层流体活动效应与中浅层明显不同。与压力相比，温度对化学反应的影响更加显著（图 5a）。此外，温度还直接影响着碳酸盐岩矿物或气体等组分在地质流体中的溶解度，并驱动矿物溶蚀或沉淀直至达到另一平衡状态。

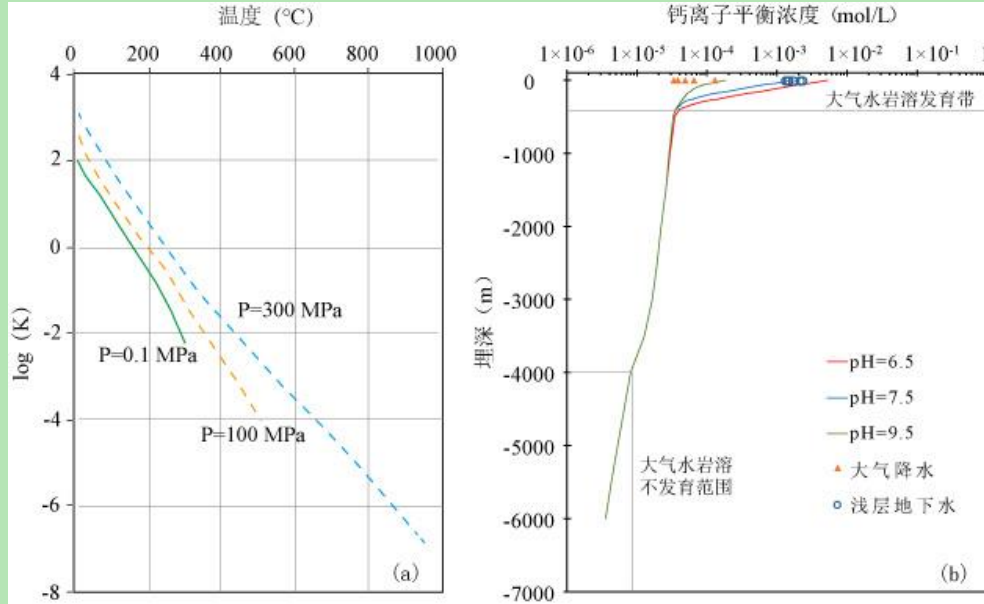


图 5 (a) 方解石溶解/沉淀反应平衡常数 (K) 随温度、压力的变化关系 (据文献[30]修改); (b) 塔里木盆地鹰山组碳酸盐岩孔隙流体在不同 pH 条件下 Ca^{2+} 平衡浓度与埋深的关系 (数据据文献[15])

Fig.5 (a) Relationship between the equilibrium constant (K) of calcite dissolution/precipitation reaction with temperature and pressure (modified from reference [30]); (b) relationship between pore fluid Ca^{2+} equilibrium concentration and burial depth of the Yingshan Formation carbonate rocks, Tarim Basin, for different pH conditions (data from reference [15])

对于浅部来源的大气降水、沉积流体，在流体向下运移过程中，升高的温度使得 Ca^{2+} 平衡浓度降低，从而导致碳酸钙沉淀析出；但当该流体远离饱和状态时，即使温度升高，流体仍具备对碳酸钙的溶蚀能力，此时外来流体的注入会导致孔隙度的增加。而深部来源的流体温度较地层相对较高，即使该流体为碳酸钙饱和状态，在流体上移过程中仍具备一定的侵蚀性。以大气水对塔里木盆地鹰山组碳酸盐岩影响为例（图 5b），钙离子平衡浓度在 1 000 m 内呈指数衰减，而从 1 000 m 至 6 000 m 范围内的减小程度有限；一般在埋深不超过 400 m 时，不同 pH 条件钙离子的平衡浓度差异较大，但随着埋深增大，不同 pH 的钙离子平衡浓度差异较小。换句话说，大气水岩溶的有效、规模发育深度（距地表或不整合面）一般不超过 400 m，深层发育大气水岩溶作用的可能性极小；但深层—超深层对浅层岩溶的保存则取决于前述深埋过程中的平衡状态和反应速率，特别是外源流体的介入将使得这一过程复杂化，而这又恰恰是深层—超深层叠合盆地普遍发育的特征景象。

3 深层—超深层成岩动力体制认识

流体活动是盆地沉积成岩及其非均质演变的核心动力,而其动力体制的驱动要素包括热场、应力场(含重力场)、化学场^[13],与盆地类型及其演化阶段密切相关。

3.1 盆地(构造)应力—热体制

(构造)应力—热体制是决定盆地尺度深层—超深层成岩效应的基础,前人对单旋回(单型)盆地的应力—热体制已有较多论述^[31-32]。研究认为,深层—超深层油气藏发育的单旋回盆地主要为被动陆缘、前陆/挠曲成因,且基本为中生代盆地^[15];单旋回的克拉通盆地沉积一般不可能形成深层—超深层埋藏,但古老的克拉通往往呈现多期、多类型叠加复合的特点。

对于多数前中生代古老的深层—超深层油气藏而言,其盆地成因类型暨应力—热体制实际上很难简单界定,因此一些诸如复合、叠合等含有复杂成因含义的术语已被用来描述这类盆地,但这种描述对于深层—超深层成岩—成藏动力体制而言显然是笼统的。有鉴于此,主要针对盆地中下构造层,依据盆地深埋路径和热流、构造应变过程、时间等变量的归纳分析,可将主要叠合盆地的深层构造—热演化环境划分为稳定、低、中、高热流深埋等四种基本类型(表1)。一般而言(尤其砂岩),低热流深埋型盆地最有利于深层—超深层油气储层规模发育,中热流深埋型盆地次之,高热流深埋型盆地罕见(图6)。

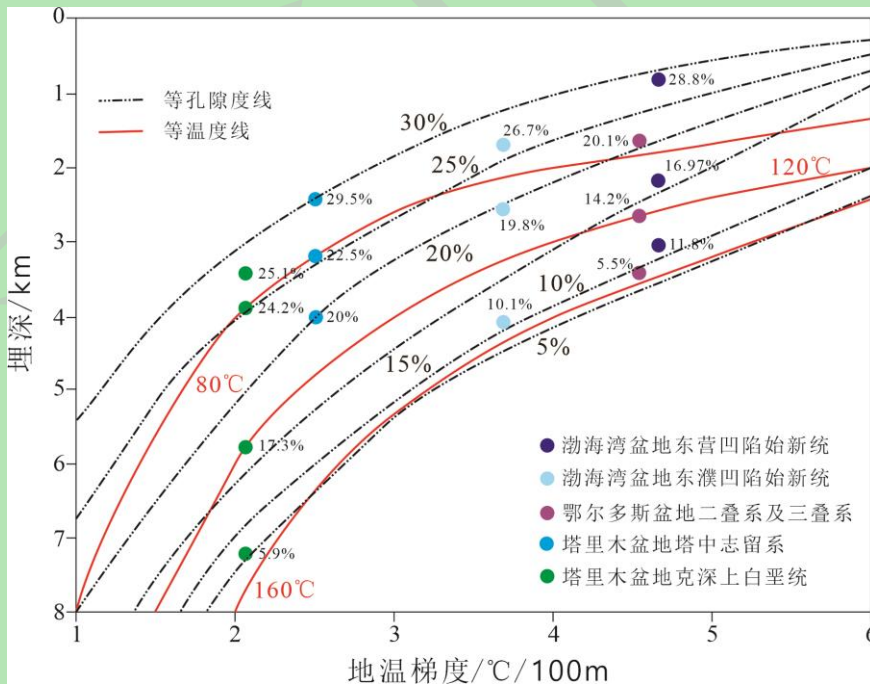


图6 不同地温与世代背景下砂岩储层孔隙度深埋演化路径分异

样品选择构造应变较弱的、不发育早期基底式胶结的中细粒长石石英砂岩或岩屑石英砂岩;孔隙度数据引自作者未刊和前人^[15]资料;地温梯度取晚中生代以来平均最高值;注意地温梯度近似背景下孔隙度深埋演化分异与盆地世代的可能关系(时间效应)

Fig.6 Variation of deep burial evolution path of sandstone reservoir porosity for different geothermal and time frameworks

埋藏中晚期构造—热活动趋于活跃,这是我国三个主要克拉通单元(塔里木、扬子、华北)及相关克拉通叠合盆地的深层—超深层碳酸盐岩储层构造演化的共性,但其活动属性、构造—流体作用过程又各具特色。这类盆地中晚期构造—热活动虽有趋于活跃的因素,但大多以转换构造呈现(尤其盆地中部),应变表现不明显,加之资料分辨率等问题,制约了对深层—超深层构造叠加效应、主控过程及驱动机制认识;此外,与深层—超深层温压环境有关,如异常流体压力导致的岩石应变强度的锐减^[33]将显著影响岩石破裂和构造变形样式,而这方面的解析实例和认知还非常有限。

大量研究迹象显示,深层—超深层规模油气藏既有层控成因特征,也与埋藏中晚期构造活动趋于活跃、断裂改造/构造成岩发育密切相关。事实上,无论在盆地尺度还是局域尺度,构造应变与岩石非均质性的成因关系均普遍存在^[34-38]。因此,构造应变与流体—岩石作用相互关系认识的缺乏,将难于完整揭示盆地流体—岩石作用的时空结构^[39]。

3.2 盆地差异成岩效应

有机—无机成岩作用可以简单划分为封闭、开放两类端员体系,尽管自然界半封闭—半开放体系比比皆是。基于地质解析和地球化学实验—数值模拟,以往对封闭或相对封闭体系的有机—无机成岩—成储模型的认识相对成熟,但大多是针对中浅层的;而对于开放或相对开放体系,其复杂性和认识难度显而易见,虽然也有诸多研究^[40-42],但多数模型在系统性和实证性等方面总体仍有待完善,其争议或论证焦点表现如下。

(1) 盆地深层—超深层是否存在大规模流体活动和作用效应?坦率说,目前多数的认识是否定的^[43-44],换句话说,多数研究认为深层—超深层规模储层发育主要缘于“保持机制”,而非“次生改造”,其最主要的推论依据就是对深层存在大规模流体源、充足有机酸及其输运效应的质疑。

(2) 深层—超深层如果存在大规模流体活动,其活动方式和流体—岩石作用机制是什么?显然,也有相当数量的研究成果提出了深层—超深层存在重要流体活动和有机—无机作用效应的证据^[25,34,45-47],其中断裂构造活动、异常高压囊(振荡性)开启等被认为是重要驱动力,但对其盆地动力学属性、演变类型、构造—流体输导作用的规模及相关质量平衡考量目前仍然缺乏有效评估。

尽管争议尚存,但基于前人及作者的研究,有两点基本事实理应给予重视:其一,盆地深层储层内有机酸含量可以维持一定水平;其二,深层—超深层高温高压条件下流体的动力黏度将发生显著变化,不仅如此,深层可能发育超临界流体,其活动性和溶解度的显著增大已经得到部分实验模拟证实^[48-49],因此针对实际地质记录重新解析和考量深层—超深层流体

活动规模是必要的。

4 深层—超深层高分辨成岩记录表征和判识技术进展

与中浅层相比,深层—超深层成岩研究面临诸多技术瓶颈,如多期次叠加改造、多介质孔洞缝或孔缝强非均质体系发育、连续岩心极少、大样品难于获取、直接探测难于实施、常规处理效果失真等。因此,技术进步是推动深层—超深层成岩研究的必由路径。

4.1 高分辨成岩记录表征

针对深层—超深层多期次叠加成岩改造、样品稀缺等问题,一系列无损、原位、高分辨成岩记录检测技术已经得到开发应用。

在常规光学显微镜和扫描电子显微镜观测基础上,多光谱连用技术和(整合式)光电关联显微技术进一步实现了高分辨成岩记录表征。例如,将 X 射线能量色散光谱与阴极射线发光成像对比检测硅质、钙质、铁质等成岩矿物组构细节;激光扫描共聚焦显微镜(LSCM)和扫描电子显微镜(SEM)相结合,检测细粒岩石的纳米至毫米级的微结构;采用微傅立叶变换红外光谱(micro-FTIR)识别黏土和极细粒成岩组构^[50];在白光、蓝光、二次电子(SE)和背散射电子(BSE)条件下使用荧光—电镜关联显微技术(CLEM),改进极细粒基质(含有机质)组构的高分辨光学和 SEM 图像识别^[51]。

多尺度数字岩心技术,特别是 3D 微米 X 射线显微镜(微米 CT)、场发射扫描电镜(FE-SEM)、自动矿物分析电镜、聚焦离子束—扫描电镜(FIB-SEM)双束系统、聚焦离子束—氦(氙)离子显微镜(FIB-HIM)三束系统等,实现了岩石组构检测的无损化,分辨率也实现了从 1 mm 到 0.5 nm、从二维到三维的跨越,并有助于多尺度成岩组构表征。另一方面,发展基于人工智能的不同分辨率的 CT 图像的组分识别,结合多尺度数字岩心组构表征^[15],将有可能实现快速、升尺度的成岩非均质性建模。

4.2 古成岩环境原位检测分析

原位同位素和微量元素示踪、原位同位素年代学检测技术,大大提高了深层—超深层古流体—成岩环境分析的精度,并使得成岩事件定量化分析水平显著提高。如基于双离子源多接收器二次离子质谱仪(SIMS)的原位硫同位素测试,有助于刻画混合成因的黄铁矿的流体环境和形成机制;基于 SIMS 的原位微区碳氧同位素检测,以及基于激光剥蚀等离子质谱仪的 U-Pb 同位素和微量元素检测,正在逐步实现碳酸盐矿物成岩世代和古流体属性的快速认知;而将原位 U-Pb 同位素年代学与团簇同位素热年代学技术结合,还可以定量识别碳酸盐矿物重结晶过程^[52]。

此外,激光拉曼光谱为分子振动光谱,是物质分子成分及结构分析的有效非破坏性分析技术。显微共聚焦激光拉曼光谱具有微观、原位、分辨率高等特点,在油气盆地成岩记录中,拉曼光谱分析可以应用在原位流体包裹体成分分析、固体有机质热演化程度、白云石有序度及其成岩温度、压力恢复等研究中^[15]。

5 深层—超深层成岩动力学的研究前沿及展望

埋藏—热演化、构造应变、介质物理化学属性是决定盆地充填物演变流体动力环境的基本要素(图7)。然而,深层—超深层沉积岩经历了相对高温高压环境的洗礼,其专属性基础问题才是成岩动力学值得探究的研究前沿。

(1) 流体相态问题

盆地深层存在多种流体来源,有机—无机成因叠加,特别是含油气盆地,在“油气窗”深度范围内的多组分、多相态或多介质流体问题,一直是学界热议的话题。然而,由于其复杂性和流体复原技术的瓶颈,认识的局限性突出,争议不断。

目前的实验研究迹象显示,盆地深层多相流体化学亲和力增大^[53]、界面张力减小,均一相可能发育,这无疑将抵消或部分抵消物性变差对流体活动性的不利影响。换句话说,由于深层油—气—水混溶、黏度降低,将可能改变深层油气的运聚形式^[13]。

显然,流体作用贯穿于成烃—成储—成藏全过程,盆地深层演化时期长,不同尺度的流体活动样式复杂^[54],而我们对深部流体相态、属性与作用类型知之甚少,极大制约了对深层规模高效储层改造机制与形成分布的认识。因此,相关前沿基础研究值得重视。

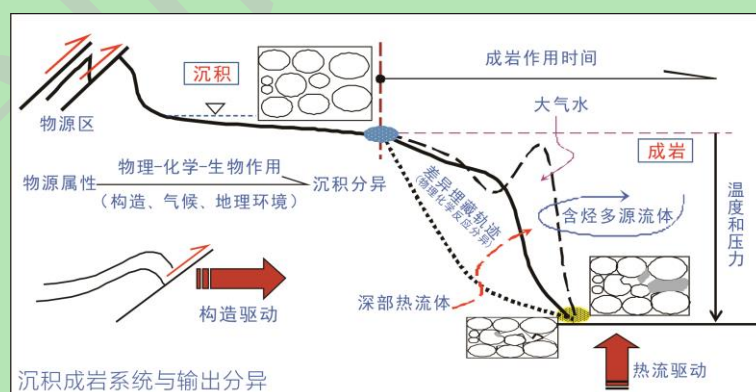


图7 沉积盆地成岩动力学系统框架(关注构造—热体制驱动的多源流体—岩石相互作用)

Fig.7 A framework of diagenetic geodynamic systems in sedimentary basins, focussing on structurally and thermally driven multi-source fluid-rock interactions

(2) 岩石物理属性演变问题

沉积岩在其成岩演变过程中大多是介于固体与液体之间的黏弹体,其岩石物理属性(弹性、塑性、黏性等),特别是应力—应变或流变学行为显然会受到温压流等环境因素的影响,

并呈现复杂的非线性特征或线性—非线性转换。但以往相当长的研究中，这种影响在盆地尺度并未获得重视，或者说在此尺度上的环境因素效应（特别是温—压方面）多认为是可以忽略不计的。

然而，目前相关领域的一些认识仍然值得关注。Connolly *et al.*^[55]结合实例对温度相关的黏弹性压实开展了数值模拟研究，认为大多数沉积盆地的近地表压实状态以静水流体压力为特征，因此完全由沉积物基质流变学决定。在这种情况下，压实最初由黏弹性流变模型很好地描述。随着深度的增加，沉淀—溶解过程则将导致热激活的黏性变形的发育（图 8）；在潘诺尼亚（Pannonian）盆地的应用表明，页岩和砂岩孔隙度分别低于 10% 和 25% 时，黏性压实就可能起主导作用。

在盆地尺度，流体超压对岩石应力—应变行为的影响近年来已受到关注，这得益于 Suppe *et al.*^[36]的工作。研究表明，流体超压可以大大降低岩石脆性破裂强度，并显著延缓了岩石地层深埋过程中的脆—塑性转变。换言之，从盆地中浅层到深层—超深层，由于温—压—流—时变化，特别是热激活效应、超压环境的出现，深层—超深层储层岩石流变行为与物性演变存在明显差异。但问题在于，这种热激活效应与岩石非均质性、流体活动密切相关，其机制远未认识；而超压环境本身成因机制复杂，且活动多变，其形成分布更是受岩石非均质性制约，因此岩石应力—应变行为与埋藏深度之间并非简单对应关系。

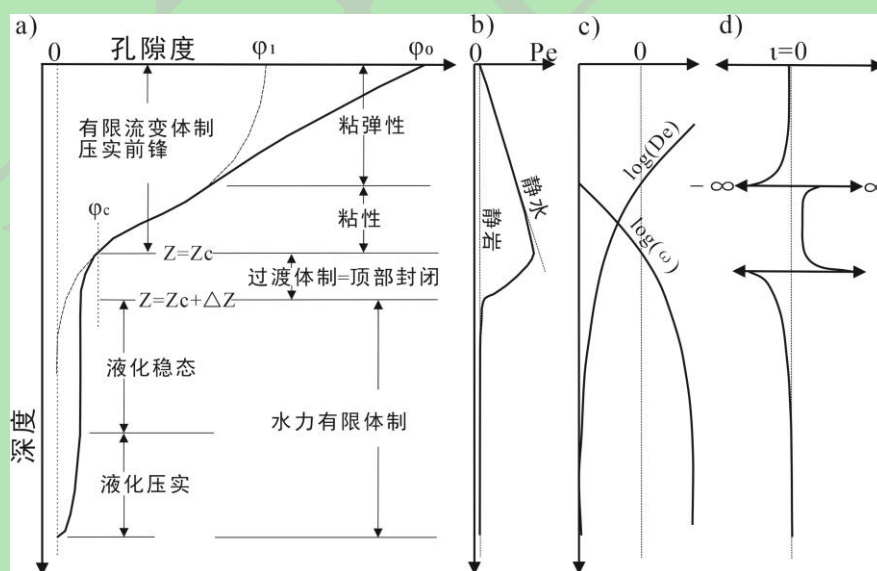


图 8 沉积岩孔隙度 φ (a)、有效压力 P_e (b)、局域 Deborah 数 De 和水力参数 ω (c)、 e 倍黏性长度 ι (d) 的深度剖面示意图 (据文献[55]修改)

p_e 是负载压力与流体压力之差； De 是黏性和黏弹性机制对压实相对影响的测度，当 De 约等于 1 时两个分量相当，而 $De \rightarrow 0$ 和 $De \rightarrow \infty$ 分别指示黏性和黏弹性极限； $\omega < 1$ 对应正常静水压力梯度； ι 的有限正值增加了黏性剖面的曲率， $\iota > 0$ 表示黏性压实

Fig.8 Depth profiles of sedimentary rock: (a) porosity φ ; (b) effective pressure P_e ; (c) the local Deborah number De ; and (d) local hydraulic parameter ω and viscous e -fold length ι (modified from reference [55])

(3) 流体—岩石作用机制问题

除化学体系、封闭性等因素外,由于上述流体相态、岩石物理属性的演变,同一流体—岩石体系的成岩行为,从中浅层到深层—超深层存在明显分异(图7)。

关于深层—超深层温—压—流态下的流体—岩石作用行为,即成岩反应类型、速率和效应等,坦率说现有的认知是比较贫乏的。一些研究迹象显示,快速胶结—溶蚀反应可能在深层—超深层比较发育^[43,56-57]。但是,相反的认识也有提出,其基本依据比较多地提及了深层—超深层致密层发育,它们对流体活动速度和效率具有严重阻碍作用。

模拟研究指出,孔缝结构对流体—岩石作用的影响显著,大孔—裂缝(微米级)中溶蚀、胶结速率较大,小孔—缝反之,因此深层—超深层多数小孔—缝得以保持的概率较大;另一方面,无外源流体介入系统,裂缝溶质浓度高、表面张力小、易沉淀,因此外源含烃热流体或酸性流体介入,是深层裂缝扩溶的必要条件,特别是深层—超深层埋藏期裂隙优先流能够更迅速的将流体向基质中传递^[15]。但目前的模拟总体缺乏前述流体相态和岩石物理属性演变的研究基础,因此有关流体—岩石作用类型与效应问题的认识还很初略,更不必谈实践应用了。

值得提及的是,地质时代或绝对时间对成岩效应的影响。在前述的数值计算、模拟以及地质推理中,时间对深层—超深层温压流环境和物性的制约都是一个绕不过去的问题(参见图6)。根据热蠕变效应的普适性,一般而言,低热流、快速深埋过程有利于深层—超深层沉积岩孔隙的保持和规模发育,也有利于有机岩成熟度的深度下延。但坦率说,目前对古老沉积成岩的时间效应的理论认识和实证还非常有限。

综上,深层—超深层沉积岩经历了相对高温高压环境的洗礼,其流体、岩石/岩矿的演变行为存在特殊性,这是毋庸置疑的,但细节远未认知。采用新技术,通过解析典型记录,探究深层—超深层成岩演变的专属性机制,这是现阶段乃至未来相当长时期内盆地动力学研究的重要任务之一。

6 结论

(1) 沉积成岩作用受控于沉积组构、盆地温度—压力/应力—流体—时间耦合演变两方面。温—压—流—时与盆地世代和类型密切关联,深层—超深层新元古界油气主要产于克拉通(叠合)盆地,古生界主要产于克拉通(叠合)盆地及前陆盆地,中—新生界主要产于前陆、冲断带、被动陆缘盆地。不同有机—无机沉积组构对其成岩路径影响明显,源—储—运的页岩/泥质岩不乏较强的层内胶结和溶蚀作用,但对其在深层—超深层的演变认识

目前非常有限。

(2) 模拟证实,除了干酪根脱羧机制,深层各类烃水岩反应包括矿物氧化、TSR 和水解歧化作用主导了有机酸的生成。高温压环境流体运动黏滞系数减小,渗透系数增大,因此深层—超深层存在大规模流体活动与有效烃类—有机酸混合充注条件,具备显著的深层專屬性成岩和岩石物性改造/保持机制。

(3) 压力/应力—热体制是决定盆地尺度深层—超深层构造成岩效应的基础,为此可将主要叠合盆地划分为稳定、低、中、高热流深埋等四种基本类型;低、中热流深埋型有利于自然界深层—超深层油气规模形成,但其构造—流体—岩石作用效应因盆地世代和叠合方式而分异显著,亟待深化。

(4) 多光谱连用技术和(整合式)光电关联显微技术进一步实现了高分辨成岩记录表征;原位同位素和微量元素示踪、原位同位素年代学检测技术,大大提高了深层—超深层古流体—成岩环境分析的精度,并有望实现完整、连续的成岩事件定量化分析水平的显著提高。

(5) 由于温—压—流—时变化,特别是热激活效应、超压环境的出现,深层—超深层储层岩石流变行为和物性演变与中浅层存在明显差异,但并非简单对应关系。为此深层—超深层沉积成岩环境的流体相态、岩石物理属性演变及其控制的流体—岩石作用机制等專屬性基础问题应成为未来盆地成岩动力学研究前沿的重点;而基于地质模型认识和基础物理化学实验数据的数值模拟研究,将为相关问题(包括绝对时间影响)的解决提供可能的重要途径。

【后记】《沉积学报》正式创刊的 1983 年,笔者正值大学二年级,那时能及时阅读到的原版专业刊物寥寥无几,《沉积学报》无疑就成为了解书本之外沉积学研究的重要信息来源之一,因此当时对该刊物的印象不能说深刻(缘于对沉积学科研究肤浅而朦胧的理解),但也是难忘的。八年之后笔者进入《沉积学报》首届和时任主编叶连俊院士的研究团队开展博士后研究,并得以进一步接近学报。《沉积学报》创刊 20 周年和 30 周年时出版的纪念特刊,笔者都有幸被邀约撰写了相关论文^[58-60];如今学报已进“不惑”之年,而我也近“耳顺”,对一路走来的曲折历程,不免心生诸多感慨而难以详表!在此学报创刊 40 周年之际,仅以拙文祝愿《沉积学报》坚定初心,助力中国沉积学发展更上一层楼,也预祝其在不远的将来成为国际沉积学界交流的重要媒介和平台。

致谢 本文流体活动属性和流体化学类型的研究分别得到中国科学院地质与地球物理研究所董艳辉副研究员、中国科学院广州地球化学研究所陈健副研究员和彭平安院士等的鼎力支持,梁蒙恣、周圆全、窦文超博士协助清绘部分图件,在此一并感谢!

参考文献 (References)

- [1] National Research Council. The dynamics of sedimentary basins[M]. Washington: National Academy of Sciences, 1997: 1-43.
- [2] Wolf K H, Chilingar G V. Diagenesis IV[M]. Amsterdam: Elsevier, 1994: 1-519.
- [3] 李忠, 刘嘉庆. 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[J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 837-848. [Li Zhong, Liu Jiaqing. Key problems and research trend of diagenetic geodynamic mechanism and spatio-temporal distribution in sedimentary Basins[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5): 837-848.]
- [4] Meyer D, Zarra L, Rains D, et al. Emergence of the Lower tertiary wilcox trend in the deepwater gulf of mexico[J]. World Oil, 2005, 226(5): 72-77.
- [5] Mcdonnell A, Loucks R G, Galloway W E. Paleocene to Eocene deep-water slope canyons, western Gulf of Mexico: Further insights for the provenance of deep-water offshore Wilcox Group plays[J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(9): 1169-1189.
- [6] Mancini E A, Li P, Goddard D A, et al. Mesozoic (Upper Jurassic-Lower Cretaceous) deep gas reservoir play, central and eastern Gulf coastal plain[J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(3): 283-308.
- [7] Ehrenberg S N, Nadeau P H, Steen Ø. Petroleum reservoir porosity versus depth: Influence of geological age[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(10): 1281-1296.
- [8] Ehrenberg S N, Nadeau P H. Sandstone vs. carbonate petroleum reservoirs: A global perspective on porosity-depth and porosity-permeability relationships[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(4): 435-445.
- [9] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣. 深层、超深层碳酸盐岩油气储层形成机理研究综述[J]. 地学前缘, 2011, 18(4): 181-192. [Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong. The research status and advances in porosity evolution and diagenesis of deep carbonate reservoir[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(4): 181-192.]
- [10] 孙龙德, 邹才能, 朱如凯, 等. 中国深层油气形成、分布与潜力分析[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(6): 641-649. [Sun Longde, Zou Caineng, Zhu Rukai, et al. Formation, distribution and potential of deep hydrocarbon resources in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(6): 641-649.]
- [11] 赵文智, 胡素云, 刘伟, 等. 再论中国陆上深层海相碳酸盐岩油气地质特征与勘探前景[J]. 天然气工业, 2014, 34(4): 1-9. [Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Liu Wei, et al. Petroleum geological features and exploration prospect in deep marine carbonate strata onshore China: A further discussion[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(4): 1-9.]
- [12] 李阳, 薛兆杰, 程喆, 等. 中国深层油气勘探开发进展与发展方向[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 45-57. [Li Yang, Xue Zhaojie, Cheng Zhe, et al. Progress and development directions of deep oil and gas exploration and development in China[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 45-57.]
- [13] 李忠. 盆地深层流体-岩石作用与油气形成研究前沿[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35(5): 807-816. [Li Zhong. Research frontiers of fluid-rock interaction and oil-gas Formation in deep-buried Basins[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2016, 35(5): 807-816.]
- [14] Evenick J C. Glimpses into Earth's history using a revised global sedimentary Basin map[J]. Earth-Science Reviews, 2021, 215: 103564.
- [15] 李忠. 盆地深层-超深层沉积成岩作用与油气储层形成分布[M]. 北京: 科学出版社, 2022: 1-558. [Li Zhong. Sedimentary diagenesis and Formation distribution of oil- gas reservoirs in deeply-ultra deeply buried Basins, China[M]. Beijing: Science Press, 2022: 1-558.]
- [16] Loucks R G. Paleocave carbonate reservoirs: Origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications[J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(11): 1795-1834.
- [17] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1071-1098.
- [18] Schieber J. Experimental testing of the transport-durability of shale Lithics and its implications for interpreting the rock record[J]. Sedimentary Geology, 2016, 331: 162-169.
- [19] Hall C D. Compositional and diagenetic controls on brittleness in organic siliceous mudrocks[M]//Camp W K, Milliken K L, Taylor K, et al. Mudstone diagenesis: Research perspectives for shale hydrocarbon reservoirs, seals, and source rocks. AAPG

- Memoir, 2019, 120: 103-120.
- [20] Peng J W, Milliken K L, Fu Q, et al. Grain assemblages and diagenesis in organic-rich mudrocks, Upper Pennsylvanian Cline shale (Wolfcamp D), Midland Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2020, 104(7): 1593-1624.
- [21] Camp W K, Milliken K L, Taylor K, et al. Mudstone diagenesis: Research perspectives for shale hydrocarbon reservoirs, seals, and source rocks[M]. AAPG Memoir, 2019, 120: 33-224.
- [22] Munnecke A, Wright V P, Nohl T. The origins and transformation of carbonate mud during early marine burial diagenesis and the fate of aragonite: A stratigraphic sedimentological perspective[J]. Earth-Science Reviews, 2023, 239: 104366.
- [23] Ghabezloo S, Sulem J, Guédon S, et al. Effective stress law for the permeability of a limestone[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(2): 297-306.
- [24] Zhou X J, Zeng Z W, Liu H. Stress-dependent permeability of carbonate rock and its implication to CO₂ sequestration[C]//Proceedings of the 45th U.S. rock mechanics / geomechanics symposium. San Francisco: ARMA, 2011.
- [25] Surdam R C, Boese S W, Crossey L J. The chemistry of secondary porosity[M]//McDonald D A, Surdam R C. Clastic diagenesis. Oklahoma, USA: American Association of Petroleum Geologists, 1984: 127-149.
- [26] Mazzullo S J. Overview of porosity evolution in carbonate reservoirs[J]. Kansas Geological Society Bulletin, 2004, 79(1/2): 22-29.
- [27] Borgund A E, Barth T. Generation of short-chain organic acids from crude oil by hydrous pyrolysis[J]. Organic Geochemistry, 1994, 21(8/9): 943-952.
- [28] Seewald J S. Aqueous geochemistry of low molecular weight hydrocarbons at elevated temperatures and pressures: Constraints from mineral buffered laboratory experiments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, 65(10): 1641-1664.
- [29] Seewald J S. Model for the origin of carboxylic acids in basinal brines[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, 65(21): 3779-3789.
- [30] Xiao Y T, Whitaker F, Xu T F, et al. Reactive transport modeling: Applications in subsurface energy and environmental problems[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2018.
- [31] Allen P A, Armitage J J. Cratonic basins[M]//Busby C J, Azor A. Tectonics of sedimentary Basins: Recent advances. Hoboken: Wiley, 2011: 602-620.
- [32] Allen P A, Allen J R. Basin analysis: Principles and application to petroleum play assessment[M]. 3rd ed. Chichester: Wiley-Blackwell, 2013.
- [33] Suppe J. Fluid overpressures and strength of the sedimentary Upper crust[J]. Journal of Structural Geology, 2014, 69: 481-492.
- [34] Davies G R, Smith L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1641-1690.
- [35] Moretti M, Owen G, Tropeano M. Soft-sediment deformation induced by sinkhole activity in shallow marine environments: A fossil example in the Apulian Foreland (southern Italy)[J]. Sedimentary Geology, 2011, 235(3/4): 331-342.
- [36] Richard J, Sizun J P. Pressure solution-fracturing interactions in weakly cohesive carbonate sediments and rocks: Example of the synsedimentary deformation of the Campanian chalk from the Mons Basin (Belgium)[J]. Journal of Structural Geology, 2011, 33(2): 154-168.
- [37] Petracchini L, Antonellini M, Billi A, et al. Fault development through fractured pelagic carbonates of the Cingoli anticline, Italy: Possible analog for subsurface fluid-conductive fractures[J]. Journal of Structural Geology, 2012, 45: 21-37.
- [38] Manganot X, Gasparrini M, Rouchon V, et al. Basin-scale thermal and fluid flow histories revealed by carbonate clumped isotopes ($\Delta 47$) -Middle Jurassic carbonates of the Paris Basin depocentre[J]. Sedimentology, 2018, 65(1): 123-150.
- [39] 李忠, 罗威, 曾冰艳, 等. 盆地多尺度构造驱动的流体-岩石作用及成储效应[J]. 地球科学, 2018, 43(10): 3498-3510. [Li Zhong, Luo Wei, Zeng Bingyan, et al. Fluid-rock interactions and reservoir Formation driven by multiscale structural deformation in Basin evolution[J]. Earth Science, 2018, 43(10): 3498-3510.]
- [40] Chen W, Ghaith A, Partk A, et al. Diagenesis through coupled processes: Modeling approach, self-organization, and implications for exploration[M]//Meshri I D, Ortoleva P J. Prediction of reservoir quality through chemical modeling. Tulsa: AAPG Memoir, 1990: 103-130.

- [41] Bachu S. Flow of Formation waters, aquifer characteristics, and their relation to hydrocarbon accumulations, northern Alberta Basin[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(5): 712-733.
- [42] Kendrick M A, Burgess R, Leach D, et al. Hydrothermal fluid origins in mississippi valley-type ore districts: Combined noble gas (He, Ar, Kr) and halogen (Cl, Br, I) analysis of fluid inclusions from the illinois-kentucky fluorspar district, viburnum trend, and tri-state districts, midcontinent United States[J]. Economic Geology, 2002, 97(3): 453-469.
- [43] Loucks R G. A review of coalesced, collapsed-paleocave systems and associated suprastratal deformation[J]. Acta Carsologica, 2007, 36(1): 121-132.
- [44] Bjørlykke K, Jahren J. Open or closed geochemical systems during diagenesis in sedimentary basins: Constraints on mass transfer during diagenesis and the prediction of porosity in sandstone and carbonate reservoirs[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(12): 2193-2214.
- [45] Surdam Ronald C, Crossey L J, Hagen E S, et al. Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(1): 1-23.
- [46] Worden R H, Benshatwan M S, Potts G J, et al. Basin-scale fluid movement patterns revealed by veins: Wessex Basin, UK[J]. Geofluids, 2016, 16(1): 149-174.
- [47] Cai C F, Hu G Y, Li H X, et al. Origins and fates of H₂S in the Cambrian and Ordovician in Tazhong area: Evidence from sulfur isotopes, fluid inclusions and production data[J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 67: 408-418.
- [48] Alexandrov E N, Kuznetsov N M, Brusova G P, et al. Supercritical fluid state of hydrocarbon-water fluids in a porous medium and optimization of fluid release from pores[J]. Russian Journal of Physical Chemistry B, 2011, 5(8): 1240-1244.
- [49] Miller Q R S, Kaszuba J P, Schaefer H T, et al. Experimental study of organic ligand transport in supercritical CO₂ fluids and impacts to silicate reactivity[J]. Energy Procedia, 2014, 63: 3225-3233.
- [50] Jobe T D, Csutak S, Eichman S L, et al. High-resolution multispectral analysis of organic-rich mudstones[M]//Camp W K, Milliken K L, Taylor K, et al. Mudstone diagenesis: Research perspectives for shale hydrocarbon reservoirs, seals, and source rocks. AAPG Memoir, 2019, 120: 19-32.
- [51] Valentine B J, Hackley P C. Applications of correlative light and electron microscopy (CLEM) to organic matter in the North American shale petroleum systems[M]//Camp W K, Milliken K L, Taylor K, et al. Mudstone diagenesis: Research perspectives for shale hydrocarbon reservoirs, seals, and source rocks. AAPG Memoir, 2019, 120: 1-18.
- [52] Gasparrini M, Morad D, Mangenot X, et al. Dolomite recrystallization revealed by $\Delta 47/\text{U-Pb}$ thermochronometry in the Upper Jurassic Arab Formation, United Arab Emirates[J]. Geology, 2023, 51(5): 471-475.
- [53] Balitsky V S, Pironon J, Penteley S V, et al. Phase states of water-hydrocarbon fluid systems at elevated and high temperatures and pressures: Evidence from experimental data[J]. Doklady Earth Sciences, 2011, 437(1): 383-386.
- [54] Shanley K W, Cluff R M. The evolution of pore-scale fluid-saturation in low-permeability sandstone reservoirs[J]. AAPG Bulletin, 2015, 99(10): 1957-1990.
- [55] Connolly J A D, Podladchikov Y Y. Temperature-dependent viscoelastic compaction and compartmentalization in sedimentary basins[J]. Tectonophysics, 2000, 324(3): 137-168.
- [56] Tigert V, Al-Shaieb Z. Pressure seals: Their diagenetic banding patterns[J]. Earth-Science Reviews, 1990, 29(1/2/3/4): 227-240.
- [57] Laubach S E, Eichhubl P, Hilgers C, et al. Structural diagenesis[J]. Journal of Structural Geology, 2010, 32 (12): 1866-1872.
- [58] 李忠, 王清晨, 王道轩, 等. 晚新生代天山隆升与库车坳陷构造转换的沉积约束[J]. 沉积学报, 2003, 21 (1): 38-45. [Li Zhong, Wang Qingchen, Wang Daoxuan, et al. Depositional record constraints on Late Cenozoic uplift of tianshan and tectonic transformation in Kuqa Depression, West China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(1): 38-45.]
- [59] 中国矿物岩石地球化学学会沉积学专业委员会, 中国地质学会沉积地质专业委员会. 中国沉积学若干领域的回顾与展望: 庆祝《沉积学报》创刊二十周年[J]. 沉积学报, 2003, 21 (1): 1-7. [The Committee of Sedimentology Branch, MPGSC, The Committee of Sedimentary Geology Branch, GSC. Review and prospect for some research fields of sedimentology in China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(1): 1-7.]
- [60] 李忠, 徐建强, 高剑. 盆山系统沉积学—兼论华北和塔里木地区研究实例[J]. 沉积学报, 2013, 31(5): 757-772. [Li Zhong,

Xu Jianqiang, Gao Jian. Basin-range system sedimentology and case studies in North China and Tarim Areas, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(5): 757-772.]

Research Advances and Specific Scientific Issues of Diagenetic Dynamics in Deeply to Ultra-deeply Buried Sedimentary Basins

LI Zhong^{1,2}

1. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: [Significance] Sedimentary diagenesis, or fluid-rock interaction, is an important aspect of basin dynamics, but the related research in deeply to ultra-deeply buried basins has many uncertainties and is still confused; the core scientific and technological issues need to be refined. [Progress] This paper mainly reviews several research fields closely related to diagenetic dynamics with deep to ultra-deep characteristics in oil- and gas-bearing basins. It includes the status of current research and progress in understanding basin types and physical property evolution, fluid activity attributes and effects, diagenetic dynamic regimes, characterization and identification techniques of high-resolution diagenetic records. [Conclusions and prospects] Our thoughts on the research trend of diagenetic dynamics are presented: we believe that the coupling evolution of temperature, pressure/stress, fluid and time is the basic factor controlling the diagenetic evolution of basin-filling materials, and that specific issues such as fluid phase behavior, the evolution of the physical properties of rock, and fluid-rock interaction mechanisms in deeply to ultra-deeply buried diagenetic environments should become the focus of current fundamental research frontiers.

Key words: deeply to ultra-deeply buried basin; fluid-rock interaction; diagenetic dynamics; basin dynamics; oil-gas