

文章编号: 1000-0550(2009) 05-0787-05

沉积成岩作用研究的若干问题

刘宝珺

(中国地质调查局成都地质矿产研究所 成都 610082)

摘要 20 世纪 60 年代由于物理化学动力学的引入和低温低压下矿物相平衡的研究, 沉积成岩作用的研究有了突破性的进展, 有机地球化学大大促进了沉积成岩作用的研究。现在沉积成岩作用的研究已经成为包括大地构造、盆地分析、沉积学、物理化学、有机地球化学等学科、范围包括大、中、小尺度的各种作用的综合研究。

对油气和固体矿产资源的需求促进了沉积成岩作用的深入研究, 石油天然气的形成和聚集、储层性质的变化涉及沉积成岩的全过程; 一些低温低压的层控固体矿物的富集涉及盆地沉积充填、盆山转化的岩相及流体的动力和物理化学行为, 自上世纪 70 年代以来, 研究工作都有重要进展。

近年来有关海洋沉积的研究、硅、锰、碳酸盐等沉积物形成、大地构造背景、同位素、有机物形成演化等的成岩过程的研究都有重要进展, 也成为研究的热点问题。

关键词 沉积成岩作用

作者简介 刘宝珺 男 1931 年出生 研究员 中国科学院院士 沉积地质学 E-mail lijb@cdut.edu.cn

中图分类号 P588.2 **文献标识码** A

1 早期的沉积岩石学研究大多重点放在对各种沉积岩石的描述, 当时的岩石分类也主要是依据沉积岩一般的表面特征, 划分出的岩石类型只能表明其结构、构造、成分等的差别, 不能说明其成因上的差别, 因之岩石类型不具有成因意义^[1, 2]。20 世纪 40—50 年代有人开始采用具有成因意义的碎屑成分对矿岩进行分类, 因而划分的砂岩类别能表示其部分成因(如物源、成熟度、构造状况), 在碎屑岩粒度的划分中考虑了其正态分布性质, 所分出的类型能在一定程度上了解其水动力状况。

20 世纪 50 年代末出现了新的石灰岩分类, 考虑了组成石灰岩的粒屑、灰泥的比例, 分类在一定程度上能说明沉积环境的动力条件, 被视为石灰岩的成因分类。砂岩分类及石灰岩分类的根据不是纯理论性的, 它们是采取了具有成因意义的结构、成分作为标志, 后者是可以度量的, 具有很大的可操作性。可以把这种分类称之为成分成因类型, 或结构成因类型等名称, 在理论和实践上都取得重要的进展。

20 世纪 60 年代初, 沉积学者引进了水力学中的泥沙运动学逐步建立和发展沉积学的理论, 所谓“逐步”是因为当时沉积学所引进的只是涉及牵引流即牛顿流体这一部分。事实上有关非牛顿流体这一部分, 地质学家早在 20 世纪 40 年代末即已经识别出浊流沉积, 只是因它的复杂性, 这方面的研究一直进

展很慢, 所谓“发展”是指水力学家研究的只是流体的动力情况与床沙表面形态变化的关系, 沉积学家的研究则是在一定的地质时间间隔内沉积层系(床沙形体)的变化与水动力条件变化的关系, 即其沉积的动力环境。由于上述研究的进展, 建立了沉积学的理论, 这个理论符合科学逻辑而且在一定程度上自然界的某些沉积现象还可以在实验室内再现。因之, 人们把 20 世纪 60 年代初看成是沉积学重大时期, 即从沉积岩石学转变为沉积学的时期。

但是沉积学家所研究的不应该只是水—沉积物界面上的作用即狭义的沉积作用, 它所经历的时间一般较短。沉积物被埋藏以后要经历很长的地质时间, 会发生很大的和深刻的变化, 即所谓的成岩—后生变化。对这一变化阶段的研究不仅有理论意义而且有很大的实际意义。

2 早期的成岩作用的研究主要是压实和胶结两方面, 使用的方法也主要是传统的矿物岩石学的方法。一般认为沉积物在沉积以后, 随着地质时间的推移, 沉积物逐渐变为固结的岩石, 认为沉积物沉积之后到变质作用之前的作用变化为成岩作用阶段包括了物理的、化学的和生物的各种作用。但是“变质作用”之前如何理解和掌握应给予界定。20 世纪 60 年代初 Pockham 和 Crook 提出以片沸石和浊沸石的出现划分沉积成岩与变质的界限, 获得很多人的支持。

沉积物沉积之后的成岩阶段所发生的变化有物理的、化学的和生物学的,在物理作用方面,重要的就是在沉积物堆积埋藏过程中由于静水压力与孔隙压力相互关系而引起的沉积物(层)的液化作用构造,在 20 世纪 50—60 年代沉积学家识别出了很多液化构造,大大加深和提高了对于重现的形成机理和动力学的认识。1982 年中国的沉积学家首次参加了国际沉积大会(第 10 届),野外观察中看到古老的砾岩重力流沉积,其中特微的泄水构造,对我们认识它是重力流有很大帮助,20 世纪 90 年代贵州平塘县居民在断裂的石块中(二叠纪生物碎屑灰岩)发现有序的汉字,当地称为救星石,引起许多传说。后经国土资源部组织有关专家鉴定,认为是成岩阶段泄水构造,其出现的概率极小。我国华北上寒武统碎屑灰岩(竹叶状灰岩)曾被一些人认为是风暴沉积,最近韩作振等的文章强调了松软状态下沉积物的变形作用,是比较合理的解释。

对于重力流的形成机理来说很重要是研究其液化过程,该密度流的变形剪切力达到其屈服强度,即进入运动状态。我们可以在沉积物(岩)中发现其成因标志,进行判断。触发重力流运动的因素也有不同,地震是其中的一个,但是从沉积物(岩)的特征直接就判断其为地震所造成的“震积岩”,是很困难的。

3 在成岩作用阶段,化学和物理化学的变化非常重要,我们所看到的自生矿物的形成,溶蚀、变化,……等都涉及到化学作用。影响成岩阶段化学变化的条件很多,如温度、压力、溶液成分和浓度, E_h , pH 等。我在过去的一些著作中曾介绍过国内外学者的一些论述。

成岩阶段中没有外来物质的加入,而是本层物质随温度、压力以及 E_h , pH 的变化而重新组合。在后生作用期是有外来物质的加入的,但是所表现出来的矿物组合都应是一定物理化学条件下的稳定矿物相,这方面的研究极其重要。Garrels^[4]是这方面研究的前驱者,他在 1960 年出版的“低温低压下矿物相平衡”以及 1965 年与 Charles Chris 合写的“溶液、矿物和平衡”两部著作中,详细探讨了利用热力学数据建立矿物相稳定图解来解释地质过程中的化学动力学,这些著作阐述了沉积物—溶液作用领域以及一些低温下成岩成矿作用的根本性问题,开启了一个新的研究领域,成为这一领域的经典著作。

我们提出 Garrels 著作的重要意义是因为他的研究在成岩作用的物理化学动力研究的前驱性。事实

上关于成岩阶段某些有用元素富集的地球化学问题曾被很多人研究过,例如与成矿作用有关的各种金属元素结合物的稳定性问题,溶度积与其溶解与沉积规律问题等,都受到矿床学家的重视。但是,有一些矿床学家过度强调物质来源对成矿的主导作用,在一定程度上忽略了环境因素,因之岩浆热液分异(按温度梯度分异)的观点统治了矿床学领域很长的时间。沉积成岩作用的研究也很重视物质来源问题,例如元素化合物要沉淀出来,它在溶液中必须达到它的溶度积。但是沉积成岩作用的研究特别重视成岩(成矿)作用环境的稳定性。成岩阶段的物理化学环境(例如温度 E_h , pH , 氧逸度等)决定了矿物相特征,环境的持续性,表明一直到现在一定矿物组合的长期存在。著名地质学家莱伊说过“只要时间足够长久,任何事情都会发生”。沉积成岩作用的研究人员对此深有体会。Garrels 的贡献则在于他首先在理论上从物理化学动力学阐明了这一地质规律。

20 世纪 70 年代初,成都地质学院部分教师与云南冶金地质部门的地质人员合作,对滇中砂矿岩型铜矿床进行了研究,很好地解释了该矿床成因及规律,这是一个典型的后生的层控矿床,其富集规律非常符合成岩—后生变化的矿物稳定相规律。20 世纪 70—80 年代成都地质矿产研究所和成都地质学院的地质学家与部分省地质局的地质人员在研究编制中国南方岩相古地理图的过程中,研究了许多铜、铅、锌、……等层控矿床,总结出“沉积期后分异作用”的规律,获得同行的认可和采用。

成岩作用中的物理化学变化可以解释许多地质现象,例如,碳酸盐岩石中的燧石结核成因问题;石英矿岩中石英屑颗粒接触呈点一点状至线状至凹凸状,而成为石英岩;一些结核的形成问题,都曾经以微区的物理化学环境变化解释。张善文最近研究了山东东营油田储层在成岩过程的“耗水作用”,并做了详细的理论计算,把这一作用与油的富集联系起来也是很有意义的研究。

4 20 世纪 70—80 年代,我国曾出现了沉积学和岩相古地理研究热潮,这是由于沉积学的原理在地质调查以及油气和一些固体矿产勘探中得到合理的利用,并取得很好效果的缘故。在我国许多铜、铅、锌等层控矿床研究之后,发现了一些有意义的规律。例如铀等一些后生层控矿床不仅仅是有一定层位,而且受一定岩相控制。这是一个有趣的现象,即后生的胶状和交代的“热液”型矿床为什么会受原生的沉积环境

(岩相)控制。这引起了当时的一些中国沉积学家的研究兴趣,对此问题矿床学家没有给予注意,而沉积学家进行了深入研究。沉积学家既研究原生的沉积时期的环境(即岩相),又研究沉积物沉积以后的成岩—后生期的全过程,包括这时期的所有物理、化学以及生物化学的所有变化,沉积学家有可能解决这个问题。我国的高校、科学院、冶金地质和煤田地质部门,石油地质部门众多地质学家多年的工作,已经积累了大量我国各地的岩相古地理资料,尤其是因为我国有类型繁多的大量层控型金属和非金属矿床,很多都已经勘探,因此我国有条件在这方面的研究取得重要进展,总结出“构造控盆,盆控岩相,岩相控矿”的重要规律。

沉积物在沉积埋藏以后,由于环境的改变,会发生很大的变化。沉积物(岩)在成分、结构、构造等特征上都可以有很大的改变,这些变化的机制可以是物理的、化学的和有机化学的。随着沉积物的沉积和埋藏,有大量的生物和微生物一起沉积和埋藏下来,在显生宙以后更为明显,特别是微生物更为重要。据研究当今世界上微生物占生物界的 95% 以上。生物物质沉积埋藏后发生分解、裂解,最后可以形成煤炭和石油天然气,也可以和金属元素结合而形成有机络合物,在沉积层中运移或沉淀富集成矿这一过程贯穿于整个沉积成岩过程。

事实上,在 20 世纪 60 年代,就已经注意到所谓低温、压的热液矿床(有人称之为侧分泌矿床)金属元素的搬运与富集与高盐度的卤水有关,后来证明很多金属是有机络合物或整合物搬运的,因此在低温低压的层控矿床的研究中增加了一个重要的内容即在成岩过程中有机质的变化与成矿物质的迁移和富集的问题。虽然这个总是很重要,但是矿床学家还没有做出很出色的成果来。而石油地质学家、有机地球化学专家则不仅在关于油气生成方面而且在成岩后生期有机物如何影响储层的物性方面做出了很好的研究。

5 由于对能源资源勘探需要,一些矿床学家比较重视地质构造和物源的研究,而对沉积成岩及后生作用的地球化学和有机地球化学研究较少。一些沉积学家对沉积成岩过程做了大量深入研究,由于实验室测试手段的进步,近 20~30 年来已经积累了大量有关研究资料,也突显出在沉积成岩变化的全过程中地球化学研究的重要性。Mackenzie^[5]在其最近出版《沉积物、成岩作用和沉积岩》的著作中举出了几个重要

的进展问题,总结了沉积物和沉积岩石最新的化学、矿物学和同位素研究成果,以及应用这些成果解释沉积物的形成环境和地质历史中海洋—大气圈系统的性质。

对于沉积物—成岩—沉积岩变化过程长期以来比较受关注的地球化学方面的问题有硅质的溶解、沉淀及硅质物的形成、地质历史中形成硅质演化的环境;碳酸盐沉积的形成环境问题;铁、锰矿物的形成环境;有机物质的形成和演化,它的降解产物和伴随有机物质沉积的元素特征;海相沉积物中还原硫酸盐细菌的作用;沉积物和沉积岩的定年问题;沉积物(岩)的同位素研究,以及从大地构造背景来研究沉积过程、沉积旋回,海洋—大气圈系统等方面的问题。

Bill Martin 等(2008)提出,根据物质平衡的原理,只有少量的有机质和蛋白石在海底早期成岩作用保存下来,能够以之计算沉积速率,铝与蛋白石结合及从蛋白石溶出 H_4SiO_4 的再沉淀而形成新生矿物的作用都凸显出二氧化硅循环的重要性。Demaster 的研究指明,显生宙放射虫和硅藻的出现改变了非晶质二氧化硅的沉积方式,而且沉积位置从浅水陆棚迁移到深水区域。他指出生物成因的二氧化硅埋深到几米到几千米,在较高的温度和压力下,生物成因的二氧化硅从非晶蛋白石-A 转变为蛋白石-CT,最终形成微晶石英。Peny 和 Leftcariu 认为溶液中沉淀的燧石可以保存同生海水或图解氧同位素特征,因之能够反映介质的温度,研究了 1 900~2 400 Ma 的燧石的同位素温度表明,当时地球表面的温度可能高达 64°C,而太古代古老的燧石氧同位素表明当时的温度高达 90°C。

John Morse(2006)讨论了深水碳酸盐岩和浅水碳酸盐岩的来源和早期成岩作用,一个不断争论的问题就是深海碳酸盐沉积与上覆水体碳酸盐钙饱和状态之间的关系。新的研究结果对长期以来建立起来的海水化学与碳酸盐沉积间的耦合关系提出了挑战,Millman 等提出大量的方解石的溶解作用(60%~80%)发生海水上部 500~1 000 m,刚好在化学溶跃面之上。在此深度范围内,有机质的溶解以及由生物造成的有机氧化作用过程都已经比较清楚了。

对于白云岩的形成问题,过去流行的看法是白云岩形成于成岩期或以后,不存在原生的白云岩。然而古代大量的层状白云岩是否有可能为原生沉积,尚存在争论。由于白云岩形成于很高的离子场的条件,因之有人认为古代层状白云岩的形成环境应是比现

代海水高得多的 Mg^{2+}/Ca^{2+} 的海水环境。Morse 指出有一些因素 (不是 Mg^{2+}/Ca^{2+}) 也会影响到白云岩的形成, 例如在细菌作用下, 造成孔隙水中硫酸盐的消耗和碱的增长 (在饱和状态的增长), 对白云岩的形成也会起一定的作用。1982 年我们在加拿大东部看到的层状深海原生白云岩也可能属于这种成因的。

6 我国的地质学家自 20 世纪 70 年代就十分重视沉积学和岩相古地理的研究, 结合能源矿产和固体矿产的勘探, 总结出“构造控盆、盆控相、相控矿 (流体)”的重要规律, 盆地的类型与大地构造背景有密切关系, 不同类型的盆地发育了不同的岩相组合, 流体是整个地质过程中最活跃的因素, 它的作用贯穿了从沉积、成岩至后生阶段的全过程, 所谓的“控”实际上是指地质的不同尺度情况下流体的行为。

盆地尺度的成岩作用是盆地动力学的重要组成部分, 无论是碎屑岩还是碳酸盐岩, 其成岩过程显著受盆地演化各种因素的控制, 如应力场、热力场、海平面的变化, 盆地沉降速率以及断层的活动等。充填盆地的地层、岩相和沉积物的性质也是很重要的因素, 沉积物的组成成分直接控制成岩作用的样式, 沉积盆地的演化控制沉积埋藏后成岩流体性质, 可使成岩流体在大气水压实水和承压水之间转化, 从而制约流体的流动方式、流体性质和相应的成岩自生矿物的沉淀机制。李忠^[3]曾列举了研究的热点问题, 例如盆地中是否有在大尺度的对流活动影响成岩作用, 流体活动是短期的突发事件还是长期缓慢的渐变过程, 这种作用的形成主要受哪些因素制约。有人从质量平衡计算和流体场模拟的研究指出, 盆地沉降过程中压实水流动非常缓慢, 不可能引起有意义的温度场扰动和成岩成矿作用 (Bethke 1985, Aplin *et al.*, 1993, Peterson *et al.*, 1994)。我在前面曾引用莱伊尔的名言, 说明变化的可能性, 关键在于地质环境的稳定性, 即有利矿物相平衡的物理化学环境能持续多久。

愈来愈多的研究证明, 沉积成岩作用的研究涉及到许多重大的基础性的问题, 由地质构造、大地构造、盆地性质到沉积及埋藏以后的全过程, 涉及物理的、化学的和生物化学的诸方面, 因此有关成岩作用的研究要从不同尺度来考虑, 把流体置于大地构造格架、盆地类型、沉积环境中研究成岩作用是非常重要的。20 世纪 90 年代我国的地质、石油、矿床部门, 中科院和高校的部分地质人员组织起来对我国部分地区的盆山转换、盆山耦合过程流体的性质、动力学及成矿作用进行了研究, 由于此前已经对我国一些盆地、岩

相等做了较好的研究, 有一定的基础, 因此在流体的研究方面也取得了较好的成果。

大尺度的成岩作用的研究涉及许多地球演化的问题, 例如地质历史中 5 次大的绝灭事件的地球化学; 事件中反映环境性质的元素、碳、硫、锶和氧同位素的变化; 大洋缺氧事件等。由于在油田勘探中大量使用了层序地层学的方法, 同时也注意了成岩作用的研究, 层序地层建立了海平面变化与大尺度岩相一同生孔隙水分布的时空关系, 海平面和潜水面升降可导致相关的暴露和淋滤作用, 这为探讨沉积物的区域埋藏成岩作用和储层孔隙预测提供了可能。相当于中等尺度的成岩相的研究最近在一些油田地质工作中也进行了探索。

近年来, 成岩作用的区域性甚至全球性受到人们的注意, 例如 Primmer 等^[6]关于砂岩成岩作用的全球模式的论述。他们在全世界范围的碎屑岩中观察到 5 种常见的重复出现的成岩自生矿物组合: 石英与少量粘土矿物组合、粘土矿物与少量石英或沸石、晚成岩碳酸盐组合, 早成岩期粘土包膜组合, 早成岩碳酸盐或蒸发岩胶结物组合, 以及沸石、粘土矿物和晚成岩亚铁碳酸盐组合。

7 沉积成岩作用是沉积物转变为沉积岩的重要阶段, 它从沉积作用开始到变质以前经历了复杂的变化。早期的研究仅限于矿物和岩石学的一般研究, 20 世纪 60 年代由于物理化学动力学和低温、压条件下矿物相平衡理论的引入, 使沉积成岩作用的研究有了突破性的进展, 以后由于生物化学和有机地球化学的引入, 沉积成岩作用的研究又更上了一个台阶。到现在沉积成岩作用的研究已经成为包括大地构造、盆地分析、沉积学、有机地球化学等学科范围也从大尺度到小尺度各种作用的综合研究。

沉积成岩作用研究的进展与沉积学的发展类似, 相关学科理论的引进也促进该学科突破性的进步, 这种情况很多, 例如板块学说促进了活动论古地理的研究, 但是造山带古地理图的编制要困难得多, 最近由于引进了新的大地构造相的理论而得到解决。因此我们需要注意引进相关学科的理论和方法, 才能使我们的工作不断进步。

沉积成岩作用研究的进步要特别提出石油地质方面的工作。关于石油、天然气的形成和聚集的问题, 要求非常详细和深入的沉积成岩方面的研究, 其实现有的关于沉积成岩作用的研究, 特别是有关的有机地球化学的研究, 大多是石油地质学家做出的。本

文是作者从沉积学家的角度, 选择个人比较熟悉的几个有关的问题进行讨论, 谈一点粗浅的看法, 目的只是引起同行们对于沉积成岩作用的注意。

参考文献 (References)

- 1 刘宝珺. 沉积岩石学 [M]. 北京: 地质出版社, 1980
- 2 刘宝珺, 张锦泉. 沉积成岩作用 [M]. 北京: 科学出版社, 1992
- 3 李忠. 沉积盆地大尺度成岩作用研究 [J]. 地学前缘, 1998

- 4 Garrels R M, Christ C L. Solution Minerals and Equilibria [M]. New York: Harper & Row, 1965
- 5 Mackenzie F T. Sediments Diagenesis and Sedimentary Rocks [M]. Treatise on Geochemistry. Elsevier, 2006
- 6 Primmer T J *et al*. Global Patterns in Sandstone Diagenesis [C] // Kucpecz J A, *et al*. ed. Reservoir Quality Prediction in Sandstone and Carbonates. AAPG, Tulsa, 1997

Some Problems on the Study of Sedimentary Diagenesis

LIU Bao-jun

(Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Bureau of Geological Survey, Chengdu 610082)

Abstract In 1960s of the last century, due to the introduction of physicochemical kinetics and facies equilibrium of minerals under low temperature and low pressure conditions, the study on sedimentary diagenesis has achieved obvious breakthroughs and advances; in the meantime, the organic geochemistry also enhanced the research on the sedimentary diagenesis. At present, the study on the sedimentary diagenesis has become the integrated research with wide scales and multi disciplines including tectonics, basin analysis, sedimentology, physiochemistry and organic geochemistry and so on. The great demands on petroleum and solid mineral resources have provided the impetus to the deep research on the sedimentary diagenesis. And the geological processes such as petroleum formation and accumulation, variation of reservoir properties are all involved in the sedimentary diagenesis; the enrichment of some stratigraphically-controlled mineral deposits is related to the basin fillings, conversion of basin-mountain lithofacies as well as dynamics of fluid flow and physicochemical behavior. Since 1970s, all these researches have gained considerable achievements. In recent years, investigations on the diagenetic processes relevant to marine sedimentation, silicon, Mn and carbonate sediments, tectonic background, isotopes, organism evolution have also gotten important advances and become hotspots in these fields.

Key words sedimentary diagenesis