

国家自然科学基金重点项目低温地球化学研究(49133080)资助课题

沉积物埋藏成岩过程中活性元素 低温地球化学行为研究

倪师军等 著

四川科学技术出版社

内 容 提 要

本书以江汉盆地拖市油田下第三系新沟嘴组下段沉积物为研究对象,采用了一套从地质学定性、热力学定量、动力学模拟、综合建模的技术路线,重点研究了沉积物在埋藏成岩过程中活性元素的低温地球化学行为。

全书共12章,其中1~5章系统地阐述了研究区域的地质背景、沉积物的岩石学特征及成岩作用类型,划分了成岩阶段,确定了成岩序列,并在此基础上定性地分析了活性元素的低温地球化学行为;6~9章研究了沉积物成岩作用发生的物理化学环境,通过分析测试与计算获得一批成岩流体的物理化学参数,在此基础上进行了“流体—矿物反应”的热力学定量计算与动力学模拟;10~12章建立了活性元素低温地球化学演化模式,探讨了成岩演化对储层物性的影响。

本书可供从事地球化学和油气藏地质研究的科技工作者及研究生参考。

序

近年来,国内外学者开始重视利用低温地球化学原理和手段来研究沉积物的埋藏成岩作用。值得注意的是研究进展出现了不平衡性。一方面,在成岩作用的物理化学(温度、压力、成分等)、成岩过程中的矿物相转变及成岩矿物与孔隙水的稳定同位素交换等方面的研究工作进展较快,研究程度较高。另一方面,尽管沉积物埋藏、成岩和浅变质作用过程中元素的地球化学行为在低温地球化学研究领域居重要地位,但是在该方面国内外研究进展缓慢,目前还未见有系统性的研究成果。前者进展较快令人欣慰,后者进展缓慢不能不说是一种缺憾。出现这种缺憾的一条重要原因是元素低温地球化学行为研究难度很大,需要开拓性地进行探索。所以,《沉积物埋藏成岩过程中活性元素低温地球化学行为研究》一书首先在我国出版发行是非常令人高兴的事情,说明我国在该研究领域已先行一步。在国家自然科学基金重点项目资助下,该书作者们摸索出一条行之有效的技术路线,即采用地质学定性、热力学定量、动力学模拟、综合建模的研究流程来研究活性元素低温地球化学行为,得出了成岩流体的性质及其演化是控制活性元素低温地球化学行为的主导因素的初步结论。目前国内外文献中还未见到这种系统的研究思路和有关结论。可以说,该书的出版,在低温过程元素地球化学行为研究领域迈出了可喜的第一步,对丰富低温地球化学理论有较大的现实意义。我祝愿该书的出版将推动我国今后的元素低温地球化学行为研究取得更大成就。

徐克勤

1996年5月11日

目 次

| | |
|-------------------|------|
| 前 言 | (1) |
| 第一章 国内外动态、研究思路和流程 | (4) |
| 第一节 国内外研究动态 | (4) |
| 第二节 研究思路 | (6) |
| 一、研究重点 | (6) |
| 二、研究思路 | (6) |
| 第三节 研究流程 | (8) |
| 第二章 地质背景 | (9) |
| 第一节 构造 | (9) |
| 第二节 地层 | (10) |
| 第三节 地质演化 | (11) |
| 第三章 岩石学特征 | (13) |
| 第一节 砂岩 | (13) |
| 一、物质成分 | (13) |
| (一)碎屑成分 | (13) |
| (二)填隙物成分 | (13) |
| (三)成分成熟度 | (14) |
| 二、结构特征 | (15) |
| (一)碎屑颗粒的结构 | (15) |
| (二)填隙物的结构 | (15) |
| (三)组构 | (15) |
| (四)孔隙结构 | (16) |
| (五)结构成熟度 | (17) |
| 第二节 泥岩 | (17) |
| 第四章 沉积物的埋藏成岩作用 | (18) |
| 第一节 成岩作用 | (18) |
| 一、机械压实作用 | (18) |
| 二、碎屑组分的成岩转变作用 | (18) |
| 三、有机质成熟作用 | (18) |
| 四、粘土矿物的成岩转化作用 | (19) |
| 五、长石、石英的溶蚀作用 | (19) |
| 六、长石、石英的次生加大作用 | (20) |
| 七、碳酸盐的沉淀和溶解作用 | (21) |
| 八、硬石膏及绿泥石的胶结作用 | (21) |

| | | |
|------------|-------------------------------|-------------|
| 第二节 | 砂岩的成岩阶段划分 | (22) |
| 第三节 | 砂岩的成岩序列 | (22) |
| 第五章 | 活性元素低温地球化学行为定性分析 | (24) |
| 第一节 | 泥岩中硬石膏的期次及成分变化 | (24) |
| 第二节 | 泥岩及砂岩的微量元素地球化学 | (27) |
| 第三节 | 活性元素地球化学行为 | (28) |
| 一、 | 准同生成岩阶段 | (28) |
| 二、 | 早期成岩阶段 | (28) |
| 三、 | 晚期成岩 A 亚阶段 | (29) |
| 四、 | 晚期成岩 B 亚阶段 | (29) |
| 五、 | 后生成岩阶段 | (30) |
| 第六章 | 成岩温度场与压力场研究 | (32) |
| 第一节 | 成岩温度场 | (32) |
| 一、 | 现代地温场特征 | (32) |
| 二、 | 古代地温场恢复 | (33) |
| (一) | 国内外现状 | (33) |
| (二) | 方法原理及测试结果 | (34) |
| (三) | 古地温场计算 | (34) |
| 三、 | 地温场研究的地质意义 | (35) |
| (一) | 受热历史与构造活动的关系 | (35) |
| (二) | 受热历史与成岩演化的关系 | (38) |
| (三) | 受热历史与沉积环境的关系 | (38) |
| 第二节 | 成岩压力场 | (39) |
| 一、 | 成岩内压的实测 | (39) |
| 二、 | 成岩外压分析 | (39) |
| 第七章 | 成岩流体研究 | (41) |
| 第一节 | 现代流体 | (41) |
| 一、 | 现代流体的成分和离子活度 | (41) |
| 二、 | 现代流体的 pH 值和 Eh 值等物理化学参数 | (42) |
| 第二节 | 古流体 | (43) |
| 一、 | 古流体成分 | (43) |
| 二、 | 古流体中各种离子活度 | (44) |
| 三、 | 古流体的 pH 值和 Eh 值 | (45) |
| (一) | pH 值 | (45) |
| (二) | MpH 值 | (46) |
| (三) | Eh 值 | (46) |
| 第八章 | 流体—矿物反应的热力学分析 | (47) |
| 第一节 | 古流体与硫(碳)酸盐矿物的相平衡 | (47) |
| 第二节 | 古流体与硅酸盐矿物的化学反应 | (47) |

| | |
|---------------------------------|-------------|
| 第三节 现代流体与硫(碳)酸盐矿物的相平衡 | (50) |
| 第九章 流体-矿物反应的动力学研究 | (52) |
| 第一节 流体-矿物反应的动力学模型 | (52) |
| 第二节 流体-矿物反应的动力学速率 | (53) |
| 第三节 流体-矿物反应的动力学模型的求解方法 | (55) |
| 第四节 成岩过程中流体-矿物反应的动力学数值模拟 | (56) |
| 第五节 计算程序的编制 | (59) |
| 第六节 模拟结果讨论 | (60) |
| 第十章 活性元素低温地球化学演化模式 | (65) |
| 第一节 盐环境成岩模式 | (65) |
| 一、成岩模式分析 | (65) |
| 二、盐湖环境成岩模式 | (65) |
| 第二节 活性元素低温地球化学演化模式 | (66) |
| 第十一章 成岩演化对储层物性的影响 | (68) |
| 第一节 特殊岩心分析与储层物性分类 | (68) |
| 一、特殊岩心分析 | (68) |
| 二、储层物性分类评价 | (69) |
| (一)有利储集岩 | (69) |
| (二)不利储集岩 | (70) |
| (三)非储层 | (70) |
| 第二节 裂缝在膏岩成岩过程中的作用 | (70) |
| 一、裂缝充填物热释光分析 | (70) |
| 二、裂缝充填物中子活化分析 | (71) |
| 第三节 孔隙演化与储层物性评价 | (72) |
| 一、储层孔隙演化 | (72) |
| (一)早期孔隙水阶段 | (72) |
| (二)中期孔隙水阶段 | (72) |
| (三)晚期孔隙水阶段 | (72) |
| 二、储层物性评价 | (73) |
| (一)沉积条件 | (73) |
| (二)构造部位与裂缝系统 | (73) |
| (三)古物化环境 | (73) |
| (四)断裂分布及 R_s 分布 | (73) |
| 第十二章 结束语 | (74) |
| Abstract | (75) |
| 图版说明 | (76) |
| 参考文献 | (77) |

前 言

低温地质作用或低温地球化学研究在过去未曾引起人们的重视,近些年来在贵金属矿床成矿作用和地球化学研究中发现,过去认为只有在高、中温条件下才呈现很强的活动性的元素在低温条件下同样表现出活泼的特性。大量矿床的矿物组合、元素组合、围岩蚀变、成矿流体特征和现代热泉等方面的研究表明,传统观念中被认为在低温条件下不活泼的元素在 200 C 以下照样可以活化、迁移和富集成矿。除已知的 Hg、Sb 和 As 等元素外,Au、Ag、U、Cu、Pb、Zn、Ge 和 Cd 等亦可以在低温条件下形成工业矿床,甚至过去认为只有在高温条件下才可能成矿的稀土元素及铂族元素也可以在低温条件下成矿。某些非金属矿床,如水晶、萤石、冰洲石及重晶石等多数也在低温条件下形成。尽管 1989 年在美国华盛顿召开的第 28 届国际地质大会和 1992 年在日本京都召开的第 29 届国际地质大会上已有了研究低温地球化学的文章,但是目前在低温成矿作用、低温条件下的元素地球化学性质和低温地球化学实验等方面研究相当薄弱。国内外地学界还未把低温地球化学研究提到应有的高度上。

由此看来,在我国率先开展低温地球化学研究是极其必要的,是占领学科发展前沿阵地重要的一步。1990 年 11 月在中国科学院地球化学研究所召开了“全国矿床地质、矿床地球化学理论与方法学术讨论会”,在会议上涂光炽院士对低温地球化学作了精辟的论述并提出了今后的研究方向。国家自然科学基金委员会 1992 年将低温地球化学列为重点项目(49133080)。该项目由涂光炽院士负责,由中国科学院地球化学研究所组织力量进行研究,主要由以下研究内容组成:(1)200 C 以下 Au、Ag 和 REE 等元素的溶解、迁移、沉淀或结晶富集条件与规律的实验;(2)200 C 以下开放体系的水岩相互作用机制;(3)某些低温矿床的地球化学研究;(4)沉积物理藏、成岩和浅变质作用过程中元素的地球化学行为。本专著成果取自第四部分研究内容。

近年来,国内外有人开始重视利用地球化学原理和手段来研究沉积物的埋藏成岩作用。研究内容主要有下列四个方面:

- (1)成岩温度的研究;
- (2)成岩矿物的研究;
- (3)同位素研究;
- (4)成岩过程中某些元素活动性研究。

目前,前三个方面的研究工作进展较快,研究程度较高,最后一个方面却只见少数零散的文献,且研究程度也较低。有鉴于此,本文选择江汉盆地拖市油田沉积物理藏成岩过程中活性元素地球化学行为作为研究对象,试图通过揭示元素在成岩过程中地球化学演化规律,来丰富和发展低温地球化学的内容。

江汉盆地位于湖北省中南部,在大地构造上隶属于扬子准地台,它是燕山运动后发育起来的中新生代内陆含油盐湖盆地,面积约 2.8 万 km²。基底为前白垩系,其上发育了白垩系 第四系,其中以第三系最为发育。由于下第三系新沟嘴组下段是拖市油田的主要工业储层,所以其研究程度较高。1990 年至 1992 年期间,罗蛰潭教授(负责人)和倪师军博士等人承担了江汉石油管理局的科研课题“江汉油田拖市地区低渗透储层特征研究”。该课题主要研究江汉盆地拖市油田下第三系新沟嘴组下段工业储层特征,其成果获 1993 年成都理工学院科技成果一

等奖和地质矿产部科技成果三等奖。该项研究表明,下第三系新沟嘴组下段泥岩和砂岩的成岩作用过程中矿物变化明显,活性元素地球化学行为突出,是沉积物埋藏成岩过程中活性元素地球化学行为的理想研究对象。在上述研究基础上,倪师军等人承担的国家自然科学基金课题“江汉盆地沉积物埋藏成岩过程活性元素低温地球化学行为”以江汉油田下第三系新沟嘴组下段沉积物为研究对象,着重讨论沉积物埋藏成岩过程中活性元素的低温地球化学行为。

沉积物在埋藏成岩作用这一低温地质作用过程中,由于流体—沉积物的相互作用,原生矿物发生溶解、交代、重结晶及次生胶结作用,一些元素(如 K、Na、Ca、Mg、Al、Si、S、C 等)较活泼地发生活化、迁移和再分配,我们把这些活动性较强的元素称之为活性元素。活性元素在成岩过程中的地球化学行为可以在不同成岩阶段、不同层位、不同岩石和矿物中的含量得到定性的显示,也可以采用平衡或局域平衡过程中的热力学计算定量预测其变化方向。对于活性元素在流体和矿物之间的动态变化过程的模拟;还可以从质量迁移—化学反应的连续方程出发,建立流体—矿物反应的动力学模型,并运用反应速率定律,采取准稳定态近似法有效地进行数值模拟。总之,对活性元素在沉积物埋藏成岩过程中的地球化学行为的描述,可以采用一套从地质学定性、热力学定量、动力学模拟、综合建模的研究流程来实现。国家自然科学基金课题“江汉盆地沉积物埋藏成岩过程活性元素低温地球化学行为”就是遵循这样一条技术路线而开展研究工作的。

国家自然科学基金课题“江汉盆地沉积物埋藏成岩过程活性元素低温地球化学行为”研究的主要进展在于:

(1) 对沉积物埋藏成岩过程中活性元素低温地球化学行为研究,摸索出一条行之有效的技术路线,即可以采用一套从地质学定性、热力学定量、动力学模拟、综合建模的研究流程来实现。

(2) 在地质学定性研究基础上,对流体—矿物反应进行了热力学计算,采用平衡或局域平衡过程中的热力学计算定量预测活性元素低温地球化学行为。

(3) 建立了流体—矿物反应的动力学模型并进行动力学模拟,对沉积物埋藏成岩过程中活性元素低温地球化学行为作了定量分析。

(4) 建立了描述沉积物埋藏成岩过程中活性元素低温地球化学行为的综合模式。

(5) 研究发现,成岩流体的性质发生变化时,成岩矿物必然发生相应变化;成岩矿物的变化又导致了活性元素的活化、迁移和再分配。因此,成岩流体的性质及其演化是控制活性元素低温地球化学行为的主导因素。

(6) 成岩温度对成岩流体的性质和演化有很大程度的控制作用,从而可以建立成岩温度与活性元素低温地球化学行为的联系。

值得说明的是,1992年1月至1993年5月,国家自然科学基金课题“江汉盆地沉积物埋藏成岩过程活性元素低温地球化学行为”研究主要在中国科学院地球化学研究所进行,课题组成员有倪师军、杨卫东、刘莉;1993年5月倪师军博士后出站,从中国科学院地球化学研究所分配到成都理工学院工作,该课题转入成都理工学院进行研究,课题组成员增加了唐建武、金景福。由于该项国家自然科学基金课题是在“江汉油田拖市地区低渗透储层特征研究”课题基础上进行的,本专著内容以国家自然科学基金课题“江汉盆地沉积物埋藏成岩过程活性元素低温地球化学行为”为主,也包括了“江汉油田拖市地区低渗透储层特征研究”课题部分内容。罗雨田、刘丽华、王绪本、李素娥、贺其川等不同程度地参与了专著的编写工作。

倪师军负责专著编写大纲拟定、专著统稿和最后定稿。金景福、杨卫东负责修改初稿,唐建武负责文字录入和加工排版,荆晓梅负责英文翻译和校对工作。各章节编写执笔人员分工如下:

- 前言(倪师军);
- 第一章(倪师军);
- 第二章(唐建武、罗两田、李素斌);
- 第三章(刘丽华、唐建武、贺其川、杨卫东);
- 第四章(唐建武、刘丽华、杨卫东、倪师军);
- 第五章(唐建武、倪师军);
- 第六章(王绪本);
- 第七章(倪师军);
- 第八章(倪师军);
- 第九章(唐建武);
- 第十章(倪师军、杨卫东、唐建武);
- 第十一章(王绪本、倪师军、罗两田);
- 第十二章(唐建武、金景福、刘莉);
- Abstract(荆晓梅、杨卫东)。

国家自然科学基金重点项目(49133080)负责人、中国科学院地学部主任涂光炽院士对本课题研究给予了精心指导,并欣然为本书作序;中国科学院地球化学研究所所长谢鸿森研究员大力支持本课题研究并资助本书的出版;欧阳自远院士、高振敏研究员、李朝阳研究员、王中刚研究员、王兴理副研究员、罗蛰潭教授、戴世昭局长、罗扬棣院长和韩定荣总工等对该课题研究提供了热情帮助;中国科学院地球化学研究所、中国科学院矿床地球化学开放研究实验室、成都理工学院、江汉石油管理局和四川省地学核技术应用开发重点实验室等单位提供了很好的工作条件,借此书出版机会一一表示感谢!

作 者

1996年3月草于成都理工学院

1996年4月定稿于中国科学院地球化学研究所

第一章 国内外动态、研究思路和流程

第一节 国内外研究动态

低温地球化学研究是当前国际上地球化学学科的前沿课题之一,它研究自然界中 200℃ 以下化学元素的活化、迁移和富集规律。低温地球化学的原理和方法在研究地球表面和浅表层的地质作用时非常有用。它不仅在成矿作用方面,而且在地质灾害、环境变迁和生命活动方面都有广阔的研究前景。工程地球化学、环境地球化学和农业地质等新兴学科都与低温地球化学有密切的关系。目前,低温地球化学领域的研究程度在国内外还十分薄弱。长期以来国内外矿床学家、沉积学家和地球化学家只注意中—高温(>200℃)阶段的金属元素迁移、活化、富集作用,很少注意它们在低温(大致 100~200℃)阶段的地球化学行为。过去大量的成岩成矿实验、热力学实验、元素活化迁移模拟实验等都在高于 200℃ 条件下进行的,人们还不大重视 200℃ 以下条件的矿床地球化学、地球化学实验等研究工作。对于低温过程中元素地球化学行为的研究则更是薄弱。

近年来,国内外学者开始重视利用地球化学原理和手段来研究沉积物的埋藏成岩作用和低温浅变质作用。主要研究内容有下列四个方面。

1. 成岩温度的研究

主要利用矿物流体包裹体分析测试来研究成岩温度并解决石油地质、有机地球化学方面的若干问题(李本超和黄伟林,1990)。Burrus 等人论述了沉积成岩作用中有机包裹体的研究。通过沉积岩裂隙充填物内矿物中包裹体的均一温度测试,可以估算产生裂隙时的古温度梯度和地层厚度,结合成岩作用和构造,可以恢复沉积盆地的发展历史(Burrus, 1981; Narr and Burrus, 1982; Aulstead and Spencer, 1985; Ni Shijun et al., 1994)。Mclimans(1987)测定了与有机包裹体共生的水溶液包裹体的均一温度,根据有关的 $P-V-T$ 相图求出了阿拉伯海湾拜特弗特油田石油生成和运移环境的温度、压力和深度。Mclimans(1987)还根据有机包裹体的分布特征,推断出英国威尔顿盆地的石油是从东部运移来的。从不同成岩阶段形成的包裹体特征和有机包裹体产状,结合地层的埋藏历史,还可以推断出油气运移的时间。利用成岩温度推断油气运移的时间和方向,从而指明油气勘探的方向。生油岩在成岩后生作用过程中形成的自生矿物的包裹体均一温度,能直接而准确地反映出生油岩有机质的成熟度,而有机包裹体的类型、成分特征可以直观地反映出油气的演化程度(施继锡等, 1987; 李本超, 1988)。此外, Tilley and Longstaffe(1989)以及倪师军等人(1993)对沉积盆地沉积物理藏成岩作用过程中孔隙充填的矿物中有机包裹体或水溶液包裹体均一温度的测定也是这方面成功的实例。

2. 成岩矿物的研究

在沉积物理藏成岩过程中,尤其在泥质物的压实、脱水和固结成岩过程中,发生一系列的矿物相转化等地质作用。成岩作用导致的粘土矿物变化常是人们注意的对象。随成岩作用的演化,常发生有蒙脱石→无序混层矿物→有序伊/蒙混层矿物→伊利石的变化。这方面的研究

较多,例如 Lanson and Champion(1991)研究了晚期成岩阶段的伊/蒙混层矿物向伊利石矿物的转变作用。也有对其它矿物进行研究的例子,如 James(1988)对白云石的方解石化(去白云石化)和方解石的白云石化作了热力学和动力学描述。

3. 稳定同位素研究

关于低温过程中的稳定同位素地球化学研究,主要在以下几个方面取得重要进展(于津生,1990):

(1)成岩矿物的同位素组成与孔隙水的演化

大部分研究都是通过成岩矿物的 O、H、C、S 稳定同位素来揭示成岩环境信息,尤其是成岩温度和孔隙水演化信息。例如,Anderson 和 Schneidermann(1973)对加勒比海中部深海钻孔岩心中白垩纪石灰岩的研究为深海环境中的固结作用提供了十分有用的资料。Tucker(1982)对加州东部前寒武纪贝克斯普林白云岩中各种沉积和成岩分选组分的碳氧同位素相关分析指示了沉积成岩变化趋势;Logstaffe and Ayalon(1987)对加拿大阿尔伯达省中西部下白垩统碎屑岩建造的氧同位素组成的测定,为研究成岩矿物的同位素组成和孔隙水演化提供了实例;Sucki and Land(1983)研究了加州北部大峡谷泥岩中成岩矿物的氧同位素组成在埋藏变质过程中与孔隙水的平衡关系。

(2)海洋历史的氧同位素信息

海洋沉积物(碳酸盐、燧石、磷酸盐和海绿石)的 $\delta^{18}\text{O}$ 值随年龄增长而普遍下降,这是稳定同位素地球化学中的一个引起人们高度重视的课题。这个问题的解决对研究沉积作用、古生态学、前寒武纪气候和海水与洋壳之间的相互作用等都有意义深远的影响(于津生,1990)。近年来,人们已从以下一些主要方面进行了探索和研究,即低温蚀变和风化过程中的氧同位素交换(Muehlenbachs, 1987)、现代和古洋壳氧同位素的启示(Alt et al., 1986; Gregory and Taylor, 1981; Bowers and Taylor Jr., 1985; Veizre et al., 1986)、海洋的氧同位素平衡(Bowers and Taylor Jr., 1985; Muehlenbachs and Clayton, 1976; Holland, 1984)和磷酸盐氧同位素保存性及其应用(Kolodny et al., 1983; Shemesh, 1983, 1988; Karhu and Epstein, 1986)。

(3)构造体系和裂隙充填物的同位素示踪

流体在地壳浅部的对流作用引起了许多研究者的兴趣。过去人们把对地壳中流体的稳定同位素研究多用在成岩成矿上,却忽视了对构造的研究。其实,不同构造体系、不同世代和不同性质的裂隙充填物的类型是有差别的,这些差别都必然反映在流体的性质、动态和同位素交换等低温地球化学性质上。因此构造体系和裂隙充填物的稳定同位素地球化学研究可起到独特的示踪作用(于津生,1990)。例如,根据加拿大前寒武纪地盾中与不同世代裂隙充填物平衡的水的氢、氧同位素组成研究,可揭示出它们所经历的复杂的水文历史(Kerrick and Kammineni, 1988)。

(4)矿物/水的稳定同位素交换和原生同位素比值在低温条件下的保存性

大多数矿物是在与它们的环境达到或接近稳定同位素平衡下形成的,但在后期的地质事件中并不总是保持它们原生的同位素比值。在沉积物埋藏成岩过程中,矿物会经受溶解或重结晶等成岩变化,可以发生矿物与孔隙水的稳定同位素交换。例如 Longstaffe(1987), O'neil(1987), Ayalon and Longstaffe(1988), Longstaffe and Ayalon(1990, 1991), Tilley and Longstaffe(1989)等人对沉积物埋藏成岩过程中矿物与孔隙水的稳定同位素交换、演化及在低温环境中 H、C、O 同位素的保存性问题的研究;Mountjoy and Qin(1992), Qin and Mountjoy

(1989,1992)对加拿大西部沉积盆地的沉积物进行了 Sr、C 和 O 同位素研究,对多阶段白云岩化作用和与其有关的大规模活动流体来源进行了深入探讨。

4. 成岩过程中某些元素活动性研究

对低温作用过程中的元素活化、迁移和再分配(贫化或富化)的研究也开始出现。Jurger (1989)对美国蒙大拿中元古代纽南建造碳酸盐岩石的成岩作用进行了元素活动性研究,他研究了碳酸盐岩石的成岩过程中 REE 元素的再分配现象并指出:在石灰岩成岩条带和成岩结核的生长过程中,从页岩到碳酸盐岩石发生了局部的 REE 再分配,且在上述变化过程中轻稀土元素有轻度富集的趋势。在这些碳酸盐岩石中的正锶异常表明了成岩作用的强还原环境。Wicks 等人(1991)则对美国阿巴拉契亚考尔盆地若干湖泊作了研究。由于酸性矿坑水排入湖水中,对沉积物早期埋藏成岩过程中硫和铁的低温地球化学行为有较大的影响。

目前,前三个方面的研究工作进展较快,研究程度较高,最后一个方面却只见少数零散的研究,且研究程度较低。本文选择沉积物埋藏成岩过程中活性元素地球化学行为作为研究对象,通过揭示元素在沉积物埋藏成岩过程中地球化学演化规律,来丰富和发展低温地球化学的研究内容。

第二节 研究思路

一、研究重点

本文研究沉积物埋藏成岩作用过程中活性元素低温地球化学行为,主要涉及沉积地球化学领域。就沉积岩来说,它是指在地表和地表下不太深的地方形成的地质体,是常温常压下由风化作用、生物作用和某种火山作用形成的物质经过一系列改造(如搬运、沉积和成岩等作用)而形成的岩石(曾允孚和夏文杰,1986)。沉积岩的形成和变化包括沉积作用(风化、搬运和沉积)、埋藏成岩作用(沉积物转变为沉积岩)、后生作用(沉积岩的变化直至转变为变质岩)和表生作用(沉积岩抬升到近地表受到改造)四大过程。

对江汉盆地拖市油田低渗透储层地质特征的研究(罗蛰潭等人,1991,1994;倪师军等人,1992,1993)表明,江汉盆地潜江凹陷第三系新沟嘴组沉积岩中保存的成岩作用信息丰富,非常适合研究沉积物埋藏成岩作用过程中活性元素低温地球化学行为。虽然江汉盆地潜江凹陷第三系新沟嘴组沉积岩在沉积作用之后经历了埋藏成岩作用和后生作用两个过程,但是其形成和变化特征最明显的要算埋藏成岩作用。因此,埋藏成岩作用过程成为本文研究重点。考虑到沉积物埋藏成岩作用和后生作用是一个连续的低温地球化学过程,在重点研究沉积物(准)同生作用(penesyngensis or syngensis)和成岩作用(diagenesis)时,也兼顾到后生成岩作用(ana-diagenesis)对活性元素低温地球化学行为的影响。沉积物的沉积作用(sedimentation)和沉积岩的表生作用(epidiagenesis or hypergenesis)不在本文的研究范围。

二、研究思路

沉积物埋藏成岩作用过程是一个低温地质作用过程。在这个过程中,沉积物会发生压实、脱水、胶结、矿物溶蚀、溶解、重结晶等地质作用。显而易见,沉积物埋藏成岩作用过程自始至终都有流体的活动。由于流体—沉积物的相互作用,一些原生矿物会发生变化受到改造,在原矿

物边缘可能出现次生加大现象,甚至形成有次生新矿物。矿物与流体之间的水岩反应,可导致元素在矿物和流体之间的转移。有一些元素(如 K、Na、Ca、Mg、Al、Si、S、C 等)和放射性元素较为活泼地发生活化、迁移和再分配,这些活动性较强的元素被称之为活性元素。对活性元素在沉积物埋藏成岩过程中的低温地球化学行为的描述,可以采用一套从地质学定性、热力学定量、动力学模拟、综合建模的研究思路来实现。

1. 地质学定性

沉积物埋藏成岩作用是地史时期地层中发生的一系列物理的、物理化学的反应结果,不同时期、不同层位的同类型岩石或矿物由于所处的环境不同,成分含量有细微差别,因此分析这些岩石或矿物的成分,可以定性地研究元素在沉积物埋藏成岩过程中的地球化学行为。不同类型的矿物对元素吸附能力不同,因而沉积物埋藏成岩过程中矿物的变化将影响元素的迁移、富集,分析沉积物埋藏成岩过程中矿物的变化亦可研究元素在成岩过程中的地球化学行为。据此,我们从岩石薄片的镜下鉴定、岩石的成分测试及成岩矿物的微区分析测试、研究成岩序列、划分沉积物埋藏成岩阶段入手,定性地研究沉积物埋藏成岩作用过程中元素的地球化学行为。活性元素在沉积物埋藏成岩过程中的地球化学行为,可以通过不同成岩阶段、不同层位、不同岩石、不同矿物中元素的含量和变化得到定性的显示。

2. 热力学定量

对沉积物埋藏成岩过程中活性元素低温地球化学行为进行定量的描述,首先需要查明活性元素活动的时空环境的地球化学参数。热力学方法在地质学中的应用已有很大的进展,对解决平衡或局域平衡问题比较奏效。由于低温过程的热力学参数比较齐全,所以用热力学方法定量描述沉积物埋藏成岩这一低温地球化学过程比较容易实现。采用热力学方法模拟低温作用,可以在一定的时空环境中对温度、压力、流体成分、流体性质、平衡或局域平衡过程中的流体—矿物反应等物理化学问题作定量描述。

3. 动力学模拟

由于传统的热力学计算只考虑平衡状态或局域平衡状态,而活性元素在沉积物埋藏成岩过程中的行为往往呈现非平衡状态,因此单考虑热力学模拟还远远不能达到目的,很难得出合理的结果。我们从质量迁移—化学反应的连续方程出发,结合热力学局域平衡计算,建立一个适应沉积物埋藏成岩过程中活性元素低温地球化学行为研究的流体—矿物反应动力学模型,并运用反应速率定律,采取准稳定态近似法有效地进行数值模拟,效果很好。从矿物包裹体成分测试来进行热力学及动力学参数计算,建立流体—矿物反应的动力学数学模型,进行数值的模拟计算,分析模拟结果所反映的地球化学意义。

4. 综合建模

上述地质学定性、热力学定量、动力学模拟研究,可以从沉积作用、成岩作用、热力学局域平衡、动力学非平衡等不同侧面寻找流体—矿物反应过程中活性元素活化迁移再分散(富集)信息,对活性元素在沉积物埋藏成岩过程中的低温地球化学行为作较为客观的描述。在此基础上,结合各方面和各个角度的研究结果,可将各不同角度得出的各种各样的信息全面综合分析,从较高层次的视野来统观全局。最终建立综合演化模式,达到全面地描述沉积物埋藏成岩过程中活性元素低温地球化学行为的目的。

第三节 研究流程

研究流程是按技术路线指出的方向循序渐进的操作程序。上述研究思路连贯起来便形成一条观点新颖、操作可行的技术路线。此技术路线的核心是把地质学定性、热力学定量、动力学模拟研究有机结合起来,合理安排操作顺序和研究进度,最终以其研究成果综合建模,建立成岩作用过程中元素的地球化学演化模式。按此技术路线可设计研究流程,研究流程用框图表示如下:

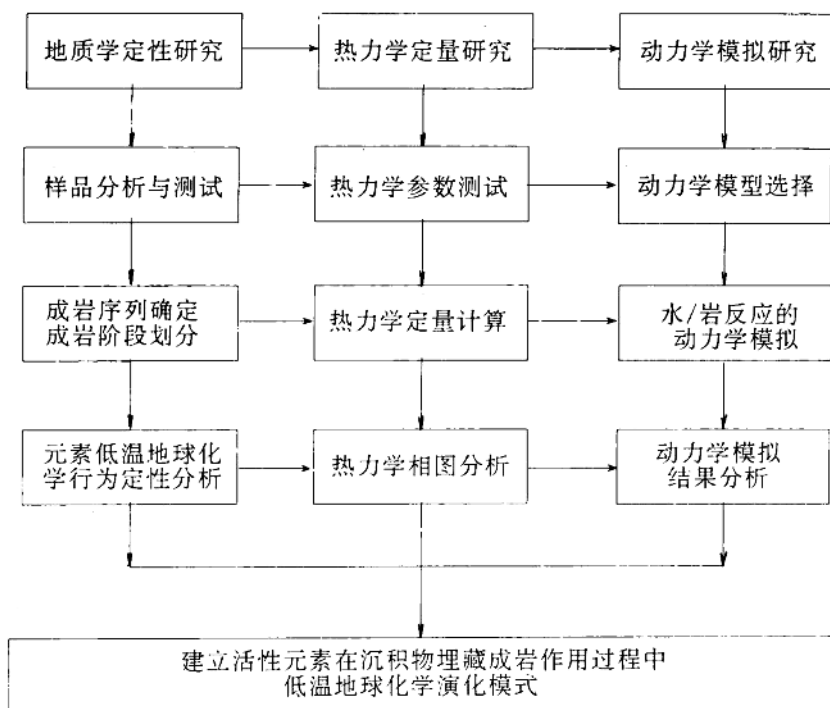


图1-1 研究流程框图

第二章 地质背景

第一节 构造

江汉盆地位于湖北省中南部,在大地构造上隶属于扬子准地台,它是燕山运动后发育起来的中新生代内陆含油盐湖盆地,面积约 2.8 万 km^2 ,基底为前白垩系,其上发育了白垩系—第四系的沉积地层,其中以第三系最为发育。因受基底断块活动的影响,盆地内形成 5 个凹陷,即潜江、江陵、沔阳、小板、云应凹陷。各凹陷内进一步形成次级构造,拖市构造即属此类,它位于潜江凹陷南部,是白垩纪以来长期发育的继承性隆起构造,面积约 80km^2 ,其东西两侧分别是吊堤口向斜和总口向斜,南端逐渐向渔洋斜坡抬高,鞍部不明显,但构造中部拖 II 断鼻南端下倾明显,北端以鞍部与马王庙断鼻相邻。

拖市隆起构造为北北东向,其上发育了数条北北东向—北东向正断层,平面上断层南端收敛,北端敞开,从西到东的断层依次为①、①'、②、③、④、⑤、⑥(图 2-1)。其中①、①'断层倾向 SEE,其余为 NW。断层从翼部到轴部变新,两翼上升轴部下掉,于轴部形成地堑,同时形成一系列断鼻构造。次级断层 19 条(其长度小于 100m),平行上述断层或为其分支断层,它们不控制油气分布,只是切割断块,使构造复杂化。

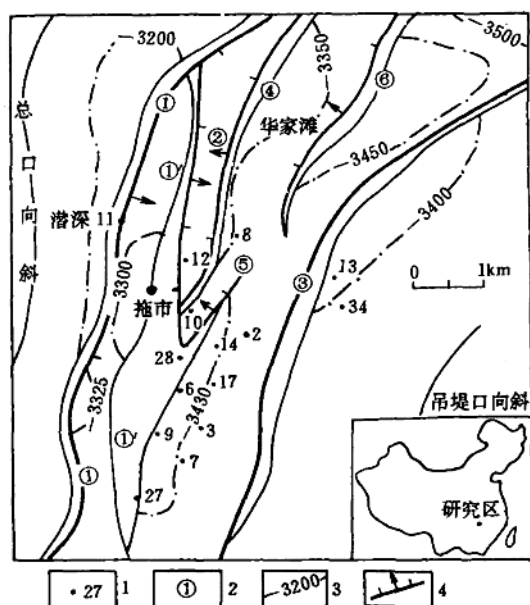


图 2-1 拖市油田新沟嘴组底面构造图
1—井号;2—断层号;3—地层等厚线(m);4—正断层

第二节 地层

江汉盆地的基底为前白垩系,之上发育的盖层主要由三个沉积旋回构成:

第一旋回:白垩系—沙市组—新沟嘴组;

第二旋回:荆沙组—潜江组—荆河镇组;

第三旋回:广华寺组—平原组。

江汉沉积盆地的地层简要介绍见表2-1。本文研究取样地点选在拖市油田范围,该范围内的地层与盆地地层情况大体一致,只是由于荆河镇组沉积之后总体抬升,遭受剥蚀,使得荆河镇组地层所剩无几,上、下第三系地层之间为不整合接触。

表2-1 江汉盆地地层简表

| 地 层 | | | | 主 要 岩 性 | 厚 度 (m) |
|------------------|-----------|----------|-------------------------------------|---|------------|
| 系 | 统 | 组 | 段 | | |
| 第四系 | 全—更 新统 | 平原组 | | 粘土、砂、砾石层 | 50~167 |
| 上第三系 | 上—中 新统 | 广华 寺组 | | 杂色粘土岩夹砂岩、砾状砂岩、砾岩、淡水泥灰岩 | 300~960 |
| 下 第 三 系 | 渐新统 | 荆河 镇组 | | 绿灰色泥岩、深灰色泥岩夹砂岩、泥膏岩、油页岩 | 0~1600 |
| | 上始 新统 | 潜江组 | | 深灰色泥岩、油浸泥岩与钙芒硝泥岩、泥膏岩、盐岩组成的韵律层夹砂岩,盆地西部无盐岩类沉积 | 300~3500 |
| | 中始 新统 | 荆沙组 | | 红色泥岩夹砂岩、含膏泥岩,局部地区具盐岩或玄武岩 | 600~1870 |
| | 下始 新统 | 新沟 嘴组 | 上段 | 红色、灰色泥岩夹膏岩、砂岩 | 500~700 |
| | 下始 新统 | 新沟 嘴组 | 下段 | 深灰色泥岩、粉砂岩及泥灰岩和泥膏岩及油页岩 | |
| | 古新统 | 沙市组 | 上段 | 绿灰色及紫灰色泥岩、芒膏岩、泥膏岩夹粉砂岩 | 150~795 |
| 古新统 | 沙市组 | 下段 | 石膏、盐岩和棕红色泥岩互层,夹少量灰色泥岩、泥质白云岩、芒硝岩及玄武岩 | 0~600 | |
| 白垩系 | 上统 | 渔洋组 | | 为一套暗紫色砂泥岩沉积,底部有少量砾岩及砾质砂岩,局部地区夹多层玄武岩及石膏 | 1200~2300 |

第一旋回由渔洋组—沙市组—新沟嘴组沉积岩构成。白垩系渔洋组厚度较大,最厚处可达2300m,主要由一套暗紫色砂岩、泥岩夹少量砾岩组成。下第三系沙市组厚度小于600m,主要

由一套紫灰色泥岩、粉砂岩和膏盐岩组成,局部见玄武岩。下第三系新沟嘴组厚 500~700m,主要由一套粉砂岩、泥膏岩夹少量油页岩组成。

第二旋回由荆沙组—潜江组—荆河镇组沉积岩构成。下第三系荆沙组厚 600~1870m,主要由一套红色泥岩夹砂岩、泥膏岩组成,局部见玄武岩。下第三系潜江组厚 300~3500m,主要由一套深灰色泥岩、油浸砂质泥岩和膏盐岩组成,见钙芒硝。下第三系荆河镇组厚度最厚处可达 1600m,主要由一套绿灰色泥岩夹砂岩、泥膏岩和油页岩组成。

第三旋回由广华寺组—平原组沉积岩构成。上第三系广华寺组厚 300~960m,主要由一套杂色粘土岩夹砂岩、砾岩组成,局部见泥灰岩。第四系平原组厚 50~167m,主要由粘土、砂、砾石组成。

下第三系新沟嘴组下段是拖市油田的主要工业储层,由于离物源远,砂岩不发育,仅占地层厚度的 10.6%~18%。它可分为 3 个油层 9 个砂组,其岩性详见表 2-2。其中砂岩的成岩作用过程中矿物变化明显,活性元素地球化学行为突出,是理想的研究对象,因此后面我们着重讨论新沟嘴组下段砂岩的岩石学特征。

表 2-2 新沟嘴组下段岩性简表

| 层位 | 岩性简表 |
|--------|--|
| 大膏层 | 灰白色石膏岩、泥膏岩为主,夹灰色石膏质泥岩、泥岩,为区域对比标准层,厚 13.5~21m |
| I 油层 | I ¹ 红灰间互泥岩,上部夹石膏质泥岩,下部夹薄层粉砂岩,厚 42.5~61m |
| | I ² 紫红色、灰色泥岩与粉砂岩互层,为本油田主要油层段之一,厚 30~34m |
| II 油层 | II ¹ 灰、深灰色泥岩夹粉砂岩及薄层石膏质泥岩,厚 32~33.5m |
| | II ² 灰、深灰色泥岩夹石膏质泥岩及粉砂岩,厚 38~44.5m |
| | II ³ 灰、灰黑色泥岩夹石膏质泥岩及少量粉砂岩,厚 40.5~44.5m |
| 泥隔层 | 深灰、灰黑色泥岩夹石膏质泥岩,泥岩质纯,为区域对比标准层,该层与 II 油组同属本区主要生油层段,厚 18~21.5m |
| III 油组 | III ¹ 灰、深灰色泥岩与粉砂岩等厚互层,粉砂岩最大单层 7.4m,为本区主要储层,厚 22.5~25m |
| | III ² 灰、灰紫色泥岩与粉砂岩互层,偶夹石膏质泥岩,厚 18.5~21.5m |
| | III ³ 灰、灰紫色泥岩与粉砂岩互层,下部夹石膏质泥岩,厚 32.5~36.5m |
| | III ⁴ 灰、灰紫色泥岩夹粉砂岩,厚 25~28.5m |

第三节 地质演化

拖谢构造带的形成和发展是受通海口基底大断层和③号基底断层控制。通海口大断层是潜江凹陷东部的边界断层,由于它的活动形成断—凹—隆的地质结构。拖谢隆起带就是其中的隆起部分。③号断层最晚在白垩纪已形成,切穿基底,断层两盘的白垩系厚度相差较大,断层上盘附近形成白垩—第三系基底隆起。随着该隆起的不断抬升,上覆地层亦不断隆起,在此过程中形成地堑式断裂。