

火山岩油气藏的形成机制与分布规律研究丛书

火山作用的成烃与 成藏效应

李建忠 单玄龙 吴晓智 王 民 著
卢双舫 郑 曼 郝国丽 李吉焱



科学出版社

火山岩油气藏的形成机制与分布规律研究丛书

火山作用的成烃与成藏效应

李建忠 单玄龙 吴晓智 王 民 著
卢双舫 郑 曼 郝国丽 李吉焱

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书针对火山岩油气勘探中出现的与火山作用有关的有机质成烃、油气成藏效应问题进行研究,包括与岩浆活动有关的烃源岩发育和催化促烃评价、火山活动对油气成藏的建设和破坏作用、火山活动与无机气富集规律、火山岩油气藏主控因素与成藏机制。

本书适合于广大地质勘探人员、石油地质综合研究人员及大专院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

火山作用的成烃与成藏效应 / 李建忠等著. —北京:科学出版社, 2015.5

(火山岩油气藏的形成机制与分布规律研究丛书)

ISBN 978-7-03-044171-3

I. ①火… II. ①李… III. ①火山作用-油气藏形成-研究 IV. P618.130.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第084789号

责任编辑:王 运 韩 鹏 / 责任校对:宋玲玲

责任印制:肖 兴 / 封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年5月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015年5月第一次印刷 印张:17 1/4

字数:410 000

定价:158.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《火山岩油气藏的形成机制与分布规律 研究丛书》编辑委员会

编辑顾问委员会

主 任：贾承造 王玉华

委 员：(以姓氏笔画为序)

王成善	王铁冠	贝 丰	吕延防
李幼铭	李廷栋	肖序常	邹才能
沙金庚	罗治斌	金成志	庞雄奇
赵文智	赵志奎	萧德铭	潘 懋
戴金星			

编辑委员会

主 任：冯志强 刘嘉麒

委 员：(以姓氏笔画为序)

王璞珺	卢双舫	冉清昌	印长海
包 丽	冯子辉	师永民	朱如凯
刘 财	孙晓猛	李成立	李江海
李红娟	李建忠	吴晓智	陈树民
陈振岩	陈福坤	邵红梅	单玄龙
姜传金	梁世君	梁江平	童 英

主 编：冯志强 陈树民

丛 书 序

——开拓油气勘查的新领域

2001年以来,大庆油田有限责任公司在松辽盆地北部徐家围子凹陷深层火山岩勘探中获得高产工业气流,发现了徐深大气田,由此,打破了火山岩(火成岩)是油气勘探禁区的传统理念,揭开了在火山岩中寻找油气藏的序幕,进而在松辽、渤海湾、准噶尔、三塘湖等盆地火山岩的油气勘探中相继获得重大突破,发现一批火山岩型的油气田,展示出盆地火山岩作为油气新的储集体的巨大潜力。

从全球范围内看,盆地是油气藏的主要聚集地,那里不仅沉积了巨厚的沉积岩,也往往充斥着大量的火山岩,尤其在盆地发育早期(或深层),火山岩在盆地充填物中所占的比例明显增加。相对常规沉积岩而言,火山岩具有物性受埋深影响小的优点,在盆地深层其成储条件通常好于常规沉积岩,因此可以作为盆地深层勘探的重要储集类型。同时,盆地早期发育的火山岩多与快速沉降的烃源岩共生,组成有效的生储盖组合,具备成藏的有利条件。

但是,作为一个新的重要的勘探领域,火山岩油气藏的成藏理论和勘探路线与沉积岩石油地质理论及勘探路线有很大不同,有些还不够成熟,甚至处于启蒙阶段。缺乏理论指导和技术创新是制约火山岩油气勘探开发快速发展的主要瓶颈。为此,2009年,国家科技部及时设立国家重点基础研究发展计划(973)项目“火山岩油气藏的形成机制与分布规律”,把握住历史机遇,及时凝炼火山岩油气成藏的科学问题,实现理论和技术创新,这对于占领国际火山岩油气地质理论的制高点,实现火山岩油气勘探更广泛的突破,保障国家能源安全具有重要意义。大庆油田作为项目牵头单位,联合中国科学院地质与地球物理研究所、吉林大学、北京大学、中国石油天然气勘探研究院和东北石油大学等单位的专业人员,组成以冯志强、陈树民为代表的强有力的研究团队,历时五年,通过大量的野外地质调查、油田现场生产钻井资料采集和深入的测试、分析、模拟、研究,取得了一批重要的理论成果和创新认识,基本建立了火山岩油气藏成藏理论和与之配套的勘探、评价技术,拓展了火山岩油气田的勘探领域,指明火山岩油气藏的寻找方向,为开拓我国油气勘探新领域和新途径做出了重要贡献:

一是针对火山岩油气富集区的地质背景和控制因素科学问题,提出了岛弧盆地和裂谷盆地是形成火山岩油气藏的有利地质环境,明确了寻找火山岩油气藏的盆地类型;二是针对火山岩储层展布规律和成储机制的科学问题,提出了不同类型、不同时代的火山岩均有可能形成局部优质和大面积分布的致密有效储层的新认识,大大拓展了火山岩油气富集空间和发育规模,对进一步挖掘火山岩勘探潜力有重要指导意义;三是针对火山岩油气藏地球物理响应的科学问题,开展了系统的地震岩石物理规律研究,形成了火山岩重磁宏观预测、火山岩油气藏目标地震识别、火山岩油气藏测井评价和

火山岩储层微观评价4个技术系列，有效地指导了产业部门的勘探生产实践，发现了一批油气田和远景区。

“火山岩油气藏的形成机制与分布规律”项目，是国内第一家由基层企业牵头的国家重大基础研究项目，通过各参加单位的共同努力，不仅取得一批创新性的理论和技术成果，还建立了一支以企业牵头，“产、学、研、用”相结合的创新团队，在国际火山岩油气领域形成先行优势。这种研究模式对于今后我国重大基础研究项目组织实施具有重要借鉴意义。

《火山岩油气藏的形成机制与分布规律研究丛书》的出版，系统反映了该项目的研究成果，对火山岩油气成藏理论和勘探方法进行了系统的阐述，对推动我国以火山活动为主线的油气地质理论和实践的发展，乃至能源领域的科技创新均具有重要的指导意义。



2015年4月

前 言

油气勘探实践表明,全球找到的油气藏几乎都在盆地的沉积岩中,火山岩分布区一般被看成寻找油气的禁区。但是随着油气勘探技术的进步及石油地质理论的不断深化,国内外已在火山岩中发现了一系列大中型油气藏,火山岩特殊储层油气藏日益受到地质学家与勘探人员的重视。我国火山岩油气藏勘探已有 60 余年历史,自 20 世纪 50 年代开始在新疆准噶尔盆地西北缘先后发现了一批油气田,到 20 世纪 90 年代又在渤海湾盆地、准噶尔盆地、海拉尔盆地发现了一系列中小型油气藏,这些油气藏均属新生古储型火山岩油气藏。进入 21 世纪,中国石油天然气股份有限公司逐步加大对火山岩勘探领域的探索,先后在东北松辽盆地发现徐深、长岭大气田;在西部准噶尔盆地、三塘湖盆地发现克拉美丽大气田、牛东大油田;极大地推动了我国火山岩领域油气勘探。但对于火山岩油气藏,其火山作用的成烃效应、火山岩储层改造、火山岩油气成藏、火山岩油气藏分布规律等基础性科学问题亟待解决。以往研究,人们在认识到火山作用对烃源岩及油气藏具有破坏作用的同时,也认识到火山作用的热效应及流体对烃源岩有机质的溶蚀和催化作用具有重要影响。自 20 世纪 80 年代开始,逐步开始探索与火山作用有关的成烃效应,探讨火山作用的热效应对沉积岩中烃类生成的影响。

2009 年,国家科技部设立国家重点基础研究发展计划(973)项目“火山岩油气藏的形成机制与分布规律”,下设 8 个课题,其中第 6 课题为“火山作用的成烃、成藏效应”,重点解决火山岩热效应的定量模型、火山流体的成烃效应模型与无机气富集规律、火山岩油气藏成藏机理与分布规律三个科学问题。

本课题研究的主要目标是通过不同类型、不同时代火山岩油气藏的解剖,利用地质-地球化学方法和实验与模拟手段,揭示火山作用的成烃、成藏效应发生的条件和规律,建立成烃成藏效应定量模型。取得 4 项创新性研究成果:

(1) 建立火山作用侵入与喷发岩成烃热效应模型,实现火山作用对泥质烃源岩热效应成烃定量评价。

(2) 建立火山流体成烃实验模型与评价方法,实现火山流体成烃定性评价。

(3) 研究火山作用与 CO_2 气藏形成关系,明确了我国东部被动大陆边缘裂谷型盆地 CO_2 气藏成因及主控因素。

(4) 通过详细解剖我国东西部典型火山岩油气藏,基本明确我国火山岩油气藏主控因素与主要成藏模式,初步揭示火山岩油气成藏机理。

课题研究成果揭示火山作用的成烃、成藏过程及其相互关系,揭示火山岩油气成藏的控制因素和机理,对我国火山岩油气藏地质理论创新及火山岩油气藏勘探具有良好的启示意义与推动作用。

本书在课题组近 5 年的研究成果基础上编写而成,全书共分八章。第一章为火山

作用与成烃、成藏关系,主要回顾国内外火山作用的成烃、成藏研究现状、研究进展,主要研究方法及手段;第二章为陆相火山水下喷发与油气成烃、成藏,针对火山作用的水下喷发,探讨火山水下喷发识别标志,火山水下喷发对有效烃源岩物质形成的促进作用;第三章在探讨火山作用热效应与成烃效应理论基础及实验模型建立的基础上,经过高温热模拟试验,确定火山作用侵入岩成烃效应与定量评价模型及火山作用喷发岩成烃效应与定量评价模型;第四章在探索火山流体成烃理论基础及实验模型建立基础上,通过实验装置设计与模拟试验,基本确定火山流体的成烃效应与定性评价流程;第五章探讨火山作用对成藏建设性作用、改造作用及破坏作用;第六章在典型火山岩油气藏解剖基础上,确定我国主要类型火山岩油气藏成藏主控因素,分析火山岩油气藏成藏过程;第七章归纳总结我国火山岩成藏类型,建立火山岩油气藏成藏模式,探讨火山岩油气藏成藏机理;第八章开展我国火山岩油气藏成藏有利条件研究,分析我国火山岩油气资源潜力,明确我国火山岩油气藏勘探领域,指明我国火山岩油气藏研究与勘探方向。

本书是在项目组的组织与指导下完成的,研究工作与书稿编写具体分工如下:前言由李建忠完成,第一章由卢双舫、单玄龙、吴晓智完成,第二章由李吉焱、单玄龙完成,第三章由王民、卢双舫完成,第四章由单玄龙、郝国丽完成,第五章由王民、郑曼完成,第六章由李建忠、吴晓智、郑曼、单玄龙完成,第七章由吴晓智、郑曼、郝国丽完成,第八章由李建忠、吴晓智、王民、郑曼完成。全书由李建忠、单玄龙、吴晓智统稿,由郑曼、郝国丽、王民校编数据和清绘书稿插图。全书由陈树民、冯子辉、王璞珺审定。研究工作得到了中国石油天然气股份有限公司科技管理部、大庆油田公司、新疆油田分公司、吉林油田分公司、吐哈油田分公司以及方朝亮教授、罗治斌教授、冯志强教授、匡立春教授、梁世君教授、王绪龙教授、王立武教授、梁浩教授、杨迪生教授、唐勇教授、冉清昌教授的大力支持和指导,在此表示衷心的感谢!鉴于作者水平有限,书中误漏在所难免,请广大读者予以指正。

目 录

丛书序

前言

第一章 火山作用与成烃、成藏关系	1
第一节 火山作用与有机质成烃的研究现状	1
一、火山岩热作用对围岩有机质成熟度的影响	2
二、火山岩热作用对围岩有机质元素及同位素的影响	2
三、火山岩热作用对无机元素及同位素的影响	3
四、火山岩热作用范围	3
第二节 火山作用成烃效应模拟实验基础	4
一、火山活动对同期沉积的烃源岩母质中有机质富集的影响作用	4
二、火山活动及火山物质对烃源岩生烃的加氢、催化作用及模拟实验	5
第三节 我国火山岩油气成藏区域地质背景	6
一、火山作用与成藏关系的研究现状	6
二、我国火山岩油气藏形成的区域地质背景	7
三、我国火山岩油气藏勘探特点	8
第四节 我国火山岩油气成藏基本石油地质条件	9
一、火山岩油气藏源储配置	9
二、火山岩成藏组合类型	10
第二章 陆相火山水下喷发与油气成烃、成藏	16
第一节 陆相火山水下喷发方式与识别标志	16
一、陆相火山水下喷发识别标志	17
二、陆相水下喷发火山岩的岩性特征	20
三、松辽盆地徐家围子营城组陆相水下喷发火山岩的分布范围	22
第二节 火山水下喷发与油气生成	22
一、松辽盆地徐家围子断陷与梨树断陷营城组烃源岩特征对比	22
二、松辽盆地徐家围子断陷营城组陆相水下喷发火山岩的形成机制及对烃源岩的影响	23
第三章 火山作用热效应与成烃效应定量评价	26
第一节 理论基础与模型建立	27
一、热传导方程	28
二、火山岩体-围岩热传导模型	29
三、化学动力学模型	35

第二节 实验装置与模拟试验	39
一、样品	40
二、实验	40
三、结果分析	43
四、小结	64
第三节 侵入岩的成烃效应与定量评价	65
一、岩浆侵入体散热过程的数值模拟	65
二、侵入体与烃源岩不同匹配关系时的热效应	71
第四节 喷发岩的成烃热效应与定量评价	80
第五节 小结	82
第四章 火山流体成烃效应定性评价	83
第一节 理论基础与模型建立	83
一、国内外研究现状	83
二、理论基础	84
三、模型建立	87
第二节 实验装置与模拟试验	88
一、模型实验原理及其研究现状	88
二、模型实验的目的和要求	88
三、模型实验方法与装置选取	89
四、模型实验步骤	90
第三节 火山流体的成烃效应与定性评价	97
一、模型实验气体产物特征	97
二、模型实验气体产物稳定同位素特征	105
三、模型实验液态产物特征	109
第四节 火山流体运动演化数值模拟研究	116
一、火山流体的渗流	116
二、徐家围子火山流体流势及聚集范围	118
第五章 火山作用对油气成藏建设与改造作用	121
第一节 火山作用对油气成藏建设性作用	121
一、火山作用对优质烃源岩的形成及生烃有促进作用	121
二、火山作用与圈闭	123
三、火山作用与油气运移	123
四、火山作用与储层	124
五、火山作用与油气的保存	125
第二节 实例分析	125
一、火山作用促进优质烃源岩的形成——以松辽盆地徐家围子断陷和梨树断陷对比 为例	125
二、火山作用对有机质生烃的促进作用——英台断陷	133

三、火山作用与圈闭——以龙深1井火山岩气藏为例	138
四、火山岩盖层——以徐家围子断陷深层火山岩为例	141
第三节 火山作用的成藏改造与破坏作用	146
一、火山作用的破坏作用	146
二、火山作用的改造作用	148
第四节 实例分析	153
一、火山作用的破坏作用——布龙果尔泥盆系古油藏	154
二、火山作用的改造作用——吉木萨尔凹陷吉15井区石炭系火山岩油藏	156
第六章 我国火山岩油气藏成藏主控因素与成藏过程分析	160
第一节 东部火山岩气藏成藏主控因素分析	160
一、充足的气源是物质基础,控制火山岩气藏宏观分布及产量	160
二、优质火山岩储层控制火山岩气藏的富集	164
三、断裂及其演化是最为重要的控藏要素	166
四、火山机构类型、相带、旋回期次控制气藏的纵横向分布	169
五、圈闭及盖层条件缺一不可	172
第二节 东部火山岩气藏成藏过程分析	173
一、生排烃史	174
二、成藏过程分析	175
第三节 松辽盆地无机 CO_2 气藏成因及其富集规律	179
一、无机 CO_2 成因机理和成藏期次	180
二、无机 CO_2 气藏成藏模式	180
三、无机 CO_2 气藏成藏主控因素	183
四、含无机 CO_2 火山岩气藏区带预测	187
第四节 西部火山岩油气藏成藏主控因素分析	188
一、典型火山岩储层油气藏解剖	189
二、典型火山岩储层油气藏成藏过程分析	192
第七章 我国火山岩油气成藏模式及成藏机理探讨	199
第一节 我国东部火山岩油气藏成藏模式	199
第二节 我国西部火山岩油气藏成藏模式	202
一、准噶尔中东部近源型组合	202
二、准噶尔西北缘侧源型组合	204
三、三塘湖盆地近源型成藏组合	205
第三节 火山岩油气成藏机理探讨	207
一、火山岩储层油气运聚	207
二、火山岩储层油气运聚模式	209
三、火山岩储层油气成藏机理探讨	213
第八章 我国火山岩油气资源潜力与勘探前景	229
第一节 我国火山岩油气藏分布规律	229

一、我国主要火山岩类型	232
二、我国主要火山岩岩相类型	233
三、我国火山岩形成主要构造环境	234
四、我国火山岩储层油气藏分布规律	236
第二节 我国火山岩油气资源潜力	237
一、我国火山岩油气领域油气资源潜力	237
二、我国典型凹陷火山岩油气资源潜力	238
第三节 我国火山岩油气藏勘探方向与勘探进展	244
一、我国火山岩油气领域油气勘探方向	244
二、我国火山岩油气领域油气勘探进展	248
参考文献	250
结语	263

第一章 火山作用与成烃、成藏关系

油气勘探实践已在世界 20 多个国家 300 余个盆地中发现与火山作用有关的油气藏或油气显示,如印度尼西亚的 Jatibarang 玄武岩油气田、澳大利亚的 Scoot Reef 玄武岩油气田、纳米比亚的 Kudu 玄武岩气田及巴西 Parana 盆地二叠系油气藏 (Mitsuata, 1999; Araujo et al., 2000; Schutter, 2003; Koning, 2003; Potter et al., 2003; 杨辉等, 2006; 赵文智, 2009; Rodriguez et al., 2009)。近年来,我国松辽、渤海湾、准噶尔、三塘湖等盆地的火山岩油气勘探均获得重大突破,如松辽盆地深层约 3000 亿 m^3 探明天然气储量富集在火山岩中,展示出巨大的勘探潜力。随着勘探的进行,有关火山作用与烃源岩成烃、成藏的研究也不断深入。

第一节 火山作用与有机质成烃的研究现状

火山作用为沉积盆地提供了新的热源,这必然对有机质的成烃进程和成烃量产生重要影响,即存在火山作用的热效应。业已认识到,火山作用的热效应对油气成藏既有有利的一面,即加速烃源岩的成熟和成烃作用 (Galushkin, 1997; Chen et al., 1999; Othman et al., 2001; Fjeldskaar et al., 2008),也有不利的一面,如破坏先期形成的油藏或加速烃源岩进入过熟期 (Finkelman, 1998; Thorpe et al., 1998; 周庆华等, 2007)。

众多的研究表明,受火山岩侵入体结晶潜热释放 (即岩浆冷却热释放) 的影响,围岩中有机质镜质组反射率急剧上升 (可达 5% 以上),远远高于沉积盆地正常热演化所能达到的成熟度,表明火山岩侵入体结晶潜热释放可以加速围岩有机质成熟。在侵入体附近,随着与接触面 (侵入体与围岩的接触部位) 距离的变小,围岩中有机碳含量快速降低、干酪根的 H/C 值迅速下降、围岩中残留烃含量逐渐增加及芳香度逐渐变高等现象都表明火山侵入体可以促进烃类的生成 (Jaeger, 1957; Dow, 1977; Simoneit et al., 1978; Raymond and Murchison, 1988; George, 1992; 孙永革等, 1995; Barker et al., 1998; Gurba and Weber, 2001; Fjeldskaar et al., 2008; Rodriguez et al., 2009)。但这些认识还只是停留在定性描述方面,尤其是对火山岩体引起围岩热蚀变的程度研究较多,但认识不一,热蚀变的范围从侵入体厚度的 0.3 倍到 4 倍距离均有报道 (Dow, 1977; Kazarinov and Homenko, 1981; Kontorovich et al., 1981; 陈荣书、何生, 1989; Galushkin, 1997),而引起热蚀变的范围大小对生烃量评价有重要影响。

国内学者 (张健等, 1997; 傅清平等, 2000) 通过非稳态热传导方程模拟了火山侵入体冷却过程中所释放的热量,对冷却过程中的温度分布和变化规律进行了探讨性研究。国外学者 (Galushkin, 1997; Fjeldskaar et al., 2008) 通过对 Carslaw 和 Jaeger

(1959) 热传导模型修订建立了火山侵入体冷却热释放模型, 结合围岩镜质组反射率数据和 Easy $R^\circ\%$ 模型标定了热释放模型参数。如 Barker 等 (1998) 认为在距离火山侵入体 $1/3$ 的厚度范围内, 与火山侵入体越近镜质组反射率 R° 不增反而降低, Raymond 和 Murchison (1988) 的研究也得到与 Barker 相似的结论。

另外据统计, 火山岩在盆地发育早期占盆地充填体体积约 $1/4$, 占储集岩体积约 $1/2$, 且在盆地发育早期, 盆地伸展、火山喷发、岩浆侵入、快速沉降、烃源岩沉积交互进行, 往往形成火山岩与烃源岩互层。Stagpoole 和 Funnell (2001) 认为火山侵入体的温度、厚度、平面展布控制了盆地中直接叠合在火山岩侵入体之上的烃源岩生排烃史。Araújo 等 (2000) 报道了通过物质平衡法所得到的巴西 Parana 盆地火山侵入体热作用的烃源岩排烃强度可达 $500 \times 10^3 \sim 3500 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ HC/km}^2$, 表明火山侵入体可以促进烃源岩大量生烃。

一、火山岩热作用对围岩有机质成熟度的影响

目前, 关于火山侵入体对附近烃源岩生烃影响的研究主要集中在成熟度参数 (如 R° 、OEP、 $S/(S+R)$ 等) 变化描述及火山岩侵入体引起的围岩热蚀变强度上。如 Schimmelmann 等 (2009) 对伊利诺斯盆地 (Illinois Basin) 岩墙附近烟煤有机质成熟度变化的研究表明, 火山岩的热作用可使得煤岩快速成熟, 成熟度 R° 从 0.62% 升高到 5.03% ; Cooper 等 (2007) 对科罗拉多州拉顿盆地中煤岩有机质成熟度的研究表明, 岩床的存在可以使 R° 从 0.99% 升高到 6.38% ; Raymond 和 Murchison (1988) 对苏格兰 Midland Valley 石炭系岩床围岩中有机质成熟度的研究发现, 这种异常热源可使 R° 从 1% 升高到 4.1% ; Gurba 和 Weber (2001) 对澳大利亚冈尼达盆地 (Gunnedu Basin) 煤层中有机质成熟度的研究表明, 侵入体的存在可以使围岩有机质成熟度从 0.8% 升高到 6% 左右; George (1992) 对苏格兰 Midland Valley 油页岩成熟度的研究发现, 岩床的存在可以使 R° 从 0.5% 升高到 6.5% ; Othman 等 (2001) 对澳大利亚冈尼达盆地北部三叠系 Napperby 地层中有机质成熟度的研究表明, 侵入体的存在使 R° 从 0.7 左右升高到 2.43% ; Chen 等 (1999) 报道的在辽河盆地 R16 井火山岩附近成熟度指标 (R° 、OEP、 $C_{29}\alpha\alpha$ 、 $C_{30}\beta\alpha/\alpha\beta$) 出现异常, 同样现象在我国其他盆地也有出现, 如渤海湾盆地、南堡凹陷以及西部盆地。

二、火山岩热作用对围岩有机质元素及同位素的影响

一般来说, 随着与侵入体距离的减小, 有机质 H、N、O 元素逐渐降低, 有机质及煤中易生烃的壳质组分逐渐减少、不易生烃的组分逐渐增加。

随着与侵入体距离的变小, 有机质干酪根 H 同位素逐渐变重, 认为是优先损失贫 D 的热解产物结果。但 Schimmelmann 等 (2009) 通过研究发现在侵入体附近的干酪根 H 同位素值不增反而降低。同样, 有人认为围岩中有机质干酪根 C 同位素值则随着与接触面距离的减小逐渐变重, 也有人认为逐渐变轻, 这种干酪根 C 同位素值与距离的

关系比较混乱。对于有机质 $\delta^{15}\text{N}$ 随着与接触面距离的变化也有不同认识,一种认为随着距离的减小(即成熟度的增加) $\delta^{15}\text{N}$ 逐渐变重,也有人认为关系比较混乱。

与接触面距离越近,围岩中有机质成熟度越高,有机质生烃进程逐渐增加,因此干酪根 C、H、O 元素含量逐渐减少,对应的干酪根中残留的 C、H、N 同位素应该逐渐变重。然而总结前人数据,变化关系比较混乱,对此 Schimmelmann 等(2009)认为 H 同位素变重的原因跟地层水介质参与反应有关,并且认为不同的环境下地层水的参与将会导致 H 同位素不同的趋势。而 N 同位素的变化原因更为复杂,受控于热裂解、运移和再结合作用。Cooper 等(2007)则认为随着与接触面距离减小残留有机质碳同位素增大是由于热作用促使了较多含 ^{12}C 甲烷的生成并挥发,而随着与接触面距离减小残留有机质碳同位素减小的原因比较复杂,可能是由于富集了富含 ^{12}C 的有机化合物,这种有机化合物在高温阶段通过芳香化/缩聚作用与干酪根重新结合,形成了富 ^{12}C 的干酪根/有机质。

一般来说与接触面距离越小,可溶有机质含量越低,对应色谱分析中低分子化合物的含量也越低;碳氢同位素的变化与残留物、无机盐及挥发性气体同位素组成有关。

三、火山岩热作用对无机元素及同位素的影响

与接触面越近,碳酸盐含量逐渐增加,方解石含量也逐渐增加,碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 逐渐降低, $\delta^{18}\text{O}_{\text{vsmow}}$ 则逐渐升高。随着距离的减少由热解有机质生成的 CO_2 和钙离子结合越多,形成的方解石也就越多,由于 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 较低,所以形成后的碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 也就越低;而距离侵入体越远,由于生物甲烷菌的 CO_2 还原作用,使得残余 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 变重, CO_2 与钙离子结合形成的碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 也就越重。因此,随着距侵入体的距离减小,碳酸盐矿物含量增加, $\delta^{13}\text{C}$ 则降低。由于有机质 $\delta^{18}\text{O}_{\text{vsmow}}$ 高于水介质的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{vsmow}}$ 值,结晶后产物的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{vsmow}}$ 就高。Finkelman 通过分析岩墙附近煤岩中 66 种无机元素发现,挥发性元素(F、Cl、Hg、Se 等)含量随着与接触面距离的减小并无减少的趋势,大部分元素和矿物含量则随着距离的减小而增加。

四、火山岩热作用范围

目前研究中对侵入体引起围岩的热蚀变强度认识不一,如 Dow(1977)通过对侵入体附近围岩镜质组反射率数据的分析认为火山侵入体引起围岩热蚀变的强度可以达到侵入体厚度的两倍。陈荣书和何生(1989)研究则认为热蚀变的强度可以达到侵入体厚度的 4 倍。Carslaw 和 Jaeger(1959)认为热蚀变的强度在侵入体厚度的 1~1.5 倍范围内比较合适。Kazarinov 和 Homenko(1981)、Kontorovich 等(1981)通过对西伯利亚地台岩床、岩墙的研究认为其引起热蚀变的强度在 30%~50% 岩床/岩墙的厚度范围内,很少能超过 1 倍岩床/岩墙厚度范围。Galushkin(1997)通过较多实例分析则认为侵入体热蚀变的强度在 50%~90% 岩床/岩墙的厚度范围内。Mastalerz 等(2009)则认为影响范围为侵入体厚度的 1.2 倍。

由于侵入岩的性质不同,其热作用影响存在差异也是可能的,比如岩浆初始温度、热传导率、热扩散率、热容、密度等岩石物理和热性质参数的不同必然会导致热影响范围的不同。再者,关于侵入体热模拟的模型有多种,考虑的参数不同,得到的热模拟结果有很大的差别。另外潜热、围岩水的汽化作用传热等都将影响热作用范围。

第二节 火山作用成烃效应模拟实验基础

火山岩是火山活动的直接产物。火山活动使火山物质经火山通道上涌至地表,在陆上或是水体中经凝固结而形成火山岩。火山活动为烃源岩的母质提供了热量和矿物质,改变了原始的沉积环境,表现为温度场、压力场和地球化学场的改变,而这种改变直接影响了烃源岩母质的沉积规律、成岩作用和地球化学特征。因此,国内外学者均认识到火山活动(火山岩)对烃源岩的形成、发育以及后来的生烃演化作用产生了重大影响。经前人学者研究发现,火山活动对烃源岩的影响作用主要体现在几个方面:①火山活动对同期沉积的烃源岩母质中有机质富集的影响作用;②火山活动对烃源岩生烃演化的热作用;③火山活动及火山物质对烃源岩生烃的加氢催化作用等。火成岩类型和火成岩与烃源岩共生组合的多样性,导致不同地区火成岩对烃源岩的影响作用程度大相径庭。

一、火山活动对同期沉积的烃源岩母质中有机质富集的影响作用

Verati (1999) 等通过研究发现,在大洋底的火山口附近的生命群落和细菌不是通过光合作用生存,而是主要依靠火山活动带来的热量和矿物质生存。由此可见,火山活动可以形成一些水生生物生存的特殊环境,而水生生物的繁盛正是优质烃源岩形成的物质基础。

金强和翟庆龙(2003)在对渤海湾盆地东营凹陷火成岩区的 P_2O_5 与烃源岩中的有机碳的关系进行研究时发现,烃源岩的磷含量与有机碳含量具有良好的正相关关系,即有机碳的含量会随着磷含量的升高而升高。

张文正等(2009)在研究鄂尔多斯盆地火山活动对烃源岩发育的影响时发现,火山灰等火山物质降落到湖盆后,火山灰中的 Fe 、 P_2O_5 、 CaO 等进入湖盆水体之中,会发生水解作用,提高水体中营养的供给速度和底层水中的生物营养成分,促进藻类等底栖生物大量繁盛。

金强等(1998)研究发现,火山物质中的氮、磷和金属矿物质通过火山活动而进入到湖盆中,为水生生物提供了养料,有利于水生生物的生长繁殖。由此可见,陆相的火山活动也可促使湖盆中的水生生物繁盛,这正是我国陆相火山喷溢环境下富含有机质的优质烃源岩富集的重要原因之一。

二、火山活动及火山物质对烃源岩生烃的加氢、催化作用及模拟实验

关于火山物质对烃源岩的加氢及催化作用的研究已非常广泛。Berndt 等根据室内模拟实验,在 300℃ 和 500bar 条件下橄榄石与含二氧化碳的 NaCl 流体反应,发现二氧化碳降低, H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 和 C_3H_8 含量显著升高,表明橄榄石在蚀变过程中能够产生大量的氢气和烃类气体。金强等(2011) 也认为橄榄石在蛇纹石化过程中产生的 H_2 (或者火山热液来的 H_2) 对烃源岩加氢及生成气态烃的数量非常可观。另外,金强等人通过模拟实验证实绿泥石有利于有机物的催化加氢,促使源岩低熟及早熟。高岭土、蒙脱石等黏土矿物是生油岩有机质的生烃演化和油气生成过程中的重要催化剂,这一点已无可争议。绿泥石与高岭土、蒙脱石等黏土矿物结构和性质相似。Mango 于 1992 年首次提出生油岩中的过渡金属在天然气形成过程中起了催化作用,并于 1994 年、1996 年和 1999 年连续发表研究成果,他认为干酪根附近被活化的过渡金属是将石蜡转化为轻烃和天然气的催化剂,催化机理在于促使烯烃环烷化和碳碳键断裂,从而产生环烷烃和烷烃。过渡金属元素在有机质演化的各个阶段中均起催化作用。他还认为过渡金属的催化作用是烃类天然气形成的主要途径。放射性元素铀的存在可以改变实验产物中饱和烃气相色谱特征参数,说明铀的存在可以使烃源岩的演化程度发生变化,促使烃源岩的生烃门限降低,提前生成“低熟”烃类;同时在高温阶段阻止有机质过度成熟,使其保持在较低的成熟度水平,利于所生成烃的保存。铀应该为低熟油、气生成的促进因素之一。

国外自从 20 世纪 60 年代开始了烃源岩的生烃模拟实验。当时的模拟实验基本上只考虑温度对生烃过程的影响 (Eisma and Jurg, 1967; Henderson et al., 1968; Brooks and Smith, 1969; Hunt, 1979)。为了更全面考虑多种因素对烃源岩生烃过程的影响,之后进行的模拟实验考虑了不同有机质类型、温度、时间、压力、催化剂和水介质对产物特征的影响 (Alomon and Johns, 1975; Hunt, 1979; Durand and Monin, 1980; Braun et al., 1990; Berner et al., 1992; Orem et al., 1996; Cramer et al., 2001)。我国的生烃模拟实验研究是从 20 世纪 80 年代初期开始 (卢家烂, 1995), 80 年代末期,一些学者 (张惠之等, 1986) 开展了对不同煤岩组分生烃的模拟实验研究。此后,广泛开展了对不同类型、不同成熟度的烃源岩有机质在不同温度、压力条件下以及有无催化剂的生烃模拟实验研究 (汪本善等, 1980; 刘德汉等, 1982; 傅家谟等, 1987; 石卫等, 1994; 孟吉祥等, 1994; 姜峰等, 1998; 刘金钟等, 1998; 付少英等, 2002; 刘德汉等, 2004; 肖之华等, 2007, 2008)。

现今国内外常用的各种热模拟方法,按照实验体系的封闭程度,大致可以分为三类。①“开放体系”,主要包括 Rock-Eval 热解仪、Py-Gc 热解-气相色谱仪、Py-Gc-Ms 热解-气相色谱仪、热解失重仪等。热解生成的挥发物依靠其自身的压力或输入载气,不断从热反应区导出,进入计量或分析装置。②“封闭体系”,一般包括钢制容器封闭体系、玻璃管封闭体系和黄金管封闭体系。其中,钢制容器封闭体系和玻璃管封闭体