

辽河油田火山岩油气藏 勘探理论与实践

谢文彦 编著

石油工业出版社

辽河油田火山岩油气藏 勘探理论与实践

谢文彦 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从研究火山岩出发,主要介绍了辽河油田火山岩基础研究,辽河油田火山岩油气藏勘探理论与技术方法,辽河油田火山岩油气藏勘探开发实践。

本书适合从事火山岩油气藏勘探的技术人员、研究人员、管理人员及相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

辽河油田火山岩油气藏勘探理论与实践/谢文彦编著.
北京:石油工业出版社,2011.5

ISBN 978-7-5021-8366-0

I. 辽…

II. 谢…

III. 火山岩-岩性油气藏-油气勘探-辽宁省

IV. P618.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 052641 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010)64523562 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京市前进印刷厂

2011 年 5 月第 1 版 2011 年 5 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:13.25

字数:327 千字

定价:85.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

序

在全球常规沉积岩储层油气藏勘探形势日益严峻,而社会经济高速发展对油气消费需求急剧增加的形势下,全球多个国家发现了火山岩油气藏,并且具有产层厚、产率高、储量大的特点,从而作为重要的勘探开发目标,火山岩油气藏的勘探开发日益为人们所关注,业已成为世界范围内油气勘探开发与研究的一个热点和难点。

国内火山岩油气藏勘探开发已有 50 余年历史。在地域分布上,东自渤海湾盆地西至准噶尔盆地,北从松辽盆地南到苏北盆地,在地层层位上,从古生界到中、新生界,火山岩储层的油气藏均有所发现。近几年来在我国东部深层油气勘探中,又陆续发现一批火山岩油气藏,特别是大庆油田徐深 1 井白垩系营城子组火山岩高产气藏的发现,证明火山岩油气藏的勘探开发具有广阔前景,揭开了火山岩油气勘探历史的新篇章。然而,火山岩的储层及其油气藏与常规油气藏相比,其地质条件更加复杂,在火山岩的岩性、岩相、储层物性及其相互关系方面还有很多科学问题有待解决;在火山岩储层识别、描述和油气藏预测、评价等方面尚有很多地质、地球物理技术亟需开发和完善。

本书对国内外火山岩勘探与研究的历史和现状作了全面评述,对盆地火山岩的岩相分类、特征和识别标志等方面也有详细论述。并且针对近 40 年来辽河油田火山岩油气藏的勘探开发实践,系统分析了辽河油田火山岩勘探的得失,书中有关火山岩储层发育规律、油源对比、火山岩油气藏分布与成藏规律及其勘探开发的实践经验的论述,具有重要的理论与实际意义。

本书不仅对辽河盆地未来的火山岩油气藏勘探和开发工作具有指导作用,而且对国内其他盆地火山岩油气藏的勘探和开发也具有重要的借鉴意义。相信本书的出版将启发和激励广大石油科技工作者去探索 and 发现新的油气勘探领域,为实现石油工业可持续发展做出贡献。

中国科学院院士
中国石油大学(北京)教授

2011 年 5 月 5 日于北京

前 言

火山岩作为盆地填充序列的重要组成部分,也是油气的主要储集岩类之一,还可以构成局部盖层。火山岩储层以及与火山岩有关的油气藏在中、新生代陆相及海相盆地中具有全球性发育的特点。

国外对火山岩油气勘探的研究已经有一百多年的历史。火山岩广泛分布于国内外的多个含油气盆地中。19 世纪末就有对火山岩类油气藏的报道。近百年来,无论是国内还是国外,都有火山岩油气藏的发现。火山岩油气藏类型丰富。国外较著名的有美国亚利桑那州的比聂赫一比肯亚正长岩油气藏、格鲁吉亚萨姆戈里—帕塔尔租里凝灰岩油气藏、印度尼西亚贾蒂巴郎安山岩油气藏、日本吉井—东柏崎流纹岩油气藏。国内则有准噶尔盆地的多种火山岩油气藏、内蒙古二连盆地阿北安山岩油气藏、胜利油区的商 741 辉绿岩油气藏、大港油田枣 35 断块玄武岩油气藏以及辽河油田黄沙坨地区的粗面岩油气藏等。

总体看来火山岩油气藏具有分布面广、规模较小的特点,但在某些地区易形成较大产能。火山岩油气藏作为一种特殊的油气藏类型,正逐渐引起人们的重视。许多专家和学者在这方面做了大量的建设性工作。因此,火山岩油气藏已经成为一类重要的勘探目标。

在 20 世纪 70 年代,我国已经在渤海湾盆地发现了火山岩工业油气藏。然而,相对于沉积储层而言,盆地火山岩和火山岩储层研究目前还很薄弱。

火山岩油气藏已经成为重要的油气藏类型之一,从勘探到开发,已经逐步走向成熟。从初步认识到实施开发开采已经形成了一套行之有效的火山岩油气藏的配套勘探开发技术,且已经由实践证明各项技术的可靠性,但是在火山岩储层形成机理的研究上还存在不足和缺陷。

本书通过总结火山岩油气藏的研究理论到勘探开发的实践经验,概括了火山岩油气藏形成的地质过程,归纳出火山岩油气藏研究与勘探的一系列理论和技术,提出了对今后的火山岩油气藏勘探开发的一些建议,在总结前人对盆地火山岩、火山岩储层和油气藏的分类、形成原因、特征研究的基础上,归纳、总结出辽河油田火山岩勘探理论与方法,结合辽河油田火山岩勘探开发实例,希望能够对辽河地区火山岩油气勘探和开发工作提供依据。

著者

2011 年 1 月

目 录

上篇 辽河油田火山岩基础研究

第一章 火山岩岩石学研究	(3)
第一节 火山岩分类研究历史及现状	(3)
第二节 火山岩的分类和命名	(6)
第三节 辽河油田火山岩类型及其特征	(18)
第二章 火山岩岩相学研究	(29)
第一节 火山岩岩相研究历史及现状	(29)
第二节 辽河油田火山岩岩相类型及岩相序列	(32)
第三节 辽河油田火山岩岩相模式及岩相分布规律	(38)
第三章 辽河油田火山岩形成的地质条件研究	(44)
第一节 辽河油田区域地质概况	(44)
第二节 辽河油田火山岩形成的构造特征	(46)
第三节 辽河油田火山岩形成的地层特征	(48)

中篇 辽河油田火山岩油气藏勘探开发理论与技术方法

第四章 火山岩油气藏勘探开发理论与技术方法研究	(57)
第一节 火山岩油气藏勘探开发理论	(57)
第二节 火山岩油气藏勘探开发技术方法	(60)
第三节 火山岩油气藏勘探开发理论方法与技术的应用	(66)
第五章 辽河油田火山岩油气藏形成的石油地质条件	(70)
第一节 火山油气藏的油源特征	(70)
第二节 火山油气藏的储层特征	(72)
第三节 火山油气藏的盖层特征	(81)
第四节 火山油气藏的生储盖组合特征	(82)
第六章 辽河油田火山岩油气藏识别与预测技术	(83)
第一节 火山岩油气藏识别与预测的测井技术	(83)
第二节 火山岩油气藏识别与预测的地震技术	(89)
第三节 火山岩油气藏识别与预测的其他技术	(96)
第四节 火山岩油气藏识别与预测技术系列评价	(107)
第七章 辽河油田火山岩油气富集规律	(112)
第一节 火山岩油气藏形成的有利条件	(112)
第二节 火山岩优势运移通道分析	(115)

第三节	不同类型火山岩油气运聚单元油气运移方向和途径	(117)
第四节	火山岩油气藏类型	(119)

下篇 辽河油田火山岩油气藏勘探开发实践

第八章	东部凹陷黄沙坨地区火山岩油气藏	(125)
第一节	火山岩类型及其特征	(126)
第二节	火山岩油气藏解剖及主控因素分析	(135)
第三节	火山岩油气藏综合评价	(138)
第四节	勘探效果及下步勘探方向	(138)
第九章	东部凹陷热河台一欧利坨子地区火山岩油气藏	(140)
第一节	火山岩类型及其特征	(140)
第二节	火山岩油气藏剖析及主控因素分析	(157)
第三节	火山岩油气藏综合评价	(163)
第四节	勘探效果及下步勘探方向	(163)
第十章	东部凹陷青龙台地区火山岩裂缝油气藏	(165)
第一节	火山岩类型及其特征	(166)
第二节	火山岩油气藏解剖及主控因素分析	(174)
第三节	火山岩油气藏综合评价	(177)
第四节	勘探效果及下步勘探方向	(178)
第十一章	西部凹陷牛心坨地区火山岩油气藏	(179)
第一节	火山岩类型及其特征	(181)
第二节	火山岩油气藏解剖及主控因素分析	(188)
第三节	火山岩油气藏综合评价	(194)
第四节	勘探效果及下步勘探方向	(194)
第十二章	辽河油田火山岩圈闭及其含油气性预测	(195)
第一节	火山岩圈闭预测	(195)
第二节	火山岩圈闭含油气性预测	(196)
第三节	火山岩勘探开发启示	(197)
参考文献		(200)

上 篇

辽河油田火山岩基础研究

第一章 火山岩岩石学研究

在地壳深部或上地幔顶部的软流圈,局部存在炽热的、成熔融状态的岩浆,岩浆直接喷出地表冷却后形成的岩石称为火山岩(volcanic rock)或喷出岩(extrusive rock)(杨桥,2004)。其中,由火山口宁静溢流出来的熔岩经冷凝而形成的岩石,称为熔岩(lava);由火山口经强烈爆发出来的各种火山碎屑物质堆积而成的岩石,称为火山碎屑岩(volcaniclastic rock);与火山作用密切相关的超浅层侵入岩称为次火山岩(subvolcanic rock)。

岩浆作用(magatism)是指岩浆的发育、运动及其固结成岩的作用。它又依据岩浆是侵入地壳之中还是喷出地表之外,分为侵入(magmatic intrusion)和喷出(eruption)两种作用形式,喷出作用也称为火山作用(volcanism)。

第一节 火山岩分类研究历史及现状

火成岩分类的研究,始于19世纪70年代,至今已有100多年的历史,提出的分类方案也不下20种。在这些分类方案中,矿物含量、化学成分、产地和结构、构造分别被不同研究者作为分类命名的依据。由于各分类所依据的着眼点不同,再加上火成岩本身的多样性,致使现有的火成岩名称达1000多种,这也反映了火成岩复杂多样的事实。在火山岩发育的地区对火山岩进行分类是一项重要的基础工作(魏惠珊,2007)。

火山作用的产物可分为熔岩和火山碎屑岩两大类。次火山岩是岩浆在超浅层条件下侵入形成的产物,在多数情况下具有类似熔岩的外貌,其分类基本可效仿熔岩的分类方案(赵澄林、孟卫工等,1999)。在命名时为了区别起见,可在岩石名称前加一“次”字,如次流纹岩、次安山岩等。有些情况下,次火山岩又具有火山碎屑岩外貌,它们是在近地表由于熔浆物质发生爆炸作用形成的,对这类次火山岩命名时可采用火山碎屑岩分类命名的某些原则,同样为了区别起见,可在名称前加一“次”字或加“自碎”两字。

一、熔岩分类历史及现状

火山熔岩是地下深处的岩浆喷出地表所形成的熔岩经凝固固化而成的岩石。火山熔岩分类有两个基本方向,即矿物成分分类和岩石化学成分分类。矿物成分分类是指用化学成分计算标准矿物组成,然后借用侵入岩的矿物成分双三角分类图来划分火山岩(Chayes,1981);岩石化学成分分类是指用常量元素(Bas等,1986)或微量元素(Winchester,1977)来进行火山岩的分类(王璞珺、冯志强等,2008)。

1. 熔岩分类历史

1) 矿物成分分类研究历史

Cross等在1903年提出了火成岩的定量分类系统(CIPW norm system)。该系统将岩石常

量元素百分含量转化成标准矿物(normative minerals)组成,再由计算取得的主要造岩矿物含量,用投影图确定火山岩类型。其标准矿物计算方法实质上是基于钙碱性和钠系列火山岩的观测结果。其缺点是计算所求得的标准矿物与实际观察到的矿物不能十分吻合,特别是对于不饱和型火山岩的计算会出现异常结果。

20 世纪 30 年代 Niggli(1931)和 Troeger(1935)提出标准矿物计算的分子数方法,并将橄榄石、辉石、角闪石、云母及黄长石等铁镁硅酸盐矿物组分考虑在内,通过计算模式与成分之间的相互控制,使计算标准与实际矿物组成趋于一致。但该结果的缺点是只给出长石平均值,没有火山岩分类所必需的碱性长石与斜长石的比值。Rittmann(1973)系统论述了火山岩标准矿物成分的求取方法,针对 12 种常见造岩矿物和 12 种典型火山岩,就标准矿物计算步骤和相关问题进行了详细的说明,完善了火山岩标准矿物分类体系。Streckeisen(1968)提出了火山岩分类的 QAPF 双三角图(Q——石英,A——碱性长石,P——斜长石,F——副长石),成为火山岩现代分类学的基础,也是用标准矿物判别火山岩类型的主要工具。由此确定的火山岩名称与侵入岩对应(邱家骧,1985),包括:碱长纹岩、流纹岩、英安岩、石英碱长粗面岩、石英粗面岩、石英粗安岩、钙碱性安山岩、钙碱性玄武岩、碱长粗面岩、粗面岩、安粗岩、橄榄粗安岩、副长石碱长粗面岩、副长石粗面岩、含副长石安粗岩、碱性玄武岩、响岩、碱玄质响岩、碱玄岩、响岩质副长石岩共 20 种(吴利仁等,1982)。

2) 岩石化学成分分类研究历史

火山岩的岩石化学成分主要依据常量元素含量进行分类,Bas 等(1986)提出全碱—二氧化硅图(total alkali - silica diagram,TAS)。LeMaitre 等(1989)对此进行了详细论述,并把火山岩分类分为 3 种情况区别对待:(1)若矿物含量可确定则用 QAPF 双三角图进行分类,方法和结果类似于深层岩;(2)若矿物含量不可确定但有岩石化学成分结果,则用 TAS 图解分类法分类;(3)若既无矿物含量又无岩石化学成分结果时,则采用“野外用火山岩 QAPF 初步分类图解”,将其划分为流纹岩类、英安岩类、粗面岩类、安山或玄武岩类、响岩类、碱玄岩类和副长石岩类共 7 种。通常第三种情况仅用于野外临时定名。

2. 熔岩分类现状

目前国内外广泛使用火山熔岩分类的基本依据是:用 SiO_2 、 K_2O 、 Na_2O 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 TiO_2 等化合物中常量元素的含量确定火山岩类型的 TAS 图解。TAS 图中用 SiO_2 质量分数(%) 和 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 质量分数(%) 分别作为横、纵坐标,将火山岩分为流纹岩、英安岩、安山岩、玄武安山岩、玄武岩、苦橄玄武岩、粗面岩(标准矿物石英含量小于 20%)或粗面英安岩(石英含量大于 20%)、粗面安山岩、玄武粗安岩、粗面玄武岩、响岩、碱玄质响岩、响岩质碱玄岩、碱玄岩(标准矿物橄榄石含量小于 10%)或碧玄岩(橄榄石含量大于 10%)、副长石岩[将其中高镁(MgO 含量大于 8%)火山岩划分为麦美奇岩($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 含量小于 1% 和 TiO_2 含量大于 1%)和科马提岩($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 含量小于 1% 和 TiO_2 含量小于 1%); SiO_2 含量大于 53%, MgO 含量大于 8% 和 TiO_2 含量小于 0.5% 火山岩称为玻(质)古(铜)安山岩]等 15 种类型。根据钾钠相对含量还可划分出夏威夷岩、钾质粗面玄武岩、橄榄粗安岩、橄榄玄武粗安岩、歪长粗面岩和安粗岩等 6 个亚种。根据 Al 和 Fe 的相对含量又分出钠闪碱流质和碱流质两类(王璞珺、冯志强等,2008)。

二、火山碎屑岩分类历史及现状

1. 火山碎屑岩

火山碎屑岩主要是由火山爆发所产生的碎屑物质,在原地堆积或经空气、水介质的短距离搬运、堆积,再经固结或熔结等成岩作用而形成的岩石。国际地质科学联合会火成岩分类命名委员会 LeMaitre 等(1989)所定义的火山碎屑岩包括空落、流动和基浪沉积,还包括地下和火山通道沉积(如玻质火山碎屑岩、侵入和侵出角砾岩、凝灰岩墙、火山角砾岩筒等)。由火山活动形成的火山碎屑物质可以在火山口附近就地形成原地堆积,也可以借气流或水流的携带而搬运到远离火山口的任何可能的地方形成异地沉积,另外还可以在地下较浅处由隐爆活动构成隐爆堆积。

2. 火山碎屑岩分类历史及现状

火山碎屑岩是介于熔岩和沉积岩之间的过渡类型岩石,其形成作用具有双重性。岩类复杂。长期以来,火山碎屑岩的分类研究受到了国内外学者的重视,先后提出了火山碎屑物、火山碎屑岩岩性和火山碎屑岩成因分类。虽然目前国际地质科学联合会火成岩分类命名委员会确定的火山碎屑物和火山碎屑岩岩性分类已得到广泛推广,但此分类尚有不足之处。其中中国学者提出的火山碎屑岩分类时间较早,具有自己特色,在一定范围内得到了应用。

国际上正式发表的火山碎屑岩分类表有数十个之多,特别是 20 世纪 80 年代初国际地质科学联合会火成岩分类命名委员会委托瑞士地质学家 R. Schmid 拟定了一个火山碎屑物和火山碎屑岩分类表。国内第一个火山碎屑岩岩性分类表,是 1959 年孙善平和王小明根据火山碎屑岩的过渡性特征和粒度提出的,之后,经过多年火山岩发育区的野外地质调查工作,结合广大地质工作者的意见,1962 年孙善平和王小明在此基础上又提出了一个比较成熟的分类表,曾在中国地质学会第 32 届年会上宣读,引起了与会者的高度重视。1987 年,孙善平等又提出了一个相对比较完善的岩性分类表,目前该分类表已在国内逐步推广和使用。

1) 国外火山碎屑岩分类历史及现状

火山碎屑岩中火山碎屑(pyroclasts)专指作为火山活动直接结果的碎裂作用而产生的碎屑,不包括熔岩流自角砾岩化而形成的碎屑颗粒;火山碎屑物质可以按其组成及结晶状况分为单晶或晶屑、玻屑和岩屑。火山碎屑的形状是其主要鉴定标志,其外形是在火山碎裂作用中或碎裂后搬运到第一沉积地点时形成的,决不能有反映在后期再沉积过程中受到改造的迹象。如果有后期改造,则应称为“改造的火山碎屑”(reworked pyroclasts)或“外碎”(epiclasts)。火山碎屑包括火山弹(bombs)、火山集块(blocks)、火山角砾(lapilli)和火山灰(ash grains)。

(1)火山弹:平均粒径大于 64mm,其形态和表面(像面包壳)显示,在形成和后续搬运过程中全部或部分处于熔融状态。

(2)火山集块:平均粒径大于 64mm,其棱角一次棱角状外形显示,它们形成时是刚性的。

(3)火山角砾:平均粒径为 64 ~ 2mm 的火山碎屑,可为任意形态。

(4)火山灰:平均粒径小于 2mm 的火山碎屑,可进一步分为粗火山灰(2 ~ 1/16mm)和细火山灰(也称火山尘),平均粒径小于 1/16mm。

LeMaitre 等(1989)将火山碎屑体积含量大于 75% 的岩石定义为火山碎屑岩,其分类按粒

度和碎屑成分分别进行:(1)粒度大于 64mm 为火山集块岩(agglomerate)和火山碎屑角砾岩(pyroclastic breccia);(2)粒度介于 64~2mm 为火山角砾凝灰岩(lapilli tuff);(3)粒度介于 2~1/16mm 为粗(火山灰)凝灰岩或(火山)尘凝灰岩(coarse ash tuff);(4)粒度小于 1/16mm 为细(火山灰)凝灰岩或(火山)尘凝灰岩(fine ash tuff or dust tuff)。成分分类是依据玻屑或浮岩、晶屑、岩屑三端元含量分别冠以“xx”凝灰岩,三者含量相对多者作前缀。例如以晶屑为主则命名为晶屑凝灰岩(王璞珺、冯志强等,2008)。

2) 国内火山碎屑岩分类历史及现状

早在国际地质科学联合会推荐分类方案之前,我国学者就结合国内实际情况开始探索火山岩分类方案(中国地质学会岩石专业委员会火山岩分类小组,1984a,1984b;李兆鼎等,1989)。王德滋和周新民于 1982 年依据中国东南地区火山岩研究经验提出了系统详尽的火山岩分类方案,首先把火山岩分为火山熔岩、火山碎屑熔岩、火山碎屑岩、火山碎屑沉积岩四大类。

其中火山熔岩按 SiO_2 含量分为 5 大类:酸性岩(SiO_2 含量大于 70%)、中酸性岩(62%~70%)、中性岩(53.5%~62%)、基性岩(44%~53.5%)和超基性岩(SiO_2 含量在 44% 以下),再根据 SiO_2 对全碱($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$)和 CaO 的关系,细分成 13 种,包括流纹岩、英安流纹岩、英安岩、安山岩、安粗岩、粗面岩、响岩、拉斑玄武岩、碱性橄榄玄武岩、碧玄岩、苦橄岩、霞石岩和镁绿岩。

火山碎屑熔岩、火山碎屑岩和火山碎屑沉积岩,按粒度大小可分为集块(大于 50mm)、角砾(50~2mm)和凝灰(小于 2mm)3 种基本类型,该分类中强调了火山碎屑熔岩。中国地质学会岩石专业委员会火山岩分类命名小组(1984a)分类中也单独划分出火山碎屑熔岩。王璞珺、冯志强等(2008)根据松辽盆地 127 口探井和盆缘剖面火山岩特点,将盆地内的火山岩分为火山熔岩类、火山碎屑熔岩类、火山碎屑岩类、沉火山碎屑岩类 4 大类。

随着对火山岩研究的深入,在不同的地区结合当地的实际地质情况,对火山岩的分类还在进一步地细化,并不断地有所突破。

第二节 火山岩的分类和命名

一、火成岩的成分

火成岩的物质成分包括化学成分和矿物成分,它们是火成岩最重要的特征之一,也是火成岩分类命名的主要依据,了解和识别各类火成岩及其内在联系和成因也有赖于对火成岩物质成分的深入研究。

1. 化学成分

地壳中的所有元素在火成岩中均有发现,它们可以分为主要元素、微量元素和同位素 3 类,其中直接用于火成岩分类的是主要元素。

1) 主要元素

主要元素是地幔和地壳的主要组成元素,其分析结果一般以氧化物质量分数的形式给出,包括 SiO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 MnO 、 CaO 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 、 FeO 、 Fe_2O_3 、 P_2O_5 和 H_2O ,依据研究目的不同,还可以包括 Cr_2O_3 、 ZrO_2 和 CO_2 等。这些氧化物的质量分数一般都大于 0.1%,其质量分数总和占火成岩平均化学成分的 98%(表 1-1)。

表 1-1 地幔、地壳及火成岩的平均化学成分(据路凤香,2001) 单位:质量百分含量(%)

氧化物	地幔 (Ringwood, 1975)	大洋壳 (Ronov, 1976)	大陆壳 (Taylor, 1964)	火成岩 (Clark, 1924)
SiO ₂	45.2	49.4	60.3	59.12
TiO ₂	0.71	1.4	1.0	1.05
Al ₂ O ₃	3.54	15.4	15.6	15.34
FeO	8.45	10.1	7.2	6.54
MnO	0.14	0.3	0.1	0.12
MgO	37.48	7.6	3.9	3.49
CaO	3.08	12.5	5.8	5.08
Na ₂ O	0.57	2.6	3.2	3.84
K ₂ O	0.13	0.3	2.5	3.13
P ₂ O ₅	—	0.2	0.2	0.3

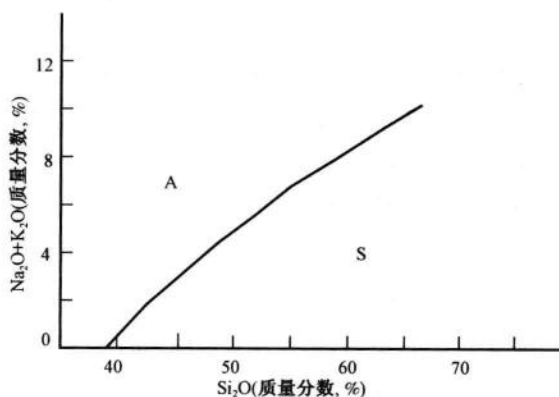
(1) 主要元素中, SiO₂ 的含量是最高的, 一般介于 34%~75%, 少数可达 80%。它对岩浆及火成岩的物理化学性质以及矿物组成的影响最大, 因此是火成岩中最重要的一种氧化物, 并作为火成岩酸性和基性程度的划分参数。其中 SiO₂ 含量小于 44%, 称为超基性岩; SiO₂ 含量介于 44%~53.5%, 称为基性岩; SiO₂ 含量介于 53.5%~62%, 称为中性岩; SiO₂ 含量介于 62%~70%, 称为中酸性岩; SiO₂ 含量大于 70%, 称为酸性岩。

(2) (Na₂O + K₂O) 在岩浆中称为全碱 (Alk)。因为 Na₂O、K₂O 是主要元素中最易熔融的组分, 因而对源区的组成和部分熔融程度的变化以及岩浆的演化过程反应敏感, 在火成岩的研究中意义重大。在火成岩中, 常用全碱含量与 SiO₂ 含量的相对关系对火成岩进行碱度及系列的划分。划分方法有很多, 常用的有以下两种。

① SiO₂ 含量与 (Na₂O + K₂O) 含量关系图解(图 1-1): 该图解是经常使用的碱度系列划分图解, 可将火成岩划分为碱性系列(A)和亚碱性系列(S)。

② 里特曼(组合)指数(δ): $\delta = [w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})]^2 / [w(\text{SiO}_2) - 43]$ 。据此分为: 钙性岩($\delta < 1.8\%$)、钙碱性岩(δ 介于 1.8%~3.3%)、碱性岩(δ 介于 3.3%~9%)和过碱性岩($\delta > 9\%$)。

(3) Al₂O₃ 在火成岩的平均组成中含量仅次于 SiO₂, 岩浆中的丰度高, 则黏度加大, 而且暗示岩浆岩中长石的含量高。同时它还是岩石进一步分类和成因研究中的重要参数。如亚碱性玄武岩中 Al₂O₃ 含量大于 16% 称为高铝玄武岩, 是岛弧火山岩中的一个重要特征。花岗岩中 Al₂O₃/(Na₂O + K₂O + CaO) (物质的量比, 常表示为 A/CNK) > 1.1, 多为 S 型花岗岩。

图 1-1 SiO₂ 含量与 Na₂O + K₂O 含量关系

(据 Irvine, 1977)

A—碱性系列; S—亚碱性系列

2) 微量元素

微量元素是指在体系中不作为任何物相的主要组分存在的非化学计量的分散元素。其含量很低,如锂、铷、铯、铌等元素,微量元素在火成岩中的总含量一般不超过 0.1%。火成岩中微量元素以多种方式存在,最主要的是呈类质同相占据矿物晶格内晶体化学性质相近的其他元素的位置,如 Cr、Ni 可占据橄榄石和辉石中 Mg、Fe 的位置, Li、Rb、Cs 可占据钾长石和云母中 K 的位置等;其次是保存在快速固结和冷凝的火山玻璃和气—液包裹体中;再次是吸附在矿物表面或以杂质的形式存在于矿物晶体缺陷的间隙内。微量元素以何种方式存在主要取决于其化学性质,如离子半径、所带电荷、岩浆成分及其所结晶的矿物种类等。有些元素会优先以类质同相的方式进入到结晶的矿物相中,有些元素则不能被早期结晶出的矿物捕获或容纳,而在残余熔体中富集,从而导致了结晶相与残余熔体相中的微量元素丰度的分异。

在地幔熔融岩浆的过程中,残留富集于地幔岩的矿物之中的元素,称为地幔相容元素,有 Cr、Ni、Co、Yb 等;另一些会在岩浆中强烈富集,称为地幔不相容元素,如 Cs、Rb、K、Ba、Sr、La、Y、Th、Ti、P 等。由于这些元素在岩石化学性质上的差异,造成微量元素在岩石圈垂向剖面上发生了强烈的分异,由地幔分异(岩浆作用)形成的地壳中不相容元素丰度要比地幔中者高很多。另外,来自软流圈或更深处的流体也可能对局部地幔进行交代,使其不相容元素发生再富集,造成地幔岩横向上的不均一性。来自不同源区的岩浆,在微量元素特征上一定会留下源区的印迹,因此,可利用火成岩中微量元素的特征来追踪岩浆源区的组成和特征,进而分析岩浆形成的构造环境。在这类研究中,微量元素比值、微量元素图解和稀土配分图解等是常用的表达方式。

3) 同位素

同位素是指元素周期表中,原子核内质子数相同而中子数不同的一组元素。同位素可分为稳定同位素和不稳定同位素两类,后者即放射性同位素,它们在火成岩研究中有重要的意义。应用较多的稳定同位素有 O、C、S、H、He 等;放射性同位素有 K—Ar、Rb—Sr、Sm—Nd、U—Pb、Th—Pb 及 Re—Os 等。应用同位素分析可以解决火成岩形成的绝对年龄,示踪岩浆的源区,阐明岩浆的演化,推断岩浆岩的形成温度、岩浆岩与成矿的关系等。

2. 矿物成分

火成岩中的矿物成分受控于岩浆的化学成分和结晶条件,因而对于了解岩石的化学成分和岩石的成因都有重要的意义,同时它也是火成岩分类和命名的依据。

1) 矿物的种类

组成火成岩的矿物不下数百种,但最常见的不过 10 余种,这些数量大且分布广,构成火成岩的矿物称为造岩矿物。主要造岩矿物在各类火成岩中均有分布,其大概含量见表 1-2。

表 1-2 某些常见火成岩的主要矿物的平均体积含量(据 T. Bapt, 1956) 单位: %

岩石 矿物	花岗岩	花岗闪长岩	闪长岩	正长岩	辉长岩	纯橄榄岩
石英	25	12	2	—	—	—
霞石	—	—	—	—	—	—
正长石	40	15	3	72	—	—
更长石	26	—	—	12	—	—

续表

岩石 矿物	花岗岩	花岗闪长岩	闪长岩	正长岩	辉长岩	纯橄榄岩
中长石	—	46	64	—	—	—
拉长石	—	—	—	—	65	—
黑云母	5	3	5	2	1	—
角闪石	1	13	12	7	3	—
单斜辉石	—	—	8	4	14	—
斜方辉石	—	—	3	—	6	2
橄榄石	—	—	—	—	7	95
磁铁矿	2	1	2	2	2	3
钛铁矿	1	—	—	1	2	—
磷灰石	微量	微量	微量	微量	—	—
榍石	微量	微量	微量	微量	—	—
色率	9	18	30	16	35	100

从表 1-2 中可看出,在酸性岩和中酸性岩(以花岗岩和花岗闪长岩为代表)中,以石英和长石为主,还有少量黑云母和角闪石;在中性岩(以闪长岩和正长岩为代表)中,以中长石为主,还有一定的角闪石、辉石、黑云母及少量石英;在基性岩(以辉长岩为代表)中,以基性斜长石(拉长石)和辉石为主,含少量橄榄石、角闪石、黑云母;在超基性岩(以纯橄榄岩为代表)中,以橄榄石为主,还有不等量的辉石,但不含石英。由此可见,矿物成分与火成岩的化学成分一样在各类火成岩中呈现出规律性的变化(唐洪明,2007)。

2) 矿物的分类

构成火成岩主体并在分类命名中起主要作用的矿物有:石英、钾长石、斜长石、似长石(石榴石、霞石)、橄榄石、辉石、角闪石、黑云母、白云母等。这些矿物依据化学成分分为硅铝矿物和镁铁矿物两大类。

(1) 矿物的成分分类。

① 硅铝矿物:矿物中 SiO_2 与 Al_2O_3 含量较高,不含 FeO 和 MgO ,包括石英类、长石类和似长石类矿物。它们基本不含色素原子,颜色较浅,所以也称为浅色矿物。

② 镁铁矿物:矿物中 FeO 、 MgO 的含量较高,包括橄榄石类、辉石类、角闪石类和黑云母类矿物。这些矿物的颜色一般较深,又称暗色矿物。暗色矿物在火成岩中的含量(体积分数)通常称为色率,是火成岩鉴定和分类的重要标志之一。色率随岩石酸度的变化情况大致为:超基性岩色率大于 90%;基性岩色率介于 40%~90%;中性岩色率介于 15%~40%;酸性岩色率小于 15%。

(2) 矿物的成因分类。在岩浆冷凝过程中结晶形成的矿物,称原生矿物。原生矿物根据形成的环境不同,又可分为高温型和低温型两种。一般来说,在火山岩中的矿物为高温型,深成岩中的矿物为低温型。例如,高温斜长石、高温石英(β -石英)常见于火山岩中,而低温斜长石和低温石英(α -石英)则多形成于深成相的侵入岩中。在岩浆完全结晶后,由于外界物

理化学条件的变化(主要是温度和压力的降低),使原生矿物发生转变而形成的新矿物称为成岩矿物,如高温 β -石英,在温度降低时,会转变为同质异相的低温 α -石英,透长石会转变为正长石等。另外,温度降低还会使某些固溶体矿物降低混溶程度,发生固溶体分解而形成成岩矿物,如钾长石分解为条纹长石。

在岩浆基本冷凝成固相的岩石后,由于受残余挥发组分和岩浆后期流体的作用(蚀变、交代及充填)而生成的矿物,称为次生矿物,它往往交代原生矿物或充填在矿物的空隙及晶洞中,如岩浆期后的流体可形成电气石、萤石和黄玉等矿物,也可交代原生矿物形成蚀变矿物,如橄榄石变成蛇纹石,斜长石遭受黝帘石化形成钠长石及黝帘石等。

(3)矿物的含量分类。主要矿物在岩石中含量较多,对火成岩大类的划分和命名起决定性作用。如橄榄岩中橄榄石是主要矿物,含量占50%以上;花岗岩中石英、长石是主要矿物,含量占绝大部分。

次要矿物在岩石中的含量低于主要矿物,它的存在与否不影响岩石大类的命名,而对岩石种属的命名起一定的作用,含量一般小于15%,如钠闪石花岗岩的主要矿物是石英和长石,但含有一定量的钠长石,将钠闪石冠名于花岗岩之前,作为岩石的种属名称。

副矿物在岩石中含量甚微,一般小于1%,在岩石分类命名中一般不起作用。如火成岩中的磁铁矿、磷灰石、榍石、锆石、独居石等都是副矿物。但当其含量较多或对岩石成因和成矿有特殊意义时,也可有选择地用做岩石名称的前缀。如独居石花岗岩,指该花岗岩中含较多Ce、La等稀土元素(唐洪明,2007)。

3) 矿物成分与化学成分的关系

火成岩中矿物及矿物共生组合与化学成分之间关系密切,化学成分不同的岩浆形成的矿物成分也不同。

(1) SiO_2 含量对火成岩中矿物共生组合的影响。根据 SiO_2 的相对含量,可将火成岩分为 SiO_2 过饱和岩、 SiO_2 饱和岩和 SiO_2 不饱和岩。

① SiO_2 过饱和岩石。 SiO_2 除与其他元素结合形成长石、角闪石等各类硅酸盐矿物外,还有剩余并单独结晶形成石英。大部分中酸性火成岩均属于 SiO_2 过饱和岩石。

② SiO_2 饱和岩石。 SiO_2 与其他元素结合形成长石、角闪石、黑云母、辉石等各种硅酸盐矿物后没有剩余,一般不能单独结晶形成石英。大部分基性火成岩及某些中性火成岩属于 SiO_2 饱和岩石。

③ SiO_2 不饱和岩石。岩浆中 SiO_2 只能与其他元素结合形成各种硅酸盐矿物,这些矿物中相当部分是橄榄石和似长石类等硅酸盐不饱和的矿物。超基性火成岩及碱性火成岩属于 SiO_2 不饱和岩。

(2) 碱质含量对火成岩中矿物共生组合的影响。岩石中 Na_2O 、 K_2O 的含量一般随 SiO_2 含量的增加而增加,但在 SiO_2 含量相同的岩石中,碱含量的差别会对矿物组合产生明显的影响,如在里特曼组合指数 $\delta < 3.3$ 的钙碱性火成岩中,不出现似长石和黑榴石,辉石为普通辉石和斜方辉石,角闪石为普通角闪石;而在里特曼组合指数 $\delta > 3.3$ 的碱性或组合指数 $\delta > 9$ 的过碱性岩石中,常见似长石和黑榴石,辉石通常富钠(霓石、霓辉石)或含钛(钛辉石),角闪石为钠闪石、钠钙闪石、棕闪石,不出现斜方辉石。

(3) Al_2O_3 含量对火成岩矿物成分的影响。根据 Al_2O_3 与 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 的相对含量,可