

火山岩气藏

—— 松辽盆地南部大型火山岩气藏
勘探理论与实践

侯启军 赵志魁 王立武 著



科学出版社
www.sciencep.com

火山岩气藏

——松辽盆地南部大型火山岩气藏 勘探理论与实践

侯启军 赵志魁 王立武 著

国家重点基础研究发展计划 (973) 课题 2009CB219300

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是在近年火山岩天然气勘探成果基础上,经过理论提升系统总结而成,展示了我国火山岩气藏研究的最新成果。全书在系统阐述松辽盆地断陷期火山-沉积序列和火山岩建造基础上,着重论述松辽盆地南部火山岩烃类和 CO₂ 气藏的类型、特征、成因和分布规律,然后从理论认识提高和勘探技术进步的双重角度回顾松辽盆地火山岩油气勘探的历程,最后展望松辽盆地南部火山岩气藏勘探前景。

本书可供石油与天然气地质勘查、油气田开发和勘探地球物理专业的科技人员和大专院校师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

火山岩气藏:松辽盆地南部大型火山岩气藏勘探理论与实践/侯启军,赵志魁,王立武著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-025093-3

I. 火… II. ①侯…②赵…③王… III. 火山岩-岩性油气藏-油气勘探-研究-东北地区 IV. P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 126039 号

责任编辑:韩 鹏 刘希胜/责任校对:桂伟利

责任印制:钱玉芬/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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 8 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2009 年 8 月第一次印刷 印张:25

印数:1—1 500 字数:571 000

定价:150.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

序

能源是人类生存的依托，是社会发展的命脉。在诸多能源中，石油、天然气长期以来一直占据着主导地位，像我们这样的大国，如果能源搞不上去，石油、天然气短缺，那会是什么样子？很难想象。幸运的是，中国的油气行业，同其他行业一样，在党的正确领导下，自力更生，奋发图强，开拓了一条自主创新的道路。陆相成油理论的建立，使中国的油田遍地开花，不仅摆脱了贫油国的局面，而且还使中国的油气产量挤进世界十强。大庆成为整个石油界的榜样，几十年的稳产、高产，创造了石油开发史的奇迹，徐家围子火山岩大型气田的发现，打破了通常认为的火山岩是油气勘探禁区的桎梏，揭开了油气勘探的新篇章，是中国油气勘探理论和实践的又一次飞跃，它的深远影响不仅促使与它毗邻的长岭断陷大气田的发现，更预示着油气勘探在更大的领域、更深层次的突破。

吉林油田在松辽盆地南部的勘探进一步证明，盆地火山岩是寻找油气藏的新靶区，具有广阔的前景。在那里发现的火山岩烃类气藏和 CO_2 气藏，展示了巨大的规模和特有的类型，其成因和分布规律在国内外都具有代表性，对寻找火山岩油气藏具有广泛的指导意义。由侯启军等工作在油气勘探第一线的专家撰写的《火山岩气藏：松辽盆地南部大型火山岩气藏勘探理论与实践》一书，系统地总结了松辽盆地南部火山岩气藏勘探的实践与经验，全面论述了松辽盆地的构造—沉积特征和火山岩建造，重点剖析了以火山岩为储层的气藏类型、特征、成藏条件、成藏模式、主控因素和分布规律，尤其是大型无机成因 CO_2 气藏，国内外少见，更具有特殊性，对它的深入研究和探讨是本书的一大亮点。与此同时，该书也较详细地描述了火山岩气藏的识别标志和勘探技术，形成了有特色的火山岩油气成藏理论和勘探技术。因而，本书对于研究火山岩气藏成藏理论和勘探技术具有重要指导意义，对我国火山岩油气勘探必将产生积极的推动作用和深远影响，在国际竞争中形成自己的优势。

我衷心祝愿《火山岩气藏：松辽盆地南部大型火山岩气藏勘探理论与实践》早日面世。

中国科学院院士



2009年7月

前言

早在 20 世纪 70 年代末,我国老一代石油地质工作者就提出“大庆下面找大庆”的大胆设想。那是“文化大革命”结束不久、百业待兴的年代,当时我国并不具备在深达 3000 余米的松辽盆地主力油层之下进行大规模勘探开发的科技和经济条件。然而,这句充满时代激情、蕴含丰富科学内涵的口号却始终激励着一代代石油人为之不懈努力……

但这样一个探索的过程真的不是一帆风顺,充满了艰辛、失望与喜悦……

当人们满怀希望钻探“大庆下面的大庆”时,却“不幸”地发现这些岩层尽是火山岩。“冰炭不同器而久,寒暑不兼时而至”,在传统石油地质理论看来,火山岩与油气是水火不相容的,通常被认为是油气勘探的禁区。

中国人历尽沧桑百折不回的精神为世人所共知,这种不屈不挠的“脊梁”特质在新中国的石油人身上得到近乎完美的体现。

我国于 1957 年在准噶尔盆地西北缘首次发现火山岩油藏,之后在盆地腹部石西和东部陆东—五彩湾等地相继发现大面积火山岩油气藏。自 20 世纪 70~80 年代开始,在渤海湾盆地各油田相继发现火山岩油气藏。90 年代后在下辽河盆地和松辽盆地发现火山岩油藏和气藏。尽管历经艰难坎坷,但探索的脚步始终没有停歇。火山岩油气成藏的神秘面纱正在被徐徐揭开,人们逐渐开始认识到,火山岩不但不与油气“相克”,而且在埋深大于 3000m 的盆地深层,它的储层物性必将好于沉积岩而成为优质储层。原因就是火山岩的储集空间基本与埋深无关,而沉积岩的储层物性随埋深增加明显变差。这就意味着,“大庆下面找大庆”的主攻目标正是火山岩储层及其油气藏。

回顾我国火山岩油气勘探历程,2002 年以前的我国火山岩油气勘探主要是偶遇或兼探,总体属于火山岩油气勘探的早期阶段。2002 年以后随着松辽盆地徐家围子大型火山岩气田的发现,标志着我国“大庆下面找大庆”方略的初战告捷,使我国火山岩油气勘探进入了一个崭新的发展阶段,开始了针对火山岩目的层的工业化勘探。近年在松辽盆地北部徐家围子断陷和南部长岭断陷已完成火山岩探井百余口,探明天然气储量 3210 亿 m^3 ;具有相似地质条件可望有所突破的断陷还有多个。海拉尔盆地目前已经探明石油地质储量 1.1 亿 t,火山岩和火山碎屑岩占储层的 20% 以上。辽河油田已探明火山岩地质储量 3175 万 t。此外,在二连、苏北、江汉等盆地中也发现了具有工业规模

的火山岩油气藏。截至2006年,全国探明石油238.2亿t,烃类天然气49 000亿 m^3 ,其中火山岩中探明石油5.4亿t,探明天然气2800亿 m^3 (据储量公报)。火山岩油气勘探已经在我国展现出广阔的前景。

“人类的历史就是一个不断地从必然王国向自由王国发展的历史”,火山岩油气勘探也是如此。火山岩油气勘探无疑仍是世界性难题,就全球而言也都处在探索阶段。我国发育两个特大型火山岩油气区:东部环太平洋构造域的中生代松辽盆地区和新生代渤海湾盆地区、西部古亚洲洋晚古生代准噶尔盆地区和三塘湖盆地区,它们构成了世界上少有的研究火山岩油气藏的最佳天然实验室。与国外相比这就使得我们在地质条件方面占据明显的优势。优越的地质条件、几十年的探索和积淀、国家对油气的迫切需求,真可谓是地利、人和加天时,使得火山岩油气藏理论创新这一历史责任自然而然地落在我们这一代石油人的肩上。向“铁人”等老一代石油工作者那样勇于承担起历史责任,不辱使命,是我们义不容辞的责任。在松辽盆地火山岩油气勘探形式空前高涨,同时也遇到前所未有的理论与技术难题之时,我们确实需要及时总结经验,在吸收国际先进思想的同时,创新相关理论技术,不断丰富和发展我国的陆相石油地质理论。本书的主旨就是希望借此推动我国火山岩油气勘探从必然王国走向自由王国。

在吉林油田创建50周年之际,我们组织出版此书,就是要表达我们对油气工作先驱者们的崇敬。我们藉此感谢所有对吉林油田发展尤其是在火山岩油气勘探开发和研究方面作出贡献的人们。

作者

2009年6月

目 录

序

前 言

第一章 松辽盆地火山岩建造	1
第一节 火山岩旋回	2
一、火山岩旋回的定义	2
二、火山岩旋回的划分	4
第二节 火山岩岩石学和岩相学	17
一、火山岩岩石学特征	17
二、火山岩岩相	44
第三节 火山岩储集空间	55
一、火山岩储集空间类型	55
二、火山岩储层的物性特征	62
三、火山岩储层的孔隙结构	65
四、储层的影响因素	69
第四节 火山岩成因和构造背景	76
一、火山岩大地构造判别图解	76
二、火山岩成因	81
三、构造背景	83
第五节 小结	84
第二章 松辽盆地断陷期火山 - 沉积序列	88
第一节 断陷地层层序	88
一、断陷地层总体特征	88
二、火山岩地层	107
第二节 断陷构造	116
一、区域性断裂体系	116
二、断陷的盆地构造	123

三、断陷盆地构造演化·····	132
四、区域断裂、盆地断裂与火山岩的发育·····	149
第三节 火山-沉积作用·····	154
一、火山物质的堆积作用——火山喷发与岩相类型和模式·····	154
二、岩相序列、结构与过程·····	158
第四节 小结·····	162
第三章 松辽盆地南部火山岩气藏 ·····	165
第一节 火山岩气藏分布与类型·····	165
一、火山岩气藏分布·····	165
二、火山岩气藏类型与特征·····	168
三、与火山岩气藏相关的深层碎屑岩气藏的类型及分布·····	177
第二节 火山岩气藏天然气地球化学特征与成因分析·····	180
一、天然气地球化学特征·····	180
二、天然气成因类型及来源分析·····	186
三、成藏期次·····	190
第三节 火山岩气藏成藏条件·····	196
一、烃源条件·····	196
二、储集层条件·····	223
三、盖层条件·····	225
四、输导条件·····	234
五、圈闭条件·····	236
第四节 火山岩气藏成藏主控因素与成藏模式·····	239
一、火山岩气藏成藏主控因素分析·····	239
二、火山岩气藏成藏模式·····	252
第五节 小结·····	256
第四章 松辽盆地南部二氧化碳气藏 ·····	259
第一节 国内外二氧化碳气藏研究现状·····	259
一、CO ₂ 气藏分类·····	259
二、CO ₂ 成因类型及判别·····	261
三、CO ₂ 的脱气模式·····	265
四、CO ₂ 气藏分布规律及控制因素·····	266
第二节 松辽盆地南部二氧化碳成因类型和特征·····	269
一、松辽盆地南部 CO ₂ 成因类型及特征·····	269
二、松辽盆地南部 He 成因类型·····	272
三、松辽盆地南部高含 CO ₂ 天然气中伴生烃类气成因类型·····	273

第三节 松辽盆地南部 CO ₂ 气藏成藏机理和成藏模式	274
一、CO ₂ 气藏成藏组合和气藏类型	274
二、成藏期次和成藏过程	276
三、成藏模式	297
第四节 松辽盆地南部二氧化碳分布规律和主控因素分析	302
一、二氧化碳分布规律	302
二、CO ₂ 分布控制因素	311
第五节 小结	317
第五章 松辽盆地南部火山岩气藏勘探实践	320
第一节 松辽盆地深层含气系统的特殊性探讨	320
一、独特的区域地质演化历史决定了资源类型的特殊性	320
二、火山岩储层成为主力产层	322
三、特殊的储存空间导致了气藏类型的特殊性	323
四、成藏过程前置使圈闭的时效性凸显	324
第二节 松辽盆地南部火山岩气藏勘探	326
一、松辽盆地南部深层天然气勘探历程	326
二、长岭断陷火山岩气藏勘探	328
三、英台断陷火山岩气藏勘探	331
第三节 火山岩气藏勘探主导配套技术	333
一、深层火山岩物探勘探配套技术系列	333
二、深层火山岩储层测井解释评价技术系列	336
三、深层火山岩的欠平衡钻井技术系列	339
四、深层高温高压火山岩气藏的大型压裂技术系列	340
第四节 松辽盆地南部火山岩气藏勘探前景	341
一、火山岩气藏勘探的三点启示	341
二、松辽盆地南部火山岩气藏资源前景及有利区带	343
第五节 小结	345
参考文献	348
词目汉语拼音索引	361
英文摘要	365

Volcanic Gas Reservoirs Principle & Exploration

Examples from Southern Songliao Basin

CONTENTS

PREFACE

FOREWORD

CHAPTER 1 VOLCANIC FORMATION IN THE SONGLIAO BASIN	1
1.1 VOLCANIC CYCLE	2
1.1.1 The definition of volcanic cycle	2
1.1.2 The division of volcanic cycle	4
1.2 VOLCANIC PETROLOGY AND PETROGRAPHY	17
1.2.1 The characteristics of volcanic petrology	17
1.2.2 The characteristics of volcanic facies	44
1.3 VOLCANIC RESERVOIR SPACE	55
1.3.1 The types of volcanic reservoir space	55
1.3.2 The physical property of volcanic reservoirs	62
1.3.3 The pore structure of volcanic reservoirs	65
1.3.4 The influencing factors of volcanic reservoirs	69
1.4 GENESIS AND TECTONIC SETTING	76
1.4.1 Tectonic settings discrimination diagram of volcanic rocks	76
1.4.2 Genesis of volcanic rocks	81
1.4.3 Tectonic setting of volcanic rocks	83
1.5 SUMMARY	84
CHAPTER 2 VOLCANIC-SEDIMENTARY SEQUENCE OF FAULT DEPRESSION	
PERIOD IN THE SONGLIAO BASIN	88
2.1 FAULT-DEPRESSION STRATIGRAPHIC SUCCESSION	88
2.1.1 The general features of fault depression stratigraphic	88
2.1.2 The volcanic strata	107
2.2 FAULT-DEPRESSION STRUCTURE	116
2.2.1 Regional fault system	116
2.2.2 The basin structure of fault depression	123
2.2.3 The basin structure evolution of fault depression	132
2.2.4 Regional fault, basin fault and volcanic rocks	149
2.3 VOLCANIC-SEDIMENTATION ACTIVITY	154
2.3.1 Cumulation of volcanic rocks	154

2.3.2	The sequence, structure and process of facies	158
2.4	SUMMARY	162
CHAPTER 3 VOLCANIC RESERVOIRS IN THE SOUTHERN SONGLIAO BASIN ...		165
3.1	DISTRIBUTION AND TYPES OF VOLCANIC GAS RESERVOIRS	165
3.1.1	The distribution of volcanic volcanic gas reservoirs	165
3.1.2	The types and characteristics of volcanic gas reservoirs	168
3.1.3	The types and distribution of deep clastic gas reservoirs relevant with volcanic rocks	177
3.2	GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS AND GENESIS ANALYSES OF THE NATURAL GAS FROM VOLCANIC RESERVOIRS	180
3.2.1	Geochemical characteristics of natural gas	180
3.2.2	Genesis and origin analysis of natural gas	186
3.2.3	Gas reservoir forming stage	190
3.3	ACCUMULATING CONDITIONS OF VOLCANIC GAS RESERVOIR	196
3.3.1	Conditions of hydrocarbon source rocks	196
3.3.2	Conditions of reservoirs	223
3.3.3	Conditions of cap rock	225
3.3.4	Conditions of petroleum conduction	234
3.3.5	Conditions of trap	236
3.4	CONTROLLING FACTOR AND ACCUMULATING MODEL OF VOLCANIC GAS RESERVOIR	239
3.4.1	Controlling factor analysis of volcanic gas reservoir	239
3.4.2	Accumulating model of volcanic gas reservoir	252
3.5	SUMMARY	256
CHAPTER 4 CO₂ GAS RESERVOIRS IN THE SOUTHERN SONGLIAO BASIN ...		259
4.1	The current development of CO ₂ gas reservoirs home and abroad	259
4.1.1	Classification of CO ₂ gas reservoirs	259
4.1.2	Genesis and discrimination of CO ₂ gas reservoirs	261
4.1.3	Outgas model of CO ₂	265
4.1.4	Distribution law and controlling factors of CO ₂ gas reservoirs	266
4.2	GENESIS OF CO ₂ IN THE SOUTHERN SONGLIAO BASIN	269
4.2.1	Genesis of CO ₂ in the southern songliao basin	269
4.2.2	Genesis of He in the southern songliao basin	272
4.2.3	Genesis of associated hydrocarbon gas of high CO ₂ content natural gas in the southern Songliao basin	273
4.3	ACCUMULATION MECHANISM AND MODEL OF CO ₂ GAS RESERVOIRS IN THE SOUTHERN SONGLIAO BASIN	274

Songliao basin	274
4.3.2 Reservoir forming stage and process	276
4.3.3 Accumulation model	297
4.4 THE DISTRIBUTION AND CONTROLLING FACTORS OF CO ₂ IN THE SOUTHERN SONGLIAO BASIN	302
4.4.1 The distribution of CO ₂	302
4.4.2 The controlling factors of CO ₂	311
4.5 SUMMARY	317
CHAPTER 5 VOLCANIC GAS RESERVOIRS EXPLORATION IN THE SOUTHERN SONGLIAO BASIN	320
5.1 PARTICULARITY IN SONGLIAO BASIN DEEP GAS SYSTEM IN THE SONGLIAO BASIN	320
5.1.1 Particularity in resource type decided by regional geology evolution history ..	320
5.1.2 Volcanic reservoir as principal producing formation	322
5.1.3 Particularity in gas reservoir type caused by particular reservoir space	323
5.1.4 Prepositive reservoir forming process caused by aging effect of trap prominently	324
5.2 VOLCANIC GAS RESERVOIR EXPLORATION HISTORY AND EXAMPLES IN THE SOUTHERN SONGLIAO BASIN	326
5.2.1 Deep natural gas exploration history in the southern Songliao basin	326
5.2.2 Volcanic gas reservoir exploration in Changling fault depression	328
5.2.3 Volcanic gas reservoir exploration in Yingtai fault depression	331
5.3 VOLCANIC GAS RESERVOIR EXPLORATION LEADING MATCHING TECHNOLOGY	333
5.3.1 Geophysical exploration technology of deep volcanic rocks	333
5.3.2 Logging reservoir explanation and evaluation technology of deep volcanic rocks...	336
5.3.3 Under balance drilling technology of deep volcanic rocks	339
5.3.4 Large scale fracturing technology of high temperature and high pressure volcanic gas reservoir in deep	340
5.4 VOLCANIC GAS RESERVOIR EXPLORATION PROSPECTS IN THE SOUTHERN SONGLIAO BASIN	341
5.4.1 Three inspirations of volcanic gas reservoirs	341
5.4.2 Prospects and favorable zone of volcanic gas reservoirs in the southern Songliao basin	343
5.5 SUMMARY	345
REFERENCES	348
SUBJECT INDEX	361
ABSTRACT	365

第一章 松辽盆地火山岩建造

建造这一术语,在英文中为 *formation*,俄文中为 *формаия*,德文中为 *die formation*,都来源于原拉丁文 *formation*,直译应做“形成”,既指形成体,又指它的发展过程。它首先在 18 世纪中叶被菲克谢尔引入地质文献中,当时是用来表示在成分及剖面中的位置上都相似的区域岩石地层组合。1882 年国际地质学会的决议,禁止用这术语来表示地层意义。近几十年来多用于表示岩石组合体的概念。并出现了诸如复理石建造、磨拉石建造、含油建造、含煤建造、含盐建造、含铁建造、含磷建造以及地台型建造和地槽型建造等。建造是研究组成地壳成层岩石圈中岩石共生组合体的形成和分布规律的(孟祥化,1979)。建造又称“地质建造”,指岩石在自然界中有规律的共生组合,它们彼此之间无论在时间还是空间上都有密切的关系。根据岩石组成的不同,可分出各种建造类型,如岩浆建造类型、沉积建造类型等。根据建造条件形成的不同,又可分出各种建造序列,如地槽建造序列、地台建造序列。其中孟祥化对沉积建造进行了系统而详细的研究,这些研究有助于对火山岩建造的研究和理解(孟祥化,1979)。沉积建造是指某一特定的长期持续的(时限大于 10^7 年)板块构造背景下形成的岩石和岩相组合体,它的形成受全球海平面和区域相对海平面变化的控制,形成特定的沉积层序和格架特征(孟祥化等,1993,1989;孟祥化和葛铭,1985)。这表明沉积体是在一定的大地构造背景下形成的,其特征反映了大地构造环境(田景春和张长俊,1995)。

Ю. А. 库兹涅佐夫和 D. W. 海德曼从地槽-地台学说的观点出发,根据火成岩在地壳构造的不同阶段所出现的有规律的共生,来划分岩浆建造或火成岩组合类型。库兹涅佐夫根据区域地质构造及岩浆活动的特点划分出四种建造类型:①活动带发展的地槽阶段的岩浆建造;②活动带造山阶段的岩浆建造;③稳定地区的岩浆建造;④地盾和老地台发展的各个阶段中的一些特殊建造。在每一建造类型内,按岩石共生的情况再进一步划分出不同的建造。当岩石组合可划出一系列建造时,则构成建造组合。海德曼则根据在构造运动(造山运动)的不同阶段所出现的岩浆活动来划分组合类型。他划分为:①前造山或早造山阶段共生组合类型(蛇绿岩套);②同造山阶段共生组合类型;③后造山阶段共生组合类型。在每一组合类型中,按岩石共生的情况再进一步划分火成岩的共生组合。

库兹涅佐夫的岩浆建造或海德曼的火成岩共生组合的观点,基本上能反映出在不同的大地构造环境和构造运动演化的不同阶段中所出现的不同类型火成岩组合的客观事实,但由于他们的岩浆建造或火成岩组合类型的划分,是建立在以大陆地质资料为依据的地槽-地台学说基础上的,而这个学说本身并没有合理地解释地槽和地台在空间

上配置的关系,因此也不易解释不同类型火成岩组合在空间上和时间上的分布规律(孟祥化,1979)。

1981年的地质辞典中将火山岩建造定义为成因相似并有共同特征的几种火山岩呈有规律的组合。

孙鼎和彭亚明(1985)认为岩浆建造(magmatic formation)是在一定地质构造环境和一定的地质发展阶段内,成因上有密切联系的,互相紧密共生的岩石有规律的自然组合。相同的火成岩组合可以在不同的地区和不同的时代出现,但却属于同一类型的地质构造,并具有类似的成矿专属性。孙鼎等采用了卡迈克尔(I. S. E. Carmichael)对火成岩组合的划分。其划分如下:大洋盆地玄武岩组合;大陆拉斑玄武岩区;大陆深源的镁铁质岩浆;岛弧和大陆边缘的安山岩及其共生的火山岩;大陆深成岩区的岩石。并详细描述了主要火山岩共生组合的特征。孙鼎等对岩浆建造(火山岩建造)的研究是在全球构造背景的基础上,划分火山岩组合并对各共生组合的特征进行了详细的描述。

袁见齐等(1985)认为,“火山建造”(或火山岩组合、火山岩系列)系指在一定的地构造单元和发展阶段,在地壳表部形成的一套火山岩组合(深度:喷溢相-次火山相;岩性:超基性-基性-中性-酸性)。“火山岩建造”的分析和研究,对了解火山岩的含矿性、火山成矿作用特征及有效地进行找矿,是极为重要的一个环节。实践证明:一定类型的矿化常常与含矿岩系中某一特定建造有密切关系,也就是说火山成矿作用对“火山建造”有一定的“专属性”。

本书将松辽盆地整个断陷期火山岩划为一个火山岩建造,与火山构造及成盆事件相对应,一个建造由数个喷发旋回组成,可以更好的反映和理解在一定的构造背景下火山活动的特点。本章通过对火山岩旋回的划分、火山岩岩石学、火山岩岩相学、火山岩的地球化学特征、火山岩的形成演化及构造背景等方面对松辽盆地南部火山岩建造进行研究,并针对目前火山岩研究的热点——火山岩油气储层,对火山岩储层发育情况及特征进行研究,并探讨火山岩建造与储层的相互关系。

第一节 火山岩旋回

一、火山岩旋回的定义

英文《地质术语辞典》中对喷发旋回/周期(volcanic cycle: a regular sequence of changes in the behavior of a volcano)的描述侧重于火山活动的变化,将其解释为“一次火山喷发事件的序列:火山活动期间,喷发方式的规律性变化”(Jackson, 1997)。中文《地球科学大辞典(基础科学卷)》中,火山旋回定义为火山活动强弱交替发展的周期性变化过程(《地球科学大辞典》编委会,1992)。

以往在我国火山岩地区区域地质调查填图工作中,考虑到火山活动的规律性和火山岩地层的特殊性,提出以岩系-旋回-韵律-期次作为火山岩地层划分单位。其中一次或多次火山喷发活动,造成成分与活动方式的周期性变化或喷发的间断,就构成喷

发韵律。若火山如此周而复始地间歇活动,岩浆成分和喷发强度等在活动中又形成若干个彼此有所区别的变化阶段,这样的变化阶段称作喷发旋回。一个喷发旋回总是由一个至若干个喷发韵律构成。二者的区别只是在于时间的长短和级别的高低(区域地质矿产地质司,1987)。

谢家莹(1996)在对陆相火山岩区火山岩地层单位与划分的论述中,提出用旋回一组一岩相一层四级作为火山地层划分单位和填图单元,其中旋回对应于火山机构,组对应于火山机构演化阶段,岩相对应于火山喷发类型,层为火山喷发产物的最小地层单位。

上述传统意义上的火山喷发旋回、期次的划分方法,主要用于查明火山活动历史、划分火山岩地层层序,随着盆地火山岩气藏勘探开发步伐的加快,已远达不到火山岩储层精细描述和火山机构详细解剖的要求。由于松辽盆地营城组古火山机构形成的多期性和相邻火山机构的叠合性,进行火山机构剖析时,不但要考虑到纵向上的序列关系,还需兼顾火山机构侧向变化规律。因此,盆地火山岩喷发旋回和期次具有两层含义,即不仅表示火山岩地层纵向上的时代关系,而且还包括在此时限内的火山岩组合及其形成的火山机构。在松辽盆地营城组火山岩研究过程中,采用旋回一期次一岩相三级方案,其中旋回对应于火山机构,期次对应于岩相组合,岩相与火山岩形成的作用方式相对应,由一个或多个火山岩层构成(黄玉龙等,2007)。

尹家衡等认为火山旋回是指在一个火山活动期内,由火山作用不同阶段形成,并与一定火山构造形式相联系的火山产物的总和。因此,正确划分火山活动旋回是阐明火山作用基本规律的基础之一。他认为划分火山活动旋回必须考虑以下基本原则。

1. 火山活动的间断性与时差性

一个火山活动旋回只代表一个火山活动期,同一活动期内,火山虽然有多次喷发,但火山活动基本连续。不同火山旋回之间由火山活动间断期分开,间断期可由区域性沉积事件、不整合而表现出来;在不同的古生物组合和同位素地质年龄上则表现为时差性。

2. 火山产物特性

不同旋回的火山产物,如火山岩岩石类型、岩相及组合、岩石化学和地球化学特征、潜火山岩以及与火山岩有关的侵入岩及矿产等,不可能完全相同。

3. 不同时期火山构造的叠置关系

不同火山旋回产物组成的火山构造虽有共性,但由于火山作用方式及所处构造环境的变异,不仅构造类型可反映出差异性,而且其火山构造的分布格局和叠置关系等亦有不同特征。同旋回火山构造以并列为主,不同旋回火山构造则主要表现为晚期构造叠置于早期构造之上(尹家衡等,1991)。

二、火山岩旋回的划分

（一）划分的依据

在盆地火山岩的相关研究中,喷发期次是指一个喷发中心的一次相对集中的(准连续)火山活动,在物质成分、喷发方式及喷发强度的规律性变化过程中,所形成的一套相序上具有成因联系的火山岩组合。这种规律性的变化,有的具有周期性,也可以具有方向性。

一个喷发期次持续时间可长达数千年,形成的火山岩厚度可达几米至几十米(多者可达几百米),侧向分布范围通常为几百米至几千米。中、酸性火山岩地区的喷发期次与旋回的厚度一般要比基性火山岩地区大得多。

根据松辽盆地火山岩地层研究的实际情况来看,火山岩喷发期次通常具有以下一些特征:①不同喷发期次之间具有小型间断面。由于构造环境的改变,不同火山活动阶段之间,发生了明显的全区性火山活动间断,间断期内火山产物遭受风化剥蚀或沉积改造,形成风化壳和沉积夹层等小型间断面。这些区域性不整合面是划分不同喷发期次最直观、最重要的标志。②不同喷发期次具有时差性。由于不同的火山活动阶段发生在不同的地质历史时期,因此不同喷发期次和旋回的火山岩同位素年龄及其内部化石组合,归属于不同的时间区段。相比较而言,不同喷发旋回之间的时差性更为显著。③不同喷发期次之间存在差异性。由于火山作用方式的改变,不同喷发期次在岩石组合和相序变化上存在差别。同一旋回的不同期次之间,火山岩成分差异一般不大,不同之处主要在于熔岩的结构构造的改变以及火山碎屑(熔)岩的粒序变化上。④不同喷发期次具有相似性和可比性。一方面,纵向上同一喷发源的不同喷发期次可呈现出周期性变化,类似的岩石组合和相序变化可重复出现。另一方面,在同一时期,即便是不同喷发源的喷发期次,由于一定范围内区域构造环境相同(似),因而在岩石和岩相的类型及组合特征上仍具有可比性。

一个至若干个喷发期次构成一个喷发旋回。在划分喷发期次的基础上,即可进行喷发旋回的划分。旋回之间的差异,主要为成分变化,也可以是火山活动强度及规模上的不同。

（二）火山岩旋回划分的方法

随着火山岩油气勘探的深入,大量地质和地球物理资料使得我们有可能将火山岩的旋回和期次划分得更加精细。同时,因为火山岩油气藏的含气性与火山岩的旋回/期次以及界面性质密切相关(蒙启安等,2005),因此产业的迫切需求也从客观上要求我们必须对火山岩的旋回和期次进行精雕细刻。王璞珺等通过对松辽盆地盆缘剖面和200余口钻遇火山岩探井的大量地质-地球物理研究,总结出一套比较适用于松辽盆地火山岩旋回期次划

分的地质与地球物理方法^{①②}，归纳总结如下。

1. 地质方法

火山岩喷发期次划分的地质方法主要为地质界面识别（包括风化壳、沉积夹层和火山灰层）、岩性组合及岩相序列分析。

（1）地质界面识别

由于火山岩形成时间持续长，而每一期火山机构建造时间可能在相对较短的时间内完成，因而后期改造时间较长，火山岩顶部存在风化壳和沉积夹层等间断界面。营城组火山活动多以爆发相开始，以大量火山灰的喷出为特征，且向上粒度变粗。火山间歇期，在一定区域范围内，也在接受来自远（异）源喷发产生的火山灰沉积。这些标志层都可作为喷发期次的划分界面。火石岭组火山岩相序变化主要由火山通道相或爆发相开始，以喷溢相为主，火山沉积相往往和喷溢相呈互层状。

1) 风化壳。两次熔浆喷溢间隔时间较长时，在早期形成的熔岩表面往往有风化剥蚀面，成分、颜色差异明显，一般不难辨认。

相邻喷发期次之间的风化壳由其下伏火山岩经过长期风化形成，同原岩相比较，易活动组分（如 FeO 、 MnO 、 Na_2O 和 K_2O 等）发生了一定迁移，同时惰性成分（如 TiO_2 、 Fe_2O_3 、 MgO 和 P_2O_5 等）发生了富集（丁林等，2000），风化过程中对放射性物质吸附能力强；钻井的测井曲线响应特征通常表现为高伽马、低电阻、低密度（郭振华，2006）。风化壳松散易碎，钻井取心不易获得，但通过分析其测井曲线特征不难识别。

风化壳成分和厚度因地而异，主要与原岩岩性、气候和风化作用的时间相关。通常情况下认为，在一定时限内，除去剥蚀作用影响的情况下，经历的风化时间越长，风化壳的厚度越大。野外露头揭示及盆内钻井识别的风化壳厚度范围为几十厘米至几米不等。

2) 沉积夹层。火山地区在火山活动间歇期接受区域性沉积，野外露头和钻井岩心观察过程中，常见大套火山岩段之间夹有薄层沉积岩，其厚度通常为几米左右，最大可达几十米，可能是正常沉积岩，但大多数情况下为火山（碎屑）沉积岩类。它们在成岩方式上基本一致，主要为压实固结；不同之处在于火山沉积岩中含有来自下部的火山碎屑物（含量 10% ~ 50%）（王璞珺等，2007a）。在研究中习惯将其统称为沉积夹层。

3) 火山灰层。以喷出火山灰开始的火山喷发形成的火山灰层，以及火山活动间歇期接受异源喷发沉积的火山灰层，都可以作为喷发期次划分的界面。受地形影响，火山灰层底面往往起伏不平，而顶面则较为平整，一般情况下，可以据此确定其顶底面（区域地质矿产地质司，1987）。

薄层火山灰常被认为是远（异）源喷发的降落沉积，厚层火山灰层则为近源沉积。

① 王璞珺等. 2000. “松辽盆地北部深层火山岩储层研究”

② 王璞珺等. 2006. “营城组火山岩野外露头岩石分析及地质大剖面建立”，中石油项目研究专题报告