

中国火山岩油气储层研究进展

孙海涛

(中国石油大学(北京)地球科学学院)

5 **摘要:** 作为一类非常规储层,火山岩也可以形成油气藏。多年的勘探成果表明其中蕴藏着丰富的油气资源。火山岩油气储层研究在中国虽起步较晚,但发展速度快、研究程度高,先后经历了早期萌芽、全面认识和精细研究三个阶段,取得了以下进展:(1)初步建立具有理论性及实用性的火山岩岩性分类体系与火山岩相模式;(2)提出了火山岩独特的成岩作用类型及成岩演化过程;(3)阐明了火山岩储层储集空间与物性演化的控制因素;(4)发现了火山岩储层油气来源的多样性;(5)探索了一套有效预测火山岩储层分布的方法。同时,关于火山岩储层的术语体系、储集空间的形成机理、三维定量的火山岩相模式、储层地质建模等方面,还有待于进一步完善和深入研究。

10 **关键词:** 火山作用;火山岩储层;成岩作用;孔隙演化;控制因素

15 **中图分类号:** G624.0

Research Advances on Volcanic Hydrocarbon Reservoir in China

SUN Haitao

(College of Geosciences, China University of Petroleum-Beijing)

20 **Abstract:** As a special kind of hydrocarbon reservoir, volcanic rock has become an important target for hydrocarbon exploration. The research on volcanic reservoirs started late in China, but it has developed quickly from the beginning to comprehensive understanding and finally accurate research. The advances are as follows: (1) Established a system for volcanic lithology classification and volcanic facies model featuring firm theoretical basis and strong practicality; (2) Putting forward diagenetic evolution process peculiar to volcanic diagenesis types and its reservoir significance; (3) Illustrating the factors controlling volcanic reservoir space and physical property evolution of volcanic rocks; (4) Verifying that the hydrocarbon exists in the volcanic reservoir in form of various sources, such as inorganic and organic sources. (5) Setting up effective methods for volcanic reservoir distribution and prediction. Even so, further systematic research should be needed for such aspects as the terminology system of the volcanic reservoir, the origin mechanism of reservoir spaces of various kinds, the three-dimensional quantitative volcanic facies model and reservoir geological modeling.

25 30 35 **Key words:** Volcanic process, volcanic rocks reservoir, diagenesis, porosity evolution, controlling factors

0 引言

从1957年在准噶尔盆地西北缘首次发现火山岩油气藏开始,中国火山岩油气勘探已有五十余年。火山岩广泛分布在各个沉积盆地基底及其周边地区,古生界(石炭系、二叠系)、中生界(侏罗系、白垩系)和新生界(古近系、新近系)都不同程度的发育有火山岩层序^[1]。目前,火山岩油气勘探已经从“勘探禁区”转为“勘探靶区”,已经陆续形成了具有一定规模、一定储量和产量的火山岩油气田^[2,3]。伴随着火山岩油气藏的发现,火山岩油气储层地质学研究也取得了丰硕的成果,本文旨在回顾中国火山岩油气储层研究已经取得的进展,并展望火山岩储层研究的未来发展。

基金项目: 国家自然科学基金(41302108);高等学校博士学科点专项科研基金(20130007120002);中国石油大学(北京)科研基金(KYJJ2012-01-18)

作者简介: 孙海涛(1985-),男,讲师,主要从事沉积岩石学研究. E-mail: haitao141141@163.com

45 1 火山岩储层勘探历史

大量的文献调研显示,火山岩油气藏或火山岩中的油气显示在五大洲均有发现^[4],主要分布在环太平洋地区,其次是非洲和中亚地区。在俄罗斯^[5]、美国^[6]、委内瑞拉^[7]、阿根廷^[8]、日本^[9,10]和中国等多个国家和地区已形成 169 个具有探明储量的火山岩油气田^[11],这些火山岩储层时代新、埋藏浅(一般小于 3000m),多数分布在侏罗系、白垩系、古近系和新近系,规模大小皆有。

50

20 世纪 80 年代以前,中国的火山岩油气藏勘探还处于偶然发现阶段;随着地质认识的提高,从 20 世纪 90 年代到本世纪初期为火山岩油气藏的局部勘探阶段,开始有针对性的对渤海湾和准噶尔盆地的个别地区火山岩展开勘探;2001 年开始,松辽盆地徐深 1 井钻探的营城组火山岩获得日产气 $52 \times 10^4 \text{m}^3$ 的突破后^[12,13],火山岩储层的勘探被重视起来,进入了全面勘探阶段。徐深 1 井所在的庆深气田已经发现控制储量 $1000 \times 10^8 \text{m}^3$ ^[14],而至 2006 年底,中国火山岩探明储量油气当量就约为 $7.3 \times 10^8 \text{t}$ ^[1],在 11 个盆地如松辽、渤海湾、二连等盆地形成了许多具有工业规模的火山岩油气藏(图 1),预测火山岩总的石油资源量达到 $60 \times 10^8 \text{t}$ ^[15]。各种文献显示,2007 年全球火山岩油气藏探明油气储量仅占总探明油气储量的 1% 左右,即 $18.24 \times 10^8 \text{t}$ 油气当量^[1,16],其中有 40% 在中国。

55

60

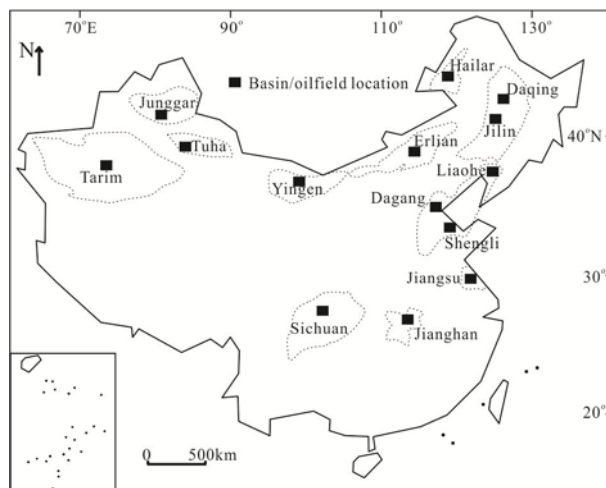


图 1 中国火山岩储层含油气盆地分布图

Fig.1 Location of major volcanic petroliferous basins in China

中国火山岩储层研究开始的时间比较晚,但相比国外而言,发展速度较快,研究程度较高。一方面,我们的火山岩储层研究并非从零开始,而是充分参考和借鉴了国外已有的勘探和研究成果;另一方面,受到勘探风险程度和经济性制约,国外火山岩油气藏的受重视程度、勘探与开发程度较低,其火山岩储层研究程度也较低。对比国内外历年火山岩储层研究成果的统计数据(图 2),国外的研究论文一直不温不火,反观国内,论文数量一直呈上升趋势,特别是 2001 年之后,论文数量猛增,充分体现了火山岩储层在中国的受重视程度。根据火山岩油气勘探阶段性和研究成果的统计数据,笔者认为中国火山岩储层研究历史可以概括为以下三个阶段:

65

70

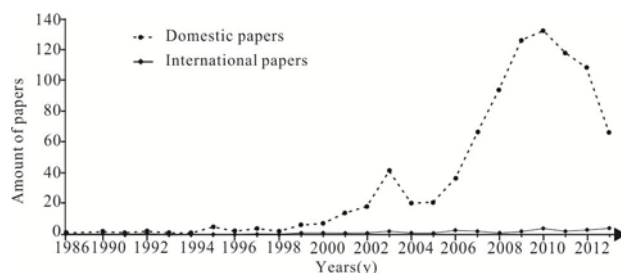


图2 国内外火山岩储层研究论文发表数量统计（国外数据来自 GSW+GeoRef，国内数据来自 CNKI）

Fig.2 Statistics chart of published papers for research on volcanic reservoirs at home and abroad (overseas data from GSW+GeoRef, domestic data from CNKI).

75 (一) 早期萌芽阶段（20 世纪 50 年代—90 年代初）

在这个阶段，常规的碎屑岩和碳酸盐岩油气藏勘探和研究发展迅速，而且全球对油气资源的需求量并不迫切，所以，火山岩油气藏并未受到太多重视，对火山岩储层研究的热度也不是很高，研究性论文发表较少，仅处于早期萌芽阶段。这一阶段的研究主要针对火山喷发作用、火山岩岩石学及火山岩油气藏的发现报导等方面。例如 Gerhard Einsele (1991) 在其
80 《沉积盆地》一书中对火山碎屑岩进行了详细分类；Jean Lajoie 和 John Stix 在 R G Walker (1992) 主编的《相模式》一书中，建立了理想的陆上和水下火山碎屑岩的锥相模式^[17]；以及中国老一辈学者详细描述了中国东部和东南部火山岩的多种喷发类型、相模式、火山机构和火山构造^[18-21]。这期间关于火山岩储层的文章主要对象是中国中西部盆地（如准噶尔盆地），刊登在《地质学报》、《新疆石油地质》、《石油勘探与开发》和《古潜山》等学术期刊
85 ^[22-28]，以及《储层研究进展》等论文集。这个阶段另一个特点是比较注重对国外火山岩储层研究成果的整理^[29-34]，这一阶段结束后，中国火山岩储层研究逐渐跟上了国外的步伐。

(二) 全面认识阶段（20 世纪 90 年代—21 世纪初）

自 1993 年之后，中国变为油气进口国，加强了对盆地内各类非常规储层的勘探和研究，也包括火山岩油气藏，因此对火山岩储层的研究被重视起来，从研究对象和研究内容等方面
90 皆进入了全面认识阶段。研究对象从中西部向东部松辽—渤海湾盆地群转移，包括辽河拗陷^[35-37]、南堡凹陷^[38]、黄骅拗陷^[39, 40]、济阳拗陷^[41, 42]、江汉盆地^[43]、二连盆地^[44]、松辽盆地^[45-47]、吐哈盆地^[48]。研究内容上有针对性地增强了对火山岩储层宏观分布、储集空间的分类、储层内的油气来源等方面的研究，初步建立了火山岩储层地质学的理论体系^[28, 49-56]。

(三) 精细研究阶段（21 世纪初—今）

95 本世纪初，松辽盆地北部庆深气田（2001 年发现）和南部长深气田（2005 年发现）的天然气勘探突破，掀起了火山岩储层研究的热潮，针对火山岩储层的研究进入精细研究阶段，继续加强火山岩储层的孔隙结构和裂缝发育特征的研究，并深入研究了火山岩储层的形成机制、控制因素和有效预测方法。具体包括次生孔隙^[57-59]、裂缝^[60, 61]、不同岩性火山岩的成岩作用类型及特征^[62-67]、储层控制因素与形成机理^[68-70]、储层的有效预测^[71-77]和油气来源的
100 争议（杜乐天，2005；^[78]；欧光习等，2009）等多个热点问题。也有很多学者认真思考了火山岩储层地质学的理论体系和未来发展^[53, 79-84]。值得注意的是，火山岩储层研究论文数量的增长也有一部分来自较早成果的再整理，查阅时需甄别论文质量。

2 火山岩储层研究的主要进展

2.1 关于火山岩储集空间与成岩过程的进展

由于火山岩是凝固成岩的，因此起初人们认为火山岩如同岩浆岩一样不存在相互连通的孔隙网络，不具有渗流和储集油气的能力。后来，随着现代显微分析技术的发展，对火山岩内部的孔隙特征有了新的认识，并对火山岩成岩过程中经历的各种成岩作用有了深入了解。

110 目前普遍认为火山岩的储集空间主要是孔隙、裂缝及二者的组合（图 4）^[48, 98-105]。一方面，与常规碎屑岩储层的储集空间类似，火山岩的储集空间也包括原生的和次生的，前者形成的时间截止于凝固成岩阶段，后者形成于火山岩热液、表生和成岩作用阶段。按照其成因差异及孔隙特征进一步细分为若干亚类。另一方面，与碳酸盐岩储层类似，洞穴也是重要的一种火山岩储集空间^[96]。若储集空间的三维空间比较接近，则小于 2mm 为孔隙，大于 2mm 为洞穴；若其中有两维空间比另一维大许多（例如大于 10: 1），则为裂缝。孔隙和裂缝具有原生和次生两种类型，洞穴基本上全是次生的。研究表明，储集空间与火山岩组构存在密切关系，受组构控制的储集空间发育受到颗粒组构的影响、具定向排列等分布特征（例如气孔、基质微孔），不受组构控制的储集空间是随机形成的，其分布不受颗粒组构的影响（如构造裂缝和溶蚀孔隙）。

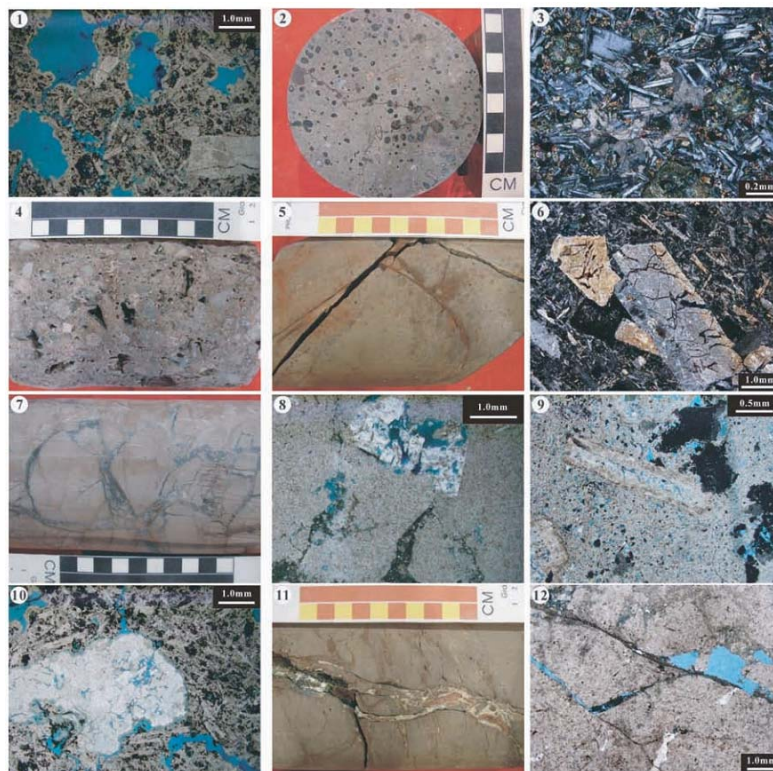


图 3 火山岩储层典型的储集空间照片

Fig.3 Photos for typical reservoir spaces of the volcanic reservoirs

120 人们逐渐发现火山岩在成岩的各个阶段，会在不同的埋深和地温场下经历各种成岩作用及强烈的构造运动，这些地质作用正是上述孔隙、裂缝和洞穴形成的原因，能够极大改善火山岩的储集和渗流能力。火山岩的整个成岩过程既类似于碎屑岩和碳酸盐岩，也区别于二者。普遍认为，火山岩的成岩演化阶段分为喷发期和喷发后期，包括冷凝阶段、热液阶段、表生阶段和埋藏阶段^[62, 63, 106-108]。在这期间发生的成岩作用包括充填作用、蚀变与交代作用和溶蚀作用，既能改变岩石的孔隙结构，也有原始基质或矿物的溶蚀，同时还有次生矿物的溶解和沉淀。除此之外，火山岩的成岩演化还有其特殊之处。其一，火山岩的成岩过程开始较早，从火山喷发、熔浆冷凝时就已经开始；其二，火山岩以冷凝方式固结成岩，压实作用不受埋

125

130

深影响,整体很弱。其三,由于岩浆和热液活动强烈,火山岩的胶结物成分丰富,重结晶作用强。其四,具有特殊的成岩过程如热液成岩阶段,以及独特的成岩作用类型,例如挥发分溢出作用、冷凝收缩作用、熔结作用、脱玻化作用、自碎角砾化作用和隐爆角砾化作用^[36, 58, 64, 96, 109-111]。目前的研究更多关注于火山岩成岩演化阶段划分依据、不同岩性之间成岩演化的差异等方面。已发现火山碎屑岩的成岩作用主要表现为熔结作用、脱玻化与重结晶作用和粘土矿物转变作用^[62],而中基性火山岩的成岩过程中表现出多种斑晶的析出作用和多种类型杏仁体的充填作用,且不同杏仁体后期蚀变过程也有差别^[64]。实际上,火山熔岩与火山碎屑岩之间,以及火山碎屑岩的晶屑凝灰岩与火山角砾岩之间,它们的成岩作用类型、成岩序列及其演化规律也具有很大的差异。

2.2 关于火山岩储层物性及其控制因素的进展

火山岩储层的物性变化不受理藏深度控制,埋深大的情况下亦能保持较高的物性,但非均质性极强,这与火山岩储层复杂的形成、发展和改造过程密不可分^[104]。研究表明,火山岩储层的物性受内外两个因素的控制,内因主要为火山作用(包括岩性岩相、喷发环境)^[112, 113],火山喷发环境、喷发过程及岩性岩相奠定了储层形成与分布的基础,并决定了储集空间的发育程度与规模;外因主要包括构造作用和成岩作用^[104, 114],成岩作用是储层储渗能力发育的关键因素,但同时也会充填破坏各类原生、次生孔隙;构造活动进一步改善储层的储渗性能。也就是说火山岩的物性受各种地质作用的相互作用控制^[2]。首先,火山喷发环境和喷发序列的差异可以影响岩浆成分、密度和粘度等性质,这不但控制了原生气孔的发育程度^[8],而且影响了火山岩后期发生的成岩作用类型,以流纹岩和流纹质熔结凝灰岩为代表的酸性火山岩^[3, 52]和以玄武岩、安山岩等为代表的中基性火山岩在孔隙发育程度与后期成岩蚀变方面就明显不同^[64, 98],二者具有不同的火山岩相分布,不同的冷凝、压实与晶体析出过程,以及不同的物性和孔隙特征。其次,几乎所有火山岩形成后都会遭受风化淋滤(暴露在水上),这一作用大大的改善了火山岩的储集性能^[39, 115, 116],促进了火山岩风化壳储层的形成,还与火山喷发旋回一同控制储层物性的垂向分布^[14]。而当火山岩埋藏至地下,各种成岩作用、流体作用及构造活动对其物性演化起到了重要影响^[53, 111, 114, 117, 118],控制了裂缝的发育程度、次生孔隙的类型与形成,有时也会通过矿物蚀变和交代破坏储层物性^[62, 107, 110, 118-120],裂缝的形成和溶蚀作用则是将各种储集空间有效连通的桥梁。另外,火山喷发前的构造作用形成的古地貌背景也可以影响到后期火山岩储层的物性^[79, 113]。总之,构造作用、流体作用 and 风化淋滤作用是引起储集空间变化的主要地质因素,上述地质作用和火山岩岩石之间相互作用的表现便是各种成岩作用。

但是,目前在许多问题上仍有一些争论。例如储集空间是以原生为主,还是次生为主?大多数人认为二者均有,并未分出主次;但有人认为次生的较多,如粒间溶孔和基质溶孔^[59, 108],还有人认为以原生气孔为主,如角砾内气孔^[98]。对于次生孔隙的成因也存在争议,有人认为脱玻化作用的贡献很大^[111],但大多数还是认为溶蚀孔隙为主。关于溶蚀作用的对象,有人认为次生孔隙来自于火山灰的风化淋滤^[51],有人认为来自于长石类矿物溶蚀^[58],还有人认为是热液形成的沸石杏仁体的晚期溶蚀^[121];关于溶液的来源,多数人认为是有机酸和大气淡水^[51, 58, 108, 116],也有人认为是幔源的烃碱流体^[65],这种流体甚至可以使火山岩中的石英被溶蚀。这种认识也不无道理,火山岩来自于岩浆,岩浆形成于地幔熔融,因此幔源流体也可能会沿着岩浆通道一同上来。从松辽盆地深层气藏成因的多解性也印证了这一点,大部学者认为其是后期充注的有机的烃源岩气体^[122, 123],也有人认为是幔源的无机成因气^[124-127],

不同类型的气藏充注可能对储层的改造作用也不一样。

2.3 关于火山岩储层分布与预测的进展

火山岩属于勘探难度较大的非常规储层，物性非均质性强，认识其规律性并有效预测是一件非常复杂的工作。近几十年的勘探和研究表明，寻找各个盆地或各个油田火山岩储层的物性控制因素，再根据这些因素所依靠的地质作用可以开展定性的分布预测。大多数人都是根据对物性数据的归类、统计和分析，并与各种地质因素进行相关分析，得出主控因素并据此定性分析储层的分布规律，例如有利储层距离深大断裂较近、靠近火山喷发旋回的顶部、靠近烃源岩等等^[38, 73, 123, 147]。但是后来人们发现，无论是构造作用、流体活动还是风化作用都是影响火山岩储层的单一地质应力，是外力，而火山岩的岩性和火山岩相才是火山岩储层的真正载体，是决定火山岩成岩演化过程的先决条件。因此，人们开始尝试依据火山岩的岩性^[19, 23, 27, 34, 42, 46]和火山岩相^[39, 46, 112]等来预测储层分布。这种方法简单，可操作性强，只要分析出有效储层的岩性和岩相特征，再借助火山岩层序的旋回性和火山岩相模式对岩性和岩相的分布加以预测^[53, 74, 148-150]，就可以控制有效储层的分布。而且如果结合测井、地震等先进方法和手段，这方面的研究可以从定性分析走向定量预测。如果根据火山机构的规模和火山岩旋回的量化分析，通过定量预测火山岩相的分布来预测有利储层^[97, 151, 152]，还可以预测各类火山产物的气孔数量密度和大小^[8, 153-155]，研究火山岩储层储集能力^[8]。国内的陈树民等 2010 年通过储层岩石物理声学特征分析，反演预测有利储层，结合钻井和露头资料标定地震和测井资料，最终可以反演储层的孔隙度和渗透率^[156]，这种方法已经应用到松辽盆地的庆深气田，在国内外都处于领先地位。

3 火山岩储层研究的未来发展方向

未来的火山岩储层研究需要从宏观向微观、从定性向定量、从理论向应用、从单学科向多学科配合，着重加强以下几方面：

(1) 完善分类方案和术语体系（岩性、火山岩相、储集空间）

已有的火山岩岩性、火山岩相、储集空间的分类方案和术语体系太多。各个盆地火山岩的钻探、录井、勘探和开发工作中，均使用了各自认为合理的分类、命名体系，出现了不同时期的资料、甚至同一时期不同来源的资料中分类方案和术语体系不一致。尽管某些学者的分类方案比较全面，但也仅适用于某个盆地，并不能从理论角度上达到全面概括。例如深成岩与浅成岩的命名依据不对应、化学成分分类命名与岩石薄片分类命名方案不统一、相同成因的火山岩相名称各异、相同成因的储集空间名称各异。这些严重影响了岩性与岩相的对应关系，影响了对储层物性的判断，不能真实全面的反映岩性、火山岩岩相与物性之间的内在联系。笔者认为，应该综合考虑火山岩的成分、结构和成岩方式，对各个地区的分类方案兼顾继承和批判，建立一个统一的分类方案和术语体系，理论上全面概括火山岩的特点，并在不同盆地都具有较强的可操作性，兼顾油气勘探的实用性以及基础研究领域的可交流性。只有这样才能使得在一个地区形成的认识到另一个地区仍然适用，形成一项普遍适用的理论成果。

(2) 加强储集空间形成机理的研究

对火山岩储集空间的研究仍以现象描述和成因推测为主，这阻碍了进一步对有利储层的深入解剖和有效预测；而且，这方面在学术界争议性较大（见 2.2 和 2.3），所以今后仍需要加强储集空间成因机理方面的研究。首先，从微观尺度上详细研究火山岩各种储集空间的形

210 成机理已经受到了重视^[64, 111], 可以利用先进的岩矿测试手段如放大倍数更大的场发射扫描
电子显微镜、氩离子抛光等技术, 加强对火山岩储集空间的观测, 一方面注意分析基质微孔、
215 脱胶化微孔的微观特征, 另一方面分析储层的孔隙结构。其次, 加强对各类储集空间的成因
分析, 只有详细解释原生孔洞的形成时间、过程、大小与分布, 才能准确预测原始气孔发育
带。气孔演化过程中矿物是如何结晶、充填气孔的? 是硅质充填还是碳酸盐充填? 次生孔隙
220 的问题较多, 风化淋滤作用的方式、程度和影响范围, 还有溶蚀孔隙的溶蚀过程、溶蚀产物
的运移路径、溶蚀后体积的变化等问题也还在激烈争论之中。所以, 今后的研究中需要借鉴
碎屑岩成岩作用的研究方法和经验, 加强火山岩流(流体)-岩(岩石)作用研究, 特别要
注意火山岩独有的特殊成岩作用过程的研究。在这个过程中, 可借助主微量元素、稀土元素、
同位素、包裹体等岩石地球化学和年代学测试手段, 分析火山岩储层及内部流体的成因、时
225 空演化问题^[119]; 还可考虑岩浆的物理特征、流体动力学参数和热力学条件, 以热力学的方法
研究次生孔隙的形成及演化^[53]。

(3) 重视基础研究, 加强火山岩相的三维定量及空间展布研究

目前的火山岩模式, 主要是利用已有的钻井岩心、野外露头, 结合地震建立的, 这些证
225 据显然具有孤立性、多解性和不充分性。火山岩形成过程的特殊性, 决定了火山岩的成分、
结构、成岩方式, 乃至孔隙类型、成岩作用与物性演化之间都具有内在联系, 而这些纷繁、
具体的岩石属性最终可以被归结到统一的火山岩模式中, 包括岩性、岩相和储集空间。因此,
要重视火山岩形成过程的基础研究, 这样才能更好地指导地震-岩相解释的火山岩模式, 才
能够给出三维空间上的尺度范围, 不仅是平面分布, 还有垂向序列, 而且是定量的、针对不
230 同岩性和喷发方式的火山岩模式。所以, 今后在开展火山机构定量研究时, 不仅要只从剖面
出发, 还要从三维尺度出发; 不仅关注钻孔区地质和测井资料的研究, 还要辅以火山机构的
地震正演和反演研究, 有效识别未钻孔地区的岩性和岩相; 不仅要加强储层孔、洞、缝形成
机制的研究, 还要分析不同岩性和岩相中孔、洞、缝的发育程度和分布方式; 并结合控陷断
裂和火山喷发作用与类型的研究, 最终建立合理的火山岩模式, 这一模式可能包括岩性预测、
235 岩相预测和储集空间预测, 真正做到对火山岩储层的定量预测。

(4) 逐步开展火山岩储层的地质建模研究

中国火山岩储层经过长期勘探, 已有大批油田进入了开发阶段, 勘探开发的储量计算误
240 差问题和开发井评价井的成功率问题逐渐暴露出来, 需要精细的火山岩储层模型^[84, 157]。火
山岩与碎屑岩储层的形成和分布方式有差异, 不能沿用碎屑岩开发地质和储层建模的理论方
法, 因此需要积极开展火山岩储层地质建模研究才能满足火山岩储层开发与评价^[158]。在宏
观的火山岩模式基础上, 从微观尺度研究储层的储渗组合类型, 分析储层的物性参数差异,
有效划分和识别储层流动单元并研究其分布规律, 综合选用合适的建模方法, 建立火山岩储
层模型, 阐明火山岩储层的物性特征及分布, 有效指导火山岩油气储层的开发。

4 结论

245 (1) 中国火山岩油气勘探和储层研究的开始时间虽晚于国外, 但是火山岩油气藏受重
视程度高、勘探和开发程度高, 因此火山岩油气储层研究发展速度快、程度高。

(2) 经过早期萌芽、全面认识和精细研究三个发展阶段, 中国火山岩储层在火山岩岩
性分类体系与火山岩相模式、储层成岩演化过程及特殊的成岩作用类型、储集空间特征与物
性演化的控制因素、储层分布与预测研究方法、以及油气来源等五个方面取得了丰硕的研究
成果。

- 250 (3) 未来, 中国火山岩油气储层的研究还需要进一步完善分类方案和术语体系(岩性和火山岩相), 重视储集空间的形成机理研究, 加强火山岩相的三维定量及空间展布研究, 逐步开展火山岩储层的地质建模研究, 有效指导火山岩油气资源的勘探与开发。

[参考文献] (References)

- 255 [1] 邹才能, 赵文智, 贾承造, 等. 中国沉积盆地火山岩油气藏形成与分布[J]. 石油勘探与开发. 2008, 35(3): 257-271.
[2] 王璞珺, 冯志强, 刘万洙, 等. 盆地火山岩:岩性 岩相 储层 气藏 勘探[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 99-116.
- 260 [3] Feng Z. Volcanic rocks as prolific gas reservoir: A case study from the Qingshen gas field in the Songliao Basin, NE China.[J]. Marine And Petroleum Geology. 2008, 25: 416-432.
[4] Schutter S. Occurrences of hydrocarbons in and around igneous rocks.[C]. London: 2003. 35-68.
[5] LE Levin. Volcanogenic and volcanoclastic reservoir rocks in Mesozoic-Cenozoic island arcs: examples from the Caucasus and the NW Pacific[J]. Journal of Petroleum Geology. 1995, 18(3): 267-288.
- 265 [6] Gries R, Clayton J, Leonard. Geology, thermal maturation, and source rock geochemistry in a volcanic covered basin; San Juan Sag, south-central Colorado[J]. AAPG Bulletin. 1997, 81(7): 1133-1160.
[7] Rohrman M. Prospectivity of volcanic basins: Trap delineation and acreage de-risking[J]. AAPG Bulletin. 2007, 91(6): 915-939.
[8] Sruoga P, Rubinstein N. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuquen basins, Argentina[J]. AAPG Bulletin. 2007, 91(1): 115-129.
- 270 [9] Sakata S, Sano Y, T M, et al. Hydrogen and carbon isotopic composition of methane as evidence for biogenic origin of natural gases from the Green Tuff Basin, Japan[J]. Organic Geochemistry. 1997, 26(5-6): 399-407.
[10] Tomarua H, Lua Z, Fehna U, et al. Origin of hydrocarbons in the Green Tuff region of Japan: 129I results from oil field brines and hot springs in the Akita and Niigata Basins[J]. Chemical Geology. 2009, 264(1-4): 221-231.
- 275 [11] Petford N, Mccaffery K. Hydrocarbons in Crystalline Rocks[M]. Special Publications ed. London: Geological Society, 2003: 7-33.
[12] 王传成, 侯贵廷, 李江海, 等. 大庆徐家围子断陷火山岩储集性控制因素分析[J]. 北京大学学报(自然科学版). 2008(06): 909-914.
[13] 冯子辉, 邵红梅, 童英. 松辽盆地庆深气田深层火山岩储层储集性控制因素研究[J]. 地质学报. 2008(06): 760-768.
- 280 [14] 冯子辉, 印长海, 齐景顺, 等. 大型火山岩气田成藏控制因素研究——以松辽盆地庆深气田为例[J]. 岩石学报. 2010, 26(1): 21-32.
[15] 朱如凯, 毛治国, 郭宏莉, 等. 火山岩油气储层地质学——思考与建议[J]. 岩性油气藏. 2010, 22(2): 7-13.
[16] 刘嘉麒, 孟凡超, 崔岩, 等. 试论火山岩油气藏成藏机理[J]. 岩石学报. 2010, 26(1): 1-13.
- 285 [17] Walker R G, James N P. Facies Models. Response to Sea Level Change[M]. St John's, Newfoundland: Department of Earth Sciences, Memorial University of Newfoundland, 1992.
[18] 陶奎元. 火山岩相构造学[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1994.
[19] 谢家莹, 陶奎元, 谢芳贵. 试论凝灰熔岩相特征、相模式及其成因[J]. 火山地质与矿产. 1995, 16(3): 1-6.
[20] 刘孟慧, 赵澄林. 油气储层研究进展与展望[J]. 石油大学学报(自然科学版). 1991(03): 115-124.
- 290 [21] 刘明高. 克拉玛依油田一区石炭系火山岩储层研究[J]. 新疆石油地质. 1986, 7(2): 78-90.
[22] 刘泽容, 信荃麟, 王永杰, 等. 山东惠民凹陷西部第三纪火山岩油气藏形成条件与分布规律[J]. 地质学报. 1988(03): 210-222.
[23] 董冬. 火山岩储层中的一种重要储集空间--气孔[J]. 石油勘探与开发. 1991(1): 89-93.
[24] 张子枢, 吴邦辉. 国内外火山岩油气藏研究现状及勘探技术调研[J]. 天然气勘探与开发. 1994, 16(1): 1-26.
- 295 [25] Chen Z, Yan H, Li J, et al. Relationship between Tertiary volcanic rocks and hydrocarbons in the Liaohe Basin, People's Republic of China[J]. AAPG Bulletin. 1999, 83(6): 1004-1014.
[26] 赵澄林, 孟卫工, 金春爽. 辽河盆地火山岩与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
[27] 陈振岩, 李军生, 张戈, 等. 辽河拗陷火山岩与油气关系[J]. 石油勘探与开发. 1996(3): 1-5.
- 300 [28] 郭齐军, 万智民, 焦守谏, 等. 火山岩储集层的研究——以北堡地区为例[J]. 石油实验地质. 1997, 19(4): 337-339.
[29] 罗静兰, 曲志浩, 孙卫, 等. 风化店火山岩岩相、储集性与油气的关系[J]. 石油学报. 1996, 17(1): 32-39.
[30] 钱崢. 济阳拗陷罗 151 块火成岩油藏储集层概念模型[J]. 石油勘探与开发. 1999, 28(6): 72-74.
[31] 王志欣, 赵澄林, 刘孟慧. 阿北油田火山岩岩相及其储集性能[J]. 石油大学学报(自然科学版). 1991(3): 15-21.
- 305 [32] 刘为付, 孙立新, 刘双龙. 松辽盆地莺山断陷火山岩地震反射特征及分布规律[J]. 石油实验地质. 2000, 22(3): 256-259.
[33] 张殿成, 何德友, 尚广弟, 等. 松辽盆地汪家屯东火山岩储层预测[J]. 石油物探. 2000, 39(2): 36-43.

- 310 [34] 谢庆宾, 韩德馨, 朱筱敏, 等. 三塘湖盆地火成岩储集空间类型及特征[J]. 石油勘探与开发. 2002, 29(1): 84-86.
- [35] 陈建文. 一门新兴的边缘科学——火山岩储层地质学[J]. 海洋地质动态. 2002, 18(4): 19-22.
- [36] 王璞珺, 迟元林, 刘万洙, 等. 松辽盆地火山岩相: 类型、特征和储层意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版). 2003, 33(4): 449-456.
- 315 [37] 赵海玲, 刘振文, 李剑, 等. 火成岩油气储层的岩石学特征及研究方向[J]. 石油与天然气地质. 2004, 25(6): 609-613.
- [38] 赵海玲. 火山岩储层[J]. 现代地质. 1998(1): 63.
- [39] 周荔青, 金之钧. 松辽盆地无机成因气藏形成分布特征及勘探方向[J]. 石油实验地质. 2009(01): 12-18.
- [40] 杜乐天. 地壳流体与地幔流体间的关系[J]. 地学前缘. 1996, 3(04): 13-21.
- [41] 赵海玲, 黄薇, 王成, 等. 火山岩中脱玻化孔及其对储层的贡献[J]. 石油与天然气地质. 2009(1): 47-52.
- 320 [42] 赵海玲, 王成, 刘振文, 等. 火山岩储层斜长石选择性溶蚀的岩石学特征和热力学条件[J]. 地质通报. 2009, 28(4): 412-419.
- [43] 刘景新. 火成岩油气储层构造裂缝发育程度预测研究[J]. 西北大学学报(自然科学版). 2014(02): 279-284.
- [44] 陈欢庆, 胡永乐, 靳久强, 等. 多信息综合火山岩储层裂缝表征: 以徐深气田徐东地区营城组一段火山岩储层为例[J]. 地学前缘. 2011(02): 294-303.
- 325 [45] 程日辉, 沈艳杰, 颜景波, 等. 海拉尔盆地火山碎屑岩的成岩作用[J]. 岩石学报. 2010, 26(1): 47-54.
- [46] 刘万洙, 黄玉龙, 庞彦明, 等. 松辽盆地营城组中基性火山岩成岩作用: 矿物晶出序列、杏仁体充填和储层效应[J]. 岩石学报. 2010, 26(1): 158-164.
- [47] 柳成志, 于海山. 火山岩储层中的烃碱流体作用及其地质意义[J]. 断块油气田. 2010, 17(1): 5-9.
- 330 [48] 王璞珺, 印长海, 朱如凯, 等. 中基性火山作用喷出物类型、特征与成因[J]. 吉林大学学报(地球科学版). 2010, 40(3): 469-481.
- [49] 柳成志, 于海山, 吕延防, 等. 三塘湖盆地马朗凹陷卡拉岗组火山岩油气储层特征及其形成机理[J]. 地球科学(中国地质大学学报). 2012(S1): 134-142.
- [50] 罗静兰, 邵红梅, 杨艳芳, 等. 松辽盆地深层火山岩储层的埋藏-烃类充注-成岩时空演化过程[J]. 地学前缘. 2013(05): 175-187.
- 335 [51] 季汉成, 杨德相, 高先志, 等. 二连盆地洪浩尔舒特凹陷中生界火山岩特征及储层控制因素分析[J]. 地质学报. 2012(08): 1227-1240.
- [52] 陈树民, 王建民, 王桂水, 等. PP-PS 协同反演技术预测大庆深层火山岩含气储层[J]. 地球物理学报. 2011(02): 280-285.
- 340 [53] 杜金虎, 赵泽辉, 焦贵浩, 等. 松辽盆地中生代火山岩优质储层控制因素及分布预测[J]. 中国石油勘探. 2012(04): 1-8.
- [54] 孟元林, 胡越, 李新宁, 等. 致密火山岩物性影响因素分析与储层质量预测--以马朗-条湖凹陷条湖组为例[J]. 石油与天然气地质. 2014(02): 244-252.
- [55] 潘文庆, 张巍, 于红枫, 等. 塔里木盆地跃南地区二叠系火山岩储层成因机理研究[J]. 北京大学学报(自然科学版). 2013(04): 603-613.
- 345 [56] 吴颜雄, 王璞珺, 边伟华, 等. 松辽盆地深层火山岩储层测井响应及地质解译[J]. 吉林大学学报(地球科学版). 2012(06): 1927-1934.
- [57] 邹才能, 侯连华, 王京红, 等. 火山岩风化壳地层型油气藏评价预测方法研究--以新疆北部石炭系为例[J]. 地球物理学报. 2011(02): 388-400.
- 350 [58] 戴金星, 邹才能, 张水昌, 等. 无机成因和有机成因烷烃气的鉴别[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学). 2008(11): 1329-1341.
- [59] 罗静兰, 邵红梅, 张成立. 火山岩油气藏研究方法 with 勘探技术综述[J]. 石油学报. 2003, 23(1): 31-38.
- [60] 梁明亮, 毛秀玲, 郑国东, 等. 火成岩油气储层的水岩相互作用: 研究进展与发展方向[J]. 矿物岩石地球化学通报. 2011(02): 215-222.
- 355 [61] 谭开俊, 卫平生, 潘建国, 等. 火山岩地震储层学[J]. 岩性油气藏. 2010(04): 8-13.
- [62] 朱如凯, 毛治国, 郭宏莉, 等. 火山岩油气储层地质学--思考与建议[J]. 岩性油气藏. 2010(02): 7-13.
- [63] 邹才能, 赵文智, 贾承造, 等. 中国沉积盆地火山岩油气藏形成与分布[J]. 石油勘探与开发. 2008(03): 257-271.
- [64] 李长山, 陈建文, 游俊, et al. 火山岩储层建模初探[J]. 地学前缘. 2000, 7(4): 381-389.
- 360 [65] 陈建文, 王德发, 张晓东, 等. 松辽盆地徐家围子断陷营城组火山岩相和火山机构分析[J]. 地学前缘. 2000, 7(4): 371-379.
- [66] 刘文灿, 孙善平, 李家振. 大别山北麓晚侏罗世金台组火山岩地质及岩相构造特征[J]. 现代地质. 1997, 11(2): 108-114.
- [67] 谢家莹, 陶奎元, 黄光昭. 中国东南大陆中生代火山岩带的火山岩相类型[J]. 火山地质与矿产. 1994, 15(4): 45-51.
- 365 [68] 王璞珺, 吴河勇, 庞彦明, 等. 松辽盆地火山岩相: 相序、相模式与储层物性的定量关系[J]. 吉林大学学报(地球科学版). 2006(05): 805-812.
- [69] 唐华凤, 徐正顺, 王璞珺, 等. 松辽盆地白垩系营城组埋藏火山机构岩相定量模型及储层流动单元特

- 征[J]. 吉林大学学报(地球科学版). 2007, 37(6): 1074-1082.
- 370 [70] 黄玉龙, 王璞珺, 舒萍, 等. 松辽盆地营城组中基性火山岩储层特征及成储机理[J]. 岩石学报. 2010, 26(1): 82-92
- [71] 吴颜雄, 王璞珺, 吴艳辉, 等. 火山岩储层储集空间的构成--以松辽盆地为例[J]. 天然气工业. 2011(04): 28-33.
- [72] 高山林, 李学万, 宋柏荣. 辽河盆地欧利坨子地区火山岩储集空间特征[J]. 石油与天然气地质. 2001(02): 173-177.
- 375 [73] 刘成林, 杜蕴华, 高嘉玉, 等. 松辽盆地深层火山岩储层成岩作用与孔隙演化[J]. 岩性油气藏. 2008, 20(4): 33-37.
- [74] 王璞珺, 陈树民, 刘万洙, 等. 松辽盆地火山岩相与火山岩储层的关系[J]. 石油与天然气地质. 2003, 24(1): 18-23.
- 380 [75] 王君, 朱如凯, 郭宏莉, 等. 火山岩风化壳储层发育模式——以三塘湖盆地马朗凹陷石炭系火山岩为例[J]. 岩石学报. 2010, 26(1): 217-226
- [76] 高有峰, 刘万洙, 纪学雁, 等. 松辽盆地营城组火山岩成岩作用类型、特征及其对储层物性的影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版). 2007, 37(6): 1251-1258.
- [77] 肖芳锋, 侯贵廷, 李江海. 准噶尔盆地新生代构造应力对石炭纪火山岩构造裂缝发育的控制[J]. 岩石学报. 2010, 26(1): 255-262.
- 385 [78] 王全柱. 火成岩储层研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版). 2004, 19(2): 13-16.
- [79] 赵文智, 邹才能, 冯志强, 等. 松辽盆地深层火山岩气藏地质特征及评价技术[J]. 石油勘探与开发. 2008, 35(2): 129-142.
- [80] 张庆春, 胡素云, 王立武, 等. 松辽盆地含二氧化碳火山岩气藏的形成和分布[J]. 岩石学报. 2010, 26(1): 109-120.
- 390 [81] 蒙启安, 门广田, 张正和. 松辽盆地深层火山岩体、岩相预测方法及应用[J]. 大庆石油地质与开发. 2001, 23(3): 21-24.
- [82] 王璞珺, 吴河勇, 庞颜明, 等. 松辽盆地火山岩相:相序、相模式与储层物性的定量关系[J]. 吉林大学学报(地球科学版). 2006, 36(5): 805-812.
- 395