

王洛, 李江海, 师永民, 等. 全球火山岩油气藏研究的历程与展望[J]. 中国地质, 2015, 42(5): 1610–1620.

Wang Luo, Li Jianghai, Shi Yongmin, et al. Review and prospect of global volcanic reservoirs[J]. *Geology in China*, 2015, 42(5): 1610–1620(in Chinese with English abstract).

全球火山岩油气藏研究的历程与展望

王 洛^{1,2,3} 李江海³ 师永民³ 赵 越² 马寅生²

(1. 中国极地研究中心, 上海 200136; 2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

3. 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘要:当前全球火山岩油气勘探进入重要阶段, 为客观评估其地位和前景, 有必要对其研究历程进行系统的回顾和认识。通过较为广泛的文献调研, 将这一历程整体上划分为四个阶段——从最初偶然发现所带来的兴奋(偶然发现阶段, 1949 年之前), 进入了漫长的低潮时期(缓慢发展阶段, 1950—1979 年), 之后逐渐升温(局部突破阶段, 1980—1999 年), 并走向成熟(成熟阶段, 2000 年至今)。分析总结认为, 印度尼西亚的 Jatibarang 油气田、中国的徐深气田、克拉美丽气田、长深气田、纳米比亚的 Kudu 气田等为典型的大型火山岩油气田。从出现频度上看, 目前已发现的火山岩油气藏主要出现在中生界, 如侏罗系、白垩系、古近系和新近系中所出现的频率较高; 其次是晚古生界。从全球范围来看, 各种岩性的火山岩都可能具有形成有效储层的潜力。在一些盆地中, 火山岩储层下伏地层中烃源岩层的发现, 使得传统意义上将这些火山岩视为这些盆地基底的认识得以改变, 其基底可考虑进一步向深部修正和调整, 油气勘探也得以向深部发展。目前来看, 火山岩油气藏勘探的重点区域依次有: 环太平洋构造域的中生界火山岩油气藏, 古亚洲洋构造域的晚古生界火山岩油气藏, 特提斯洋构造域(如其西端的环地中海区域)的火山岩油气藏等。

关键词:火山岩; 油气藏; 勘探; 综述; 展望

中图分类号: P618.13 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)05-1610-11

Review and prospect of global volcanic reservoirs

WANG Luo^{1,2,3}, LI Jiang-hai³, SHI Yong-min³, ZHAO Yue², MA Yin-sheng²

(1. *Polar Research Institute of China, Shanghai 200136, China*; 2. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China*; 3. *Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education; School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract: Currently, the oil and gas exploration of global volcanic reservoirs has entered into an important stage. For an objective assessment of the status and prospects of global volcanic reservoirs, a systematic review is necessary. Based on extensive literature analysis, the research process of global volcanic reservoirs as a whole can be divided into four stages: the casually discovering stage (prior to 1949), the low speed progress stage (1950 to 1979), the partial success stage (1980 to 1999) and the mature stage (2000 to the present). An analysis shows that Jatibarang oil and gas field (Indonesia), Xushen gas field (China), Kelameili gas field (China), Changqing gas field (China), Kudu gas field (Namibia) and some other fields are typical large volcanic oil and gas fields in the

收稿日期: 2015-04-10; 改回日期: 2015-08-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973 计划”项目(2009CB219302)及中国地质调查局地质大调查项目(1212010818054)资助。

作者简介: 王洛, 男, 1978 年生, 理学博士, 从事油气地质等研究工作; E-mail: Charly2008@gmail.com。

world. In terms of the frequency of occurrence in different strata, the major distribution of volcanic reservoirs is in the Cenozoic and Mesozoic (especially in the Jurassic, Cretaceous, Paleogene and Neogene), followed by the Upper Paleozoic. From a global perspective, all kinds of volcanic rocks have the chances to form effective reservoirs. In some cases, the discovery of volcanic reservoirs may change the traditional understanding about the basements of some basins, and hence the oil and gas exploration of these basins should be conducted towards deeper strata. At present, key areas for the exploration of volcanic reservoirs are as follows in turn: Cenozoic volcanic reservoirs in circum-Pacific tectonic domain, Late Paleozoic volcanic reservoir in Paleo-Asian Ocean tectonic domain, volcanic reservoirs in Tethys tectonic domain (such as the surrounding Mediterranean) and so on.

Key words: volcanic rock; oil and gas reservoir; exploration; review; prospect

About the first author: WANG Luo, male, born in 1978, Ph.D, engages in the research on oil and gas geology; E-mail: Charly2008@gmail.com

1 引言

盆地的填充与火山岩密切相关,对于不同的盆地类型火山碎屑物质对整个沉积体积的贡献可能高达25%^[1]。20世纪初,人们开始关注和研究这些盆地火山岩作为油气储层的现象。Powers(1931)^[2]对北美石油进行的概述中总结了几种特殊岩性的储层,包括得克萨斯中南部一些油田中的凝灰岩储层,墨西哥Furbero油田的玄武岩储层等。经过近百年的发展,人们进一步意识到,作为重要的非常规油气储层^[3],火山岩油气储层的潜力值得深入研究^[4]。

目前对全球火山岩油气藏勘探进程的系统性认识仍存在不足。对全球火山岩油气勘探的系统性总结还比较少;同时,国内一些文献出现将部分国外油气田(如澳大利亚的Scott Reef气田)中的火山岩油气藏并未占主导地位的情况下,将其储量贡献全归为火山岩油气藏的现象;一些地方还出现数据出处不明,甚至错引等现象。这对客观评估全球火山岩油气藏的地位和前景造成不利影响。当前全球火山岩油气藏进入重要的阶段,有必要对其研究历程进行系统的回顾和认识,对其全球勘探概况(特别是国外情况)进行较为系统的认识,以客观分析总结其对油气勘探带来的一系列影响。

如无特别说明或特定的参照对象,本文所提火山岩为广义上的火山岩^[5-7],即包括次火山岩^[6,8]。

2 国外火山岩油气藏研究历程

Powers^[2] 1931年对北美石油进行的概述中,谈到了不同岩性的储层,除了常见的砂岩、石灰岩、白云岩、燧石和长石砂岩储层外,在古巴出现了蛇纹岩储层,得克萨斯中南部一些油田中以蛇纹岩和凝

灰岩作为储层,墨西哥Furbero油田以玄武岩和被火成岩烘烤的泥灰岩储层。

于1896年投产的美国德克萨斯州Interior Coastal Plain火山锥上覆的砂岩和石灰岩储层(白垩纪-始新世)的油藏^[2],是较早的与火山岩相关的油藏。在德克萨斯州中南部一些油田具有蛇纹岩和凝灰岩储层^[2]。

Udden(1915)^[9]汇报了当时出现在德克萨斯Williamson郡Thrall附近一个新油田(称为Thrall油田)中独特的石油现象,Thrall油田的含油岩被认为是一个海底喷发岩,现在很大程度上蚀变成了蛇纹岩。该岩石为绿色多孔且不纯,包含辉石、橄榄石、绿泥石、绿帘石和赤铁矿,原岩为含玻璃质、角砾和杏仁的熔岩,另外有一些火山凝灰岩。

Lewis(1932)^[10]对当时古巴火成岩油藏的出现进行了概述,古巴两个油田——Bacuranao和Motembo油田的石油生产均来自于蛇纹岩,而沉积岩中没有发现商业级的石油生产。Motembo油田1881年的发现井井深1000英尺(304.8 m),在285英尺(86.87 m)处蛇纹岩层中出现无色轻质油,日产量为26加仑(约0.08 t)。Bacuranao油田发现于1915年,到1932年在不足160英亩(0.65 km²)的范围内大约钻井40口。该油田为当地的Union Oil公司所有。油气一般产自200~800英尺(60.96~243.84 m)深处的蛇纹岩裂缝中。初始的流量为25~200桶/天(3.41~27.28 t/d),不过很快下降到10桶/天(约1.36 t/d)。

Powers and Cla^[11]在1932年指出,当时全球火成岩和变质岩中产出的石油超过15 000 000桶;古巴北部和西北部,在溢流玄武岩中发现了一个气田,并在蛇纹岩中发现了数百万吨沥青(代表着200 000 000桶石油残余,或27 285 129 t石油残余)。与

火成岩侵入体相关的石油渗漏导致了当时(1932年之前)一些全球最大的油田在墨西哥被发现,火成岩中油、气、沥青的渗漏和痕迹指示世界其他很多至今还没有发现石油的地方可能存在商业化油气生产的可能。

墨西哥富贝罗(Furbero)辉长岩油藏发现于1907年,是当时最有名的火成岩油藏。据Government of Mexico(1940)^[12],墨西哥Vera Cruz盆地Furbero油田,第一口生产井“Furbero No. 2”并于1907年完钻,深度为580.64 m,有两个生产层位,一个是页岩层,另一个是辉长岩层。截止到1936年12月,Furbero油田共钻14口生产井,1936年年产石油39,797桶(约5429 t)。Furbero油田的重要意义在于它代表了一种在火成岩及其周围岩石中形成的新型的油气沉积类型——其储层为分解的辉长岩床或与它毗邻的变质页岩,出现在火成岩和沉积岩中的石油达到商业数量^[13]。

日本陆上大型Minami Nagaoka气田在深部中新世火山岩中发现了大型油气沉积^[14]。作为复式火山机构(repeated volcanisms),流纹岩喷出物一层接着一层沉积,最后形成一个很厚的地层。由于在海下火山机构快速冷凝和破碎作用,岩相变化快^[14]。储层岩性主要由流纹岩组成,可以分为三种相:(1)玻质碎屑岩相,该相受海水作用而快速冷凝和破碎现象非常明显;(2)大块的自然熔岩相,一般认为位于流纹岩体的中心,因而未出现因海水作用导致的快速冷凝和破碎现象;(3)枕状角砾岩相,前两者的中间状态,一般为有利储层相带。该储层总厚度超过2600英尺(792 m),深度位于12500英尺(3810 m)之下的地层^[14]。

由于发现和开发的非常规油气田数量日益增多,作为非常规油气储层之一的火山岩储层变得重要起来^[15]。在阿根廷Austral和Neuquen盆地,中生代火山岩储层已经开始产油。

从早侏罗世开始,Neuquen盆地为弧内到弧后陆壳盆地。它是阿根廷产能最高的油气盆地,大约占阿根廷石油产量的43%、天然气产量的59%^[15]。按2005年阿根廷的油气数据来看,估计Neuquen盆地年产石油超过 1500×10^4 t,年产天然气超过 260×10^8 m³。尽管Neuquen盆地的油气田自1960年就开始投产,但只在最近10年(1997—2007年)勘探上才将火山单元作为潜在的储层^[15]。该盆地重要的火山岩储层实例

为Medanito-25 de Mayo油田,日产油12,190桶(约1663 t),日产气 488×10^3 m³,估计该油田代表着总计约440.3百万桶(约0.6亿t)探明和控制储量,并且1962—2001年累积产量352.2百万桶(约0.48亿t)^[15]。

Austral盆地大约占阿根廷油气产量的7%~9%^[15]。Austral盆地的非正式地层单元Serie Tobifera广泛分布于Chon-Aike省,主要由熔结凝灰岩、外生碎屑和流纹质熔岩组成,形成一个覆盖面积大约 1.7×10^6 km²的硅质大火成岩区(Large Igneous Province),其地层时代为中到晚侏罗世^[18]。尽管一些油气田扩展到了Serie Tobifera层位,但因该厚层火山岩的储集条件似乎具有随机性,传统上,该厚层火山岩层序被视为油气勘探的次级目标,其上覆的Springhill砂岩层为该盆地的主力产层^[18]。之前Austral盆地的火山岩储层只作为次级目标,然而最近的研究显示火山岩储层可能使总的探明储量增加达5倍^[15]。

不少学者对Neuquen盆地和Austral盆地的火山岩油气藏进行了多方面研究。Neuquen盆地的Cupen Mahuuida油田是一个由三叠纪synrift阶一系列火山岩和火山碎屑岩层组成的天然裂缝性储层^[16],D'Huteau & Pereira(2007)^[16]对该天然裂缝性火山碎屑储层的优化裂缝作业设计进行了实例研究。Monreal et al.(2009)^[17]对Neuquen盆地中央的Altiplanicie del Payun区域与火成侵入岩相关的这类非典型油气系统的烃源岩的产生、运移和富集规律进行了实例分析并建模。Sruoga & Rubinstein(2007)^[15]对Austral盆地Serie Tobifera地层(unit)以及Neuquen盆地Precuyano地层挑选的火山岩岩心的孔隙度和渗透率特征进行了研究,并分析了形成该储层孔隙度和渗透率的有关控制过程。Sruoga et al.(2004)^[18]对取自Austral盆地Cerro Norte、Campo Bremen和Oceano油田收集到的火山岩岩心进行孔隙度和渗透率方面的分析。Pángaro et al.(2005)^[19]对Neuquen盆地Volcan Auca Mahuuida油田火山事件与油气系统的关系进行了研究。

澳大利亚Browse盆地为完全位于海上的古生代到新生代沉积区^[20],盆地的储层埋深一般稳定在4000~5000 m^[21]。Browse盆地富含至今还未开采的巨大商业天然气和凝析油藏,它们主要包含在6大气田: Torosa, Brecknock, Brecknock South

(Calliance), Ichthys, Crux and Argus^[22]。该盆地最大的 Torosa(又名 Scott Reef)气田发现于1971年^{[20][23]}。其储层包括(但不限于)侏罗系溢流玄武岩,可采储量天然气储量13.7 Tcf(约3879.4 m³)、石油131 MM bbl(约1787万 t)^[24]。2007年12月31日的初始可采资源量(initial recoverable resource)评估为凝析油121.0 MM bbl(约0.165亿 t)、天然气11.4421 Tcf(3240 m³, 1945.2MMboe1油当量,约2.65亿 t油当量),初始可采资源量合计约2.8亿吨油当量^[20]。部分文献将该气田列为目前世界最大的火山岩油气田。经分析认为,虽然该气田油气储量巨大,但却不能简单地认定该气田是当前发现的世界最大火山岩油气田。因为虽然存在火山岩作为有效储层,但该气田主力储层仍是河流-三角洲和海底扇相带中的砂岩^[20],就目前来看火山岩储层对该气田的油气储量贡献依然有限。

对火成岩油气藏勘探和研究历程的阶段划分,不同学者的认识可能不尽相同。本文根据以上各时期火成岩勘探成果为基础,结合各时期的相关文献发表情况进行阶段划分。文献的发表情况往往代表着对某一领域的关注程度。Schutter(2003)^[24]提供了火成岩中的油气领域的及时且极为全面的文献^[4]。对Schutter(2003)^[24]所收集到的296篇文献,按年代(10年为期)为单位进行频度统计,结果见图1。

以各时期火成岩油气藏的勘探成果为基础,结合文献的发表频度(图1),可将火成岩油气藏研究史大致分为四个阶段。

第一阶段(≤1949年):偶然发现阶段。在这一时期,发现了不少火成岩油气藏,最著名的火成岩油气藏是发现于1907年的墨西哥富贝罗(Furbero)辉长岩油藏。这一发现曾一度让人们对于火成岩储层充满期待。但由于缺少后续的持续发现,对火山岩油气藏的关注经历由起步、兴起到逐渐冷却的过程。

第二阶段(1950—1979年):缓慢发展阶段。这一时期一定的文献持续发表,勘探上的典型的发现要属日本 Akita 盆地和新泻(Niigata)盆地古近一新近系火山岩油气藏的发现^[25]。但这一时期火山岩油气藏的勘探、开发及研究总体上比较平淡。

第三阶段(1980—1999年):局部突破阶段。由于对砂岩等常规储层的研究已经非常成熟,火山岩储层重新得到关注。这一时期的典型特点是新发

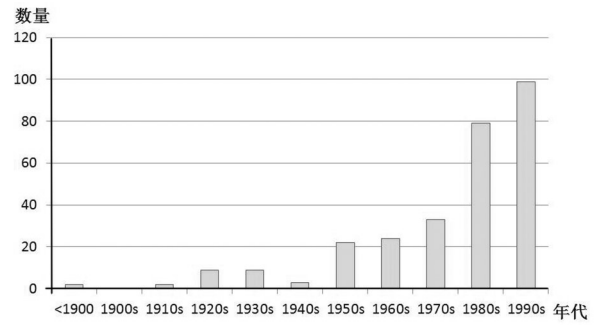


图1 各年代火成岩相关文献发表频度统计图
(以Schutter(2003)^[24]收集的文献按10年期为间隔进行频度统计,统计的截止年份为2000年)

Fig.1 Statistics of frequency for the igneous rock related literatures published in every decade (frequency statistics based on the materials collected by Schutter (2003)^[24], the terminative statistical year is 2000)

现不再限于偶然发现,而是针对火山岩储层进行有目的勘探。阿根廷油气产能最高的 Neuquen 盆地大约于1997年开始在勘探上将火山单元作为潜在的储层^[15],这成为这一阶段的标志性事件。

第四阶段(2000年至今):成熟阶段。这一时期的典型特点是勘探上取得了一系列重大发现,同时火成岩油气勘探的理论水平得到空前的提高并日益成熟。2002年之后在中国取得了徐深气田、克拉美丽气田、长深气田等一系列较为重要的火山岩油气田的新发现。虽然图1的统计限制在2000年之前,但不难从全球各大文献数据库中检索到2000年之后发表的火成岩油气藏的相关研究成果,其成果发表数量迅猛增长,已经跟之前的文献发表数量不再为同一数量级了。而伦敦 Geological Society 也在2003年为《结晶岩中的油气》(Hydrocarbons in crystalline rocks)出版了专辑,所有这一切标志着对火山岩储层的研究重新升温并走向成熟。

和大多数理论研究的生命周期一样,火山岩油气藏理论的研究也将面对诞生、存活、成长、成熟、衰亡这一系列过程,目前它正处于相对成熟的早期。

3 国内火山岩油气藏研究历程

分析中国火山岩油气藏的勘探历程和状况对了解该类型油气藏在我国的地位和战略意义非常重要。前人在这方面就中国陆上火山岩的勘探历程进行了一定的探讨^{[26],[34]}。但往往探明储量和预测储量等混杂,非火山岩的岩性和层系也容易混杂其

中,这常常掩盖了火山岩油气藏的真实探明情况。这些问题主要是由于涉及到不同的勘探单位,且跨越的时期很长,资料的保存和检索难度大等因素造成,使得恢复我国火山岩油气藏历年的探明地质储量成为一项非常困难的工作。本文在核查上千份文献资料的基础上,尝试进行了仅针对火山岩岩性和其探明地质储量的统计成图,如图2。

中国火山岩油气藏勘探已有50余年历史^[26]。中国于1957年在准噶尔盆地西北缘首次在火山岩中获得工业气流^{[26],[27]},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。预计准噶尔盆地火山岩油气储量5~6亿t(图2)以上。

Zou et al.(2008)^[26]将中国的火山岩油气勘探历程大致分为3个阶段:

(1)偶然发现阶段(1957—1990年):主要集中在准噶尔盆地西北缘和渤海湾盆地辽河、济阳等拗陷。

(2)局部勘探阶段(1990—2002年):随着地质认识的不断提高和勘探技术的不断进步,开始在渤海湾和准噶尔等盆地个别地区开展针对性的勘探。

(3)全面勘探阶段(2002年以后):在渤海湾、松辽、准噶尔等盆地全面开展了火山岩油气藏的勘探部署,取得了重大进展和突破。

2002年以来松辽盆地庆深气田的天然气探明储量已经超过1000 m³,储层主要由火山岩(流纹岩和凝灰岩)组成,也有少部分产自砾岩^[28]。随着2002年松辽盆地徐家围子大型火山岩气田的发现,中国

火山岩油气勘探进入了新的阶段,开始了针对火山岩目的层的工业化勘探。另据冯志强等(2010)^[29]数据显示,截止2009年底,徐深气田累计探明天然气储量2457.45 m³。松辽盆地在深部白垩系火山岩中发现了徐深气田和长深气田,截止2007年底,累积探明天然气地质储量3197×10⁸ m³,并且3P(Proved, Probable and Possible)储量超过5000×10⁸ m³^[30]。由冯志强等(2010)^[29]及Zhao, et al.(2009)^[30]的数据推算,长深气田的已探明天然气地质储量为740×10⁸ m³。近年在松辽盆地徐家围子断陷和长岭断陷已完成火山岩探井百余口;具有类似的地质条件有望获得突破的断陷还有多个,因此前景非常可观。海拉尔盆地目前已经探明石油地质储量1.1×10⁸ t^[31],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油藏地质储量3175×10⁴ t^[32]。渤海湾盆地济阳拗陷滨南油田的主力储层为古近纪火山岩,29口井中有5口日产百吨以上。在二连盆地,石油勘探工作者早在1980年代就认识到火山岩中已探明石油地质储量约占总储量的15%,成为该盆地重要的油气勘探领域^[33]。该盆地火山岩油气藏探明储量2134万t^[3]。另外,苏北盆地、江汉盆地等盆地中均发现了具有工业规模的火山岩油气藏。

此外,在中国西部的一系列火山岩油气藏的发现更是形式喜人。在准噶尔盆地克一百逆冲带和石西地区发现了一系列新生古储类型的油藏,累积探明地质储量达到2.2×10⁸ t^[30]。在东准噶尔的陆东

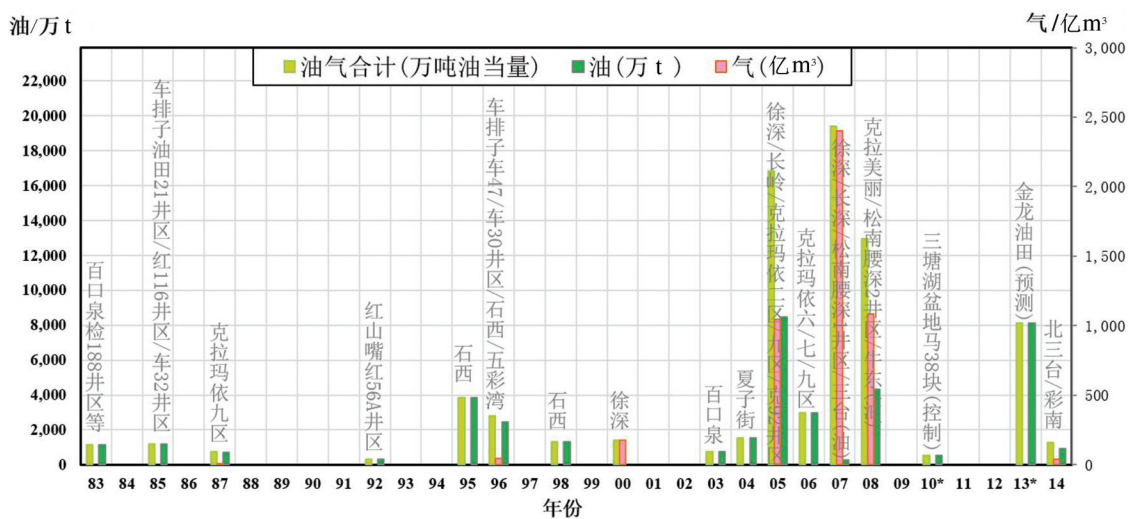


图2 中国火山岩油气藏探明地质储量勘探历程

Fig.2 Exploration history of proved reserves of oil and gas in volcanic rocks in China

—五彩湾地区石炭系火山岩储层中发现的气藏,其探明地质储量超过 $1000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

就中国范围内而言,截止到2006年底,中石油提交的火山岩中探明石油储量已经达到 $4.7 \times 10^8 \text{ t}$,溶解气地质储量达到 $229.4 \times 10^8 \text{ m}^3$,探明天然气地质储量达到 $1249.2 \times 10^8 \text{ m}^3$,火山岩中发现的探明油气总量达到 $7.3 \times 10^8 \text{ t}$ 油当量^[26]。而截止2014年底,中国火山岩中已探明石油地质储量达 $5.4 \times 10^8 \text{ t}$ 以上,探明天然气地质储量达到 $4800 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上。

4 火山岩油气藏时空分布

据不完全统计^[24],火山岩油气储层广泛分布于全球五大洲20多个国家336余个盆地或区块内(图3),其中发现油气藏169个,油气显示65处,油苗102处。从分布上看,它们主要分布在构造板块(或古板块)的边界,如环太平洋构造域和古亚洲洋构造域的分布比例较高,另有少量出现在板内环境。火山岩油气藏正在成为全球油气资源勘探开发的重要新领域。

据不完全统计(表1),印度尼西亚、纳米比亚、美国、阿尔及利亚、格鲁吉亚等地区均有大型火山岩油气田发现;特别是在中国,已发现徐深气田、克拉美丽气田、长深气田等大型火山岩气田,目前已探明储量已经非常高。

从油气日产量上看,火山岩储层不乏形成较高油气日产量的实例。据Schutter(2003)^[24]对火成岩相关的油气日产量不完全统计,古巴的North Cuba盆地(本质上为侏罗纪时期的裂谷盆地)Cristales油田日产油量达到3425 t,其主要的火山岩储层岩性为玄武质凝灰岩;日本Niigata盆地为弧内到弧后环境中的反转裂谷(衰退裂谷)盆地^[36],其Yoshii-Kashiwazaki气田日产量约50万 m^3 ,其主要储层岩性为流纹岩;阿根廷Neuquen盆地Vega Grande油田日产油224 t、气1.1万 m^3 ,其火山岩储层岩性主要为裂缝安山岩;格鲁吉亚Samgori油田日产油达到411 t,其火山岩储层岩性主要为凝灰岩;阿根廷Noroeste盆地的YPF Palmar Largo油田日产550 t、气3.4万 m^3 ,其火山岩储层岩性主要为气孔玄武岩。而在中国,松辽盆地庆深气田(主要指徐深气田)2008年更是实现天然气日产量一度突破200万 m^3 ^[37],2010年平均日产277.53万 m^3 ,年产达到10.13亿 m^3 ^[38]。无论从油气的探明储量、日产和发表的科研论文数量来看,目前中国对火山岩油气藏的勘探开发和研究都走在了世界的前头。而国外目前在这一领域的勘探和研究还并未完全大规模展开,其火山岩油气潜力可能被显著低估了^[39]。

从全球范围看,火山岩油气储层的时代分布跨度非常广,最老可至寒武纪,如澳大利亚McArthur

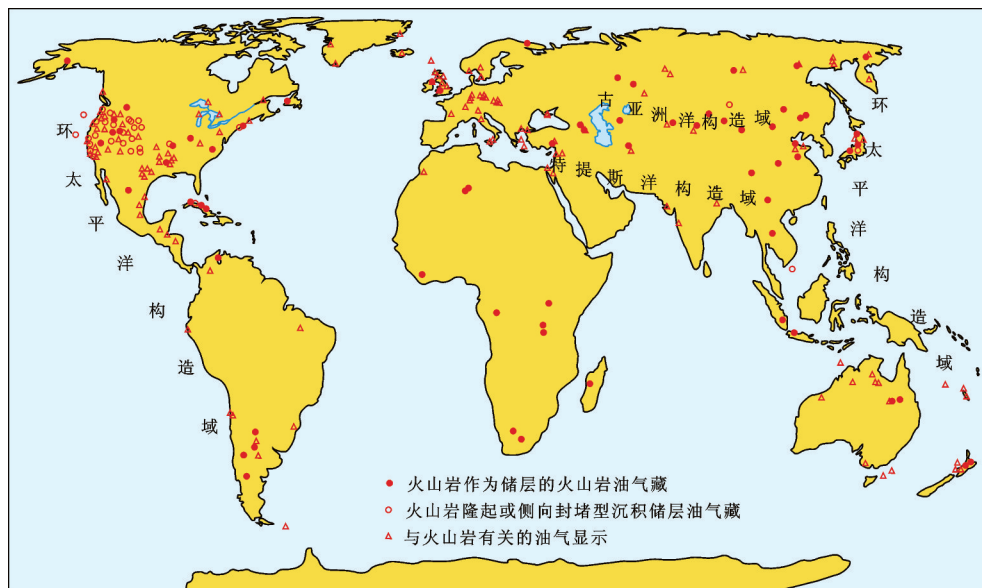


图3 全球火成岩相关油气的地理分布图(据文献[24,35])

Fig.3 Map showing the worldwide geographical distributions of hydrocarbons associated with igneous rocks(after references[24,35])

表 1 全球火山岩大油气田储量统计
Table 1 Statistics of large oil and gas fields of volcanic rocks around the world

国家	油气田	盆地	流体性质	储量 (油 t, 气 m ³)	储层岩性	参考文献
印度尼西亚	Jatibarang	NW Java	油,气	1.64×10 ⁸ t,764×10 ⁸ m ³	玄武岩,凝灰岩	[24]
中国	徐深气田	松辽盆地	气	已探明 2457.45×10 ⁸ m ³	流纹岩、凝灰岩	[28,29]
中国	克拉美丽气田	准噶尔盆地	气	已探明超过 1000×10 ⁸ m ³	火山岩	[30,40]
中国	长深气田	松辽盆地	气	已探明超过 740×10 ⁸ m ³	火山岩	[29,30,41]
纳米比亚	Kudu	Orange	气	849×10 ⁸ m ³	玄武岩	[24]
阿根廷	Medanito-25 de Mayo	Neuquen 盆地	油	约 0.6×10 ⁸ t 探明和控制储量	火山岩	[15]
美国	Richland	Monroe Uplift	气	399×10 ⁸ m ³	凝灰岩	[24]
阿尔及利亚	Ben Khalala	Triassic/Oued Mya	油	大于 0.34×10 ⁸ t	玄武岩	[24]
阿尔及利亚	Haoud Berkaoui	Triassic/Oued Mya	油	大于 0.34×10 ⁸ t	玄武岩	[24]
俄罗斯	Yaraktin	Markovo-Angara Arch	油	0.2877×10 ⁸ t	玄武岩,辉绿岩	[24]

盆地 Jamison 1 油气田在寒武纪溢流玄武岩中发现油气显示;最新可至新近纪,如日本陆上大型 Minami Nagaoka 气田火山岩储层的时代中新世^[14], Niigata 盆地火成岩储层的形成时代为中中新世到早上新世^[25]。从目前已发现的火山岩油气藏的分布频度上看,火山岩油气储层主要分布在中新生代地层中,其中侏罗系、白垩系、古近系和新近系中所出现的频率较高;其次是晚古生代地层中。如目前已发现的中新生代火山岩油气藏有澳大利亚 Browes 盆地中下侏罗统 Scott Reef 油气藏^[42]、阿根廷 Neuquen 盆地下侏罗统 Lapa 油气藏^[15]及该盆地 Cupen Mahuuida 油田三叠系火山岩油藏^[16]、中国松辽盆地白垩系营城组气藏^{[28][30]}、印度尼西亚 Jawa 盆地新近系中上新统 Jatibarang 油气藏^[43]、日本新泻(Niigata)盆地新近系 Kurosaka 气藏^[44]及该盆地中 Mitsuke、Katagai、Yoshii、Higashi-Kashiwazaki、Myohoji 等气田新近系火山岩气藏^[25]、日本 Akita 盆地 Kurokawa 油气田新近系火山岩油气藏^[45]、日本 Minami Nagaoka 气田中新统火山岩气藏^[14]、中国渤海湾盆地古近系沙河街组火山岩油气藏^[30]等。对古生代火山岩油气勘探而言,目前主要在中国西部盆地中取得了重要的油气发现,如准噶尔盆地和三塘湖盆地石炭系火山岩油气藏^[30],但国外古生代火山岩油气勘探和研究程度相对较低,所报道的古生代火山岩油气藏仍较罕见且规模较小。

5 火山岩油气藏展望

火山岩油气藏的出现和不断发展进一步丰富了储层岩性,给油气勘探带来新的前景。从全球范围来看,从基性岩到酸性岩、从熔岩到火山碎屑岩,几乎所有类型的火成岩都可能具有形成有效储层的潜力^[4,24,46-48]。其中以火山熔岩(包括玄武岩、安山岩和流纹岩)作为油气储层的频率较高,占到60%以上,其次为侵入岩(占20%以上)、火山碎屑岩(占10%以上)^[4](图4)。Petford & McCaffrey(2003)^[4]对此特别加以说明:数据揭示玄武岩、安山岩和流纹岩与油气的关系最密切,然而事实上当前大多数大型油气生产来自于花岗岩和相关的深层岩,当前的统计并未考虑油气田规模因素,对火成岩油气储层岩性做频率统计时,不同规模的油气藏在统计中使用了相同的权值。这进一步提醒人们,相对于常规储层而言,火山岩储集条件的形成具有更大的随机性,火成岩油气勘探不一定只固定针对某一类岩性,而需要结合区域实际情况具体分析。

随着对火山岩油气藏研究的深入,也再次让人们就结晶基底和沉积盖层的关系进行争论和重新认识。Petford & McCaffrey(2003)^[4]以及 Koning(2003)^[49]都对此进行了探讨并认为,石油地质学家关于结晶基底的标准定义为被沉积层序不整合上覆的任何变质岩或火成岩。油或气可能运移至相对较老的多孔变质岩或火山岩,形成基底储层。在

有些盆地如 Central Sumatra 盆地, 基底岩可能部分或完全为变质的。然而对结晶岩而言, 变质或明显老于它们的沉积覆盖都不是必需条件。也许更合适的结晶基底的定义, 需要回顾 Landes et al (1960)^[50]的经典观点:“基底岩和上覆沉积岩油气沉积的主要区别在于, 基底岩中储层的生油层(烃源岩)不能为其下覆岩层。”对这一定义的最终解释即基底岩中不能有烃源岩层出现^[49]。这一观点得到了众多研究人员^[4, 49, 51]的支持与推崇。正因为如此, 在之前普遍定义为基底岩的一些特定区域, 如果通过进一步勘探、地质和地化的研究而发现存在烃源岩层, 则需要对该基底岩的定义和性质作出重要的修正, 据此, 油气勘探家对基底岩的定义不能是固定不变的, 而必须对新的地质思想和数据作出响应^[49]。因此, 按火山岩出现在盆地基底或是沉积盖层的位置不同, 火山岩既可作为出现在沉积盖层中的普通储层; 也可能作为基底岩形成基底储层; 还可能原先定义为基底岩, 由于发现了下覆的烃源岩层而将该基底重新认识为沉积盖层。

火山岩油气藏的出现可能改变人们对盆地基底的认识, 使得某些沉积盆地的范围进一步向深部推进, 这些盆地的油气前景也将得以进一步扩大。如准噶尔盆地石炭系受到广泛的关注^[55-59], 对其中的火山岩从多方面进行了卓有成效的深入分析和探讨。过去石炭系曾被视为基底, 而由于其内含有重要的烃源岩层(如滴水泉组 C、d 为巴塔玛依内山组 C、b 火山岩储层的主要烃源岩层), 因而从 Landes et al (1960)^[50]、Petford & McCaffrey (2003)^[4]、Koning (2003)^[49]、Sircar (2004)^[51]等的观点和主张来看, 该石炭系已不能称之为基底, 石炭系内的火山岩也已不能称之为基底火山岩(当然, 必须认识到, 由于所使用的场合不同, 目前研究人员对盆地基底及基底岩的定义尚存在差异, 如从盆地拼合的角度来考虑基底, 从不同阶段的盆地演化来考虑相对基底等), 该盆地的基底可考虑进一步向深部修正和调整。类似的情况也可能出现在全球的其它一些盆地中。火山岩油气藏的出现导致对某些盆地基底认识上的修正, 将进一步增加盆地的油气前景, 使得一些勘探开发成熟的盆地向深部挖潜。

特定时期的板块边界是火山岩油气藏勘探的前景区。火山的分布与地球的构造活动存在非常

密切的关系, 在俯冲带、离散边界、转换边界和热点地区, 是火山活动的活跃区^[52]。主要的火山以及它们相应的火山碎屑沉积位于板块边界^[60]。活动的地表火山中大约 80% 与会聚板块边界有关, 15% 与离散边缘(洋中脊或陆内裂谷)有关, 余下的 5% 出现在板内环境^[53]。已发现的火山岩油气藏也主要分布在特定时期的板块边界位置, 如图 3。因此, 目前来看, 火山岩油气藏勘探的重点区域依次有: 环太平洋构造域的中新生代火山岩油气藏, 古亚洲洋构造域的晚古生代火山岩油气藏, 特提斯洋构造域(如其西端的环地中海区域)的火山岩油气藏等。

除作为潜在的储层而给盆地油气勘探来有利的方面外, 火山岩的出现有时也会对其带来不利影响。盆地中火山机构的出现可能破坏地层的有序性, 增加地层的复杂性和油气区带认识的复杂性。因而, 沉积盆地中火山机构的增加一般有扩大风险的趋势^[54]。比如, 玄武岩覆盖的沉积盆地, 其玄武岩之下的地震成像品质往往比较差, 这困扰着对玄武岩之下的油气区带的认识^[54]。玄武岩之下的成像(sub-basalt imaging)技术为此类勘探的关键技术。

综上所述, 在储层岩性上, 各种类型的火山岩都可能具有形成有效储层的潜力, 这进一步丰富了储层岩性; 在勘探的深度上, 使得一些盆地的油气勘探得以向深部发展, 并有可能改变传统意义上对一些盆地基底的认识; 在勘探的广度上, 一些被火山岩覆盖的盆地可能面临新的勘探潜力。火山岩的出现, 也会给油气勘探带来诸多复杂性和风险性等不利影响, 需要就此寻找针对性的技术进行解决。

6 结 论

通过较为广泛的文献调研, 系统回顾了国内外火山岩油气藏的研究历程, 将其整体上划分为四个阶段: 偶然发现阶段(1949 年之前), 缓慢发展阶段(1950—1979 年), 局部突破阶段(1980—1999 年); 成熟阶段(2000 年至今)。分析总结认为, 印度尼西亚的 Jatibarang 油气田、中国的徐深气田、克拉美丽气田、长深气田、纳米比亚的 Kudu 气田、阿根廷的 Medanito-25 de Mayo 油田等为典型的大型火山岩油气田。从出现频度上看, 目前已发现的火山岩油气储层主要分布在中新生界, 其中侏罗系、白垩系、古近系和新近系中所出现的频率较高; 其次是晚古生界。

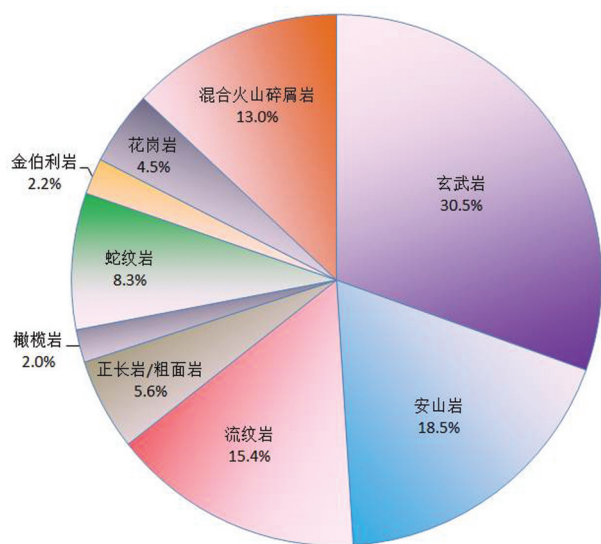


图4 全球火成岩油气藏按岩性分布统计据文献[4,24]修改
Fig.4 The distribution of hydrocarbons in and around igneous rocks according to lithology(after references[4,24])

从全球范围来看,几乎所有类型的火山岩都可能具有形成有效储层的潜力,其能否形成储集条件具有比常规储层更大的随机性。其不利的一面是增加了油气勘探和开发的复杂性和不确定性;有利的一面是,火山岩油气藏的出现和不断发展进一步丰富了储层岩性,给油气勘探带来新的前景。

火山岩油气藏的出现可能改变人们对一些盆地基底的认识,使得这些沉积盆地的范围进一步向深部推进,其油气前景也将得以进一步扩大。基底岩储层和沉积岩储层的主要区别在于,基底岩储层的生油层(烃源岩)不能为其下覆岩层。据此,油气勘探家对基底岩的定义不能是固定不变的,而必须对新的地质思想和数据作出响应,如,原先定义为基底岩的地层,由于发现了下覆的烃源岩层则该基底将重新认定为沉积盖层。

特定时期的板块边界是火山岩油气藏勘探的前景区。目前来看,火山岩油气藏勘探的重点区域依次有:环太平洋构造域的中新生代火山岩油气藏,古亚洲洋构造域的晚古生代火山岩油气藏,特提斯洋构造域(如其西端的环地中海区域)的火山岩油气藏等。

火山岩的出现,也会给油气勘探带来诸多复杂性和风险性等不利影响,需要就此寻找针对性的技术进行解决,以减少勘探中的风险性。

参考文献(References):

- [1] Einsele G. Sedimentary Basins: Evolution, Facies, and Sediment Budget[M]. Berlin: Springer-verlag, 2000: 64-65.
- [2] Powers S. Occurrence of Petroleum in North America[EB/OL]. 1931, <http://www.aimehq.org/search/docs/Volume%20096/096-32.pdf>, 2010-10-20
- [3] 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.
Zhang Zishu, Wu Banghui. Investigation of the research status and exploration technology at home and abroad about volcanic reservoir[J]. Natural Gas Exploration and Development, 1994, 16(1): 1-26 (in Chinese with English abstract).
- [4] Petford N, McCaffrey K. Hydrocarbons in crystalline rocks: an introduction[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2003, 214(1): 1-5
- [5] 王洛, 李江海, 师永民, 等. 准噶尔盆地滴西地区石炭系火山岩识别与预测[J]. 岩石学报, 2010, 26(1): 242-254
Wang Luo, Li Jianghai, Shi Yongmin, et al. The identification and prediction of Carboniferous volcanic rocks in Dixi area, Junggar Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(1): 242- 254 (in Chinese with English abstract).
- [6] 邱家骧. 岩浆岩岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1985: 11-69
Qiu Jiexiang. Magmatite Petrology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985: 8-22 (in Chinese)
- [7] 邱家骧. 国际地科联火成岩分类学分会推荐的火山岩分类简介[J]. 现代地质, 1991, 5(4): 457-468.
Qiu Jiexiang. Brief introduction of a classification of volcanic rocks recommendations of the IUGS subcommis on the systematics of igneous rocks[J]. Geoscience, 1991, 5(4): 457-468 (in Chinese with English abstract)
- [8] 张树业, 刘如曦, 常丽华, 等. 火成岩结构构造图册[M]. 北京: 地质出版社, 1982: 4-5.
Zhang Shuye, Liu Ruxi, Chang Lihua, et al. Atlas of Igneous Rock Texture and Structure[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1982: 4-5 (in Chinese).
- [9] Udden A J. Oil in an igneous rock[J]. Economic Geology, 1915, 10(6): 582-585.
- [10] Lewis W J. Occurrence of oil in igneous rocks of Cuba[J]. AAPG Bulletin, 1932, 16(8): 809-818.
- [11] Powers S, Cla G F. Nature and origin of occurrences of oil, gas, and bitumen in igneous and metamorphic rocks[J]. AAPG Bulletin, 1932, 16(8): 719-726.
- [12] Government of Mexico. MEXICO'S OIL[EB/OL]. 1940, <http://ds.heavyoil.utah.edu/dspace/bitstream/123456789/7953/1/Government%20of%20Mexico%201940%20part.pdf>, 2010-10-20
- [13] Chavez R. The Mexican Oil Fields[EB/OL]. Publisher: School of

- Mines and Metallurgy of the University of Missouri, Missouri, USA, 1921 http://scholarsmine.mst.edu/thesis/pdf/Chavez_09007dcc8065fd47.pdf, 2010-10-20
- [14] Shimamoto T, Inoue N, Sato K. Characterization of a Volcanic Formation Through Comprehensive Well Test Analyses[J]. Society of Petroleum Engineers, SPE(37413), 1997: 243-250.
- [15] Sruoga P, Rubinstein N. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuquen basins, Argentina[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91: 115-129.
- [16] D'Huteau E, Pereira M. Optimal Process for Design of Fracturing Treatments in a Naturally-Fractured Volcaniclastic Reservoir: A Case History in the Cupén Mahuida Field, Neuquén, Argentina[J]. SPE(107827), 2007: 1-6.
- [17] Monreal F R, Villar H J, Baudino R, et al. Modeling an atypical petroleum system: A case study of hydrocarbon generation, migration and accumulation related to igneous intrusions in the Neuquen Basin, Argentina[J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(2009): 590-605.
- [18] Sruoga P, Rubinstein N, Hinterwimmer G. Porosity and permeability in volcanic rocks: a case study on the Serie Tobifera, South Patagonia, Argentina[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 132(2004): 31-43.
- [19] Pángaro F, Vottero A, Villar H, et al. Volcanic Events and Petroleum Systems: The Case of the Volcán Auca Mahuida Field, Neuquen Basin, Argentina[J]. EAGE 67th Conference & Exhibition - Madrid, Spain, 2005, 13-16 June 2005.
- [20] Australian Government (Department of Resources, Energy and Tourism). Regional Geology of the Browse Basin[EB/OL]. 2009, http://www.ret.gov.au/resources/Documents/acreage_releases/2009/RegionalBrowse.pdf, 2010-10-24
- [21] Schlumberger/Baker Hughes company. North Browse 3D survey[EB/OL]. 2010, www.multiclient.westerngeco.com/NavPDFs%5CWG3D_NorthBrowse_Australia_WG0681P.pdf, 2010-10-27
- [22] Bernecker T. New opportunities for offshore petroleum exploration[J]. AUSGEO News, 94(2009.07), 2009: 1-8. <http://www.ga.gov.au/servlet/BigObjFileManager?bigobjid=GA14027>, 2010-10-25
- [23] Bradshaw M T, Foster C B, Fellows M E & Rowland D C. Australia's search for petroleum: patterns of discovery[J]. Oil & Gas Journal, 1999, 97(23): 37-44.
- [24] Schutter SR. Occurrences of Hydrocarbons in and around Igneous Rocks[M]. London: Geological Society, London, Special Publications, 2003, 214(1): 35-68.
- [25] Ukai M, Katahira T, Kume Y, et al. Volcanic Reservoirs, Their Characteristics of the Development and Production[J]. SPE(4296-MS), 1972: 1-16.
- [26] Zou C N, Zhao W Z, Jia C Z, et al. Formation and distribution of volcanic hydrocarbon reservoirs in sedimentary basins of China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(3): 257-271.
- [27] 黄玉龙. 松辽盆地白垩系营城组火山岩有效储层研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
- Huang Yulong. Characterization of Effective Gas Reservoirs Hosted in the Lower Cretaceous Volcanic rocks of Songliao Basin[D]. Changchun: Jilin University, 2010 (in Chinese with English abstract).
- [28] Feng Z Q. 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(2008), 416-432.
- [29] 冯志强, 金成志, 梁江平, 等. 大庆油田勘探技术现状及发展方向[J]. 中国工程科学, 2010, 12(5): 58-62.
- Feng Zhiqiang, Jin Chengzhi, Liang Jiangpin, et al. Present state and development trend of exploration technology in Daqing Oilfield[J]. Engineering Science, 2010, 12(5): 58-62 (in Chinese with English abstract).
- [30] Zhao W Z, Zou C N, Li J Z, et al. Comparative study on volcanic hydrocarbon accumulations in western and eastern China and its significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(1): 1-11 (in Chinese with English abstract).
- [31] 冯志强, 张晓东, 任延广, 等. 海拉尔盆地油气成藏特征及分布规律[J]. 大庆石油地质与开发, 2004, 23(5): 16-19.
- Feng Zhiqiang, Zhang Xiaodong, Ren Yanguan, et al. Hydrocarbon reservoir forming characteristics and distribution rule of Hailar Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2004, 23(5): 16-19 (in Chinese with English abstract).
- [32] 谢文彦. 辽河探区油气勘探新进展与下步勘探方向[J]. 中国石油勘探, 2005,(4): 19-33.
- Xie Wenyan. New Achievements of Oil and Gas Exploration and Next Prospecting Targets in Liaohe Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2005,(4): 19-33 (in Chinese with English abstract).
- [33] 于英太. 二连盆地火山岩油气藏勘探前景[J]. 石油勘探与开发, 1988(4): 9-19.
- Yu Yintai. The prospect of volcanic rock oil reservoirs in Erlian basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 1988(4): 9-19 (in Chinese with English abstract).
- [34] 张光亚, 邹才能, 朱如凯, 等. 我国沉积盆地火山岩油气地质与勘探[J]. 中国工程科学, 2010, 12(5): 30-38.
- Zhang Guangya, Zou Caineng, Zhu Rukai, et al. Petroleum geology and exploration for volcanic reservoirs in the sedimentary basins of China[J]. Engineering Science, 2010, 12(5): 30-38 (in Chinese with English abstract).
- [35] 姜洪福, 师永民, 张玉广, 等. 全球火山岩油气资源前景分析[J]. 资源与产业, 2009, 11(3): 20-22.
- Jiang Hongfu, Shi Yongmin, Zhang Yuguang, et al. Potential of global volcanics-hosted oil-gas resources[J]. Resources & Industries, 2009, 11(3): 20-22 (in Chinese with English abstract).
- [36] Takano O, Tateishi M, Endo M. Tectonic controls of a backarc trough-fill turbidite system: The Pliocene Tamugigawa Formation in the Niigata-Shin'etsu inverted rift basin, Northern Fossa Magna, central Japan[J]. Sedimentary Geology, 2005, 176(2005): 247-279
- [37] 王志田, 李成堃. 大庆油田深层天然气日产量突破 200 万立方米[N]. 中国石油报, 2008(01): 1-1.
- Wang Zhitian, Li Chengkun. The deep natural gas from Daqing

- Oilfield break through 2 million cubic meters per day[N]. China Petroleum Daily, 2008(01): 1-1 (in Chinese).
- [38] 王志田, 孟祥波. 庆深气田为大庆稳产“争气”[N]. 中国石油报, 2011(03): 1-1.
Wang Zhitian, Meng Xiangbo. Qingshen gas field contribute to stable production of Daqing[N]. China Petroleum Daily, 2011(03): 1-1 (in Chinese).
- [39] 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.
Liu Jiaqi, Meng Fanchao, Cui Yan, et al. Discussion on the formation mechanism of volcanic oil and gas reservoirs[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(1): 1-13 (in Chinese with English abstract).
- [40] 陈萍, 张玲, 王惠民. 准噶尔盆地油气储量增长趋势与潜力分析[J]. 石油实验地质, 37(1): 124-128.
Chen Ping, Zhang Ling, Wang Huimin. Reserves growth trend and potential analysis of Junggar Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(1): 124-128 (in Chinese with English abstract).
- [41] 魏国齐, 杨威, 李剑, 等. 中国陆上天然气地质特征与勘探领域[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(7): 957-969.
Wei Guoqi, Yang Wei, Li Jian, et al. Geological characteristics and exploration fields of subaerial natural gas in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(7): 957-969 (in Chinese with English abstract).
- [42] Dutkiewicz A, Volk H, Ridley J, et al. Geochemistry of oil in fluid inclusions in a middle Proterozoic igneous intrusion: implications for the source of hydrocarbons in crystalline rocks[J]. Organic Geochemistry, 2004, 35: 937-957.
- [43] Benyamin. Facies distribution approach from log and seismic to identification hydrocarbon distribution in volcanic fracture[J]. 9th SPWLA Japan formation evaluation SYMP. 9, 2007: 25-26.
- [44] Kawamoto T. Distribution and alteration of the volcanic reservoir in the Minami-Nagaoka gas field[J]. Japanese Association for Petroleum Technology, 2001, 66: 46-55.
- [45] Chakhmakhchev A, Suzuki N, Suzuki M, et al. Biomarker distributions in oils from the Akita and Niigata Basins, Japan[J]. Chemical Geology, 1996, 133(1996): 1-14.
- [46] Vernik L. A new type of reservoir rock in volcanoclastic sequences[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74: 830-836.
- [47] Levin L E. 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: 267-288.
- [48] Gu L X, Ren Z W, Wu C Z, et al. Hydrocarbon reservoirs in a trachyte porphyry intrusion in the eastern depression of the Liaohe basin, NE China[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86: 1821-1832.
- [49] Koning T. Oil and gas production from basement reservoirs: examples from Indonesia, USA and Venezuela[M]. Geological Society, London, Special Publications, 2003, 214(1): 83-92.
- [50] Landes K K, Amoruso J J, Charlesworth L J, et al. Petroleum resources in basement rocks[J]. American Association of Petroleum Geologists, Bulletin, 1960, 44: 1682-1691.
- [51] Sircar A. Hydrocarbon production from fractured basement formations[J]. Current Science, 2004, 87(2): 147-151.
- [52] Smithsonian Institution. Global Volcanism Program[EB/OL]. 2010, http://earth.rice.edu/mtpe/geo/geosphere/hot/volcanoes/volcanoes_b2.html, 2010
- [53] Fisher R V, Schmincke H U. Pyroclastic rocks[M]. Berlin: Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 1984: 472.
- [54] Rohrman M. Prospectivity of volcanic basins: Trap delineation and acreage de-risking[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(6): 915-939.
- [55] 李亚萍, 李锦轶, 孙桂华, 等. 准噶尔盆地基底的探讨: 来自原泥盆纪卡拉麦里组砂岩碎屑锆石的证据[J]. 岩石学报, 2007, 23(7): 1577-1590.
Li Yaping, Li Jinyi, Sun Guihua, et al. Basement of Junggar basin: evidence from detrital zircons in sandstone of previous Devonian Kalamaili formation[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(7): 1577-1590 (in Chinese with English abstract).
- [56] 王方正, 杨梅珍, 郑建平. 准噶尔盆地岛弧火山岩地体拼合基底的地球化学证据[J]. 岩石矿物学杂志, 2002, 21(1): 1-10.
Wang Fangzheng, Yang Meizhen, Zheng Jianpin. Geochemical evidence of the basement assembled by island arc volcanics terranes in Junggar Basin[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2002, 21(1): 1-10 (in Chinese with English abstract).
- [57] 王方正, 杨梅珍, 郑建平. 准噶尔盆地陆梁地区基底火山岩的岩石地球化学及其构造环境[J]. 岩石学报, 2002, 18(1): 9-16.
Wang Fangzheng, Yang Meizhen, Zheng Jianpin. Geochemical characteristics and geological environment of basement volcanic rocks in Luliang, central region in Junggar basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18(1): 9-16 (in Chinese with English abstract).
- [58] 曾广策, 王方正, 郑建平, 等. 准噶尔盆地基底火山岩中的辉石及其对盆地基底性质的示踪[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2002, 27(1): 13-18.
Zeng Guangce, Wang Fangzheng, Zheng Jianpin, et al. Study of pyroxene in Junggar basin basement volcanic rock and its indicator to basin basement characteristics[J]. Earth Science——Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(1): 13-18 (in Chinese with English abstract).
- [59] 郑建平, 王方正, 成中梅, 等. 拼合的准噶尔盆地基底: 基底火山岩 Sr-Nd 同位素证据[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2000, 25(2): 179-184.
Zheng Jianpin, Wang Fangzheng, Cheng Zhongmei, et al. Nature and evolution of amalgamated basement of Junggar basin, northwestern China: Sr-Nd isotope evidences of basement igneous rock[J]. Earth Science——Journal of China University of Geosciences, 2000, 25(2): 179-184 (in Chinese with English abstract).
- [60] Manville V, Németh K, Kano K. Source to sink: A review of three decades of progress in the understanding of volcanoclastic processes, deposits, and hazards[J]. Sedimentary Geology, 2009, 220(2009): 136-161.