

doi:10.3799/dqkx.2012.S1.013

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

柳成志¹, 于海山¹, 吕延防¹, 孙玉凯^{2,3}, 杨文敏¹, 雷海艳¹

1. 东北石油大学地球科学学院, 黑龙江大庆 163318
2. 吐哈油田分公司勘探开发研究院, 新疆哈密 839009
3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州 510640

摘要: 利用岩心、薄片、扫描电镜、录井、电测井及地球化学分析资料, 从火山岩的岩石学特征、储集空间类型及其成岩作用等方面, 研究了三塘湖盆地马朗凹陷卡拉岗组火山岩储层形成机理。结果表明: ①该区含油气火山岩岩性包括熔岩(玄武岩、安山岩)和火山碎屑岩, 以熔岩为主; ②火山岩相包括爆发相、溢流相、火山沉积相, 以溢流相为主; ③储集层碱交代作用明显, 可见钠长石化、钠铁闪石化、浊沸石化及石英多期充填孔缝等典型标志; ④卡拉岗组火山岩形成于碱性环境中, 其储集空间主要为次生溶蚀孔隙, 浊沸石溶蚀孔隙层段是本区较好的储集层, 反映卡拉岗组火山岩储层“先碱后酸”的形成机理; ⑤浊沸石层段与石英充填或胶结层段交互出现, 并且总是分布在石英充填或胶结层段之下, 是碱交代后热液向上运移排硅的证据, 反映卡拉岗组火山岩储层“下交上排”的形成机理。研究得出马朗凹陷卡拉岗组普遍发育碱交代作用, 揭示了火山岩储层形成演化具有烃碱流体参与的特征, 对深化火山岩储层形成机理认识具有重要意义。

关键词: 马朗凹陷; 火山岩; 成岩作用; 烃碱流体; 碱交代; 次生孔隙; 石油地质; 油气。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2012)S1-0134-09

收稿日期: 2011-06-20

Volcanic Oil and Gas Reservoir Characteristics and Formation Mechanism in Kalagang Formation of Malang Sag in Santanghu Basin

LIU Cheng-zhi¹, YU Hai-shan¹, LÜ Yan-fang¹, SUN Yu-kai^{2,3}, YANG Wen-min¹, LEI Hai-yan¹

1. College of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China
2. Exploration and Development Institute of Tuha Oilfield Company, Hami 839009, China
3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

Abstract: The petrographic characteristics, types of reservoir spaces and diagenesis of volcanic rocks, and formation mechanism of volcanic reservoir in Kalagang Formation of Malang sag in Santanghu basin were studied, by combining core, core wafer, scanning electron microscope log data, electric logging and geochemical analysis data. The results show that: (1) The hydrocarbon bearing volcanics in this region is mainly composed of lava (basalt and andesite) and volcanoclastic rock; (2) The volcanic phase contain mainly effusive facies, explosive facies and volcanic sedimentary facies; (3) The alkali metasomatism in the reservoir is obvious, the typical marks of which are albitization, arfvedsonization, laumontitization and pore-fracture filled with quartz by multi-stage; (4) The volcanics in Kalagang Formation was formed in alkaline environment, the reservoir space of which is mainly secondary dissolution porosity. The solution pore layers of laumontite in the reservoir are good reservoir, which reflects volcanic reservoir formation mechanism of “alkali before acid” in Kalagang Formation; (5) The interaction by layers of laumontite and layers of quartz-cementing, while the former ones are always distributed under the latter ones, is the favorable evidence of the upward migration and discharging silicon after the hydrocarbon alkali fluid metasomatized the volcanic rocks, which reflects the volcanic reservoir formation mechanism of “metasomatism the lower layers and discharging in the upper layers” in Kalagang Formation. The research shows that alkali metasomatism is pervasive in Kalagang Formation, and it al-

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司专项(No. 2008B-0101)。

作者简介: 柳成志(1962—), 男, 副教授, 博士, 主要从事火山岩和油气成藏与保存条件研究工作。E-mail: lchzhdq@vip.sina.com

so reveals that the characteristics of hydrocarbon alkali fluid participation in the formation and development of volcanic reservoir, which is significant in further acquaintance of the formation mechanism in volcanic reservoir.

Key words: Malang sag; volcanic rocks; diagenesis; hydrocarbon alkali fluid; alkali metasomatism; secondary pore; petroleum geology; oil and gas.

近年来,我国学者对火山岩储层的研究取得了丰硕的成果,以松辽盆地为典型,从火山岩成岩作用、储集空间类型及成因、储层发育控制因素等方面有了很多可贵的认识(慕敦科等,2002;王璞珺等,2003a;刘为付,2004;高有峰等,2007)。然而,由于三塘湖盆地火山岩形成地质背景十分复杂,且岩石受流体及风化作用改造蚀变严重,储层非均质性强、物性变化大等,造成对火山岩储层特征认识不清,制约了该区石炭系火山岩油气藏的勘探。为此,笔者对马朗凹陷卡拉岗组火山岩储层特征进行研究。为了从根本上认识火山岩储层形成及演化机制,笔者深入分析储层形成机理,发现了卡拉岗组火山岩中存在一种“碱性+酸性”叠加溶蚀型的火山岩储层形成机理,以期为该区火山岩储层预测及其评价提供理论依据。

三塘湖盆地位于新疆东部,毗邻蒙古,地处中亚造山带的东准格尔构造带上(赵泽辉等,2006),自北向南划分为东北隆起带、中央拗陷带和西南逆冲推覆带。马朗凹陷是位于三塘湖盆地中央拗陷带中东部的一个含油气凹陷,可以划分出马北、牛圈湖、黑墩、马中和马东5个构造带和沉积凹陷区(图1)。马朗凹陷在石炭系发育了一系列的大型鼻状构造带,平面上自北向南包括牛圈湖、牛东、马中和马东鼻状构造带,这些鼻状构造带自东向西倾伏于凹陷中,总体表现为东高西低的构造格局。2006年,上石炭统卡拉岗组火山岩首次获得高产油气流,从而提升了盆地的勘探潜力,石炭系火山岩油气藏

因此成为了吐哈油田油气储量增长的重要领域。

1 火山岩储层特征

1.1 储层岩石学特征

通过对马朗凹陷卡拉岗组火山岩取心井进行岩心观察、薄片鉴定及全岩化学分析得出,本区火山岩储层中 SiO_2 含量多为 45%~65%, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 含量约为 3%~9%, 岩石里特曼指数为 1.8~9.0, 属钙碱性-碱性系列, 主要发育一套以玄武岩、安山岩及其向酸性岩过渡岩性为主的中基性火山熔岩, 并且夹有火山碎屑岩及少量沉火山碎屑岩(表1)。油气储层岩石类型主要为自碎角砾安山岩、自碎角砾玄武岩、气孔杏仁安山岩、气孔杏仁玄武岩, 其次为火山角砾岩。岩石成分中暗色矿物含量较高, 稳定性差, 极易蚀变。岩矿鉴定表明, 橄榄石蚀变为伊丁石、褐铁矿; 辉石、角闪石蚀变为绿泥石、磁铁矿; 基性斜长石多钠长石化或蚀变为高岭石、绿泥石, 个别蚀变为油沸石和碳酸盐矿物。

1.2 储层岩相特征

以岩心观察为基础, 结合录井、测井及地震反射特征分析, 建立了本区岩心相、测井相及地震相标志, 揭示卡拉岗组火山岩相可划分为火山通道相、爆发相、溢流相、侵出相和火山沉积相5种相类型, 各岩相的鉴别特征与东部中生代火山岩相似(王璞珺等, 2003b)。由于本区火山岩多为裂隙式喷发, 火山岩相以溢流相最为发育, 因此相序多表现为3种样式: 溢流相→爆发相→火山沉积相; 溢流相→火山沉积相; 溢流相→沉积岩相。卡拉岗组火山岩溢流相具有喷出温度高、低-中粘度、厚度和成分较为稳定的特点, 以基性玄武岩和安山岩为主, 电测曲线上表现为自然伽玛(GR)块状低值, 电阻率(RD)中高值, 声波时差(DT)中低值。爆发相具有喷发温度低、含挥发成分多、粘度较大、厚度和成分不稳定的特点, 主要以中基性火山角砾岩和凝灰岩为主, 夹有火山集块岩、熔结火山碎屑岩, 电测曲线上明显地区别于溢流相, 其中火山角砾岩具自然伽玛(GR)箱型低值、密度测井(DEN)高值、电阻率(RD)中高值的特点; 凝灰岩具有自然伽玛(GR)齿化块状高值、密度测井

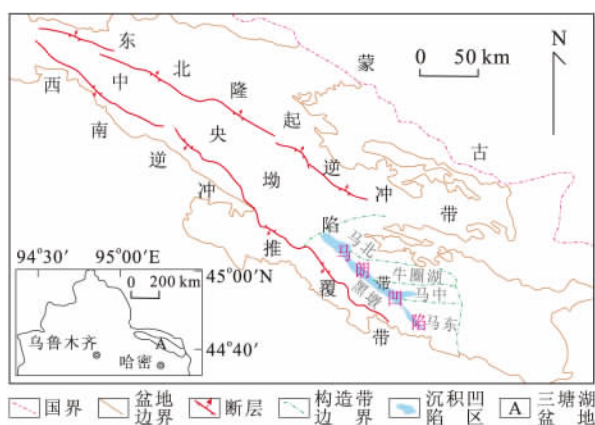


图1 马朗凹陷区域位置及构造单元划分

Fig.1 Regional location and tectonic partition in Malang sag

表 1 马朗凹陷卡拉岗组火山岩岩性统计 (%)

Table 1 Statistics on lithology of volcanic rocks in Kalagang Formation of Malang sag

构造带	熔岩					火山碎屑岩				
	玄武岩	粗玄武岩	粗安岩	安山岩	粗面岩	熔结火山碎屑岩	火山角砾岩	凝灰岩	沉火山角砾岩	沉凝灰岩
马北	19.94	27.39	14.56	6.32	0.79	6.52	13.77	6.37	3.14	1.20
牛圈湖	7.32	21.45	21.28	11.16	1.69	3.21	23.26	5.95	3.99	0.59
黑墩	34.09	24.12	7.26	3.21	1.32	5.39	14.56	3.65	5.23	1.17
马中	24.59	20.14	13.37	7.43	1.47	2.68	17.75	4.57	7.09	0.91
马东	13.44	26.49	17.24	4.57	1.26	1.36	16.43	6.35	9.57	3.29

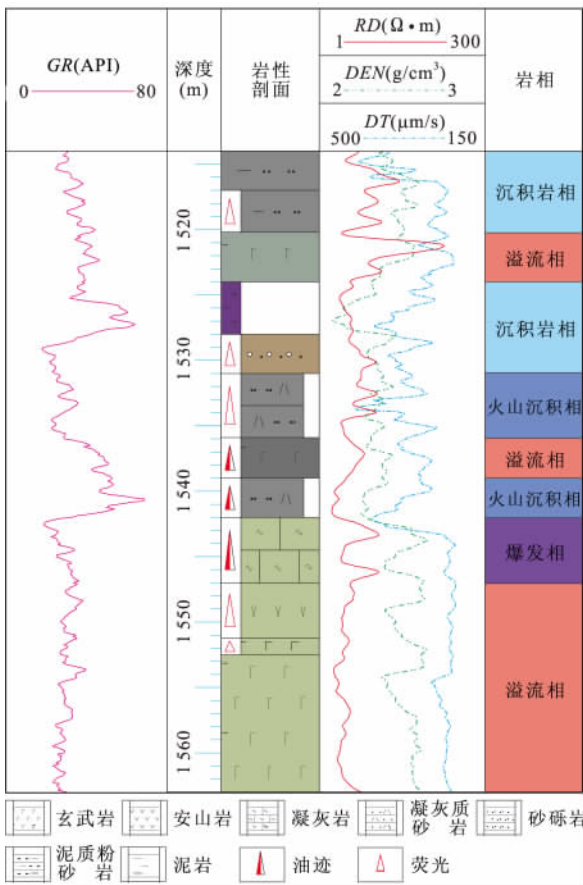


图 2 马朗凹陷卡拉岗组火山岩测井相分析

Fig. 2 Electrofacies map of volcanics in Kalagang Formation of Malang sag

(DEN)中值和自然电位(SP)中负异常值的特点,火山沉积相发育局限,主要为沉凝灰岩、沉火山角砾岩等,电测曲线特征与沉积岩类似,具有自然伽玛(GR)高值、电阻率(RT)和密度(DEN)由低值向高值变化的特点(图 2)。岩相对火山岩储层发育程度具有明显的控制作用(王璞珺等,2003b;孙玉凯等,2009b;刘俊田等,2009),这是火山岩中重要的地质规律之一。

1.3 储集空间类型及特征

在岩心观察、铸体薄片鉴定和成像测井(FMI)分析的基础上得出,马朗凹陷石炭系卡拉岗组火山岩具

有储层非均质性强、储集空间类型多、孔隙结构复杂、次生作用影响强烈的特征。储集空间可分为原生孔缝和次生孔缝两大类(表 2)。次生储集空间往往叠加在原生储集空间之上,孔、洞、缝交织在一起形成有效储集空间,大大改善了火山岩储集层的物性,是本区最主要的储集空间类型(谢庆宾等,2000)。

1.4 储集物性特征

据岩心分析孔隙度资料,卡拉岗组火山岩油气储层平均孔隙度为 8.19%,平均渗透率为 $0.64 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。储层物性受岩性、岩相、构造、流体作用及烃源岩分布范围影响十分明显。岩性方面以安山岩类最好,玄武岩类次之,凝灰岩类最差;岩相上以溢流相上部亚相最好,爆发相之碎屑流亚相稍差(表 3)。在构造运动所形成的断裂带及风化壳上,次生孔隙发育,储层物性较好。另外,地壳内流体(碱性流体、酸性流体)对火山岩的改造作用强烈的储层物性较好。其中碱性流体是以往研究中所忽略的影响储层物性的重要因素,其独特的溶解营力可形成大量的次生孔隙;而酸性流体,特别是有机酸性流体对储层物性有很大的影响。由于距烃源岩近,有机酸对碱性-钙碱性火山岩改造作用强,如马 36 井和马 40 井均位于马朗凹陷东南洼槽内,有很好的烃源岩条件,加之附近断裂发育,流体有很好的运移条件,工业油流产出层位的薄片鉴定结果均反映出“碱性+酸性”叠加溶蚀型孔隙发育十分普遍,可以得出其有效储层的形成是碱性流体和酸性流体先后作用的结果。因此,火山岩有效储层物性受岩性、岩相、构造、流体作用及烃源岩分布的范围影响十分明显。

2 火山岩储层形成机理

通过对卡拉岗组火山岩储层特征进行研究,结合火山岩储层中特征蚀变矿物的存在及储集空间形成演化分析得出,本区火山岩储层中存在一种“碱性+酸性”叠加溶蚀型的火山岩储层形成机理,它表

表2 马朗凹陷石炭系卡拉岗组火山岩储集空间类型及特征

Table 2 Types and characteristics of Carboniferous volcanic reservoir space in Kalagang Formation of Malang sag

储集空间类型	成因	特征及识别标志	发育的岩石类型
气孔	火山喷发时,冷凝作用使岩浆包裹气体逸出后形成气孔	圆形、压扁伸长性,孔壁可不规则但较圆滑;大多数呈孤立状,少数为串珠状	玄武岩、安山岩、角砾熔岩、凝灰熔岩、熔结角砾岩
杏仁体内残留孔	充填气孔的矿物沿其孔隙壁生长,但未被填满而形成的孔隙	伸长形、多边形,边缘多为棱角状	玄武岩、安山岩、角砾熔岩、凝灰熔岩、熔结角砾岩
原生 晶内熔孔	地下形成的晶体(斑晶、晶屑)喷至地表受高温熔浆和氧化作用被熔透而成	圆形、椭圆形、不规则形,多发育于石英晶体内部	玄武岩、安山岩、角砾熔岩、熔结角砾岩、熔结凝灰岩、凝灰岩
原生 粒内孔	火山碎屑岩的刚性和塑性岩屑自身带来	主要发育于较粗粒的火山碎屑内部	集块岩、火山角砾岩、凝灰岩、熔结角砾岩、角砾熔岩、沉火山碎屑岩
原生 粒间孔	较粗粒火山碎屑之间未被充填,受压结、压实作用改造而缩小	形状不规则,多发育于火山碎屑组分之间	集块岩、火山角砾岩、凝灰岩、熔结角砾岩、角砾熔岩、沉火山碎屑岩
孔隙 微孔	熔岩基质的结晶作用为占满的空间,较细粒火山碎屑之间未被充填	发育于熔岩基质微晶矿物之间或较细粒火山碎屑之间	各类火山岩
原生 粒内溶孔	地表水淋滤或地下水溶蚀长石晶体(斑晶、晶屑)及岩屑内的长石、火山尘、玻璃质等	分布于长石及岩屑的内部或边缘,在长石内多沿解理缝分布,形状多不规则	玄武岩、熔结角砾岩、角砾熔岩、集块岩、火山角砾岩、凝灰岩、沉火山碎屑岩
次生 基质内溶孔	地表水淋滤或地下水溶蚀熔岩的基质和细粒火山灰、火山尘而形成	形状不规则,个体小,发育于熔岩基质或较细粒火山碎屑中	玄武岩、熔结角砾岩、角砾熔岩、集块岩、火山角砾岩、凝灰岩
次生 杏仁体内溶孔	地表水淋滤或地下水溶蚀杏仁体内的充填物质	发育于杏仁体内	玄武岩、安山岩、玄武岩、浮岩、角砾熔岩、凝灰熔岩、熔结角砾岩、熔结凝灰岩
次生 铸模孔	岩屑、单个或多个长石晶体被地表水淋滤或地下水溶蚀而成	保留长石斑晶或晶屑以及刚性或塑性岩屑的外形	玄武岩、熔结角砾岩、角砾熔岩、集块岩、火山角砾岩、凝灰岩
原生 收缩缝	熔浆喷冷凝收缩作用、火山碎屑物成岩收缩作用	同心圆形、相平行的弧状	各类火山岩
原生 层间缝	火山岩的压实、压结成岩作用	顺层分布、缝窄面大、延伸长	玄武岩、安山岩、角砾熔岩
原生 炸裂缝	由火山喷发时岩浆上拱力、岩浆爆发力引起的气液爆炸作用而形成	裂缝不定向、弯曲形	各类火山岩
原生 贴粒缝	压实成岩作用	多贴近火山集块和火山角砾边缘	熔结角砾岩、角砾熔岩、集块岩、火山角砾岩
裂隙 解理缝	矿物受外力作用形成	相互平行、成组出现	各类火山岩
裂隙 构造缝	岩石受构造应力作用形成	常平行成组出现,具方向性,常连通其他孔隙	各类火山岩
次生 风化缝	表生风化作用形成	不具方向性,错综交叉,弧形、同心弧形、马尾形、不规则形	各类火山岩
次生 缝合缝	压实、压溶作用形成	呈锯齿状、缝合线形	熔结角砾岩、角砾熔岩、集块岩、火山角砾岩
次生 溶蚀缝	地表水淋滤或地下水溶蚀	不具方向性,缝壁不规则	各类火山岩

现为“先碱后酸”和“下交上排”两种具体的形式。

2.1 “先碱后酸”

晚石炭纪后期中亚造山带发生多次软碰撞,火山活动频繁(赵泽辉等,2006),岩浆来源于亏损地幔的部分熔融和残余洋壳的再次熔融(韩宝福等,1999;王玉往等,2010)。这套岩浆具有“富水”、多与早期蛇绿岩套伴生、富集多种不相容元素和轻稀土元素的特征(张弛和黄萱,1992;王玉往等,2004,2006;),具典型幔源流体改造的性质(赵泽辉等,2006),因此,卡拉岗组中基性火山岩的形成与幔源流体的改造有着密切关系。杜乐天(1996)将幔源流体称为羟碱流体(HACONS),它是一种既富挥发份又富碱金属的深源高温、高压、高密度、高能超临界

流体,其最典型的特征就是富碱。深层火山岩次生储集空间的发育与碱交代作用有着密切的关系。研究发现,卡拉岗组火山岩受幔源流体的改造,其成岩环境属于碱性环境,因此将其成岩作用称之为碱性成岩作用。“先碱后酸”就是指卡拉岗组火山岩储层的形成具有以碱性成岩作用为先,酸性溶蚀作用在后为明显特征的一种火山岩储层形成机理。

碱性成岩作用可划分出两个时期:一是火山岩形成时期,指从岩浆至成岩的时期,原生孔隙和原生裂缝形成于这一时期;二是火山岩形成后期,时限止于其经受变质作用而形成变质岩前或经受表生风化作用而形成风化产物之前,次生孔隙和次生裂缝形成于这一时期。因此,“先碱后酸”机理也可以分为两

表 3 卡拉岗组火山岩储层物性与岩性、岩相关系

Table 3 Relationship of physical property with lithofacies and lithology of volcanic rocks in Kalagang Formation

岩相	亚相	典型岩石类型	储集空间类型	孔隙度(%)	渗透率($10^{-3} \mu\text{m}^2$)
火山通道相	火山颈	角砾熔岩	砾间孔+裂隙	12.71	1.03
	次火山岩	次辉绿玢岩	溶蚀孔+裂隙	2.60	0.17
	隐爆角砾岩	隐爆角砾岩	气孔+砾间孔+裂隙	9.39	0.68
溢流相	上部	气孔及自碎熔岩	气孔+溶蚀孔+裂隙	19.13	1.74
	中部	致密熔岩	溶蚀孔+裂隙	4.96	0.27
	下部	角砾、凝灰熔岩	砾间孔、溶蚀孔+裂隙	7.21	0.86
爆发相	热碎屑流	熔结火山碎屑岩	气孔+砾间孔+溶蚀孔	15.60	1.31
	热基浪	晶屑凝灰岩	溶蚀孔+裂隙	9.12	0.72
	空落	集块岩、角砾岩	砾间孔+溶蚀孔	11.84	0.68
侵出相	外带	角砾熔岩	气孔+溶蚀孔+裂隙	5.35	0.76
	中带	致密中酸性熔岩	脱玻化微孔+溶蚀孔+裂隙	3.02	0.08
	内带	中酸性熔岩	脱玻化微孔+溶蚀孔+裂隙	4.85	0.33
火山沉积相	再搬运	沉火山角砾岩	溶蚀孔+砾间孔	4.64	0.27
	含外碎屑	沉火山角砾岩、沉凝灰岩	溶蚀孔+砾间孔	4.30	0.10

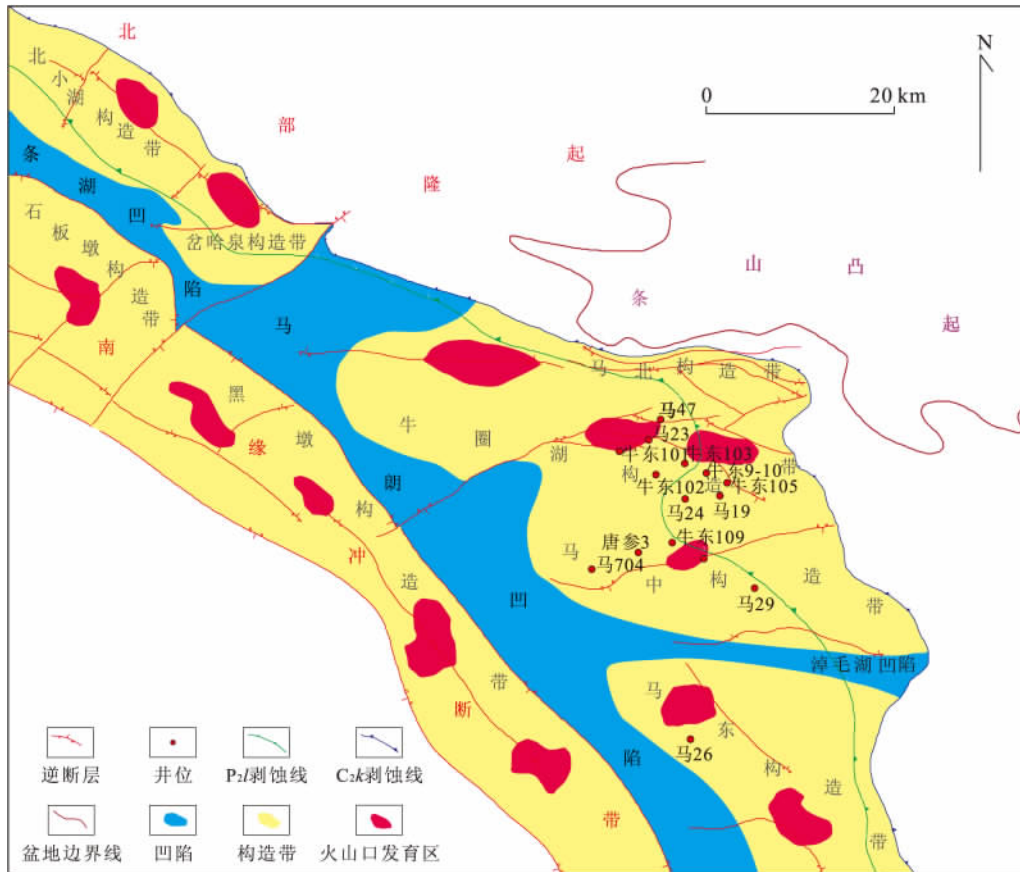


图 3 马朗凹陷石炭系卡拉岗组火山分布与断裂关系

Fig. 3 Carboniferous volcanic distributing and fracture belt in Kalagang Formation of Malang sag

个阶段.

2.1.1 早期成岩阶段 卡拉岗组火山岩分布基本上都依附深大断裂带而存在(图 3),岩浆喷发时期构造运动导致断裂开启,幔源岩浆必然会受到烃碱流体的改造,岩浆的化学成分发生变化,使得火山岩

先期成岩环境为碱性(孙玉凯等,2009a).因此,卡拉岗组不同于一般的中基性火山岩,具有明显受流体改造的性质,岩石化学特征上普遍表现为碱性—钙碱性特征.由于岩浆固结过程中大量气体挥发逸散形成了众多原生气孔,溢流相上部自碎角砾熔岩中

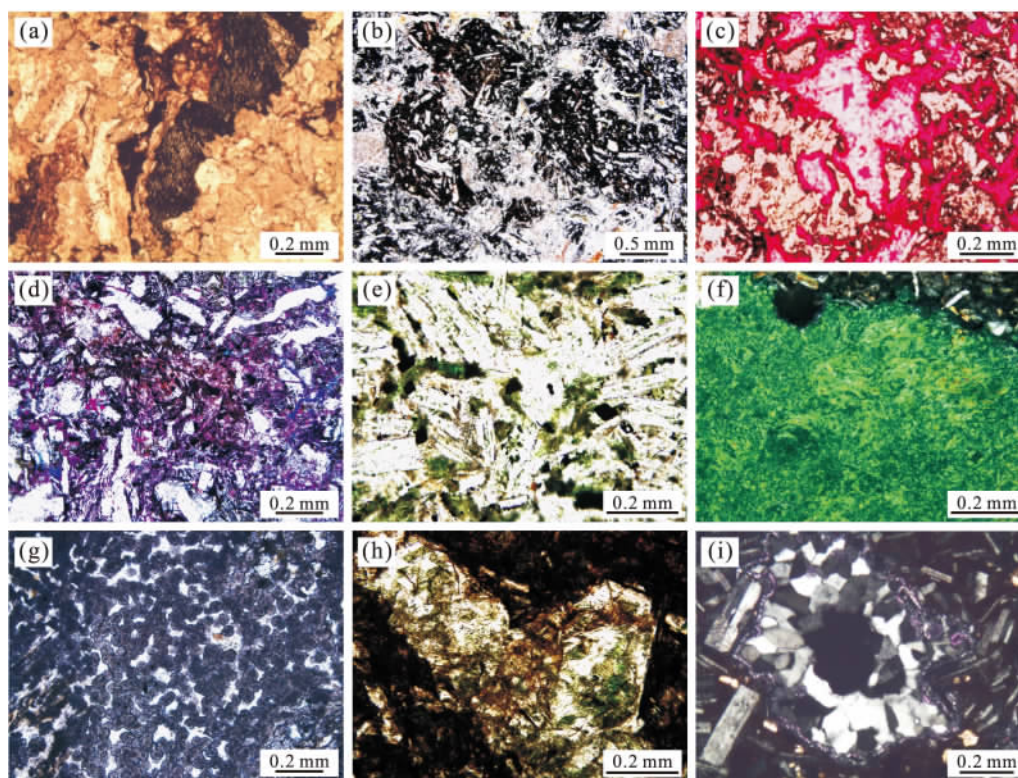


图4 马朗凹陷卡拉岗组火山岩典型矿物特征

Fig. 4 Plate provided with mineral properties of the volcanic rocks of Kalagang Formation in Malang Saga

a. 钠长石化, T11井, 卡拉岗组, 2 944 m, 普通(-); b. 浊沸石胶结, M28井, 卡拉岗组, 413 m, 普通(-); c. 浊沸石充填孔缝后溶解, M19井, 卡拉岗组, 1 559 m, 铸体(-); d. 钠铁闪石化, ND9-10井, 卡拉岗组, 1 574 m, 铸体(-); e. 黄铁矿化, M47井, 卡拉岗组, 1 466 m, 普通(-); f. 绿磷石充填气孔形成杏仁体, ND9-10井, 卡拉岗组, 1 559 m, 普通(+); g. 菱铁矿化, M24井, 卡拉岗组, 1 588 m, 普通(-); h. 绿帘石化, M19井, 卡拉岗组, 1 564 m, 普通(-); i. 次生石英充填气孔形成杏仁体, ND9-10井, 卡拉岗组, 1 505 m, 铸体(+)

发育了错综复杂的原生裂缝体系都为后期次生孔隙的发育奠定了良好的基础。在岩浆固结成岩后暴露地表至浅埋藏阶段, 地表水淋滤及浅层流体中无机酸溶蚀, 使得原生的孔缝进一步扩大, 形成了大量溶蚀孔隙。

2.1.2 晚期埋藏阶段 火山岩形成后在深埋藏阶段, 热液在火山岩储层形成过程中扮演了重要角色。热液是烃碱流体上升后降温减压冷凝的产物, 热液作用无一例外都是从碱交代开始的(杜乐天, 1996)。碱交代和后期有机酸性溶蚀使得次生孔隙进一步发育, 是卡拉岗组火山岩储层中次生孔隙形成的主要原因。

碱交代导致原有矿物发生交代蚀变、溶蚀, 使岩石内部结构受到破坏而造成机械强度降低、孔隙度增加, 形成类似海绵体的结构, 其具有多孔隙高孔隙, 非常有利于构造破碎和吸引热液(杜乐天, 1996, 2001)。通过薄片鉴定和 X 荧光化学元素综合分析结果表明, 马朗凹陷碱交代作用广泛, 以钠长石化、浊沸石化和钠铁闪石化为典型特征的碱交代蚀变矿物普遍存在。

(1) 钠长石化。钠长石化是碱交代过程中发生钠交代的结果, 是碱交代的代表现象。石炭系卡拉岗组中基性火山岩钠长石化作用主要表现为: 中基性熔岩中钾长石斑晶和火山碎屑岩中的钾长石晶屑被钠长石交代(图 4a)。岩石钠交代最显著现象是岩石有效孔隙度增加, 其原因有 3 点: 一是碱性热液前列淋蚀, 大量成分带出是主要原因; 二是在钠交代中 K^+ 被 Na^+ 交代, 由于离子半径前小后大, 也可产生孔隙, 当钾长石被钠交代后必然会出现可观的孔隙; 三是鉴于岩石被钠交代后, 岩石机械强度大为降低, 易于发生构造再破碎而孔隙度进一步增大(杜乐天, 2001)。

(2) 浊沸石化。岩心观察可见沸石普遍发育在气孔及裂缝中, 镜下观察孔隙中的沸石多呈柱状、纤状和放射状集合体填充于空隙中, 少部分为梳状。镜下鉴定结果确认卡拉岗组火山岩中的沸石以浊沸石为主(图 4b), 含有部分钠沸石、片沸石和少量丝光沸石。由于浊沸石稳定环境为高 pH 值(>9), 钙离子来源于斜长石的钠长石化(柳益群, 1996; 林潼等, 2009), 因此浊沸石的广泛发育是本区火山岩碱交代

作用最为有利的证据之一。在碱交代后期有机酸注入,浊沸石大量溶解(图 4c),所形成的次生孔隙是卡拉岗组火山岩主要的储集空间。

(3) 钠铁闪石化。钠铁闪石 $\text{Na}_3\text{Fe}^{2+}\text{Al}[\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2 \cdot (\text{OH},\text{F})_2$ 是富钠铁的碱性角闪石,以富钠为特征。钠铁闪石晶体呈短柱状或平行 b 轴的板状(图 4d),角闪石式{110}节理完全,颜色为黑色和蓝色,摩氏硬度为 5.5~6.0,密度为 3.3~3.5 g/cm³,薄片呈蓝色或绿色,多色性显著,可次生变化为菱铁矿和褐铁矿(李茹等,2007)。用电镜能谱分析,该矿物主要含 Si、O、Fe、Mg、Na,说明这种蚀变作用实质上是钠质碱性交代作用。

马朗凹陷卡拉岗组火山岩中除钠长石化、浊沸石化、钠铁闪石化作用之外,黄铁矿化(图 4e)、绿磷石充填孔隙(图 4f)、菱铁矿化(图 4g)和绿帘石化(图 4h)也较为普遍,表明了卡拉岗组火山岩储层形成过程中碱交代作用的普遍性。蚀变矿物普遍可见溶蚀现象,表明碱交代应早于有机质成熟向烃类转化或与之相近,也充分说明碱交代在先,有机酸溶蚀在后。深层烃碱流体和有机酸性流体的溶解营力的双重作用是深层次生孔隙形成的主要原因,碱交代作用是主导和控制次生孔隙形成和分布的地球化学因素,其直接后果是导致火山岩原有矿物发生蚀变和碱性溶蚀;同时由于碱性火山岩对酸性溶蚀作用极为敏感(雷天柱等,2008),蚀变和溶蚀使火山岩次生孔隙增加,孔隙度变好,“先碱后酸”的储层形成机理是本区中基性火山岩储层形成的最主要的机理。因此,这种“酸性+碱性”叠加溶蚀的储层形成机理不仅发生在碎屑岩中,也发生在火山岩储层中,只是碎屑岩中没有先期的碱性环境,所以是“先酸后碱”(王京等,2006)。不管是先酸后碱,还是先碱后酸,碱交代作用对储层形成的作用是显而易见的。

2.2 “下交上排”

“下交上排”是卡拉岗火山岩储层形成的又一个重要机理,是研究碱交代作用双重影响过程中的一个重大发现。它是指烃碱流体使火山岩发生碱交代作用后,向上运移含碱量降低、温度降低, SiO_2 析出沉淀形成次生石英胶结层覆盖在碱交代层位之上的一种火山岩储层形成机理。

2.2.1 硅迁移 薄片鉴定中发现,很多孔缝中充填了次生石英集合体(图 4i),这说明了硅迁移现象必然存在。近年来有学者对石英的溶解作用进行了探讨(施振飞等,2005)。我国学者在碎屑岩的研究中发现,当碱性介质 $\text{pH} > 8.5$ 时可以溶解石英, $\text{pH} > 9$

时 SiO_2 的溶解度随 pH 值的增大而迅速增高(邱隆伟等,2002)。石英在表生作用中是很耐风化的矿物,但在烃碱流体作用下却是最不稳定、最易溶解迁移的矿物(邱隆伟等,2001;袁静等,2007)。碱交代使得热液中碱质成分逐渐消耗,当热液演变成酸性时 SiO_2 沉淀。因此,硅迁移后的排硅现象使得次生石英充填或胶结层段分布在浊沸石层段之上。

2.2.2 碱交代作用双重性的新认识 烃碱流体对火山岩碱交代作用的影响是双重的:一方面,碱交代作用可以引起物质的带入和带出,使火山岩体处于开放体系下,导致原有矿物发生蚀变、溶蚀,使岩石内部结构受到破坏而造成强度降低,形成疏松多孔的岩石,进而为深部油气提供了运移和储集的空间;另一方面,碱交代的排硅作用导致次生石英等新矿物的形成,使孔隙度降低,尤其是渗透率降低(邵英梅和冯子辉,2007)。在对马朗凹陷卡拉岗组火山岩储层岩石学及地球化学特征的研究中发现,次生石英集合体充填孔隙的现象较为普遍,浊沸石主要呈孔隙式充填分布在石英胶结层段之下,浊沸石溶解层段往往是很好的储层,石英胶结层段的含油气状况则很差。此种现象很好地说明了碱交代作用的双重性是分带的。由于其充填作用结果是分层段的,石英充填或胶结层段使储层物性变差;但浊沸石充填层段却保存了潜在的次生孔隙,为后期有机酸溶蚀孔隙的大量发育奠定了基础。同时,碱交代双重作用结果也是反映“下交上排”火山岩储层形成机理的有力证据。

烃碱流体作用丰富了火山岩储层形成机理的认识,促进了火山岩成岩作用理论不断完善和创新。“碱性+酸性”叠加溶蚀型机理的提出对次生孔隙形成和碱交代作用的双重性有了新的认识,对加深火山岩储层形成机制的认识具有重要意义,也为储层的评价和预测提供了新的思路。

3 结论

(1) 卡拉岗组火山岩储层以溢流相为主,其上部亚相的自碎角砾熔岩及气孔玄武岩、气孔安山岩层位是本区最好的油气储集层。

(2) 次生溶蚀孔隙是本区火山岩中重要的储集空间类型,各种微裂缝对孔隙有很好的连通作用。

(3) 卡拉岗组火山岩储层揭示了一种以“先碱后酸”和“下交上排”为表现形式的“碱性+酸性”叠加溶蚀型火山岩储层形成机理,烃碱流体在储层形成过程中具有重要作用。

References

- Du, L. T., 1996. Geochemical principles of hydrocarbon alkali-fluids. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Du, L. T., 2001. Hydrothermal uranium metallogenic regularity and hydrothermal metallogeny of China. Atomic Energy Press, Beijing (in Chinese).
- Gao, Y. F., Liu, W. Z., Ji, X. Y., et al., 2007. Diagenesis types and features of volcanic rocks and its impact on porosity and permeability in Yingcheng Formation, Songliao basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 37(6): 1251—1257 (in Chinese with English abstract).
- Han, B. F., He, G. Q., Wang, S. G., 1999. Postcollisional mantle-derived magmatism, underplating and implications for basement of the Junggar basin. *Science in China (Ser. D)*, 29(1): 16—21 (in Chinese with English abstract).
- Lei, T. Z., Shi, X. P., Sun, Y. H., et al., 2008. Effect of dissolution on forming high-quality reservoir in alkaline volcanic rocks—an example from Carboniferous volcanic rocks in Luxi area in Junggar basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 29(3): 306—309 (in Chinese with English abstract).
- Li, R., Zhang, M. Z., Shen, G. Z., et al., 2007. An unusual mineral metasomatic alteration phenomenon in north deep Songliao basin. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 26(1): 32—34 (in Chinese with English abstract).
- Lin, T., Jiao, G. H., Sun, P., et al., 2009. Characteristic and influencing factors of Carboniferous volcanic reservoirs in Santanghu basin. *Natural Gas Geoscience*, 20(4): 513—517 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. T., Liu, Y. P., Guo, M. Z., et al., 2009. Volcanic reservoir characteristics and genetic mechanism of Carboniferous in Niudong area of Santanghu basin. *Lithologic Reservoirs*, 21(2): 64—69 (in Chinese with English abstract).
- Liu, W. F., 2004. Reservoir characteristics of deep volcanic rocks and prediction of favorable areas in Xujiaweizi fault depression in Songliao basin. *Oil & Gas Geology*, 25(1): 115—119 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. Q., 1996. The boundary between diagenesis and metamorphism—a discussion with reference to zeolite facies. *Geological Review*, 42(3): 215—221 (in Chinese with English abstract).
- Qi, D. K., Qi, J. S., Wang, G., 2002. Study on volcanic reservoir characteristics in Xujiaweizi area. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 9(4): 30—32 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, L. W., Jiang, Z. X., Cao, Y. C., et al., 2001. Alkaline diagenesis and its influence on a reservoir in the Biyang depression. *Science of China (Ser. D)*, 31(9): 752—759 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, L. W., Jiang, Z. X., Chen, W. X., et al., 2002. A new type of secondary porosity-quartz dissolution porosity. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(4): 621—627 (in Chinese with English abstract).
- Shao, Y. M., Feng, Z. H., 2007. Petrologic and geochemical characteristics of volcanic rock of Yingcheng Formation in Xujiaweizi fault depression. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 26(4): 27—30 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Z. F., Zhang, Z. C., Ye, S. D., et al., 2005. The mechanism of secondary pores in the reservoir of Funing Formation in Gaoyou depression of Subei basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(3): 429—436 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Y. K., Luo, Q. S., He, G. M., 2009a. Reservoir characteristics and impacting factors of Carboniferous volcanics in Malang sag Santanghu basin. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 33(3): 36—42 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Y. K., Luo, Q. S., Zhang, K. A., et al., 2009b. Lithologic and lithofacies features of volcanics and their control on reservoir capability in Niudong oilfield of Santanghu basin. *Journal of Oil and Gas Technology*, 31(3): 57—61 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Zhao, Y. C., Liu, K., et al., 2006. Superimposing controls of acidic and alkaline dissolutions on sandstone reservoir quality of the Paleozoic Xiashihezi and Shanxi Formations in Tabamiao area, Ordos basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(2): 221—228 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P. J., Chen, S. M., Liu, W. Z., et al., 2003a. Relationship between volcanic facies and volcanic reservoirs in Songliao basin. *Oil & Gas Geology*, 24(1): 18—23 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P. J., Chi, Y. L., Liu, W. Z., et al., 2003b. Volcanic facies of the Songliao basin: classification, characteristics and reservoir significance. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 33(4): 449—456.
- Wang, Y. W., Wang, J. B., Wang, L. J., et al., 2006. An intermediate type of Cu-Ni sulfide and V-Ti magnetite deposit: Xinjiang Xiangshanxi deposit, China. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 61—73 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. W., Wang, J. B., Wang, L. J., et al., 2004. REE characteristics of Cu-Ni sulfide deposits in the Hami area, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 20(4): 935—948 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. W., Wang, J. B., Wang, L. J., et al., 2010. PGE

- metallogenesis related to mafic-ultramafic complex in North Xinjiang. *Earth Science Frontiers*, 17(1): 137—152 (in Chinese with English abstract).
- Xie, Q. B., Han, D. X., Zhu, X. M., et al., 2000. Geological model of carbonate reservoirs in Tahe oilfield. *Petroleum Exploration and Development*, 29(1): 84—111 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, J., Zhang, S. W., Qiao, J., et al., 2007. Cause of formation and dynamic mechanisms in multiply medium of dissolved pores in deep formation of Dongying sag. *Acta Sedimentologica Sinica*, 25(6): 840—846 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C., Huang, X., 1992. The ages and tectonic settings of ophiolites in west Junggar, Xinjiang. *Geological Review*, 38(6): 509—524 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. H., Guo, Z. J., Han, B. F., et al., 2006. The geochemical characteristics and tectonic implications of the Latest-Paleozoic volcanic rocks from Santanghu, eastern Xinjiang, Northwest China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 199—214 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 杜乐天, 1996. 烃碱流体地球化学原理: 重论热液作用和岩浆作用. 北京: 科学出版社.
- 杜乐天, 2001. 中国热液铀矿基本成矿规律和一般热液成矿学. 北京: 原子能出版社.
- 高有峰, 刘万洙, 纪学雁, 等, 2007. 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. 吉林大学学报(地球科学版), 37(6): 1251—1257.
- 韩宝福, 何国琦, 王式洸, 1999. 后碰撞幔源岩浆活动、底垫作用及准噶尔盆地基底的性质. 中国科学(D辑), 29(1): 16—21.
- 雷天柱, 石新璞, 孙玉华, 等, 2008. 溶蚀在形成碱性火山岩优质储集层中的作用——以准噶尔盆地陆西地区石炭系火山岩为例. 新疆石油地质, 29(3): 306—309.
- 李茹, 张民志, 沈光正, 等, 2007. 松辽盆地北部深层一种罕见的矿物交代蚀变现象. 大庆石油地质与开发, 26(1): 32—34.
- 林潼, 焦贵浩, 孙平, 等, 2009. 三塘湖盆地石炭系火山岩储层特征及其影响因素分析. 天然气地球科学, 20(4): 513—517.
- 刘俊田, 刘媛萍, 郭沫贞, 等, 2009. 三塘湖盆地牛东地区石炭系火山岩相储层特征及其成因机理. 岩性油气藏, 21(2): 64—69.
- 刘为付, 2004. 松辽盆地徐家围子断陷深层火山岩储层特征及有利区预测. 石油与天然气地质, 25(1): 115—119.
- 柳益群, 1996. 关于成岩作用和变质作用的界线的讨论——从沸石相谈起. 地质评论, 42(3): 215—221.
- 慕敦科, 齐景顺, 王革, 2002. 徐家围子地区火山岩储层特征研究. 特种油气藏, 9(4): 30—32.
- 邱隆伟, 姜在兴, 操应长, 等, 2001. 泌阳凹陷碱性成岩作用及其对储层的影响. 中国科学(D辑), 31(9): 752—759.
- 邱隆伟, 姜在兴, 陈文学, 2002. 一种新的储层孔隙成因类型——石英溶解型次生孔隙. 沉积学报, 20(4): 621—627.
- 邵英梅, 冯子辉, 2007. 徐家围子断陷营城组火山岩岩石学及地球化学特征. 大庆石油地质与开发, 26(4): 27—30.
- 施振飞, 张振城, 叶绍东, 等, 2005. 苏北盆地高邮凹陷阜宁组储层次生孔隙成因机制探讨. 沉积学报, 23(3): 429—436.
- 孙玉凯, 罗权生, 何国貌, 2009a. 三塘湖盆地马朗凹陷石炭系火山岩储集层特征及影响因素. 大庆石油学院报, 33(3): 36—42.
- 孙玉凯, 罗权生, 张克安, 等, 2009b. 三塘湖盆地牛东油田火山岩岩相特征及其对储集性能的控制作用. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 31(3): 57—61.
- 王京, 赵彦超, 刘琨, 等, 2006. 鄂尔多斯盆地塔巴庙地区上古生界砂岩储层“酸性+碱性”叠加溶蚀作用与储层质量主控因素. 地球科学——中国地质大学学报, 31(2): 221—228.
- 王璞珺, 陈树民, 刘万洙, 等, 2003a. 松辽盆地火山岩相及其与火山岩储层的关系. 石油与天然气地质, 24(1): 18—23.
- 王璞珺, 迟元林, 刘万洙, 等, 2003b. 松辽盆地火山岩相: 类型、特征和储层意义. 吉林大学学报(地球科学版), 33(4): 317—325.
- 王玉往, 王京彬, 王莉娟, 等, 2004. 新疆哈密黄山地区铜镍硫化物矿床的稀土元素特征及意义. 岩石学报, 20(4): 935—948.
- 王玉往, 王京彬, 王莉娟, 等, 2006. 岩浆铜镍矿与钒钛磁铁矿的过渡类型——新疆哈密香山西矿床. 地质学报, 80(1): 61—73.
- 王玉往, 王京彬, 王莉娟, 等, 2010. 新疆北部镁铁—超镁铁质岩的PGE成矿问题. 地学前缘, 17(1): 137—152.
- 谢庆宾, 韩德馨, 朱筱敏, 等, 2000. 三塘湖盆地火成岩储集空间类型及特征. 石油勘探与开发, 29(1): 84—111.
- 袁静, 张善文, 乔俊, 等, 2007. 东营凹陷深层溶蚀孔隙的多重介质成因机理和动力机制. 沉积学报, 25(6): 840—846.
- 张驰, 黄萱, 1992. 新疆西准噶尔蛇绿岩形成时代和环境的探讨. 地质论评, 38(6): 509—524.
- 赵泽辉, 郭召杰, 韩宝福, 等, 2006. 新疆三塘湖盆地古生代晚期火山岩地球化学特征及其构造—岩浆演化意义. 岩石学报, 22(1): 199—214.