

王璞珺, 缴洋洋, 杨凯凯, 等. 准噶尔盆地火山岩分类研究与应用. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(4): 1056-1070. doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.201604106.

Wang Pujun, Jiao Yangyang, Yang Kaikai, et al. Classification of Volcanogenic Successions and Its Application to Volcanic Reservoir Exploration in the Junggar Basin, NW China. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2016, 46(4): 1056-1070. doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.201604106.

准噶尔盆地火山岩分类研究与应用

王璞珺¹, 缴洋洋¹, 杨凯凯¹, 张增宝², 边伟华¹

1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061

2. 中石化胜利油田分公司油气勘探管理中心, 山东 东营 257017

摘要: 岩石分类一直是人们长期探索的课题。由于油气勘探的需要, 针对储层研究的盆地火山岩分类已经成为火成岩研究的重要新方向。在综合分析国内外火山岩分类研究的基础上, 根据 3 条野外剖面 and 21 口钻井岩心岩屑的观察描述、岩石薄片鉴定和化学成分分析等资料, 依照结构-成分-成因分类原则, 建立了适于储层评价的准噶尔盆地石炭系火山岩及其他岩类的岩性分类体系和识别标准。将本区火山岩划分为火山熔岩、火山碎屑熔岩、火山碎屑岩、沉火山碎屑岩等 4 大类; 同时将盆地内与火山岩共生的其他岩类也进行分类和识别, 共划分出 8 大类 45 种基本类型。与我国东部的中-新生代盆地火山岩不同, 本区古生代火山岩普遍遭受较长期风化改造和蚀变作用, 常见有绿泥石化、碳酸盐化和黏土矿化。这些蚀变会影响 TAS 图解岩性判别的结果, 因此笔者探讨了蚀变条件下的岩石识别和定名方法。本文分类体系针对火山岩储层研究, 结果显示, 基于该分类体系岩性与储集空间的类型及其变化规律呈现明显相关性, 不同岩性的储集空间类型、组合方式和发育程度存在差异, 由此可指导火山岩油气勘探。

关键词: 准噶尔盆地; 石炭系火山岩; 岩石分类; 火山岩储层

doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.201604106

中图分类号: P588.1

文献标志码: A

Classification of Volcanogenic Successions and Its Application to Volcanic Reservoir Exploration in the Junggar Basin, NW China

Wang Pujun¹, Jiao Yangyang¹, Yang Kaikai¹, Zhang Zengbao², Bian Weihua¹

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

2. Management Center of Oil and Gas Exploration, Shengli Oilfield, Dongying 257017, Shandong, China

Abstract: Rock's classification has long been an intriguing task for geologists all over the world. With the development of volcanic reservoir exploration, volcanic classification buried in petroliferous basins has become increasingly needed work recently. Based on comprehensive summarization of the available classification scenarios of volcanic rocks, we proposed a so called structure-composition-origin volcanic classification for the Junggar basin focusing on the volcanic reservoir evaluation and exploration.

收稿日期: 2015-10-31

作者简介: 王璞珺(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事油气地质勘查、火山岩储层和沉积学研究, Tel: 0431-88502620, E-mail: wangpj@jlu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41472304); 国家重点基础研究发展计划(国家“973”计划)项目(2012CB822002)

Supported by National Natural Science Foundation of China (41472304) and National Key Basic Research Program of China (2012CB822002)

The related data base includes 3 outcrops of 4.2 km accumulative thickness and 21 wells of 474 m volcanic core sections. Geochemical data and thin sections work have been done on these samples. 8 categories and 45 types are classified for the volcanogenic successions. Volcanic lavas, breccia-bearing lavas, pyroclastic rocks, sedimentary pyroclastic rocks, pyroclastic-bearing sedimentary rocks, hypabyssal rocks and subvolcanic rocks, and platonite rocks are described in detail. Paleozoic volcanic rocks interested have generally been suffered from alterations which can change the petrochemical compositions, and affect the result of the chemical classification using the TAS diagram. Methods were provided for the precise naming of the altered volcanic rocks in the paper. Correlations have been well established between volcanic lithology and reservoir features in the basin. The results would be useful for similar basins concerning volcanic classification and reservoir evaluation and exploration.

Key words: Junggar basin; Carboniferous volcanic successions; classification of rocks; volcanic reservoir

0 引言

火成岩分类一直是地质学研究的重要课题,19世纪90年代至20世纪80年代,火成岩分类主要集中在全球火成岩分类和地区分类两大方面^[1-3]。作为火成岩中的喷出岩类,火山熔岩和火山碎屑岩分类也是地学界研究的重要内容^[4-8]。20世纪80年代中后期,国际地科联(IUGS)火成岩分类委员会推荐的火山岩全碱-二氧化硅(TAS)分类方案^[9-12],对火山岩研究和全球对比起到了重要推动作用。然而,问题还远没有就此解决,主要表现为两方面:首先,基于火山岩化学成分的硅碱 TAS 图解分类,需要化学成分投点确定火山岩的岩石类型,即,需要有成分分析数据才能确定岩性,因此不便于实际应用;再者,火山岩经常会发生蚀变,导致 Ca、Si 和 K、Na 等常量元素含量发生显著变化,这会影响到 TAS 图解岩性判别的真实性^[13-14]。20世纪90年代年代以来,国内外火山岩分类呈现出多元化的趋势,主要表现为以下4个方面:一是针对研究区的特定地质条件对岩石类型进行详细划分,以便深化研究区的地质认识^[15-16];二是对特定的岩石类型开展进一步的成因分类,以便深化对该类岩石形成与分布规律的认识^[17-19];三是用计算机技术和统计学方法,或者将矿物成分分析-计算机技术联合进行火成岩分类^[20-28];四是针对特定的研究目的或者工程技术开展火山岩分类研究^[29-31]。

近十几年来火山岩已经逐渐成为我国油气勘探的重点领域^[32-33]。深埋于盆地内的火山岩类在油气系统中主要起到储层以及盖层的作用^[34-35]。对于具体盆地的火成岩类而言,其化学成分类型相对较少,

例如,松辽盆地火山岩中多数是流纹岩类^[36-37],而渤海湾和辽河盆地多为玄武岩和粗面岩^[38-39]。在这种情况下用 TAS 图解进行盆地火山岩分类,通常的结果是少数几种岩石类型集中出现,而其他分区内的岩石类型几乎从不出现。由于大量的样本集中在少数分区内,因此难以进行储层特征等相关研究。

准噶尔盆地是我国火山岩油气发现最早的地区,近年在晚古生界火山岩中有大规模油气发现,火山岩已经成为该区油气勘探的主要接替领域^[40]。基于勘探和研究需要,盆地内具体探区的火成岩分类研究已经逐渐开展^[41]。然而,目前准噶尔盆地火山岩分类主要是用火成岩化学成分,依据国际地科联的 TAS 图解进行类型划分。如前所述,这存在应用不便和蚀变干扰等诸多问题。另外,这样的分类没有涉及到储层研究这一核心问题。

本文用钻井和剖面资料,通过岩石薄片鉴定、化学成分和统计分析,提出准噶尔盆地火山岩的结构-成分-成因分类方案。分类中充分考虑火山岩结构与成岩作用和储集空间的关系,同时明确给出各种岩石类型的肉眼和显微镜下鉴定特征,即,见到哪些特征矿物能够确定哪些岩石类型。该分类方案近年在准东五彩湾地区火成岩勘探和研究中应用,效果良好,很好地解决了长期以来同岩石不同名或同名不同意,以及岩性与储层物性关系不明确等勘探和研究中遇到的诸多问题。该分类体系在类似的含火山岩盆地,尤其是风化蚀变较强的中基性火山岩勘探和研究中,具有借鉴意义。

1 区域地质概况

准噶尔盆地位于阿尔泰造山带与天山造山带之

间,为一古生代以来的大型复合叠加盆地^[42]。盆地先后经历了裂陷盆地阶段、前陆盆地阶段、陆内拗陷阶段和再生前陆盆地阶段 4 个演化阶段:裂陷盆地阶段(泥盆纪晚期至石炭纪早期),盆地内部拉张断陷,发育了一套浅海相、沼泽相、泻湖相暗色泥岩以及煤岩夹部分碳酸盐岩;前陆盆地阶段(石炭纪晚期至二叠纪),盆地边缘冲断、推覆并强烈褶皱,盆地内大型隆起平缓褶皱,并发育逆冲断裂,发育一系列岛弧杂岩带和增生楔杂岩带;陆内拗陷阶段(三叠纪至古近纪),盆内发生频繁的升降运动,主要发育陆内拗陷的河湖相煤系地层和泥质岩泛盆沉积;再生前陆盆地阶段(新近纪至第四纪),受喜山运动影响,北天山强烈隆升,区域性南部掀斜,山前快速沉降,沉积了巨厚的山麓冲积扇辫状河相红色磨拉石建造^[43-45]。

准噶尔盆地发育的石炭系火山岩主要为岛弧背景产物,分布于扎伊尔造山带、卡拉麦里山、北塔山造山带和天山山前带^[46]。其中中基性火山岩主要分布在西北缘、陆梁隆起和中央拗陷中部。中酸性火山岩主要分布在乌伦古拗陷、中央拗陷中南部及东部隆起西部^[47]。天山山前带火山岩出露情况较差^[48]。研究区火山岩主要位于扎伊尔造山带和卡拉麦里山、北塔山带(图 1)。

2 材料与方法

2.1 材料

笔者 2008 年以来对该区双井子、金山沟和白碱沟 3 个小区的火山岩剖面进行了详细测量、采样、岩矿鉴定和分析测试。这些研究积累构成了本文的盆缘剖面资料基础(表 1)。本文火山岩钻井主要位于准噶尔盆地哈山地区和车排子地区。它们在区域构造上都处于准噶尔盆地西部隆起,现有钻遇石炭系探井 21 口,取心 474.08 m(图 1b、图 1d)。3 条石炭系火山岩野外剖面和盆内钻井的目的层位均为石炭系上统巴塔玛依内山组(以下简称巴山组),本文所用剖面和钻井资料详细情况见表 1。

2.2 方法

根据野外剖面和探井所揭示的火山岩类型分布和火山岩储层研究的实际需要,本文主要采用三级分类方法。

一级分类:结构分类,主要是建立岩石结构与成岩作用及储层物性的关系。依据 7.22 km 实测剖面、8.8 km 野外调查剖面结果和 474.08 m 岩心观

察结果,对岩石宏观结构、构造进行描述,将火山岩大类进行划分,包括火山熔岩类、火山碎屑熔岩类、火山碎屑岩类、沉火山碎屑岩类等。其中,火山熔岩和火山碎屑熔岩都为凝固固结,即,熔浆在地表冷凝后固结成岩。这类岩石的体积和孔隙度等物性参数在后期的盆地内深埋过程中变化很小。火山碎屑岩和沉火山碎屑岩均为压实成岩,在孔隙度和渗透率随埋深的变化方面类似于沉积岩类,即,随埋深增加孔渗明显减小。

二级分类:化学成分分类,主要是建立化学成分与岩石类型的关系。这主要体现火山岩分类的通用性,符合现有习惯,便于交流。依据岩石化学分析资料,将本区火山岩划分为玄武质、安山质、流纹质等 5 种类型,划分标准如下:

1) 玄武质/粗玄质:基性岩类, $w(\text{SiO}_2)$ 为 45%~52%; 2) 玄武安山质:中基性岩类, $w(\text{SiO}_2)$ 为 52%~57%; 3) 安山质:中性岩类, $w(\text{SiO}_2)$ 为 52%~63%; 4) 英安质:中酸性岩类, $w(\text{SiO}_2)$ 为 63%~69%; 5) 流纹质:酸性岩类, $w(\text{SiO}_2)$ 为 > 69%。

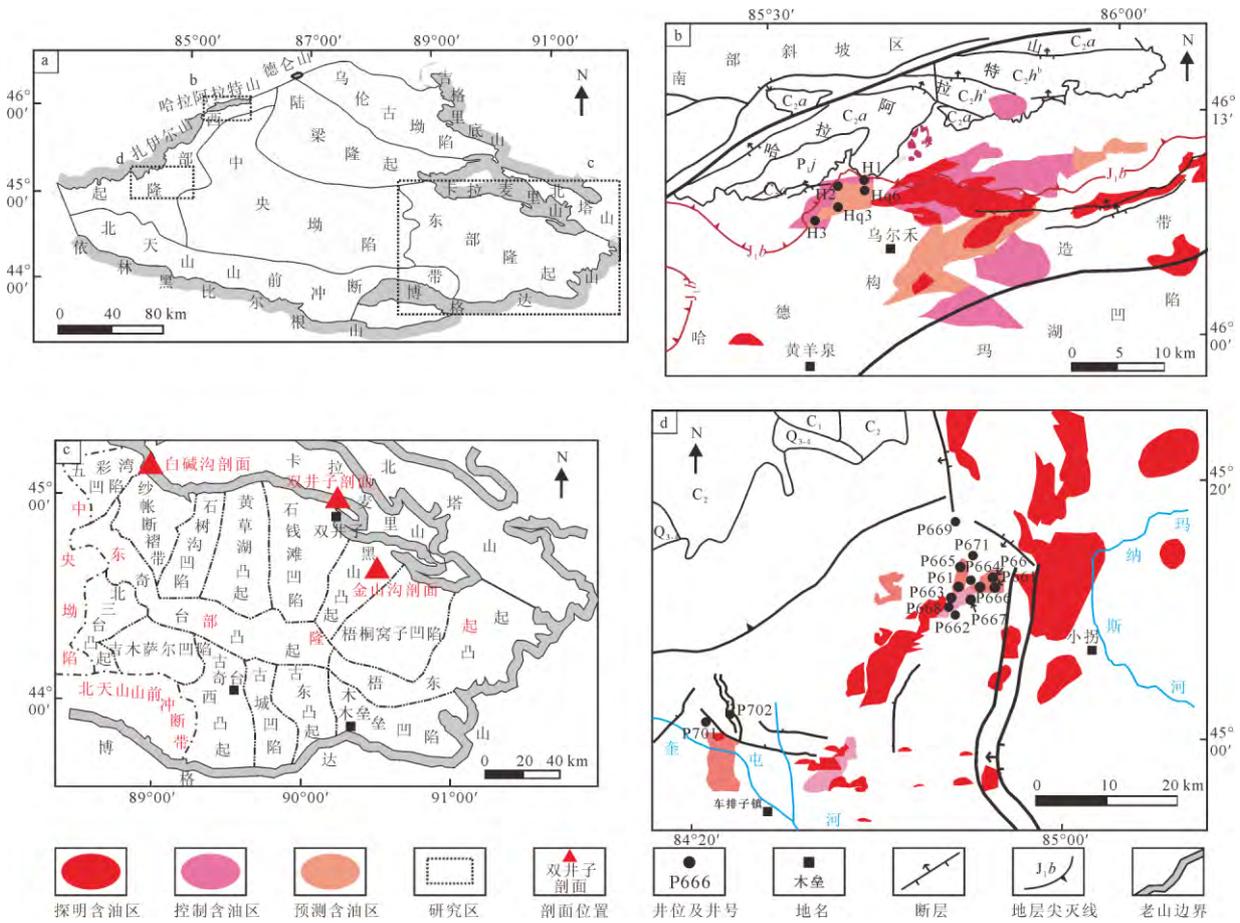
三级分类:矿物成分分类,主要是建立特征矿物与具体岩石类型的关系。这主要体现分类的实用性,即,通过特征矿物确定岩石名称。通过对 585 件岩心薄片、841 件岩屑薄片、403 件野外样品薄片进行显微镜下观察,确定岩石矿物成分、特征结构、火山碎屑粒级及其比例,进而确定具体岩石类型。

辅助方法:采用磁化率测量等方法在野外为岩石定名提供参考依据。研究区火山岩风化时间长,剖面火山岩蚀变较强,肉眼确定岩性较为困难。我们在实践中摸索出用磁化率测量辅助确定岩性的方法。本区火山岩中普遍存在基性火山岩磁化率>中性火山岩磁化率>酸性火山岩磁化率的现象。另外,野外剖面磁化率测量数据对盆地内火山岩的重磁解释和测井识别也具有重要约束作用。图 2 是 510 组野外磁化率数据与岩性关系图。

3 结果

3.1 火山岩及其他岩石分类方案

首先根据岩石化学成分可以看出,准噶尔盆地火山岩岩性的岩石化学成分类型在 TAS 图解的 15 种基本类型中有 10 种。而似长石岩 F、碱玄岩和碧玄岩 U_1 、响岩质碱玄岩 U_2 、响岩 Ph 和苦橄玄武岩 Pc 等 5 类成分的火山岩没有出现。这 10 种成分类



a.准噶尔盆地研究区构造位置图;b.准噶尔盆地哈山地区井位位置图;c.准噶尔盆地东部地区剖面位置图;d.准噶尔盆地车排子地区井位位置图。Q₃₋₄.上更新统一全新统;J_{1b}.下侏罗统八道湾组;P_{1j}.下二叠统佳木河组;C_{2a}.上石炭统阿腊德依克赛组;C_{2h}^b.上石炭统哈山组上段;C_{2h}^a.上石炭统哈山组下段;C₂.上石炭统;C₁.下石炭统。

图 1 准噶尔盆地研究区井位-剖面分布图

Fig.1 Distribution map of well location and field sections in the Junggar basin

型分属于亚碱性和碱性两个系列(图 3)。

1)亚碱性系列:玄武岩、玄武安山岩、安山岩、英安岩、流纹岩,以流纹岩、安山岩居多。

2)碱性系列:粗面玄武岩、玄武粗安岩、粗面安山岩、粗面岩、碱玄质响岩,以粗面岩和粗面安山岩居多。

由图 3 可见,本区火山岩在 TAS 图解的各个岩性分区中,分布很不均匀。因此,需要对化学成分较为集中岩性进一步细分。调整的基本原则是,要使得不同岩石类型能够分开,同时同一分区内的岩石样本数又不能过度集中。根据准噶尔盆地火山岩类型分布、岩石特点、火山岩储层研究的实际需要,依据火山岩的结构成因、化学成分、矿物成分、特征结构、火山碎屑粒级及其比例等综合分类命名,提出准

噶尔盆地火山岩及其他岩类的分类方案(表 2),研究区共确定出 24 种火山岩岩石类型:

1)火山熔岩类,包括玄武岩、粗面玄武岩、玄武安山岩、安山岩、粗面安山岩、粗面岩、英安岩、流纹岩、珍珠岩。

2)火山碎屑熔岩类,包括玄武质(熔结)碎屑(凝灰、角砾、集块)熔岩、玄武安山质(熔结)碎屑(凝灰、角砾、集块)熔岩、安山质(熔结)碎屑(凝灰、角砾、集块)熔岩、英安质(熔结)碎屑(凝灰、角砾、集块)熔岩、流纹质(熔结)碎屑(凝灰、角砾、集块)熔岩、隐爆角砾岩。

表 1 剖面 and 探井实际资料
Table 1 Detailed data of field sections and wells

| 剖面井号 | 剖面长度/ km | 剖面厚度/ km | 井段/ m | 岩心长度/ m | 岩性和岩性组合 |
|-----------|-------------|-------------|-------------------|------------|-------------------|
| 双井子剖面(实测) | 7.10 | 4.06 | | | 玄武岩、流纹岩 |
| 白碱沟剖面(实测) | 0.12 | 0.06 | | | 流纹质角砾熔岩、玄武岩 |
| 金山沟剖面(调查) | 8.80 | | | | 流纹岩、流纹质角砾岩 |
| P61 | | | 855.00~1 003.76 | 17.26 | 玄武岩、流纹质晶屑凝灰岩 |
| P66 | | | 299.35~2 757.50 | 57.52 | 玄武岩、玄武质角砾熔岩、凝灰质泥岩 |
| P661 | | | 1 056.00~1 897.70 | 7.40 | 玄武岩、玄武质角砾熔岩 |
| P662 | | | 979.00~1 094.30 | 9.30 | 玄武岩、玄武质角砾熔岩 |
| P663 | | | 1 012.8~1 015.65 | 2.85 | 玄武岩 |
| P664 | | | 869.00~1 116.70 | 14.70 | 玄武岩、玄武安山质角砾熔岩 |
| P665 | | | 790.00~852.40 | 11.10 | 英安质晶屑凝灰岩 |
| P666 | | | 972.00~1 406.50 | 195.11 | 玄武质角砾熔岩、玄武岩、玄武安山岩 |
| P667 | | | 992.00~2 221.80 | 13.20 | 玄武岩、凝灰质泥岩 |
| P668 | | | 1 002.20~1 136.15 | 10.65 | 玄武岩 |
| P669 | | | 448.80~750.20 | 6.60 | 凝灰质泥岩 |
| P671 | | | 946.70~948.50 | 1.80 | 流纹质晶屑凝灰岩 |
| P672 | | | 1 044.28~1 247.70 | 18.23 | 玄武质火山角砾岩 |
| P681 | | | 701.00~703.76 | 2.76 | 沉凝灰岩、凝灰质泥岩 |
| P701 | | | 662.30~674.25 | 9.10 | 流纹质角砾岩 |
| P702 | | | 935.00~937.30 | 2.30 | 花岗岩 |
| H1 | | | 110.60~2 554.00 | 20.20 | 玄武岩 |
| H2 | | | 148.00~1 210.90 | 6.50 | 玄武岩、安山岩 |
| H3 | | | 855.00~1 003.76 | 19.70 | 玄武岩、英安质晶屑凝灰岩 |
| Hq3 | | | 1 154.30~2 833.75 | 33.10 | 玄武质角砾岩、安山岩、流纹岩 |
| Hq6 | | | 135.30~815.60 | 14.70 | 玄武岩、流纹质凝灰熔岩 |

注:剖面的层位为巴山组。钻探井的层位为石炭系。根据地层序列和对比结果,盆内石炭系即为盆缘石炭系巴山组。但由于探井综合柱状图等原始地质记录均将这套火山岩系标为“石炭系”,故本文也用石炭系表示它们的地质层位。

3) 火山碎屑岩类,包括玄武质碎屑(凝灰、角砾、集块)岩、安山质碎屑(凝灰、角砾、集块)岩、英安质碎屑(凝灰、角砾、集块)岩、流纹质碎屑(凝灰、角砾、集块)岩。

4) 沉火山碎屑岩类,包括沉火山角砾岩、沉凝灰岩。

5) 火山碎屑沉积岩类,主要为凝灰质泥岩。

6) 浅成岩和次火山岩类,主要为辉绿岩。

7) 深成岩类,主要为花岗岩。

3.2 火山岩岩性分布

通过对准噶尔盆地西部地区 21 口探井长度共计 12 213.50 m 钻遇火山岩井段的统计,该区主要发育火山岩类型共计 19 种,其中以玄武岩、玄武质角砾熔岩和安山岩为主,合计占全部岩性的 50% 以上(图 4a)。根据准噶尔盆地东部地区 2 条实测剖面 and 1 条调查剖面共计 16.02 km 火山岩野外剖面的统计,该区主要发育火山岩类型共计 19 种,其中以玄武岩、安山岩和流纹岩为主,合计占全部岩性的 60%(图 4b)。

结果显示,基于该分类方案能够较好地该区分开。同时,本分类方案能够较

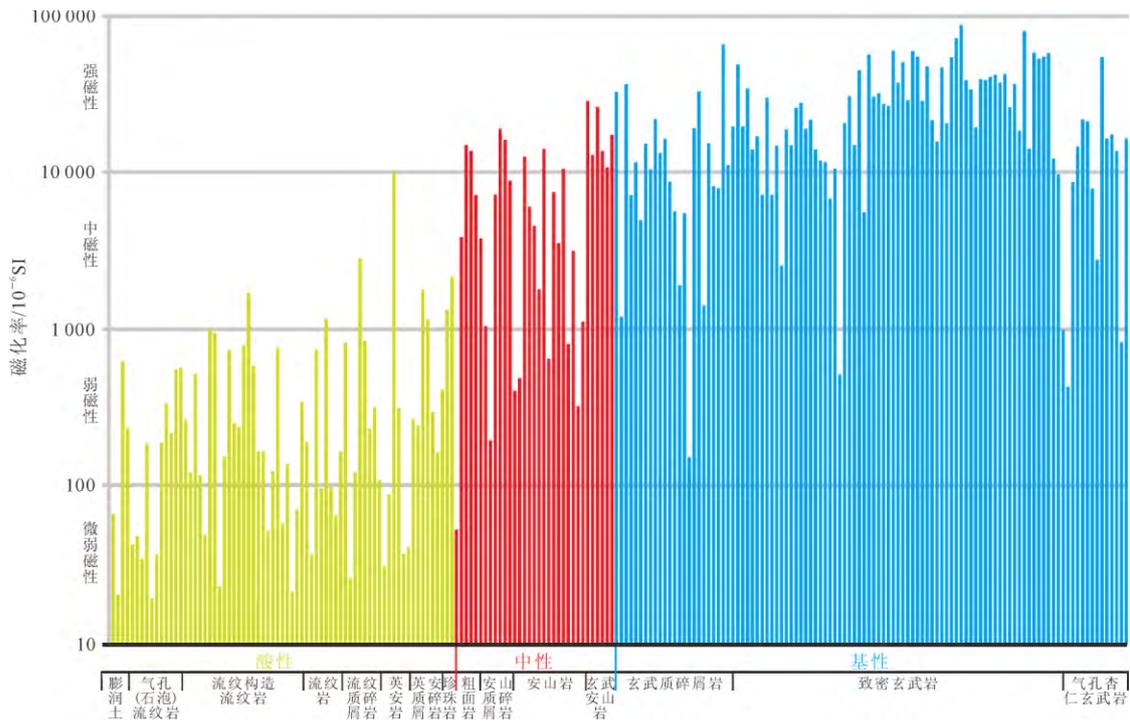


图 2 火山岩磁化率特征直方图

Fig.2 Histogram of volcanic magnetic characteristic

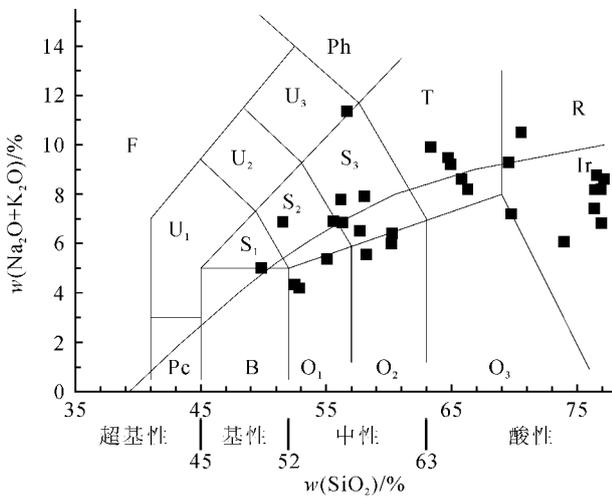


图 3 准噶尔盆地火山岩化学分类 TAS 图解

Fig.3 TAS diagram of volcanic rocks in the Junggar basin

好地揭示本区火山岩的分布特点,即,本区剖面火山岩与盆地内部火山岩均以火山熔岩类为主,但盆地内中基性熔岩居多,而剖面火山岩有较大比例的酸性岩。出现这种岩性分布差异的可能原因有两个:一是不同岩性在空间分布上存在原始差异,即,准东(剖面出露)地区基性、中性和酸性火山岩均有发育,而准西(盆地埋藏)地区酸性火山岩相对不发育;二是盆地埋藏区火山岩揭示不够全面,目前探井所揭示的火山岩以中基性为主。我们更趋向于认为,后者是造成岩性分布差异的主要原因。

4 讨论

4.1 风化蚀变作用与岩性识别

准噶尔盆地石炭系火山岩经受后期溶蚀、变形改造并轻度变质^[49]。本区火山岩受到风化淋滤、构造、热液以及地层水在不同时期的影响,使岩石成分发生显著的变化,如矿物的溶解、氧化、水化和碳酸盐化等^[50]。化学蚀变指数(CIA)作为一个判断化学风化程度的化学指标被广泛应用^[51], $CIA = [(Al_2O_3)/(CaO^* + Al_2O_3 + K_2O + Na_2O)] \times 100$,

表 2 准噶尔盆地石炭系火山岩岩性分类方案

Table 2 Lithologic classification of Carboniferous volcanic rocks in the Junggar basin

| 结构大类 | 成分大类 | 基本岩石类型 | 特征矿物组合或碎屑组分 | 代表井段/厚度比例 | | |
|------------------------------|--------------------------------|---|--|---|--------------------------------------|---------------------|
| 火山熔岩类(熔岩基质中分布的火山碎屑<10%,冷凝固结) | 熔岩 | 基性 SiO ₂ 45% ~ 玄武岩/气孔(杏仁)玄武岩 | 基性斜长石、辉石、橄榄石 | P666.1 244.00 m/>20% | | |
| | 结构 | 52% | 粗面玄武岩 | 基性斜长石、碱性长石、辉石、橄榄石 | P66.2 753.80 m/±1% | |
| | | 中基性 SiO ₂ 52% ~57% | 玄武安山岩 | 基性斜长石、辉石、角闪石 | P666.1 016.00 m/±5% | |
| | | 中性 SiO ₂ 57% ~63% | 安山岩/气孔(杏仁)安山岩 | 中性斜长石、辉石、角闪石、黑云母 | P666.992.80m/±5% | |
| | | | 粗安岩 | 中性斜长石、碱性长石、辉石、角闪石、黑云母 | ND/±1% | |
| | | | 粗面岩 | 碱性长石、中性斜长石、辉石、角闪石、黑云母 | ND/<1% | |
| | | 中酸性 SiO ₂ 63% ~69% | 英安岩 | 中酸性斜长石、石英、碱性长石、黑云母 | ND/±2% | |
| | | 酸性 SiO ₂ >69% | 流纹岩/气孔(石泡)流纹岩 | 石英、碱性长石、酸性斜长石、黑云母、角闪石 | Hq3.2 687.00m/>20% | |
| | 玻璃质 | 一般为酸性 SiO ₂ >63%,基性、中性都有 | 珍珠岩/黑曜岩/松脂岩/浮岩 依据化学成分冠以流纹质/安山质/玄武质等 | 常见石英和长石斑晶(雏晶);亦可见黑云母、角闪石、辉石、橄榄石等斑晶 | ND/±2% | |
| | 火山碎屑熔岩类(熔岩基质中分布的火山碎屑>10%,冷凝固结) | 熔结结构或碎屑结构 | 基性 SiO ₂ 45% ~52% | 玄武质(熔结)凝灰/角砾/集块熔岩 | 基性斜长石、辉石、橄榄石 | P666.1 029.00m/±5% |
| | | 中基性 SiO ₂ 52% ~57% | 玄武安山质(熔结)凝灰/角砾/集块熔岩 | 基性斜长石、辉石、角闪石 | P666.1 016.00m/<1% | |
| | | 中性 SiO ₂ 57% ~63% | 安山质(熔结)凝灰/角砾/集块熔岩 | 中性斜长石、辉石、角闪石、黑云母 | ND/±2% | |
| | | | 粗安质(熔结)凝灰/角砾/集块熔岩 | 中性斜长石、碱性长石、辉石、角闪石、黑云母 | ND/<1% | |
| | | | 粗面质(熔结)凝灰/角砾/集块熔岩 | 碱性长石、中性斜长石、角闪石、黑云母、辉石 | ND/<1% | |
| | | 中酸性 SiO ₂ 63% ~69% | 英安质(熔结)凝灰/角砾/集块熔岩 | 中酸性斜长石、石英、碱性长石、黑云母、角闪石 | P665.794.50m/±1% | |
| | | 酸性 SiO ₂ >69% | 流纹质(熔结)凝灰/角砾/集块熔岩 | 石英、碱性长石、酸性斜长石、黑云母、角闪石 | ND/±5% | |
| 隐爆角砾结构 | | 基性—中性—酸性 | 玄武质隐爆角砾岩 安山质隐爆角砾岩 流纹质隐爆角砾岩 | 基性斜长石、辉石、橄榄石 中性斜长石、辉石、角闪石、黑云母 碱性长石、石英、酸性斜长石、黑云母 | H2.1 210.40m/<1% ND/<1% ND/<1% | |
| 火山碎屑岩类(火山碎屑>90%,压实固结) | | 火山碎屑结构 | 基性 SiO ₂ 45% ~52% | 玄武质凝灰/角砾/集块岩 | 碎屑中:基性斜长石、辉石、橄榄石 | P666.1 076.00m/±10% |
| | | | 中基性 SiO ₂ 52% ~57% | 玄武安山质凝灰/角砾/集块岩 | 碎屑中:基性斜长石、辉石、角闪石 | ND/<1% |
| | 中性 SiO ₂ 57% ~63% | | 安山质凝灰/角砾/集块岩 | 碎屑中:中性斜长石、辉石、角闪石、黑云母 | P666.976.70m/<1% | |
| | | | 粗安质凝灰/角砾/集块岩 | 碎屑中:中性斜长石、碱性长石、辉石、角闪石、黑云母 | ND/<1% | |
| | | 粗面质凝灰/角砾/集块岩 | 碎屑中:碱性长石、中性斜长石、角闪石、黑云母、辉石 | ND/<1% | | |

表 2(续)

| 结构大类 | 成分大类 | 基本岩石类型 | 特征矿物组合或碎屑组分 | 代表井段/厚度比例 | |
|--|---|---|--|---|--------------------------------------|
| | 中酸性 SiO ₂ 63%~69% | 英安质凝灰/角砾/集块岩 | 碎屑中:中酸性斜长石、石英、碱性长石、黑云母、角闪石 | P665,851.90m/±1% | |
| | 酸性 SiO ₂ >69% | 流纹质凝灰/角砾/集块岩 | 碎屑中:石英、碱性长石、酸性斜长石、云母、角闪石 | P61,1 000.50m/±10% | |
| | 蚀变火山灰 SiO ₂ >63% | 沸石岩,伊利石岩,蒙脱石岩/膨润土 | 沸石,伊利石,蒙脱石 | ND/<1% | |
| 沉火山碎屑岩类(火山碎屑 90%~50%,压实固结) | 沉火山碎屑 2 mm | 火山碎屑为主 | 火山角砾、火山集块、外来岩屑 | ND/±2% | |
| 沉积岩(火山碎屑<50%),当火山碎屑体积分数 50%~10%时冠以凝灰质××岩 | 碎屑 2 mm 碎屑 > 2 mm 碎屑 0.063~0.003 9 mm 泥状结构 碎屑<0.003 9 mm | 沉凝灰岩 陆源碎屑岩 砂岩 粉砂岩 黏土质、泥岩/页岩/油页岩 有机质 煤 | 火山灰(岩屑、晶屑、玻屑、火山尘),外碎屑(石英、长石) 岩屑、长石、石英 长石、石英、岩屑、云母、角闪石 石英、长石、黏土矿物 黏土矿物、石英、长石、炭质 有机显微组分,黏土矿物、石英、黄铁矿 | P66,2 240.80m/±2% ND/<1% ND/<1% ND/<1% ND/<1% ND/<1% ND/<1% | |
| 浅成岩和次火山岩 | 显微晶质结构 | 基性 中 酸性 | 辉绿岩 闪长玢岩/正长斑岩 花岗斑岩 | 基性斜长石、辉石、橄榄石 中性斜长石/碱性长石、角闪石、黑云母、辉石 碱性长石、石英、酸性斜长石、黑云母、角闪石 | P61,908.40m/±1 ND/<1% ND/<1% |
| 深成岩 | 全晶质结构 | 基性 中 酸性 | 辉长岩 闪长岩/正长岩 花岗岩 | 基性斜长石、辉石、橄榄石 中性斜长石/碱性长石、角闪石、黑云母、辉石 碱性长石、石英、酸性斜长石、黑云母、角闪石 | ND/<1% ND/<1% P702,935.00m/<1% |
| 变质岩 | 变余结构 变晶结构 | 板岩类 千枚岩类 片岩类 片麻岩类 | 砂质板岩、泥质板岩、炭质板岩 绢云母千枚岩、绿泥石千枚岩 云母片岩、绿片岩、石英片岩 长英质片麻岩 | 砂质、泥质、炭质 绢云母、绿泥石、石英、钠长石 云母、绿泥石、阳起石、石英、长石、滑石 钾长石、斜长石、石英、云母、角闪石、辉石 | ND/<1% ND/<1% ND/<1% ND/<1% |
| | 碎裂、糜棱结构 | 动力变质岩类 碎裂岩、糜棱岩 | 石英、长石、绢云母、绿泥石 | ND/<1% | |

注释:①分类表中 SiO₂ 质量分数的划分区间:基性岩 SiO₂ 45%~52%;中基性岩 SiO₂ 52%~57%,中性岩 SiO₂ 57%~63%;中酸性岩 SiO₂ 63%~69%,酸性岩 SiO₂>69%是根据 1989 年国际地科联推荐的火山岩 TAS 分类方案划分的。②火山碎屑的粒度划分:火山集块>64 mm;火山角砾 64~2 mm;火山凝灰<2 mm。碎屑含量均指火山碎屑的体积分数,%。③特征矿物组合指在火山熔岩或火山碎屑熔岩中特指斑晶矿物组合;在火山碎屑岩中特指晶屑的矿物组合。④杏仁体可能矿物:沸石、葡萄石、绿帘石、绿泥石、皂石、方解石、硅质。⑤ND:在参与统计井中未发现,但在其他区块或围区剖面中存在该类岩石,故而在分类表中保留其分类位置;代表井段为准西地区该种类型岩性代表井段;厚度比例为准东地区野外剖面和准西钻井揭示该种类型岩性所占岩性厚度百分比。

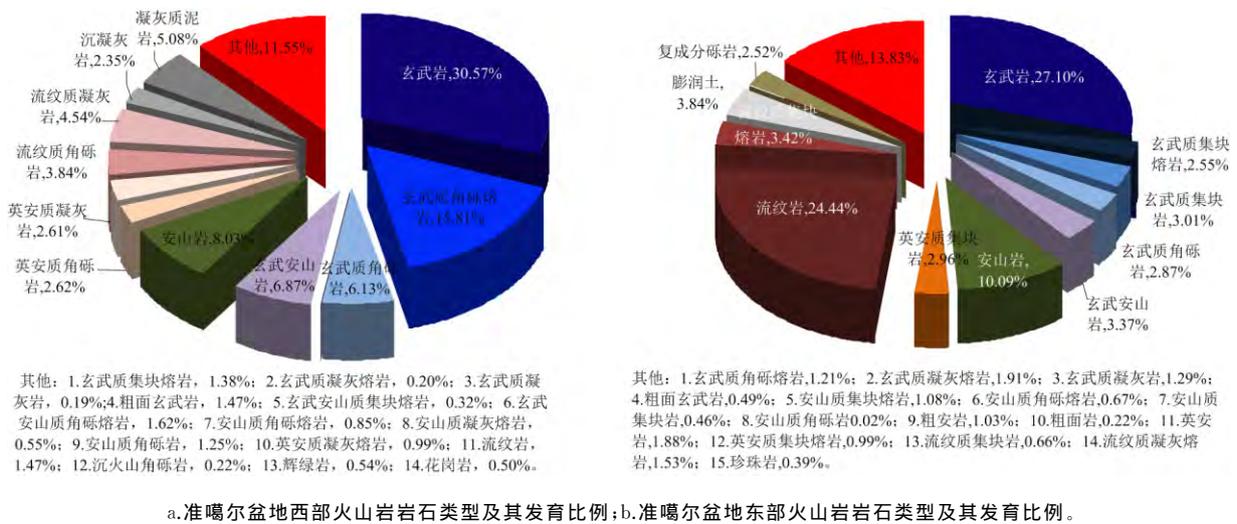


图 4 准噶尔盆地石炭系火山岩岩石类型及其发育比例

Fig.4 Carboniferous volcanic rock types and their proportion in the Junggar basin

其中氧化物均为摩尔浓度, CaO^* 为硅酸盐中的浓度, CIA 值的高低与风化程度强弱具正相关性^[52]。斜长石蚀变指数(PIA)常用来单独指示斜长石的风化状况, $PIA = [(Al_2O_3 - K_2O) / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O - K_2O)] \times 100$, 新鲜岩石 PIA 指数为 50, 而黏土矿物, 如高岭石、伊利石及蒙脱石的 PIA 指数则接近 100^[53]。所测火山岩的主量元素 CIA 显示所选样品 60.61% (20/33) 基本都遭遇不同程度的化学蚀变, 从而对岩石化学成分产生不同程度的影响。针对蚀变岩石岩性定名主要依据原生矿物和次生矿物组合, 由此确定蚀变前岩石中原生矿物的矿物组合、结构构造以及基质特征或火山碎屑粒级及其比例等特征, 进而确定原岩名称。即, 蚀变岩石定名需要恢复并确定出蚀变前原岩的名称; 而蚀变矿物主要代表岩石成岩固结后的改造过程, 它们对岩石次生孔隙形成意义重大, 在此不作详细讨论。表 3 给出了代表性的 6 个样品的主量元素分析结果, 选取 3 个不同蚀变程度的岩石为例进行分析(图 5)。

图 5a 根据 TAS 图解投点确定岩性为玄武岩, 显微镜下薄片鉴定结果为玄武岩。斑状结构, 斑晶为基性斜长石、辉石和橄榄石, 基质呈间粒结构, 岩石整体蚀变较弱, 斜长石发生轻微黏土化。 CIA 数值为 $35.22 < 50$, 显示岩石整体未发生显著蚀变; PIA 数值为 $34.04 < 50$, 显示斜长石未发生明显蚀变。这属于化学成分与矿物成分定名一致的岩石类型。

图 5b 根据 TAS 图解投点确定岩性为玄武安山

岩, 显微镜下薄片鉴定结果为玄武岩。少斑结构, 斑晶为辉石、斜长石, 基质呈间隐结构, 岩石整体发生皂石化。 CIA 数值为 $50.89 > 50$, 显示岩石整体发生蚀变; PIA 数值为 $50.95 > 50$, 显示斜长石发生轻微蚀变。皂石成分为 $(1/2Ca, Na)_{0.33} (Mg, Fe)_3 [(Si, Al)_4O_{10}](OH)_2 \cdot 4H_2O$, 其中的 SiO_2 质量分数为 57.90%~62.40%。这类岩石属于蚀变后导致 SiO_2 相对升高, TAS 投影向右偏移型。岩石定名以岩矿鉴定为准, 即, 玄武岩。

图 5c 根据 TAS 图解投点确定岩性为粗安岩, 显微镜下薄片鉴定结果为玄武安山岩。斑状结构, 斑晶为斜长石、辉石, 基质结晶程度较差, 见不清晰间隐结构, 岩石整体蚀变严重, 斜长石发生黏土化、皂石化, 基质发生脱玻化。 CIA 数值为 $54.19 > 50$, 显示岩石整体发生蚀变; PIA 数值为 $55.91 > 50$, 显示斜长石发生蚀变。该类岩石属于蚀变导致碱质和 SiO_2 都相对升高, TAS 投影向右上方偏移型。岩石定名以岩矿鉴定为准, 即, 玄武安山岩。

4.2 火山岩储层与岩性关系

火山岩储层是一种由孔隙、裂缝及晶洞构成的双孔或多孔介质非均质性储层^[39]。根据野外剖面、岩心和岩石薄片观察与分析, 该区火山岩储集空间类型分为原生孔隙和次生孔隙两类。其中原生孔隙主要包括原生气孔、杏仁体内孔、杏仁体收缩孔、粒间孔、冷凝收缩缝和矿物解理缝; 次生孔隙主要包括溶蚀孔、脱玻化孔、构造缝和溶蚀缝。基于本分类体系, 火山岩岩性与储集空间类型呈现较好的对应关

系。

原生孔隙 原生气孔:气孔多成圆形、椭圆形、压扁伸长形,大多数呈孤立状,主要发育于火山熔岩中,本区气孔多被皂石、沸石、方解石、石英等矿物充填,少数未被完全充填而形成残余孔,多见于玄武岩和流纹岩中(图 6a)。杏仁体内孔:矿物充填气孔未充填形成的杏仁体内矿物之间的孔隙,主要发育于火山熔岩中,本区杏仁体内孔中矿物多为结晶程度较好的皂石或沸石,多见于玄武岩中(图 6b)。粒间孔:火山碎屑颗粒之间的孔隙,主要发育于火山碎屑岩中,本区粒间孔多被沸石充填,而后经脱玻化形成脱玻化孔,多见于火山碎屑岩中(图 6c)。冷凝收缩缝:岩浆冷凝、结晶过程中所形成的收缩微裂缝,主要形成于火山熔岩中,以火山岩柱状节理和板状节理最为典型,多见于玄武岩和安山岩中(图 6d)。矿物解理缝:主要指长石和云母等矿物中常见的片状或楔形解理缝,主要形成于各种含斑晶的火山岩中,本区解理缝大多呈孤立状存在,只有极少的解理缝与孔隙连通,多见于玄武岩中,图 6e 为辉石矿物蚀变为黑云母矿物的解理缝。杏仁体收缩孔:

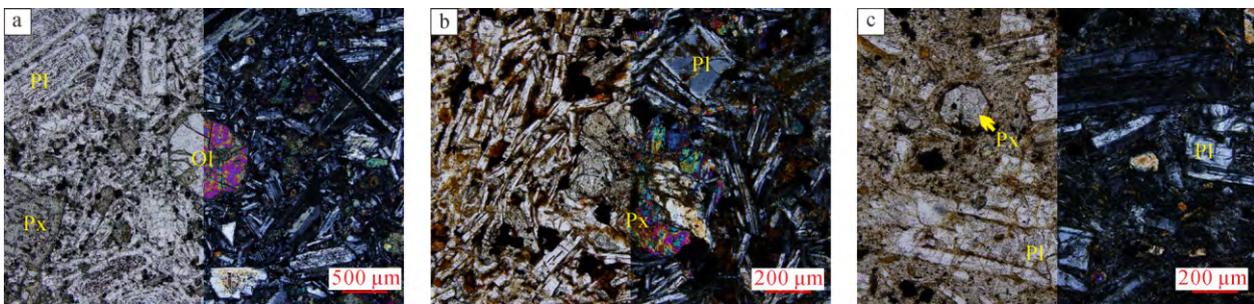
杏仁体与气孔边缘交界处由于成分差异异常形成冷凝收缩孔,主要形成于各种火山熔岩中,本区杏仁体收缩孔常见于玄武岩气孔中皂石、沸石等矿物边缘(图 6f)。

次生孔隙 斑晶溶蚀孔:矿物晶体部分或完全溶解、水解或交代形成的孔隙,主要形成于火山熔岩中,本区斑晶溶蚀孔多见于安山岩和玄武岩斜长石斑晶中(图 6g)。基质溶蚀孔:基质中微晶长石、微晶辉石、火山玻璃及火山灰物质等被溶蚀,呈筛孔状,主要形成于各种火山岩石中,本区基质溶蚀孔以玄武岩和安山岩中较常见(图 6a)。脱玻化孔:火山玻璃脱玻化形成矿物时发生体积的缩小形成的微孔隙,主要形成于火山熔岩中,本区脱玻化孔主要见于结晶较差的安山岩和流纹岩中(图 6h)为隐晶质和长石石英微晶组成的流纹条带中隐晶质经脱玻化作用所形成的脱玻化孔。构造缝:火山岩遭受构造应力作用后产生的微裂缝,形成于各种火山岩石中,本区构造裂缝常被沸石、皂石、方解石、石英等矿物充填,常见经后期溶蚀重新开启的溶蚀构造缝隙(图 6i)。

表 3 准噶尔盆地石炭系火山岩主量元素分析结果

Table 3 Major element composition of Carboniferous volcanic rocks in the Junggar basin

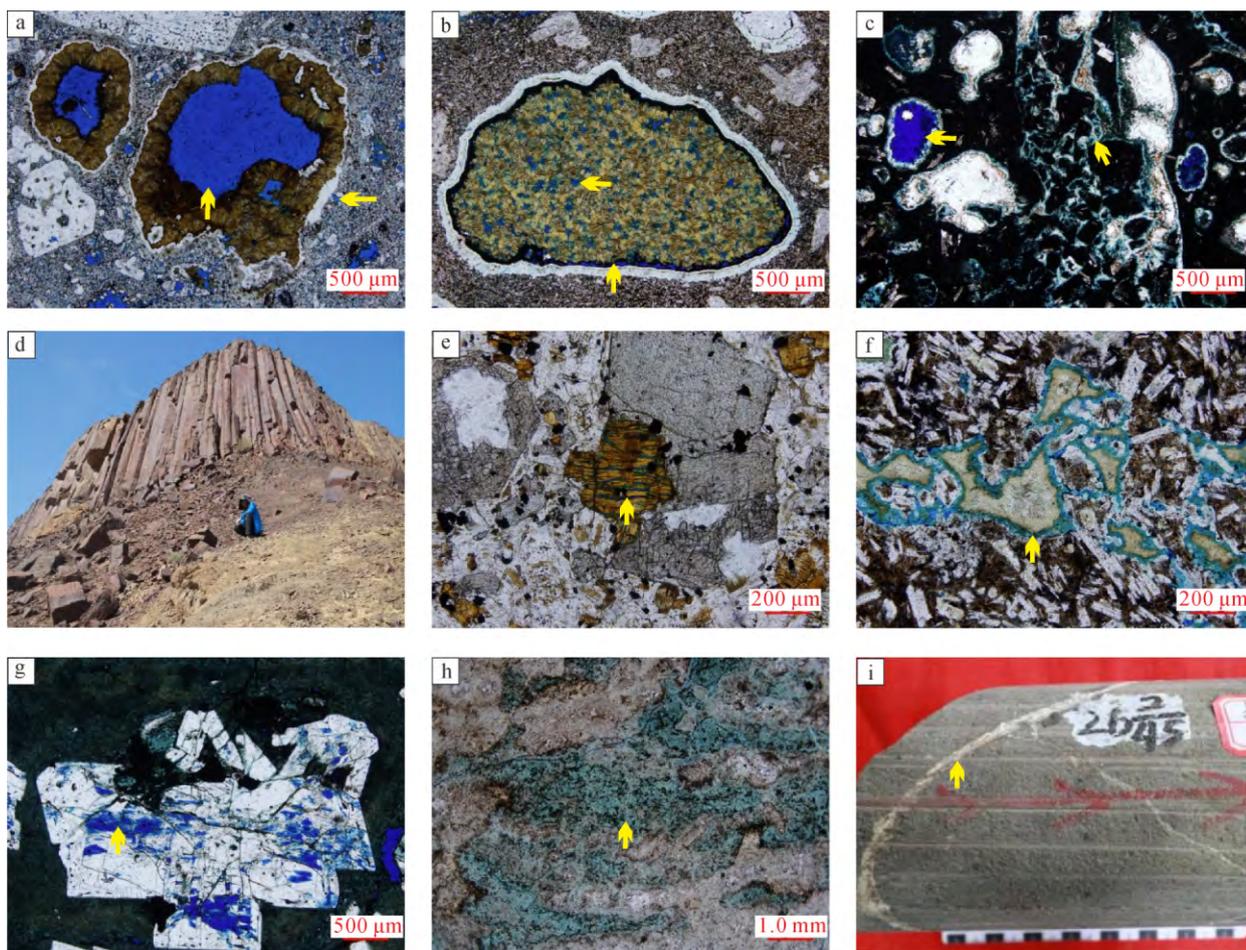
| 样品号 | TAS 岩性 | 薄片鉴定 | wB/% | | | | | | | | | | 烧失量 | CIA | PIA | 总和 |
|------|--------|-------|------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------|-------------------|-------|------|-------|------------------|-------------------------------|------|-------|-------|-------|
| | | | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | TFe ₂ O ₃ | K ₂ O | Na ₂ O | CaO | MgO | MnO | TiO ₂ | P ₂ O ₅ | | | | |
| X3 | 玄武岩 | 玄武岩 | 48.30 | 14.70 | 10.08 | 1.42 | 3.43 | 11.10 | 7.22 | 0.20 | 0.40 | 0.15 | 1.93 | 35.22 | 34.04 | 98.93 |
| X4 | 玄武安山岩 | 玄武岩 | 50.76 | 12.43 | 9.37 | 0.68 | 3.51 | 10.84 | 8.19 | 0.21 | 0.48 | 0.200 | 2.18 | 32.53 | 31.83 | 98.85 |
| X10 | 粗安岩 | 玄武安山岩 | 54.94 | 15.81 | 8.77 | 3.92 | 2.77 | 7.38 | 2.97 | 0.220 | 0.48 | 0.30 | 1.62 | 54.19 | 55.91 | 99.18 |
| X57 | 安山岩 | 玄武岩 | 56.90 | 16.39 | 8.47 | 1.69 | 3.75 | 7.11 | 2.39 | 0.26 | 0.48 | 0.35 | 1.24 | 53.63 | 54.12 | 99.03 |
| X201 | 玄武安山岩 | 玄武岩 | 53.48 | 15.73 | 8.60 | 0.89 | 4.32 | 7.68 | 3.44 | 0.15 | 0.76 | 0.45 | 1.49 | 50.89 | 50.95 | 96.99 |
| X304 | 流纹岩 | 流纹岩 | 78.30 | 11.00 | 0.30 | 5.56 | 2.22 | 0.61 | 0.11 | 0.02 | 0.10 | 0.01 | 0.97 | 50.52 | 51.17 | 99.20 |



a. 玄武岩,轻微蚀变,双井子(X3); b.玄武岩,中等蚀变,双井子(X201); c.玄武安山岩,严重蚀变,金山沟(X10)。Pl.斜长石;Px.辉石;Ol.橄榄石。

图 5 准噶尔盆地石炭系不同蚀变程度火山岩典型照片

Fig.5 Microphotos of Carboniferous volcanic rocks with different alteration degrees in the Junggar basin



a. 残余气孔及基质溶蚀孔,玄武岩,双井子;b.杏仁体内孔及杏仁体收缩孔,玄武岩,双井子;c.粒间孔及原生气孔,玄武质角砾岩,双井子;d.柱状节理,安山岩,双井子;e.矿物解理缝,玄武岩,双井子;f.杏仁体收缩孔,玄武岩,双井子;g.斑晶溶蚀孔,安山岩,双井子;h.脱玻化孔,流纹岩,双井子;i.构造缝,玄武岩,P666井,1 241.49 m。

图 6 准噶尔盆地石炭系火山岩岩性与储层储集空间类型关系

Fig.6 Relationship between Carboniferous volcanic rocks and their reservoir space types in the Junggar basin

5 结论

1) 本文采用三级分类方案,岩石结构-成因一级分类、岩石化学成分二级分类、矿物成分-特征结构-火山碎屑粒级及比例三级分类,针对本区岩石发育的实际特点,对出现频率低岩石给出分类中位置或者合并,对出现频率高岩石进行细分,同时明确给出各种岩石的肉眼鉴定特征,以增强现场定名的实用性。

2) 依据准噶尔盆地盆缘剖面和探井取心段的火山岩资料,根据火山岩的结构成因、化学成分、矿物成分、特征结构、火山碎屑粒级及其比例等,将准噶尔盆地石炭系火成岩划分为火山熔岩类、火山碎屑

熔岩类、火山碎屑岩类、沉火山碎屑岩类、火山碎屑沉积岩类、浅成岩和次火山岩类和深成岩类 7 种类型,进一步细分为 24 种基本岩石类型。

3) 岩石蚀变对火山岩准确定名有显著影响。本区火山岩用 TAS 投影定名有 3 种情况:一是轻微蚀变型,此时 TAS 图解与薄片定名相同;二是中等蚀变型,此时 TAS 图解常为右移型,所确定岩石类型比薄片定名偏酸性(如,玄武岩投点为玄武安山岩);三是强蚀变型,此时 TAS 图解常为右上偏移型,所确定岩石类型比薄片鉴定偏酸性和碱性(如,玄武安山岩投点为粗面岩)。后两种情况,均以薄片定名为准。

4) 火山岩岩性与储层关系密切,不同岩性的储

集空间类型、组合方式和发育程度存在差异。本区玄武岩多发育原生气孔、基质溶蚀孔等,而安山岩多发育斑晶溶蚀孔以及脱玻化孔等,流纹岩多发育脱玻化孔和原生气孔等;火山碎屑熔岩储集空间发育类型大多和其对应火山熔岩类相似;火山碎屑岩类多发育粒间孔,部分碎屑发育火山熔岩类储集空间类型。

参考文献(References):

- [1] Bailey W S. The Classification and Naming of Igneous Rocks[J]. *Science*, 1893, 21(524):87-89.
- [2] Turner H W. Classification of Igneous Rocks[J]. *Science*, 1898, 7(175):622-625.
- [3] Foerste A F. The Classification of the Ordovician Rocks of Ohio and Indiana[J]. *Science*, 1905, 22(553): 149-152.
- [4] 任秉琛.新疆北天山东段海相火山碎屑岩的分类命名及其主要特征[J].*西北地质*, 1981(2):13-20.
Ren Bingchen. The Classification and Nomenclature and Major Characteristics of Marine Volcanoclastic Rocks in the Eastern Sector of the Northern Tianshan Mountain, Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 1981(2):13-20.
- [5] 中国地质学会岩石专业委员会火山岩分类命名小组.火山岩的分类和命名(熔岩部分)[J].*岩石矿物及测试*, 1984, 3(4):289-300.
The Group on the Systematics of Volcaniclastic Rocks of the Commission on Petrology of the Geological Society of China. Classification and Nomenclature of Volcanic Rocks[J]. *Acta Petrologica Mineralogica et Analytica*, 1984, 3(4):289-300.
- [6] 中国地质学会岩石专业委员会火山岩分类命名小组.火山碎屑岩的分类和命名[J].*岩石矿物及测试*, 1984, 3(4):301-309.
The Group on the Systematics of Volcaniclastic Rocks of the Commission on Petrology of the Geological Society of China. Classification and Nomenclature of Volcaniclastic Rocks[J]. *Acta Petrologica Mineralogica et Analytica*, 1984, 3(4):301-309.
- [7] 孙善平,李家振,朱勤文,等.国内外火山碎屑岩的分类命名历史及现状[J].*地球科学:武汉地质学院学报*, 1987, 12(6):571-577.
Sun Shanping, Li Jiazhen, Zhu Qinwen, et al. A Review of Nomenclature of Pyroclastic Rock Classification and Its Present Status both Abroad and at Home[J]. *Earth Science: Journal of Wuhan College of Geology*, 1987, 12(6):571-577.
- [8] 梅厚钧.火山岩的钾钠并列化学分类及名称[J].*地球化学*, 1988(2):33-36.
Mei Houjun. Classification and Nomenclature of Volcanic Rocks Using Kalium and Sodium Suite[J]. *Geology-Geochemistry*, 1988(2):33-36.
- [9] LeMaitre R W, Bateman P, Dudek A. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks[M]. London: Blackwell, 1989:193.
- [10] 李兆霖,王碧香,王富宝,等.火山岩(熔岩)的分类和命名[J].*中国地质科学院院报*, 1989(19):175-194.
Li Zhaonai, Wang Bixiang, Wang Fubao, et al. Classification and Nomenclature of Volcanic Rocks (Lava Part)[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 1989(19):175-194.
- [11] 王碧香.国际火成岩分类命名研究现状[J].*地质科技情报*, 1990(4):30-47.
Wang Bixiang. Current Status of Classification and Nomenclature of Igneous Rock in the Whole Globe[J]. *Geological Science and Technology Information*, 1990(4):30-47.
- [12] 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 Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks[J]. *Geoscience*, 1991, 5(4):457-468.
- [13] Arkan F, Ulusay R, Aydm N. Characterization of Weathered Acidic Volcanic Rocks and a Weathering Classification Based on a Rating System[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2007, 66(4):415-430.
- [14] Hastie A R, Kerr A C, Pearce J A, et al. Classification of Altered Volcanic Island Arc Rocks Using Immobile Trace Elements: Development of the Th-Co Discrimination Diagram [J]. *Journal of Petrology*, 2007, 48(12): 2341-2357.
- [15] 李曙光. ϵ_{Nd} -La/Nb, Ba/Nb, Nb/Th 图对地幔不均一性研究的意义:岛弧火山岩分类及 EMII 端元的分解[J].*地球化学*, 1994, 23(2):105-114.
Li Shuguang. Implications of ϵ_{Nd} -La/Nb, Ba/Nb, Nb/Th Diagrams to Mantle Heterogeneity: Classification of Island Arc Basalts and Decomposition of EMII Component[J]. *Geochimica*, 1994, 23(2):105-114.
- [16] Shellnutt J G, Jahn B M. Origin of Late Permian

- Emeishan Basaltic Rocks from the Panxi Region (SW China): Implications for the Ti-Classification and Spatial-Compositional Distribution of the Emeishan Flood Basalts[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2011, 199(1):85-95.
- [17] Tappe S, Foley S F, Jenner G A, et al. Integrating Ultramafic Lamprophyres into the IUGS Classification of Igneous Rocks: Rationale and Implications[J]. *Journal of Petrology*, 2005, 46(9):1893-1900.
- [18] Frost B R, Frost C D. A Geochemical Classification for Feldspathic Igneous Rocks[J]. *Journal of Petrology*, 2008, 49(11):1955-1969.
- [19] Nardi L V S, Bitencourt M D F. A-Type Granitic Rocks in Post-Collisional Settings in Southernmost Brazil: Their Classification and Relationship with Tectonics and Magmatic Series [J]. *The Canadian Mineralogist*, 2009, 47(6):1493-1503.
- [20] Verma S P, Torres-Alvarado I S, Sotelo-Rodriguez Z T. SINCLAS: Standard Igneous Norm and Volcanic Rock Classification System[J]. *Computers & Geosciences*, 2002, 28(5):711-715.
- [21] Verma S P, Rivera-Gomez M A. Computer Programs for the Classification and Nomenclature of Igneous Rocks[J]. *Episodes*, 2013, 36(2):115-124.
- [22] 陶文宏. 基于 BP 网络的火成岩岩石化学分类研究[J]. *济南大学学报(自然科学版)*, 2002, 16(1):1-5.
Tao Wenhong. The BP Net Chemical Classification of Igneous Rocks[J]. *Journal of Jinan University (Science and Technology)*, 2002, 16(1):1-5.
- [23] Lacassie J P, Del Solar J R, Roser B, et al. Visualization of Volcanic Rock Geochemical Data and Classification with Artificial Neural Networks [J]. *Mathematical Geology*, 2006, 38(6):697-710.
- [24] Dubois M K, Bohling G C, Chakrabarti S. Comparison of Four Approaches to a Rock Facies Classification Problem[J]. *Computers & Geosciences*, 2007, 33(5):599-617.
- [25] 刘凤英, 张楠, 郎伟民. BP 网络在火成岩岩石化学判别分类中的应用[J]. *新疆地质*, 2007, 25(2):140-143.
Liu Fengying, Zhang Nan, Lang Weimin. The Application of BP Net in Chemical Classification of Igneous Rocks[J]. *Xinjiang Geology*, 2007, 25(2):140-143.
- [26] 张治国, 杨毅恒, 夏立显, 等. RPROP 算法在火成岩岩石分类中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2008, 23(3):898-902.
Zhang Zhiguo, Yang Yiheng, Xia Lixian, et al. The Application of RPROP Algorithm to Igneous Rock Classification[J]. *Progress in Geophysics*, 2008, 23(3):898-902.
- [27] Tsuji T, Yamaguchi H, Ishii T, et al. Mineral Classification from Quantitative X-Ray Maps Using Neural Network: Application to Volcanic Rocks[J]. *Island Arc*, 2010, 19(1):105-119.
- [28] 林楠, 姜琦刚, 陈永良, 等. 基于核主成分支持向量机的火成岩 QAPF 分类: 以青海格尔木地区为例[J]. *地球学报*, 2014, 35(4):487-494.
Lin Nan, Jiang Qigang, Chen Yongliang, et al. The Classification of Igneous Rocks with QAPF Based on Kernel Principal Component SVM: A Case Study of Golmud Area in Qinghai Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2014, 35(4):487-494.
- [29] Sapigni M, Berti M, Bethaz E, et al. TBM Performance Estimation Using Rock Mass Classifications[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39(6):771-788.
- [30] Watanabe H, Matsuo K. Rock Type Classification by Multi-Band TIR of ASTER[J]. *Geosciences Journal*, 2003, 7(4):347-358.
- [31] 张旗, 金惟俊, 李承东, 等. 再论花岗岩按照 Sr-Yb 的分类: 标志[J]. *岩石学报*, 2010, 26(4):985-1015.
Zhang Qi, Jin Weijun, Li Chengdong, et al. Revisiting the New Classification of Granitic Rocks Based on Whole-Rock Sr and Yb Contents: Index[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(4):985-1015.
- [32] Luo J L, Zhang C L, Qu Z H. Volcanic Reservoir Rocks: A Case Study of the Cretaceous Fenghuadian Suite, Huanghua Basin, Eastern China[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1999, 22(4):397-415.
- [33] 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(4):416-432.
- [34] 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.
Zhao Hailing, Liu Zhenwen, Li Jian, et al. Petrologic Characteristics of Igneous Rock Reservoirs and Their Research Orientation[J]. *Oil & Gas Geology*, 2004, 25(6):609-613.
- [35] Wang P J, Chen S M. Cretaceous Volcanic Reservoirs and Their Exploration in the Songliao Basin, Northeast China[J]. *AAPG Bulletin*, 2015, 99(3):499-523.
- [36] 王璞珺, 郑常青, 舒萍, 等. 松辽盆地深层火山岩岩性

- 分类方案[J].大庆石油地质与开发,2007,26(4):17-22.
- Wang Pujun, Zheng Changqing, Shu Ping, et al. Classification of Deep Volcanic Rocks in Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2007, 26(4):17-22.
- [37] 郑常青,王璞珺,刘杰,等.松辽盆地白垩系火山岩类型与鉴别特征[J].大庆石油地质与开发,2007,26(4):9-16.
- Zheng Changqing, Wang Pujun, Liu Jie, et al. Types and Distinguishing Characteristics of Cretaceous Volcanic Rocks in Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2007, 26(4):9-16.
- [38] 杜洋,罗明高,周强,等.南堡凹陷第三系火山岩分类命名研究[J].天然气技术,2009,3(5):2-7.
- Du Yang, Luo Minggao, Zhou Qiang, et al. Classification and Naming of Triassic Volcanic Rocks in Napu Sag[J]. Natural Gas Technology, 2009, 3(5):2-7.
- [39] 王岩泉,胡大千,蔡国刚,等.辽河盆地东部凹陷火山岩储层特征与主控因素[J].石油学报,2013,34(5):896-904.
- Wang Yanquan, Hu Daqian, Cai Guogang, et al. Characteristics and Controlling Factors of Cenozoic Volcanic Reservoirs in Liaohe Basin, NE China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 34(5):896-904.
- [40] 王淑芳,邹才能,侯连华,等.准噶尔盆地东部石炭系火山岩气藏石油地质特征及有利勘探方向分析[J].地学前缘,2013,20(2):226-236.
- Wang Shufang, Zou Caineng, Hou Lianhua, et al. Petroleum Geological Characteristics of Gas Accumulation in Carboniferous Volcanics and Prospect for Gas Exploration, Eastern Junggar Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(2):226-236.
- [41] 何刚,王志章,谭伏霖,等.准噶尔盆地腹部火成岩分类及特征[J].新疆石油地质,2010,31(2):125-127.
- He Gang, Wang Zhizhang, Tan Fulin, et al. Classification of Characteristic of Igneous Rocks in Hinterland of Junggar Basin[J]. Xinjing Petroleum Geology, 2010, 31(2):125-127.
- [42] 赵霞,贾承造,张光亚,等.准噶尔盆地陆东—五彩湾地区石炭系中\基性火山岩地球化学及其形成环境[J].地学前缘,2008,15(2):272-279.
- Zhao Xia, Jia Chengzao, Zhang Guangya, et al. Geochemistry and Tectonic Settings of Carboniferous Intermediate-Basic Volcanic Rocks in Ludong-Wucaiwang, Junggar Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(2):272-279.
- [43] 陈新,卢华复,舒良树,等.准噶尔盆地构造演化分析新进展[J].高校地质学报,2002,8(3):257-267.
- Chen Xin, Lu Huaifu, Shu Liangshu, et al. Study on Tectonic Evolution of Junggar Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2002, 8(3):257-267.
- [44] 王伟锋,王毅,陆诗阔.准噶尔盆地构造分区和变形样式[J].地震地质,1999,21(4):324-333.
- Wang Weifeng, Wang Yi, Lu Shikuo. Structural Belts and Deformation Features of the Junggar Basin[J]. Seismology and Geology, 1999, 21(4):324-333.
- [45] 陈业全,王伟锋.准噶尔盆地构造演化与油气成藏特征[J].石油大学学报(自然科学版),2004,28(3):4-8.
- Chen Yequan, Wang Weifeng. Structural Evolution and Pool-Forming in Junggar Basin[J]. Geochemical Research Institute of Chinese Academy of Science, 2004, 28(3):4-8.
- [46] 李建忠,吴晓智,齐雪峰,等.新疆北部地区上古生界火山岩分布及其构造环境[J].岩石学报,2010,26(1):195-206.
- Li Jianzhong, Wu Xiaozhi, Qi Xuefeng, et al. Distribution and Tectonic Setting of Upper Paleozoic Volcanic Rock in Northern Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(1):195-206.
- [47] 何登发,陈建新,况军,等.准噶尔盆地石炭系油气成藏组合特征及勘探前景[J].石油学报,2010,31(1):1-11.
- He Dengfa, Chen Xinfu, Kuang Jun, et al. Characteristics and Exploration Potential of Carboniferous Hydrocarbon Plays in Junggar Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 31(1):1-11.
- [48] 毛翔,李江海,张华添,等.准噶尔盆地及其周缘地区晚古生代火山机构分布与发育环境分析[J].岩石学报,2012,28(8):2381-2391.
- Mao Xiang, Li Jianghai, Zhang Huatian, et al. Study on the Distribution and Developmental Environment of the Late Paleozoic Volcanoes in Junggar Basin and Its Adjacent Areas[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(8):2381-2391.
- [49] 毛治国,邹才能,朱如凯,等.准噶尔盆地石炭纪火山岩岩石地球化学特征及其构造环境意义[J].岩石学报,2010,26(1):207-216.
- Mao Zhiguo, Zou Caineng, Zhu Rukai, et al. Geochemical Characteristics and Tectonic Settings of Carboniferous Volcanic Rocks in Junggar Basin[J]. Acta Petrologica, 2010, 26(1):207-216.

- [50] 李伟,何生,谭开俊,等.准噶尔盆地西北缘火山岩储层特征及成岩演化特征[J].天然气地球科学,2010,21(6):909-916.
Li Wei, He Sheng, Tan Kaijun, et al. Characteristics of Reservoir and Diagenetic Evolution of Volcanic Rocks in Northwestern Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(6):909-916.
- [51] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic Climates and Plate Motions Inferred from Major Element Chemistry of Lutites[J]. Nature, 1982, 299(5885): 715-717.
- [52] 胡楠,裴先治,李瑞保,等.东昆仑南缘布青山得力斯坦地区马尔争组[J].地质学报,2013,87(11):1731-1747.
Hu Nan, Pei Xianzhi, Li Ruibao, et al. Provenance and Tectonic Setting Study of the Maerzheng Formation at the Delistan of Buqingshan Area in the Southern Margin of East Kunlun[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(11):1731-1747.
- [53] Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. Unraveling the Effects of Potassium Metasomatism in Sedimentary Rocks and Paleosols, with Implications for Paleoweathering Conditions and Provenance[J]. Geology, 1995, 23(10):921-924.