

# Discussion on Volcanic Rock Reservoir Structure-Genesis Classification

Kangxu Ren<sup>1</sup>, Xiaojun Wang<sup>2</sup>, Chang Liu<sup>1</sup>, Baocheng Wu<sup>2</sup>, Jiandong Mu<sup>1</sup>, Haiming Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing

<sup>2</sup>Research Institute of Exploration & Development, Petro China Xinjiang Oilfield Company, Karamay

Email: [renkangxu@163.com](mailto:renkangxu@163.com)

Received: Feb. 20<sup>nd</sup>, 2014; revised: Mar. 22<sup>nd</sup>, 2014; accepted: Apr. 1<sup>st</sup>, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Traditional classifications of volcanic rock emphasize the connotation of petrography and poorly relate to reservoir spaces, which cannot meet the need for reservoir studies with respect to the oil and gas exploration. Based on the analyses of reservoir space types, combinations and genetics of volcanic rock, six factors that are closely related to reservoir spaces are summed up. Combining with the traditional classification schemes and previous knowledge, a new classification scheme of volcanic rock reservoir in oil and gas exploration is set up.

## Keywords

Reservoir Classification, Volcanic Rock, Reservoir Space

---

# 火山岩储层构造 - 成因分类探讨

任康绪<sup>1</sup>, 王小军<sup>2</sup>, 刘 畅<sup>1</sup>, 吴宝成<sup>2</sup>, 穆剑东<sup>1</sup>, 王海明<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国石油勘探开发研究院, 北京

<sup>2</sup>新疆油田公司勘探开发研究院, 克拉玛依

Email: [renkangxu@163.com](mailto:renkangxu@163.com)

收稿日期: 2014年2月20日; 修回日期: 2014年3月22日; 录用日期: 2014年4月1日

---

## 摘 要

火山岩传统分类强调岩类学内涵, 与储集空间联系不紧密, 不能满足油气勘探中储层研究的需要。基于

火山岩储集空间类型、组合及其成因分析，归纳了6种与储集空间联系最紧密的因素，结合传统岩类学方案和前人认识，建立了油气勘探中火山岩储层分类新方案。

## 关键词

储层分类，火山岩，储集空间

## 1. 引言

火山岩油气勘探已有近 130 年的历史，至今在世界范围内发现了 300 多个与火山岩有关的油气藏或油气显示[1] [2]，火山岩已逐渐成为含油气盆地勘探的重要领域。在盆地发育早期，火山岩体积不但较大，而且与快速沉降的烃源岩共生，组成有效的生储盖组合，具备成藏的基本条件。统计表明，火山岩类约占全球盆地充填物体积的 25% [3]，因此火山岩在盆地发育早期或深层的勘探意义重大。然而，传统以岩类学为核心的火山岩分类与储集空间联系不紧密，不利于储层评价，已成为制约含油气盆地深层油气勘探的问题。而现有的火山储层分类方案存在对储集空间及组合考虑不全面或分类因素交叉等问题。本文基于火山岩主要储集空间与传统岩类学分类的结合，探讨油气勘探中火山岩储层的构造 - 成因分类方案。

## 2. 火山岩传统分类概述

### 2.1. 火山熔岩分类

本文讨论的火山岩是指含油气盆地中因火山作用而形成的岩石类型，包括火山熔岩、次火山岩和火山碎屑岩。

火山熔岩是岩浆喷出地表冷凝而成的岩石，通常结晶程度较差，矿物颗粒细小，常含玻璃质，仅凭标本观察或偏光显微镜鉴定来准确命名常常会有一定难度。根据国际地质科学联合会(IUGS)火成岩分类原则，熔岩分类主要根据能否测定岩石中实际矿物含量而采用不同办法：对于能够借助偏光显微镜测定岩石中实际矿物含量的，用 QAPF 双三角图进行分类；对于不能准确测定实际矿物含量的，可根据新鲜样品全岩化学分析数据借助 TAS 图解进行分类[4] [5](图 1)。

### 2.2. 次火山岩分类

次火山岩是指岩浆在喷发过程中受到阻碍停留在近地表的空间中冷凝而成的岩石，通常侵位深度低于 3 km。0~0.5 km 者为地表亚相，0.5~1.5 km 者为超浅成亚相，1.5~3 km 者为浅成亚相。

次火山岩是介于熔岩与结晶岩之间的岩石，它们的基本分类一般以熔岩或浅成结晶岩的名称为基础，再根据岩石外貌和产状等特征进一步命名。与熔岩外貌特征比较相似的岩石，通常以熔岩名称为词头，以斑岩(或玢岩)为词尾，如安山玢岩、流纹斑岩等；具有角砾结构的次火山岩，一般按照角砾含量命名，当角砾含量<10%时，定为含角砾××岩，××岩是指具体次火山岩，如含角砾安山玢岩；当角砾含量为 10%~30%时，将含字去掉，如角砾流纹斑岩；当角砾含量>30%时，定为××岩(次火山岩名)角砾岩，如粗面斑岩角砾岩。另外，也有为强调角砾成因而定名的，如隐爆角砾岩、侵入角砾岩、震碎角砾岩、崩塌角砾岩等[5]。

### 2.3. 火山碎屑岩分类

火山碎屑岩分类方案较多，IUGS 推荐的方案由于未涉及火山碎屑熔岩和熔结火山碎屑岩而未被广泛应用，国内学者主要采用基于孙善平等的方案进行分类，共划分了 3 个成因类型、5 个亚类、17

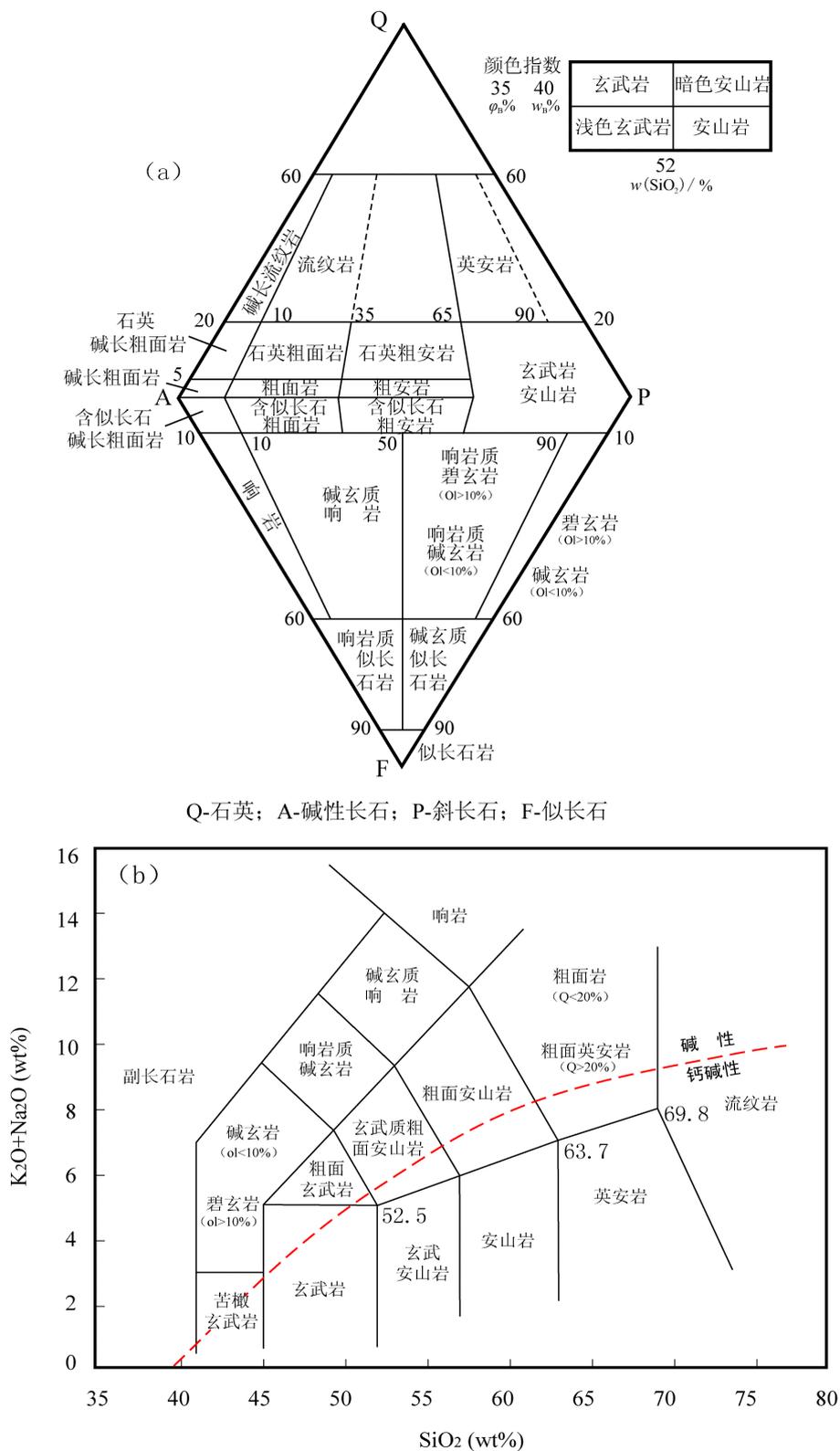


Figure 1. Double triangle figure (a) and TAS figure (b) of volcanic rock traditional classification schemes

图1. 火山熔岩传统分类的双三角图(a)和TAS图(b)图版

种主要岩石类型[5] [6](表 1)。

不难看出，火山岩传统分类强调岩类学特征，对于确定岩石基本名称具有重要意义。但是，油气勘探中更关注的是火山岩的储集空间特征，这在上述分类中没有得到有效反映，这也是火山岩传统分类在油气勘探中遇到的最大问题[7]。

### 3. 火山岩储集空间特征

火山岩储层的储集空间种类繁多，包括各种大小、成因的孔、洞、裂缝及其复杂组合，是由喷发、溢流、冷凝、结晶、构造、风化和溶蚀等多种因素影响而形成的。可见，火山岩中的储集空间及其组合，包括了原生成因和次生成因两种主要类型，并常常形成复合类型。

邹才能等基于国内主要含油气盆地的研究，归纳了火山岩储层储集空间的主要类型及其含油气性[8]，本文在此基础上进行了适当修改，把各类裂缝也进行原生、次生成因划分，增加了残余杏仁孔类型、删除了碳酸盐溶孔(因为这一类型与其他类型有重叠，隶属于溶孔、洞一类)(表 2)。

原生储集空间包括气孔(石泡)、粒(砾)间孔、晶间(内)孔、冷凝收缩孔、收缩缝、炸裂缝等主要类型，这些储集空间的形成与岩浆性质、火山喷发环境、火山岩岩相等密切相关，在评价这类储集空间时非常注重火山机构的刻画和火山活动期次的划分。

次生储集空间主要是火山岩在构造作用、风化淋蚀、流体溶蚀等岩浆期后成岩过程中形成的。包括溶孔(洞)、残余杏仁孔、矿物溶蚀孔、脱玻化孔、火山灰溶孔、构造缝、风化缝 - 溶蚀缝等主要类型。

### 4. 火山岩储层分类探讨

#### 4.1. 已有分类及其问题

近年来，有学者或油田现场因研究或生产需要开展了火山岩储层进行分类，提出了不同的分类方案[7]-[10]，但这些方案在实际应用中发现都存在一定程度局限性，主要表现在以下几个方面。

##### 4.1.1. 分类因素或划分类型有重叠

文献[7]和文献[8]关于火山岩储层分类都存在这样的问题。文献[7]中，熔岩基本类型划分出现了种类包含，如玄武岩与气孔杏仁玄武岩，流纹岩与气孔流纹岩(或石泡流纹岩)，都具有前者包含后者的岩类重叠问题。文献[8]的分类体系中，火山岩储层发育控制因素按照火山作用、成岩作用和构造作用划分在内涵上也有重叠问题，因为成岩作用指形成岩石的各种地质作用，原生、次生皆有，因此火山作用、构造

Table 1. The traditional classification scheme of volcanic clastic rocks

表1. 火山碎屑岩类的传统分类方案

| 岩类     | 火山碎屑熔岩       | 正常火山碎屑岩 |          | 火山-沉积碎屑岩  |         |                  |
|--------|--------------|---------|----------|-----------|---------|------------------|
|        |              | 熔结火山碎屑岩 | 普通火山碎屑岩  | 沉火山碎屑岩    | 火山碎屑沉积岩 |                  |
| 火山碎屑含量 | 10%~90%      | >90%    |          | 90%~50%   | 50%~10% |                  |
| 成因类型   | 火山碎屑熔岩类      | 高空降落    | 火山碎屑(灰)型 | 沉积(沉)火山碎屑 | 火山碎屑沉积岩 |                  |
| 胶结方式   | 熔结胶结为主       | 熔结为主    | 压实为主     | 压结和水化学胶结  |         |                  |
| 基本岩石名称 | 碎屑粒径 >64mm   | 集块熔岩    | 熔结集块岩    | 集块岩       | 沉集块岩    | 凝灰质<br>巨砾岩       |
|        | 碎屑粒径 2~64 mm | 角砾熔岩    | 熔结角砾岩    | 火山角砾岩     | 沉火山角砾岩  | 凝灰质角砾岩           |
|        | 碎屑粒径 < 2 mm  | 凝灰熔岩    | 熔结凝灰岩    | (晶屑玻屑)凝灰岩 | 沉凝灰岩    | 凝灰质砂岩、<br>粉砂岩、泥岩 |

Table 2. Reservoir space types and features of igneous rocks (modified after reference [8])

表2. 火成岩储层储集空间类型和特征(据文献[8], 有修改)

| 储集空间类型      | 对应岩类       | 成因                              | 主要特点                         | 含油气性                       |                            |
|-------------|------------|---------------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 原生储集空间      | 气孔<br>(石泡) | 玄武岩, 安山岩,<br>流纹岩, 角砾岩, 角砾溶岩     | 成岩过程中气体<br>膨胀溢出              | 多在岩流层顶底,<br>大小、形状各异        | 后期次生成岩改造后缝洞<br>连通较好者含油气性较好 |
|             | 粒(砾)间孔     | 火山角砾岩, 集块岩,<br>火山沉积岩            | 碎屑颗粒间经成岩<br>压实后残余孔隙          | 火山碎屑岩中多见                   | 含油气好                       |
|             | 晶间孔晶内孔     | 玄武岩, 安山岩, 流纹岩,<br>次火山岩, 自碎屑角砾溶岩 | 造岩矿物格架                       | 多在岩流层中部,<br>孔隙空间一般较小       | 大多不含油                      |
|             | 冷凝收缩孔      | 玄武岩                             | 岩浆在冷凝过程中发生体<br>积收缩形成         | 无一定方向性,<br>形状常常不规则         | 与气孔连通时充填油气                 |
|             | 收缩缝        | 玄武岩, 安山岩, 流纹岩,<br>自碎屑角砾熔岩       | 岩浆冷却收缩、冷凝、底部<br>岩浆上涌破坏上部熔岩   | 柱状节理, 呈张开形式,<br>面状裂开, 但少错动 | 含油气性较好                     |
|             | 炸裂缝        | 自碎屑角砾熔岩、次火山岩                    | 自碎或隐蔽爆破                      | 有复原性                       | 含油气性较好                     |
| 次生储集空间      | 溶孔、溶洞      | 玄武岩, 安山岩, 角砾熔岩,<br>火山, 角砾岩      | 风化、淋滤、溶蚀                     | 通常沿裂缝、自碎屑岩带<br>及构造高部位发育    | 含油气性好                      |
|             | 残余杏仁孔      | 气孔杏仁熔岩                          | 气孔充填残余或<br>岩浆期后溶蚀            | 发育在杏仁体边缘、<br>杏仁体内部         | 含油气性较好                     |
|             | 矿物溶蚀孔      | 各类岩石, 富碱性<br>火山岩最有利             | 常沿解理缝发育, 长石、似<br>长石、富镁铁矿物最常见 | 孔隙形态不规则                    | 主要储集空间之一                   |
|             | 脱玻化孔       | 球粒流纹岩                           | 玻璃质经脱玻化形成                    | 微孔隙、但连通性较好                 | 较好储气空间                     |
|             | 火山灰溶孔      | 凝灰岩, 熔结凝灰岩,<br>火山角砾岩            | 火山灰灰蚀                        | 孔隙小, 但数量多,<br>连通性好         | 能形成好的储层                    |
|             | 构造缝        | 各类岩石                            | 构造应力作用                       | 较平直, 多为高角度裂缝、<br>网状缝       | 与构造作用时间有关                  |
| 风化缝、<br>溶蚀缝 | 各类岩石       | 风化作用、构造缝易溶成分<br>被溶蚀             | 溶蚀孔缝洞和<br>构造缝相连              | 常与次生孔隙组合,<br>含油气性好         |                            |

作用与成岩作用并列欠妥当。方案中储集层类型按照熔岩型、火山碎屑岩型、溶蚀型、裂缝型划分, 前 2 种都与火山岩类型有关, 而油田常见的次火山岩类却没有涉及。此外, 裂缝型储层与熔岩型储层也有内涵重叠问题, 如节理或收缩缝发育的玄武岩在裂缝型和熔岩型中都可以划分。

#### 4.1.2. 岩石类型与储集空间组合匹配不全面

文献[9]的火山岩储层划分方案最有代表性。油田实践表明, 该方案划分的不同岩石类型均可能在遭受强烈构造破裂、风化蚀变等次生作用改造后成为多种物性特征的储层, 即不同岩石类型实际上可以与多种渗流特征的原生、次生储集空间匹配。以准噶尔盆地为例, 西泉 2 井石炭系熔岩岩心分析孔隙度多低于 8%, 岩石致密, 但因构造裂缝发育而获得高产油流; 西泉 3、西泉 103 井火山岩虽然孔隙度一般大于 10%, 但渗透率多低于  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 都获得了高产, 火山岩储集意义显著。这些油井中的火山岩储层在该方案中显然不好评价。可见, 该方案对于中、中-高孔中-低、低-特低渗或低孔高、中-高渗这种物性参数交叉的储层的评价存在局限性。

#### 4.1.3. 储层细分因素与储集空间关系不全面且有冗余

以新疆油田提出的方案最有代表性[10]。该方案中基本岩石类型遵循了传统岩类学方案, 但在储层类型划分时, 除次火山岩、火山熔岩、熔结火山碎屑岩外的其它岩石类型并未明确细分方案, 这显然与实际情况有出入, 因为其它火山碎屑岩常发育多种多样的储集空间, 具有油气储集意义。该方案细分时包含了一些与储集空间关系不明显的因素, 如含碎屑、球粒、霏细、珍珠等。此外, 火山碎屑岩按照强、中等和弱熔结因素细分难以充分体现其储集空间特征。

## 4.2. 构造 - 成因分类

一般认为, 火山岩储层物性优劣主要取决于岩石原生、次生孔隙和裂缝的发育程度及其连通性。即使是化学成分相似的同种熔岩, 由于孔隙结构发育程度不同而物性特征会有很大差异, 可以是优质储层也可以是非储层。因此, 评价火山岩储层及含油气性能力时, 应综合考虑其岩性、组构、成因和孔隙特征等因素[11]。为此, 本文提出一种基于火山岩储集空间及其组合类型的分类方案。

根据上文所述, 火山岩某些特征结构构造及成因因素在反映储集空间特征时关系密切, 归纳起来有以下 6 种类型: 1) 由各种原生或次生形成的、形态、大小不一的气孔、石泡、溶孔、溶洞等比较发育且充填程度较低的火山岩, 可合并为具有孔洞构造的火山岩储层, 简称孔洞型储层。由于孔洞多孤立, 连通性一般不太好, 这类储层以中 - 高孔、低 - 特低渗为典型特征(图 2(a))。2) 对于孔洞发育但充填程度较高的火山岩, 通常仅发育少量残余孔隙, 但改造潜在大, 当受风化淋蚀后也可形成较好储层, 本文把具有这种特征的火山岩划分为杏仁构造型火山岩储层, 简称杏仁型储层。典型储层一般表现出低 - 特低孔、低 - 特低渗特征(图 2(b))。3) 对于储层基质致密但裂缝比较发育的火山岩, 其裂缝可以是原生节理缝、冷却收缩缝, 也可以后期构造裂缝、风化裂缝等, 裂缝可以有不同的充填程度。这种储层储集空间总量一般不大, 但因裂缝发育渗透率变化幅度大, 也具有成藏意义。典型储层一般表现为低孔高渗特征, 本文把这类储层划分为裂缝型储层(图 2(c))。4) 对于不仅裂缝发育且原生或次生溶蚀孔隙也较发育的岩石, 可以划分为具有缝洞构造的火山岩储层, 简称缝洞型储层。这类储层储集空间最为发育, 孔洞连通性也非常好, 典型储层表现出中 - 高孔、中 - 高渗特征(图 2(d))。5) 对于裂缝和孔隙均不发育的火山岩, 一般表现为致密块状构造特征, 实际上是非储层, 是油气成藏中较好的封盖层, 典型岩石一般表现出特低孔、特低渗特征(图 2(e))。6) 火山岩潜山面附近或断裂破碎带常见到强烈风化蚀变的储层类型, 各种火山岩都可在这种条件下遭受强烈淋滤、溶蚀、蚀变作用改造成为良好储层。总体来看这是一种成因类型储层, 储层岩石的粘土矿物相对含量较高, 结构松散, 次生微孔发育, 岩色特殊, 通常呈现出显著的蚀变色, 储层物性变化范围大, 以中 - 高孔、中 - 低渗者多见, 本文把这种类型储层笼统归为一大类, 即淋蚀型(淋滤 - 溶蚀 - 蚀变型的简称)储层(图 2(f))。

通过对现有火山岩储层划分方案的剖析, 作者认为火山岩储层分类应充分反映出储集空间特征且还必须忠实于传统岩类学方案。为此, 本文将上述最能反映火山岩储集空间及组合特征的 6 种构造 - 成因

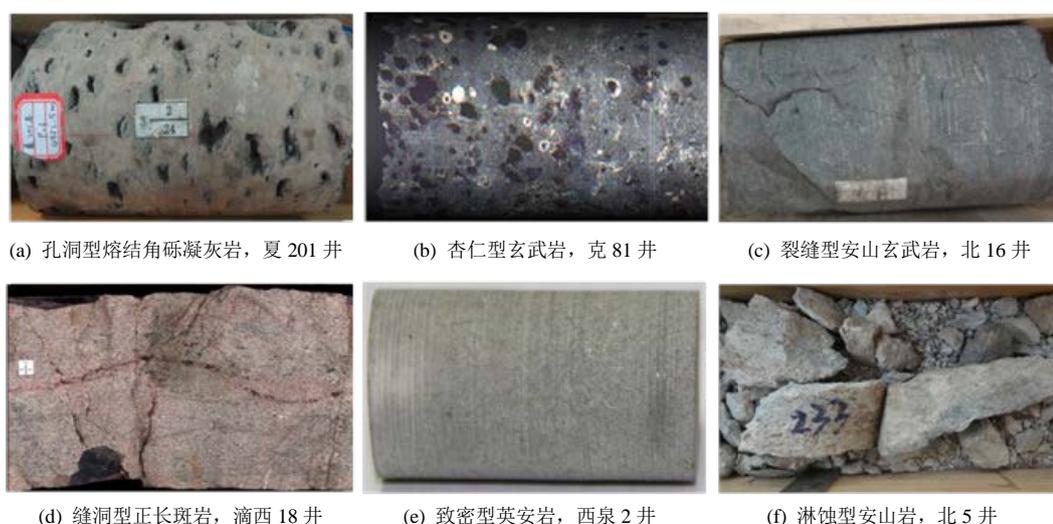


Figure 2. Representative pictures of typical volcanic rock reservoirs  
图2. 火山岩储层典型类型的代表性岩石照片

因素考虑到火山岩储层分类中, 提出火山岩储层划分新方案(表 3), 具体分类原则如下。

1) 火山岩基本名称参照传统岩类学划分方法确定。由于火山岩种类繁多, 对具体含油气盆地来说, 对于发育较少、分布范围局限的火山岩, 基本岩石名称尽量向化学成分近似的主体类型靠, 种类划分宜粗不宜细。2) 根据不同火山岩的储层特征, 将 6 种构造 - 成因因素以词头形式加到基本岩石名称上, 形成储集空间特征明确的储层岩石类型, 如孔洞型玄武岩、裂缝型安山岩等。3) 划分的储层岩石类型应比较容易建立测井识别图版, 便于井震结合和储层综合评价研究。

根据上述原则和不同类型火山岩储集空间发育规律, 对次火山岩细分主要涉及致密型、裂缝型、缝洞型、淋蚀型等 4 个方面; 而火山熔岩和火山岩碎屑岩的储集空间类型和成因多样性强, 细分考虑了孔洞型、杏仁型、致密型、裂缝型、缝洞型、淋蚀型等 6 个类型。

## 5. 结论

1) 火山岩传统岩类学分类方案未能有效反映岩石的储集空间特征, 因此不利于油气勘探、开发中储层评价研究。

2) 当前存在的火山岩储层分类或多或少存在着储集空间反映不全面或分类因素交叉等问题, 需要加以完善。

3) 本文基于火山岩储集空间组合特征分析, 总结了孔洞型、杏仁型、致密型、裂缝型、缝洞型、淋蚀型等与储集空间联系紧密的 6 类因素, 提出火山岩储集层的构造 - 成因分类, 方案以 6 类因素为词头, 结合传统岩类学分类, 形成一种储集空间特征显著的火山岩储层岩石类型, 完善了火山岩储集层的分类。

## 基金项目

中国博士后科学基金(资助编号: 2013M530661)资助。

Table 3. New classification scheme of volcanic rock reservoirs in oil and gas exploration

表3. 火山岩储层油气勘探分类新方案

| 化学成分<br>(酸碱度) | 次火山岩类                   |                          | 火山熔岩类                  |  | 火山碎屑岩类                 |                                   |                           |                                  |  | 细分<br>因素                               |
|---------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|--|------------------------|-----------------------------------|---------------------------|----------------------------------|--|--|
|               | 基本<br>名称                | 细分<br>因素                 | 基本<br>名称               | 细分<br>因素                               | 火山碎屑<br>熔岩             | 熔结火山<br>碎屑岩                       | 正常火山<br>碎屑岩               | 沉火山岩                             | 火山碎屑<br>沉积岩                                    |  |
|               |                         |                          |                        |  | 基本<br>名称               | 基本<br>名称                          | 基本<br>名称                  | 基本名称                             | 基本<br>名称                                       |  |
| 酸性            | 花岗斑岩、<br>花岗闪<br>长斑岩     |                          | 流纹岩、<br>英安岩、<br>碱性流纹岩  |  |                        |                                   |                           |                                  |  |  |
| 中性            | 闪长玢岩、<br>二长斑岩、<br>正长斑岩  | 致密、<br>裂缝、<br>缝洞、<br>淋蚀。 | 安山岩、<br>粗安岩、<br>粗面岩、响岩 | 孔洞、<br>杏仁、<br>致密、<br>裂缝、<br>缝洞、<br>淋蚀。 | 集块熔岩、<br>角砾熔岩、<br>凝灰熔岩 | 熔结集<br>块岩、<br>熔结角砾<br>岩、熔结<br>凝灰岩 | 集块岩、<br>火山角砾<br>岩、<br>凝灰岩 | 沉集块<br>岩、<br>沉火山角<br>砾岩、<br>沉凝灰岩 | 凝灰质<br>巨砾岩、<br>凝灰质<br>角砾岩、<br>凝灰质砂岩<br>/粉砂岩/泥岩 | 孔洞、<br>杏仁、<br>致密、<br>裂缝、<br>缝洞、<br>淋蚀。 |
| 基性            | 辉绿(玢)岩、<br>碱性辉绿<br>(玢)岩 |                          | 玄武岩、<br>碱性玄武岩          |  |                        |                                   |                           |                                  |  |  |
| 超基性           | 苦橄玢岩、<br>霓霞岩            |                          | 苦橄岩、<br>霞石岩            |  |                        |                                   |                           |                                  |  |  |

## 参考文献 (References)

- [1] Schutter, S.R. (2003) Occurrences of hydrocarbons in and around igneous rocks. *Geological Society Special Publications*, **214**, 35-68.
- [2] 邹才能, 赵文智, 贾承造, 等 (2008) 中国沉积盆地火山岩油气藏形成与分布. *石油勘探与开发*, **3**, 257-270.
- [3] Einsele, G. (2000) *Sedimentary basins: evolution, facies, and sediment budget*. Springer, New York, 1-792.
- [4] 赵海玲, 刘振文, 李剑, 等 (2004) 火成岩油气储集层的岩石学特征及研究方向. *石油与天然气地质*, **25**, 609-615.
- [5] 常丽华, 曹林, 高福红 (2009) 火成岩鉴定手册. 地质出版社, 北京, 61-124.
- [6] 孙善平, 刘永顺, 钟蓉, 等 (2001) 火山碎屑岩分类评述及火山沉积学研究展望. *岩石矿物学杂志*, **20**, 313-317.
- [7] 王璞珺, 郑长青, 舒萍, 等 (2007) 松辽盆地深层火山岩岩性分类方案. *大庆石油地质与开发*, **26**, 17-22.
- [8] 邹才能, 陶士振, 侯连华, 等 (2011) 非常规油气地质. 地质出版社, 北京, 192-230.
- [9] 赵澄林, 刘孟慧, 胡爱梅, 等 (1997) 特殊油气储层. 石油工业出版社, 北京, 1-203.
- [10] 钱根宝, 王延杰, 王彬, 等 (2012) 陆东 - 五彩湾火山岩气藏提高单井产量现场攻关试验. 新疆油田公司勘探开发研究院, 克拉玛依, 32-115.
- [11] 朱怡翔, 石广仁 (2013) 火山岩岩性的支持向量机识别. *石油学报*, **34**, 312-322.