

文章编号：1000-0747(2016)04-0000-07 DOI: 10.11698/PED.2016.04.00

# 火山地层就位环境对储集层分布的约束 ——以松辽盆地王府断陷侏罗系火石岭组二段流纹质火山地层为例

唐华风<sup>1</sup>, 杨迪<sup>1</sup>, 邵明礼<sup>2</sup>, 王璞珺<sup>1</sup>, 孙文铁<sup>2</sup>, 黄玉龙<sup>1</sup>

(1. 吉林大学地球科学学院; 2. 吉林油田勘探开发研究院)

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

**摘要：**以松辽盆地王府断陷侏罗系火石岭组二段流纹质火山地层为例，探讨火山地层就位环境类型及储集层发育模式，总结火山地层就位环境对储集层形成的控制作用。利用下伏岩层岩相分析法和上覆岩层印模法对就位前和就位后的古地貌进行恢复，进而将就位环境划分为4类：就位前洼陷-就位后洼陷(I类)、就位前洼陷-就位后低凸起(II类)、就位前低凸起-就位后低凸起(III类)、就位前低凸起-就位后洼陷(IV类)。钻井揭示处于I类就位环境的火山地层具有“下好上差”的储集层分布模式，主要受挥发分捕获、熔浆淬火和深埋藏溶蚀作用的控制；处于III类就位环境的火山地层具有“上好下差”的储集层分布模式，主要受风化淋滤、挥发分捕获和构造作用的控制。I类就位环境的火山地层下部和III类就位环境的火山地层上部为有利的勘探目标。图7表1参19

**关键词：**松辽盆地；王府断陷；侏罗系火石岭组；火山地层；就位环境；储集层分布模式

中图分类号：TE122.2

文献标识码：A

## Constraint of volcano-stratigraphic emplacement environment on the reservoir distribution: A case analysis of rhyolitic volcanic strata in the 2<sup>nd</sup> member of Jurassic Huoshiling Formation in Wangfu fault depression, Songliao Basin, East China

TANG Huafeng<sup>1</sup>, YANG Di<sup>1</sup>, SHAO Mingli<sup>2</sup>, WANG Pujun<sup>1</sup>, SUN Wentie<sup>2</sup>, HUANG Yulong<sup>1</sup>

(1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China;  
2. PetroChina Jilin Oilfield Company, Songyuan 138000, China)

**Abstract:** This paper takes rhyolitic volcanic strata of the 2<sup>nd</sup> member of Jurassic Huoshiling Formation in the Wangfu fault depression, Songliao Basin as an example to discuss the environment type of volcano-stratigraphic emplacement and distribution pattern of reservoirs and to analyze the correlation between volcanic strata emplacement environment type and reservoir origin. Litho-facies analysis techniques can roughly determine the paleo-landform before volcano-stratigraphic emplacement according to the types of underlying rocks. Horizon flatten techniques can basically determine the paleo-landform after emplacement according to coal bottom. There are four environment types of volcano-stratigraphic emplacement, namely, sub-sag before and after emplacement (type I), sub-sag before emplacement- low salient after emplacement (type II), low salient before and after emplacement (type III), and low salient before emplacement and sub-sag after emplacement (type IV). The drilling reveals that volcanic strata of type I emplacement environment have the reservoir distribution pattern of excellent in the lower part and poor in the upper part because of the controlling of capturing of volatile matter, quenching of magma and deep burial dissolution. However, the volcanic strata of type III emplacement environment have the reservoir distribution pattern of excellent in the upper part and poor in the lower part because of the controlling of the weathering leaching, capturing of volatile matters and tectonic activity. The lower part of volcanic strata in type I and upper part of volcanic strata in type III are favorable exploration targets.

**Key words:** Songliao Basin; Wangfu fault depression; Jurassic Huoshiling Formation; volcanic formation; emplacement environment; reservoir distribution pattern

## 0 引言

火山地层就位环境指火山岩就位时的古地貌与就位后到上覆岩层形成前的古地貌组合。火山岩就位时的古地貌-环境可划分为洼陷区-湿环境(包括水下喷发

环境)、低凸起区-干环境或二者的过渡区,火山岩就位后的古地貌可划分为低凸起和洼陷。就位于洼陷区-湿环境的熔浆可形成微裂缝十分发育的玻质碎屑岩或珍珠岩<sup>[1]</sup>;就位于低凸起区-干环境的熔岩流可形成气孔发育的上部亚相和致密的下部亚相<sup>[2]</sup>。而就位后的古低

凸起区相对于洼陷区会经历更长时间的风化淋滤作用,有利于形成风化壳型储集层<sup>[3-5]</sup>;洼陷区多数为盆地沉积沉降区,烃源岩发育,可与火山岩组成有利的生储组合<sup>[6-7]</sup>,在合适的条件下就可以成藏<sup>[8-9]</sup>。因此,火山地层的就位环境对火山岩储集层及油气藏的形成具有控制作用。

目前关于火山地层有利储集层分布的研究主要有3个方面:①基于火山机构类型、相带与储集层关系的分析,认识到有利储集层分布于复合火山机构的中心相带,尤其是中心相带的喷溢相上部亚相、爆发相热碎屑流亚相、火山通道相火山颈亚相和侵出相内带亚相<sup>[10-12]</sup>;②火山地层结构对储集层分布的约束<sup>[13]</sup>;③溶蚀和淋滤作用对有利储集层分布的控制作用<sup>[14]</sup>。这些研究往往局限于各火山地层构成要素的单独分析,缺少从火山地层就位环境角度的整体分析,导致对有利储集层分布认识不全面。本文以松辽盆地王府断陷侏罗系火石岭组二段流纹质火山地层为例,从火山地层就位环境入手,分析火山岩储集层发育模式。以期寻找有效的火山岩储集层提供理论依据。

## 1 研究区概况

王府断陷位于松辽盆地南部,构造样式为西断东超,划分为东部低凸起区、中部斜坡区和西部洼陷区(见图1)。钻井揭示断陷期发育有火石岭组、沙河子组和营城组,火石岭组厚度大、分布范围广,火石岭组沉积晚期—泉头组沉积早期在CS2井区发生隆升,使火石岭组遭受抬升和剥蚀,形成东高西低的古斜坡,沙河子组和营城组尖灭于该斜坡(见图2)。火石岭组由上至下可分为2段,火二段发育粗安质和流纹质两套火山地层,其中流纹质火山地层厚20~60 m,岩性主要为流纹质角砾熔岩、流纹质凝灰熔岩和流纹岩,岩相以爆发相和喷溢相为主(见图1),岩石中气孔、溶蚀孔和裂缝发育,富含黄铁矿,下伏地层为火二段泥岩、砂砾岩和火山岩,上覆地层主要为火二段泥岩、砂砾岩和煤层,局部区域与沙河子组—登娄库组接触。目前有14口井钻遇流纹质火山地层,除WF1井、CS13井、CS1井外,其他11口井均位于中部斜坡区并具有相同的岩相组合特征。

## 2 火山地层就位环境的类型及特征

火山地层就位环境的古地貌恢复与沉积地层的研究方法一致。选取流纹质火山地层底面和火石岭组顶部煤层底面作为火山岩就位环境分析的等时面。就位前古地貌分析采用下伏地层岩相分析方法,就位后古

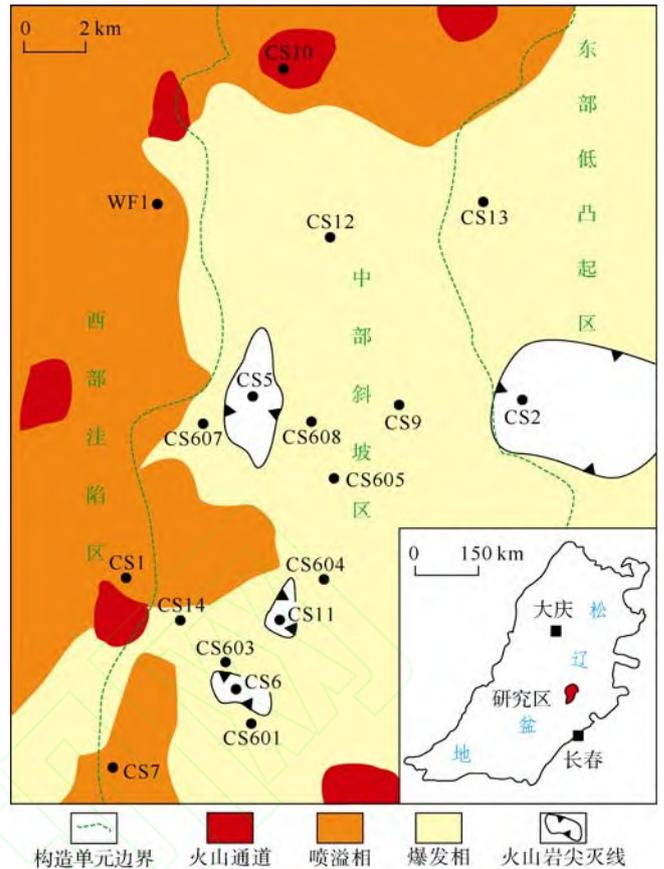


图1 松辽盆地王府断陷流纹质火山地层岩相分布图

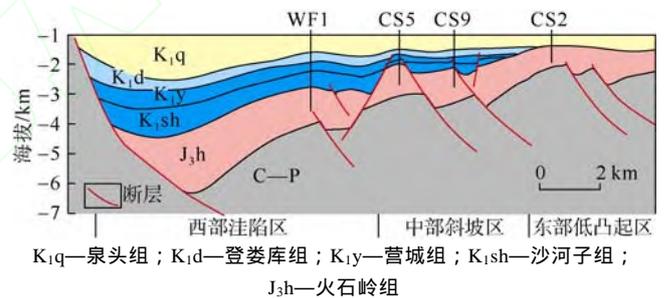


图2 松辽盆地王府断陷深层构造样式

地貌分析采用上覆地层印模法。根据古地貌组合特征,将火山地层就位环境进行分类。

### 2.1 就位前、后古地貌恢复

就位前古地貌恢复:流纹质火山地层的下伏岩性为泥岩、砂砾岩和粗安质火山岩,有6口井(CS9、CS10、CS12、CS14、CS607、WF1)钻井揭示流纹质火山地层厚达数十米的下伏泥岩,显示为稳定的湖相区,指示该区就位于洼陷区;有2口井(CS1、CS7)钻井揭示流纹质火山地层下伏岩性为厚层砂砾岩与薄层泥岩,具有冲积扇特征,指示该区就位于低凸起区边缘;有5口井(CS11、CS13、CS20、CS603、CS604)钻井揭示流纹质火山地层直接与下伏粗安质岩石接触,指示该区就位于低凸起区。综合上述结果,将火

山岩就位前的环境划分为洼陷区-湿环境和低凸起区-干环境，整体上呈东高西低，东部为大规模的低凸起区，西南部和中部为补丁状低凸起区（见图 3a）。

就位后古地貌恢复：依据印模法恢复火山地层充填后的古地貌，选取煤层底界为参照面拉平，煤层底界和火山岩顶面间沉积岩（尤指泥岩）厚的地方为洼陷区，沉积岩缺失或厚度薄（以砂砾岩为主）的区域为低凸起区。就位后整体上地形仍是东高西低，低凸起区分布范围缩小，洼陷区分布范围扩大（见图 3b）。

### 2.2 就位环境类型

将图 3a 和图 3b 叠置得到就位环境图。根据古地

貌组合的特征，就位环境可划分为 4 类：就位前洼陷-就位后洼陷（I 类） 就位前洼陷-就位后低凸起（II 类） 就位前低凸起-就位后低凸起（III 类） 就位前低凸起-就位后洼陷（IV 类）（见图 3c）。I 类就位环境的火山地层可与上覆、下伏厚层泥岩形成良好的生-储-盖组合。II 类就位环境的火山地层可与下伏泥岩形成良好的生-储组合，火山地层就位后风化淋滤作用可对地层进一步改造。III 类就位环境的火山地层就位后至沙河子组沉积早期受风化淋滤作用改造形成风化壳型储集层，但与下伏烃源岩距离较远。IV 类就位环境不利于风化壳型储集层发育，且与下伏烃源岩距离较远。

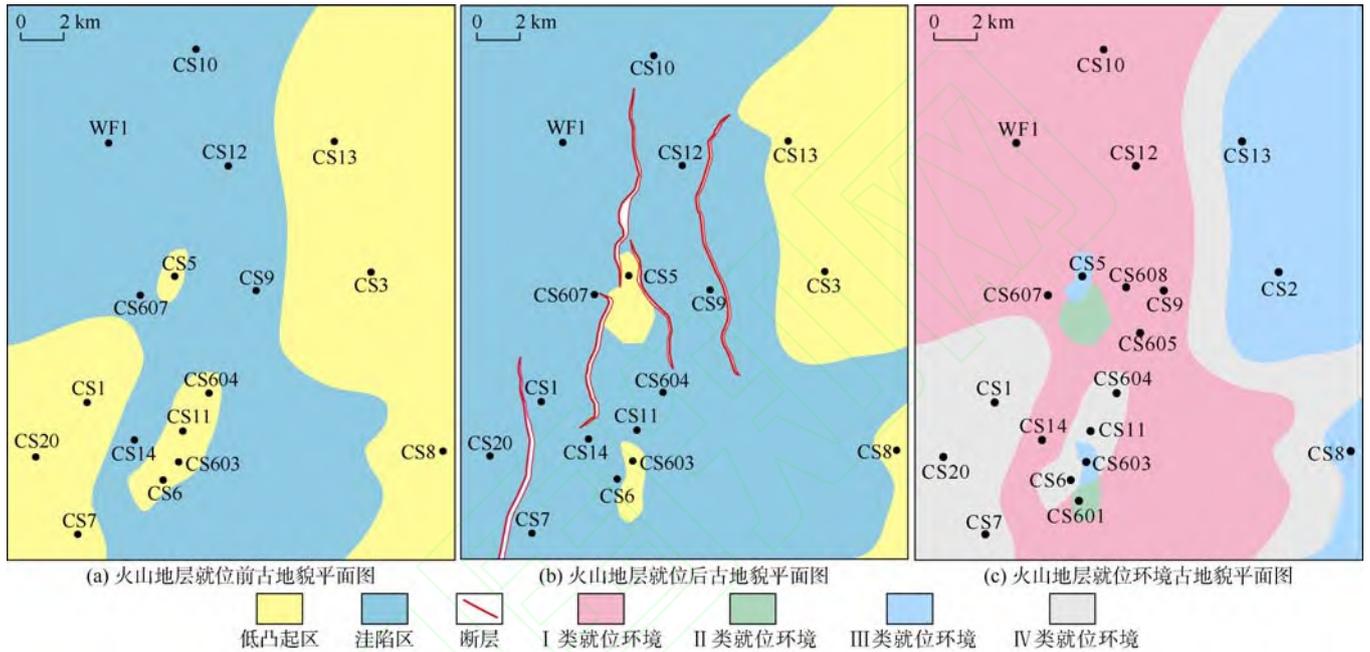


图 3 松辽盆地王府断陷火石岭组流纹质火山地层就位前后古地貌及就位环境平面图

## 3 储集层发育模式

### 3.1 储集层分布特征

测井解释结果统计显示，I 类就位环境的高孔隙度地层占比高（峰值大于 5% 的井占 86%），孔隙度分布以正态和偏右正态型为主（见图 4a），有利于储集层发育；II 类就位环境的火山地层在王府断陷分布较少、钻井揭示少；III 类和 IV 类就位环境高孔隙度地层占比低（峰值大于 5% 的井仅占 25%），孔隙度分布形态为偏左正态型，III 类就位环境略好于 IV 类，部分区域可发育好储集层（如 CS13 井孔隙度峰值高达 9%），IV 类就位环境不利于储集层发育（见图 4c、4d）。本文重点对 I 类和 III 类就位环境储集层进行研究。

### 3.2 储集层分布模式

I 类就位环境的储集层分布模式为“下好上差”，即下部储集层较发育、储集空间类型多样、孔隙度和

渗透率相对高。以 CS14 井为例，岩性以流纹质角砾熔岩为主，气孔、裂缝和溶蚀孔发育，气孔面孔率可达 8.5%，占孔隙度的 70%。取心段显示岩石组分整体没有明显的差别，但气孔只发育在 2 996.2~3 006.0 m 井段，气孔形状呈椭圆状、直径 1~2 cm，离散状分布。实测孔隙度和渗透率资料显示下部为高孔高渗（考虑到孔渗测试结果未包括大孔隙，其测试值往往小于实际值），上部为中低孔中低渗（见图 5）。这种特殊的储集层分布模式表明大套就位于洼陷区的火山地层下部可能发育优质储集层。

III 类就位环境的储集层分布模式为“上好下差”，即上部储集空间发育且储集层物性好，与 I 类就位环境的模式正好相反。以 CS13 井为例，熔岩流上部（2 228~2 240 m）发育丰富的溶蚀孔，包括粒内溶蚀孔、基质溶蚀孔和气孔溶蚀扩大孔（洞），此外还发育丰富的微裂缝（缝宽 0.2 mm、充填程度 10%），成像

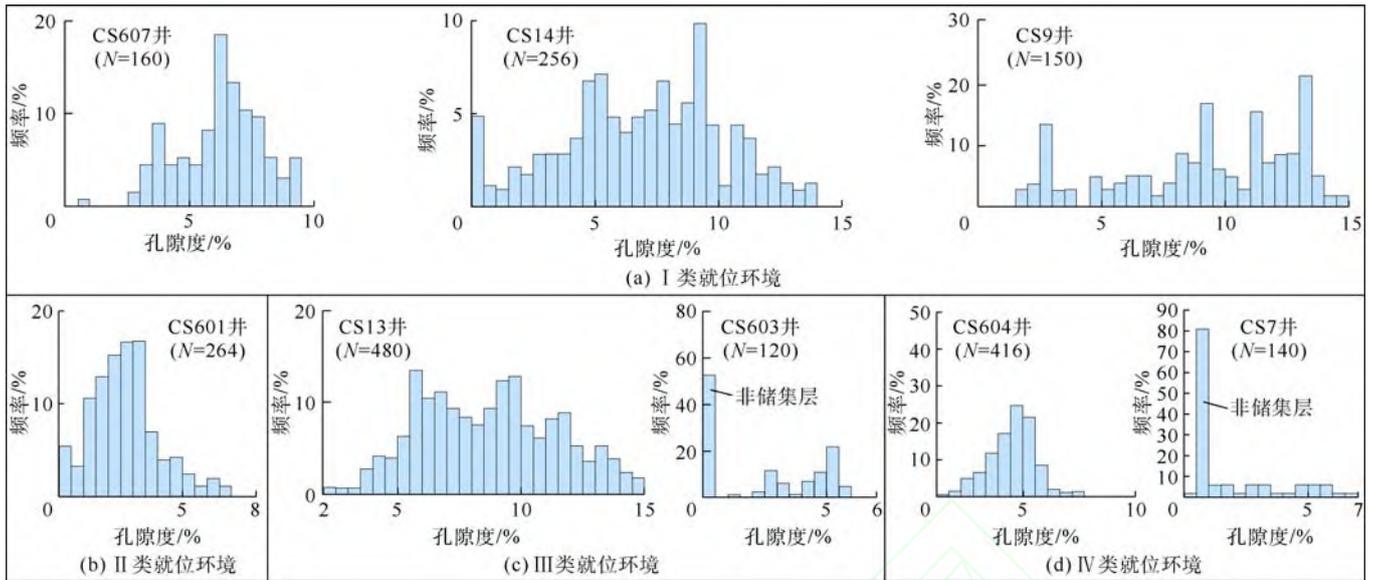


图4 松辽盆地王府断陷火石岭组流纹质火山地层就位环境类型与储集层物性关系图 (N—样品数)

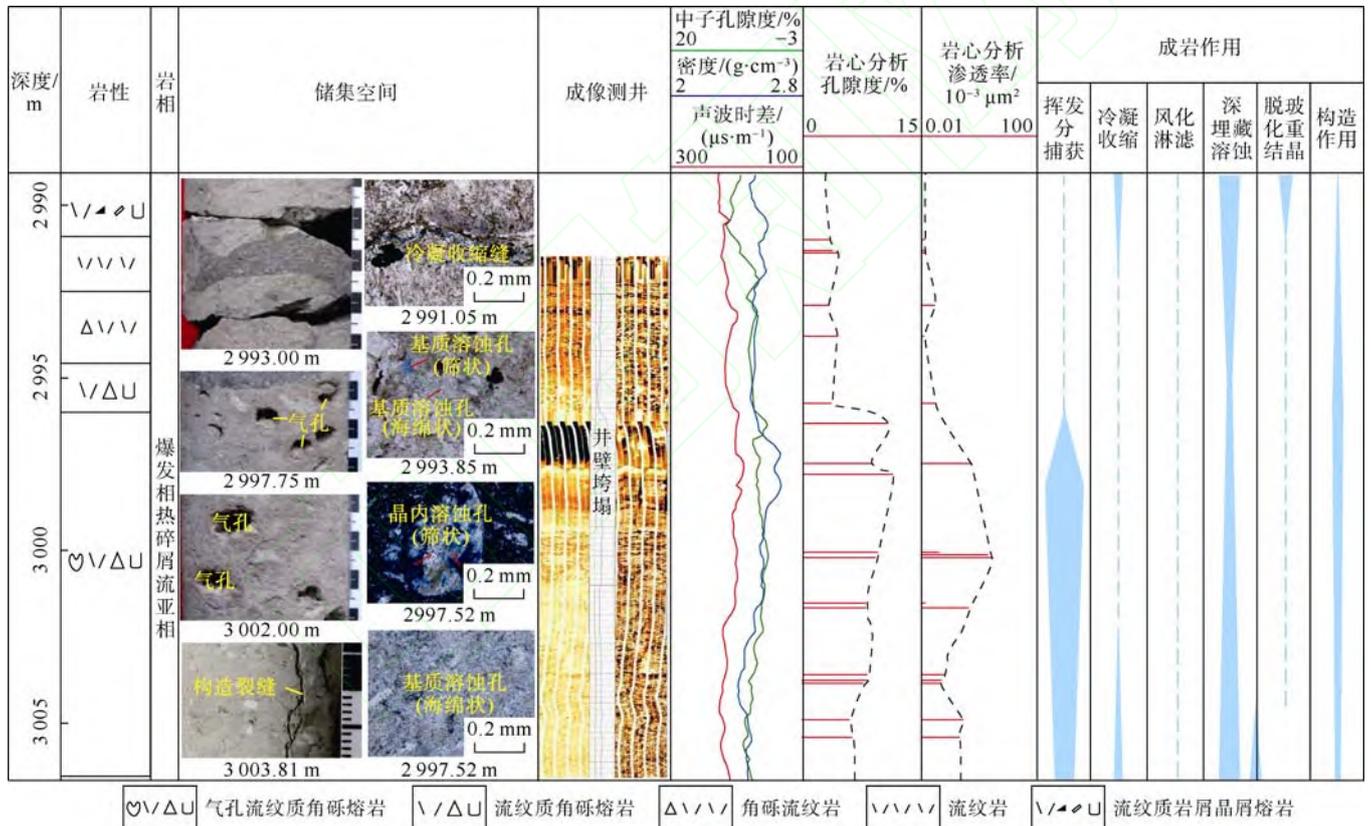


图5 松辽盆地王府断陷火石岭组I类就位环境火山地层储集层分布模式 (CS14井)

测井静态图像表现为中低阻、动态图像表现为不规则团块状；熔岩流下部(2240~2249 m)成像测井静态图像表现为中高阻、动态图像表现为斑状，测井解释孔隙度和渗透率显示上部储集层物性好于下部(见图6)。这种分布模式表明就位于低凸起区的大套火山地层上部可能发育优质储集层。

### 4 储集层主控因素

储集空间类型及分布受成岩作用控制，而成岩作用的发生又受就位环境的控制。本文利用岩心、薄片资料对I类和III类就位环境的成岩作用进行研究，分析储集层发育主控因素，以期对火山储集层刻画提供依据。

### 4.1 挥发分捕获作用

钻井揭示本区挥发分捕获作用在 I 类和 III 类就位环境中表现出不同的分布特征。I 类就位环境的熔浆在流经下伏湿环境区域时，挤压和烘烤作用使湿环境中的水排出成为挥发分，当水与熔浆达到一定比例时，挥发分便会被熔浆捕获形成气孔，因此气孔只发育于底部，形成“下好上差”的储集层分布模式。III 类就位环境的气孔在熔浆流动过程中会上升、膨胀、合并，造成熔岩流上部气孔发育、下部致密，且顶部气孔带通常不超过 15 m<sup>[2]</sup>，形成“上好下差”的储集层分布模式（见图 7）。

表 1 火山地层充填环境类型及储集层发育主控因素

井号	就位环境类型	主要储集空间类型	储集层发育主控因素
CS607	I 类	基质/晶内溶蚀孔 冷凝收缩缝	深埋藏溶蚀 熔浆淬火
CS14	I 类	原生气孔 基质/晶内溶蚀孔 冷凝收缩缝	挥发分捕获 深埋藏溶蚀 熔浆淬火
CS13	III 类	原生气孔 溶蚀孔洞 溶蚀缝	挥发分捕获 风化、淋滤 风化、构造改造

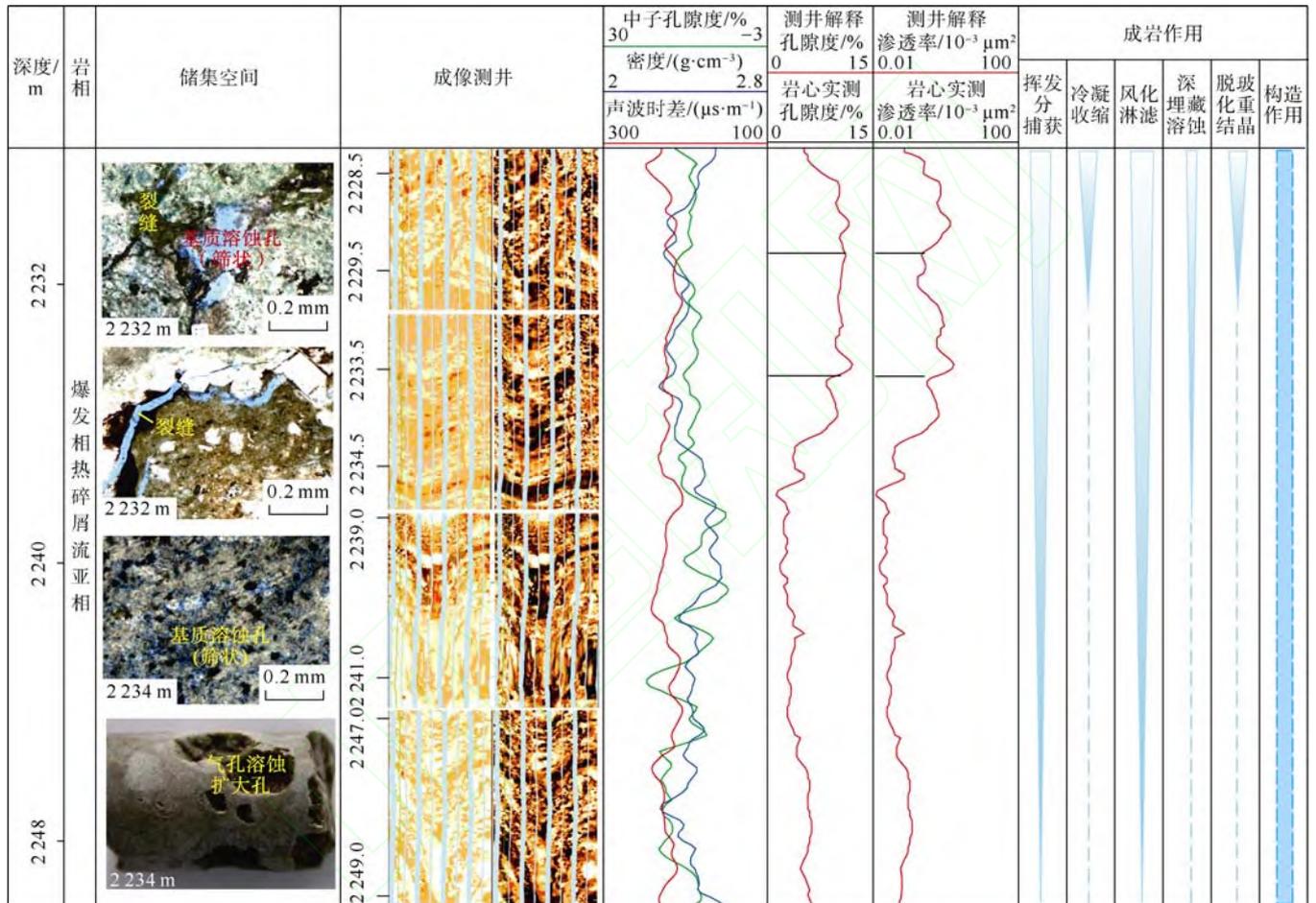


图 6 松辽盆地王府断陷火石岭组 III 类就位环境火山地层储集层分布模式 (CS13 井, 流纹质角砾熔岩)

### 4.2 熔浆淬火作用

钻井揭示该类成岩作用主要发育在 I 类就位环境的火山地层中。当熔浆与洼陷区水体接触时会发生熔浆淬火作用，产生冷凝收缩缝，形成“下好上差”的储集层分布模式（见图 7）。蓄水量与熔浆体积的比值越大，形成冷凝收缩缝的岩层厚度越大。受湖盆水体深度的限制，就位在 I 类就位环境的熔浆顶部可能出露于水面之上，其底部和前缘淬火厚度更大，产生更为丰富的冷凝收缩缝。

### 4.3 风化淋滤作用

钻井揭示风化淋滤作用主要发生于 III 类就位环境的火山地层中。CS13 井流纹质火山地层从就位后到登娄库组沉积覆盖结束均位于低凸起区，根据沙河子组沉积期和营城组沉积期处于湿热环境推算火山地层经受约 35 Ma 的风化剥蚀和淋蚀。依照风化壳层结构的特征<sup>[4]</sup>，在 CS13 井识别出水解带和淋蚀带，其中水解带分布在 2 222~2 228 m 井段，测井曲线特征为高自然伽马、低电阻、中密度，测井解释孔隙度平均值仅

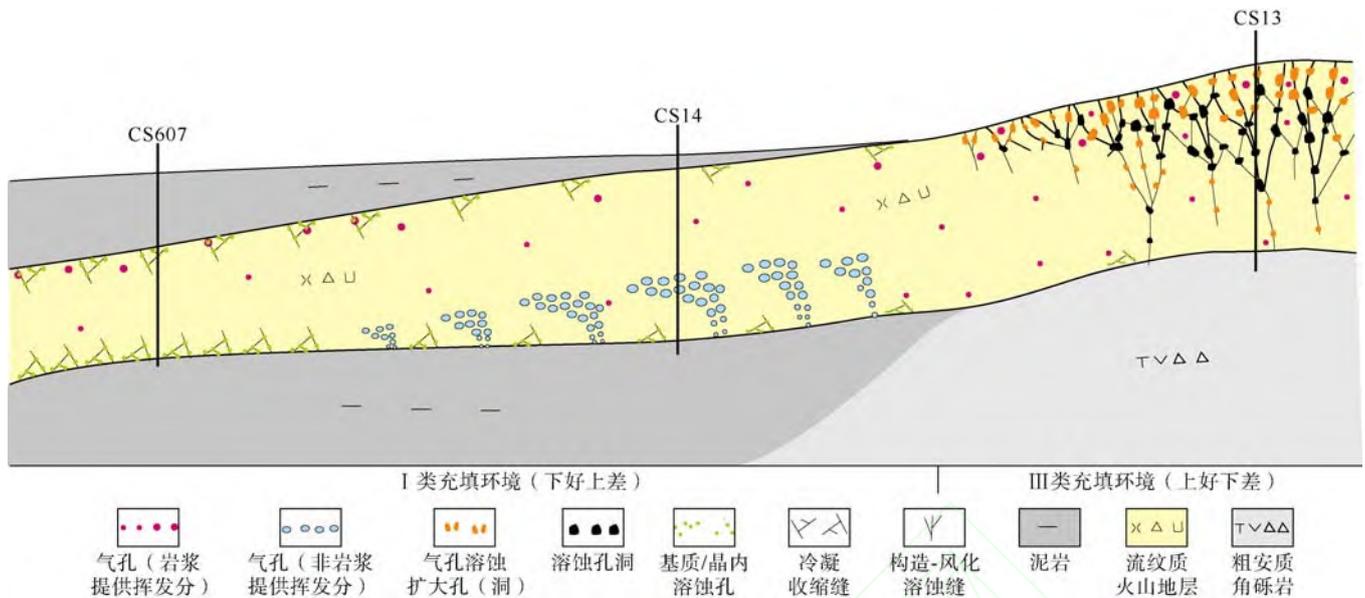


图7 松辽盆地王府断陷火石岭组流纹质火山地层就位环境与储集层发育模式图

有3%；淋蚀带分布在2228~2236 m井段，测井曲线特征为中自然伽马、中电阻和低密度，岩心显示基质、粒内溶蚀孔（洞）发育，实测孔隙度达12.8%（见图6）。淋蚀带之下风化淋滤对孔隙的改造作用不明显。风化淋滤作用是III类就位环境火山地层形成“上好下差”储集层分布模式的关键，这与准噶尔盆地风化壳型储集层分布模式相似<sup>[4-6, 15-16]</sup>。

#### 4.4 深埋藏溶蚀作用

王府断陷为西断东超的构造样式，沙河子组和火石岭组经历了差异块断深埋作用，其有机质演化存在差异，深埋藏溶蚀过程和程度均存在差别。如CS14井可见斜长石溶蚀转化为绿泥石，易溶物质被溶蚀后形成孔隙即晶内筛状溶蚀孔，基质转化为绿泥石过程中见有大团块海绵状基质溶蚀孔产生（见图5）；而CS607井的溶蚀多发育于裂缝附近的基质中，有小团块海绵状基质溶蚀孔形成（见图7）。断陷西侧在营城组沉积末期就进入了生烃阶段，营城组沉积末期—嫩江组沉积末期均有酸性物质排出；中部斜坡区在泉头组沉积早期进入生烃阶段，在嫩江组沉积末期达到最大埋藏温度和深度，在此过程中排出酸性物质；上述酸性物质的排出为深埋藏溶蚀作用提供了必要条件。有研究表明越靠近烃源岩溶蚀作用越强<sup>[17]</sup>，处于I类就位环境的火山地层接受深埋藏溶蚀作用更容易、溶蚀程度更高，处于III类和IV类就位环境的火山地层接受后期深埋藏溶蚀作用则较难、溶蚀程度较低。溶蚀过程通常从火山地层外部向内部递进发生，底部经受更长时间的溶蚀。所以深埋藏溶蚀作用也是I类就位环境火山地层的溶蚀孔在底部更发育、中上部发育较差的主

要因素。

#### 4.5 构造作用

王府断陷火石岭组流纹质火山地层经历了两个阶段的造缝过程：①火石岭组沉积期至营城组沉积末期地层受到张性应力作用的影响；②嫩江组沉积末期发生了大规模的构造反转作用，受到剪切应力作用的影响。岩心揭示构造裂缝可能欠发育，对孔隙度的贡献率有限，但可促进风化淋滤作用和深埋藏溶蚀作用的发生。如地表水可沿着裂缝向下渗透至更深的部位，增大溶蚀区域，并随着溶蚀作用的加强使孤立的原生孔隙连通性变好，提高储集层充注流体的效率<sup>[18-19]</sup>。因此构造作用对III类就位环境火山地层的储集层分布模式具有重要影响。

## 5 结论

松辽盆地王府断陷火石岭组流纹质火山地层就位环境可划分为4类：就位前洼陷-就位后洼陷（I类）、就位前洼陷-就位后低凸起（II类）、就位前低凸起-就位后低凸起（III类）和就位前低凸起-就位后洼陷（IV类）。处于I类就位环境的火山地层具有“下好上差”的储集层分布模式，该模式主要受挥发分捕获（含非熔浆挥发分）、熔浆淬灭和深埋藏溶蚀作用的控制。处于III类就位环境的火山地层具有“上好下差”的储集层分布模式，该模式主要受风化淋滤和挥发分捕获（熔浆自身的挥发分）作用的控制。综合分析，I类就位环境的火山地层下部和III类就位环境的火山地层上部均是有利的勘探目标，IV类就位环境的火山地层可能不是有利的勘探目标。

## 参考文献:

- [1] 黄玉龙, 单俊峰, 边伟华, 等. 辽河拗陷中性火成岩相分类及储集意义[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(6): 671-680.  
HUANG Yulong, SHAN Junfeng, BIAN Weihua, et al. Facies classification and reservoir significance of the Cenozoic intermediate and mafic igneous rocks in Liaohe depression, East China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(6): 671-680.
- [2] TANG H, CRYTON P, GAO Y, et al. Types and characteristics of volcanostratigraphic boundaries and their oil-gas reservoir significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(1): 163-174.
- [3] 侯连华, 邹才能, 刘磊, 等. 新疆北部石炭系火山岩风化壳油气地质条件[J]. 石油学报, 2012, 33(4): 533-540.  
HOU Lianhua, ZOU Caineng, LIU Lei, et al. Geologic essential elements for hydrocarbon accumulation within Carboniferous volcanic weathered crusts in Northern Xinjiang, China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(4): 533-540.
- [4] 侯连华, 罗霞, 王京红, 等. 火山岩风化壳及油气地质意义: 以新疆北部石炭系火山岩风化壳为例[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(3): 257-265.  
HOU Lianhua, LUO Xia, WANG Jinghong, et al. Weathered volcanic crust and its petroleum geologic significance: A case study of the Carboniferous volcanic crust in northern Xinjiang[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(3): 257-265.
- [5] 邹才能, 侯连华, 陶士振, 等. 新疆北部石炭系大型火山岩风化体结构与地层油气成藏机制[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(11): 1613-1626.  
ZOU Caineng, HOU Lianhua, TAO Shizhen, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism and structure of largescale volcanic weathering crust of the Carboniferous in Northern Xinjiang, China[J]. SCIENCE CHINA Earth Sciences, 2012, 55(2): 221-235.
- [6] 陈振岩, 仇劲涛, 王璞珺, 等. 主成盆期火山岩与油气成藏关系探讨[J]. 沉积学报, 2011, 29(4): 798-808.  
CHEN Zhenyan, QIU Jintao, WANG Pujun, et al. Relationship between volcanic rocks and hydrocarbon accumulation during dominant period of basin formation in Liaohe depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(4): 798-808.
- [7] 王璞珺, 张功成, 蒙启安, 等. 地震火山地层学及其在我国火山岩盆地中的应用[J]. 地球物理学报, 2011, 54(2): 597-610.  
WANG Pujun, ZHANG Gongcheng, MENG Qi'an, et al. Applications of seismic volcanostratigraphy to the volcanic rifted basins of China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(2): 597-610.
- [8] 赵文智, 邹才能, 李建忠, 等. 中国陆上东、西部地区火山岩成藏比较研究与意义[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(1): 1-11.  
ZHAO Wenzhi, ZOU Caineng, LI Jianzhong, 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.
- [9] 冯子辉, 印长海, 刘家军, 等. 中国东部原位火山岩油气藏的形成机制: 以松辽盆地徐深气田为例[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(10): 2221-2237.  
FENG Zihui, YIN Changhai, LIU Jiajun, et al. Formation mechanism of in-situ volcanic reservoirs in eastern China: A case study from Xushen gas field in Songliao basin[J]. SCIENCE CHINA Earth Sciences, 2014, 57(12): 2998-3014
- [10] 唐华风, 庞彦明, 边伟华, 等. 松辽盆地白垩系营城组火山机构储层定量分析[J]. 石油学报, 2008, 29(6): 841-845.  
TANG Huafeng, PANG Yanming, BIAN Weihua, et al. Quantitative analysis on reservoirs in volcanic edifice of early Cretaceous Yingcheng formation in Songliao basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(6): 841-845.
- [11] WANG P, CHEN S. Cretaceous volcanic reservoirs and their exploration in the Songliao basin, northeast China[J]. AAPG Bulletin, 2015, 99(3): 499-523.
- [12] 赵文智, 邹才能, 冯志强, 等. 松辽盆地深层火山岩气藏地质特征及评价技术[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(2): 129-142.  
ZHAO Wenzhi, ZOU Caineng, FENG Zhiqiang, et al. Geological features and evaluation techniques of deep-seated volcanic gas reservoirs, Songliao basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(2): 129-142.
- [13] 唐华风, 李瑞磊, 吴艳辉, 等. 火山地层结构特征及其对波阻抗反演的约束[J]. 地球物理学报, 2011, 54(2): 620-627.  
TANG Huafeng, LI Ruilei, WU Yanhui, et al. Textural characteristics of volcanic strata and its constraint to impedance inversion[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(2): 620-627.
- [14] SRUOGA P, RUBINSTEIN N. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuquén basins, Argentina[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(1): 115-129.
- [15] 杨辉, 张研, 邹才能, 等. 松辽盆地深层火山岩天然气勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(3): 274-281.  
YANG Hui, ZHANG Yan, ZOU Caineng, et al. Exploration scheme of gas in deep-seated volcanic rocks in Songliao basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(3): 274-281.
- [16] 王仁冲, 徐怀民, 邵雨, 等. 准噶尔盆地东地区石炭系火山岩储层特征[J]. 石油学报, 2008, 29(3): 350-355.  
WANG Renchong, XU Huaimin, SHAO Yu, et al. Reservoir characteristics of carboniferous volcanic rocks in Ludong area of Junggar basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(3): 350-355.
- [17] 朱筱敏, 王英国, 钟大康, 等. 济阳拗陷近系储层孔隙类型与次生孔隙成因[J]. 地质学报, 2007, 81(2): 197-204.  
ZHU Xiaomin, WANG Yingguo, ZHONG Dakang, et al. Pore types and secondary pore evolution of Paleogene reservoir in the Jiyang depression [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(2): 197-204.
- [18] 王京红, 邹才能, 靳久强, 等. 火成岩储集层裂缝特征及成缝控制因素[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(6): 708-715.  
WANG Jinghong, ZOU Caineng, JIN Jiuqiang, et al. Characteristics and controlling factors of fractures in igneous rock reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(6): 708-715.
- [19] 侯连华, 邹才能, 匡立春, 等. 准噶尔盆地西北缘克百断裂带石炭系油气成藏控制因素新认识[J]. 石油学报, 2009, 30(4): 513-517.  
HOU Lianhua, ZOU Caineng, KUANG Lichun, et al. Discussion on controlling factors for Carboniferous hydrocarbon accumulation in the Ke-Bai fractured zone of the northwestern margin in Junggar basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(4): 513-517.

第一作者简介: 唐华风(1979-), 男, 四川泸县人, 博士, 吉林大学副教授, 主要从事火山地层和火山岩储集层综合研究。地址: 吉林省长春市建设街 2199 号, 吉林大学地球科学学院, 邮政编码: 130061。E-mail: tanghf@jlu.edu.cn

收稿日期: 2015-04-15 修回日期: 2016-04-22

(编辑 王晖)