

陆上与水下喷发火山岩的区别及其对储层的影响 ——以松辽盆地营城组为例

张艳¹, 舒萍², 王璞珺¹, 郑常青¹, 单玄龙¹

1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061

2. 大庆油田勘探开发研究院, 黑龙江大庆 163712

摘要: 陆上与水下喷发火山岩在岩性、结构构造、蚀变特征、产状、与下伏地层接触关系、孔隙和裂缝发育特点等6方面有显著区别。陆上喷发火山岩包括各种熔岩、碎屑熔岩、火山碎屑岩和沉火山碎屑岩; 熔岩流纹构造发育, 火山碎屑岩除发育常见层理外, 还可见反丘构造; 同生蚀变弱; 与下伏地层多呈角度不整合接触, 古风化壳常见, 常含有陆相植物; 主要储集空间为原生孔隙和冷凝收缩节理缝、次生溶蚀孔、矿物解理缝和构造裂缝。水下喷发火山岩多为具玻璃质结构的熔岩和含晶屑玻璃屑的层/沉凝灰岩、膨润土/伊利石岩/蒙脱石岩/沸石岩; 常具枕状、球状构造, 水平层理、粒序层理、变形层理; 蚀变强烈; 水下熔岩呈穹隆状、透镜状, 凝灰岩为层状, 近火山口的膨润土/伊利石岩/蒙脱石岩/沸石岩呈松散团窝状并夹有火山弹; 与下伏地层呈整合、假整合或侵蚀接触; 原生气孔、杏仁体内溶蚀孔和炸裂纹, 岩球岩枕间孔和粒间孔、基质和斑晶蚀变孔缝, 后期构造缝是主要储集空间。松辽盆地营城组陆上、水下喷发火山岩均有发育。其陆上喷发火山岩的典型标志为流纹构造、柱状节理, 含炭化木/硅化木, 与下伏地层呈角度不整合接触。水下喷发火山岩典型标志为珍珠岩、玻璃质结构、枕状构造、纹层状凝灰岩和膨润土。松辽盆地营城组的储层火山岩以陆上喷发火山岩为主; 水下喷发火山岩中侵入相内带亚相珍珠岩为优质储层。

关键词: 松辽盆地; 营城组; 储集空间; 陆上喷发火山岩; 水下喷发火山岩

中图分类号: P588.14; P618.13 文献标识码: A 文章编号: 1671-5888(2007)06-1259-07

Comparison between Subaerial and Subaqueous Volcanic Rocks and the Reservoir Significance—Taking Yingcheng Formation in Songliao Basin as Example

ZHANG Yan^{1,2}, SHU Ping², WANG Pu-jun¹, ZHENG Chang-qing¹, SHAN Xuan-long¹

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

2. Daqing Exploration & Development Institute, Daqing, Heilongjiang 163712, China

Abstract: The subaerial and subaqueous volcanic rocks have significant differences in lithology, texture and structure, alteration, occurrence, contact with underlying strata, pore and fissure development. Subaerial volcanic rocks mainly comprise lavas, clastic lava, pyroclastic rocks and sedimentary pyroclastic rocks. Subaerial lava has rhyolitic structure. Bedding structure and few reverse hummocky structure formed in pyroclastic rocks. The subaerial volcanic rocks underwent weak alteration and unconformity

收稿日期: 2007-07-10

基金项目: 国家“973”项目(2006CB701403)

作者简介: 张艳(1974-), 女, 黑龙江勃利人, 讲师, 博士, 主要从事油气地质研究, Tel: 0431-88502620, E-mail: zhangyan@email.jlu.edu.cn

通讯联系人: 王璞珺(1959-), 男, 黑龙江绥滨人, 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.

with underling strata. Ancient weathering crusts and continental plant can be found. Main reservoir spaces in subaerial volcanic rocks are primary pore, condensing shrinkage joint, secondary dissolution pore, cleavage fissure in mineral and structural fracture. Subaqueous volcanic rocks mainly comprise glassy lava, crystal-vitric bedded/sedimentary tuff, bentonite/illite/montmorillonite/zeolite. Subaqueous volcanic rocks have pillow or orbicular structure, horizontal bedding, graded bedding, strong alteration. Subaqueous lava appears domed, lenticular shape, tuff appears stratiform shape, bentonite/illite/montmorillonite/zeolite near crater appears loose conglomeration with volcanic bombs. Contact relation of subaqueous volcanic rocks and underlying strata is conformity, disconformity or erosion. Main reservoir spaces of subaqueous volcanic rocks are primary pore, dissolution holes in amygdaloid body, explosive fracture, intergranular pores, erosion pore and fracture in matrix and phenocrysts and structural fracture. Both subaerial and subaqueous volcanic rocks can be found in Yingcheng Formation of Songliao Basin. Typical characteristics of subaerial volcanic rocks include rhyolitic structure, columnar joint, carbonized wood / silicified wood, angular unconformity contact with underlying strata. Typical features of subaqueous volcanic rocks include perlite with glassy structure and pillow structure, lamellar tuff, bentonite. Most of volcanic reservoirs in Yingcheng Formation of Songliao Basin are subaerial volcanic reservoirs. The inner subfacies of extrusive facies of subaqueous volcanic rocks are good reservoirs.

Key words: Songliao Basin; Yingcheng Formation; reservoirs; subaerial volcanic rocks; subaqueous volcanic rocks

0 引言

随着油气勘探的深入,国内外相继发现了一些火山岩油气藏^[1~4],火山岩储层逐渐引起了人们的注意。目前对火山岩储层的研究集中在火山岩储集空间的类型^[5],储层物性^[6,7],储层岩性的识别^[8,9],储层岩相的研究^[10,12]等几方面。这些研究都是为了更好地了解火山岩储层的形成特点、分布规律、储集特性,以便为火山岩油气藏的勘探开发提供依据。

按火山活动时的地理环境,将火山岩分为陆上喷发火山岩和 underwater 喷发火山岩^[13~16]。在此基础上,按火山岩堆积、保存时的环境,又可将陆上喷发火山岩分为:陆上喷发陆上保存火山岩,陆上喷发水下保存火山岩。水下喷发火山岩分为:水下喷发陆上保存火山岩,水下喷发水下保存火山岩。

本次研究侧重于火山岩堆积、保存时所处环境对火山岩的影响,因而按火山岩保存时的环境将陆上喷发陆上保存火山岩、水下喷发陆上保存火山岩归为陆上喷发火山岩。将陆上喷发水下保存火山岩、水下喷发水下保存火山岩归为水下喷发火山岩,并将探讨陆上、水下喷发火山岩的区别,营城组陆上、水下喷发火山岩的特点及其对储层的影响。

1 陆上与水下喷发火山岩的区别

地球上 3/4 的火山活动是在水下发生的,一般是很直接观测到的,近些年来已进行的一些实验及观测,可以更好地了解水下火山岩的喷发情况^[17,18]。陆上与水下喷发火山岩喷发或保存时的介质(水和空气)不同,是二者产生区别的最主要原因。与在空气中喷出或保存相比,水下火山岩在水中喷出或在水中保存时,水的作用及影响主要表现在岩性、结构构造、蚀变特征、产状、与下伏地层的接触关系、孔隙和裂缝发育特点等方面。

岩性 陆上、水下火山喷发岩均含有火山碎屑岩和火山熔岩。水下喷发火山熔岩多具玻璃质结构,水下喷发火山碎屑岩多为含晶屑玻璃屑的层/沉凝灰岩,常见到膨润土/伊利石岩/蒙脱石岩/沸石岩。陆上喷发火山岩包括各种熔岩、碎屑熔岩、火山碎屑岩和沉火山碎屑岩。

结构构造 水底喷发的熔岩或陆地上熔岩流入水中时,水吸收掉大量岩浆的热量,使岩浆快速冷却,熔岩流表面形成韧性的固体外壳,随着熔岩流内部压力增大,外壳破裂,就会像挤牙膏一样,挤出新的熔岩,随后再次形成外壳。如此循环往复,形成外形浑圆,状似枕头的枕状熔岩,水下喷发的熔岩常具枕状构造、球状构造。

水体比空气的密度及粘度大, 碎屑在水中沉积速度比空气慢, 因此, 易于形成粒序层理、水平层理和变形层理。这类火山碎屑岩一般很少混有正常碎屑物质(砾石、砂粒)。胶结物主要为火山灰的次生分解物及水溶液化学沉淀物(碳酸盐、粘土、蛋白石等)。其中层状凝灰岩最常见, 广泛分布于湖成和海成保存岩中。

陆上喷发火山熔岩流纹构造发育, 常发育柱状节理, 柱状节理通常为陆上火山喷发岩的特征, 但水下也可见有柱状节理, 一般含有气孔或与水强烈作用(图版 A)。火山碎屑岩除发育常见层理外还可见反丘构造、变形层理(图版 B、C)。

蚀变 水下火山喷发岩普遍发生蚀变, 蚀变强烈, 多见钠长石化。热的熔岩自水底喷发或由陆地流入水中时, 水遇热膨胀气化; 当水体为海水时, 海水中钠含量高, 在气化—热液作用下, 发生钠长石化, Na_2O 高者为细碧岩—石英角斑岩系, Na_2O 低者为变拉斑玄武岩—变流纹岩系。陆上火山喷发岩除区域变质、蚀变区外, 同生蚀变弱。

产状 水下熔岩呈穹隆状、透镜状, 凝灰岩为层状, 近火山口的膨润土/伊利石岩/蒙脱石岩/沸石岩呈松散团窝状并夹有火山弹。

与下伏地层接触关系 水下火山喷发岩常与下伏地层呈整合、假整合或侵蚀接触, 风化壳不发育。陆上喷发火山岩受原始火山斜坡的影响, 原始倾角大, 常与下伏地层呈不整合接触, 并常见古风化壳及冲刷洼坑, 常含有陆相植物。

孔隙和裂缝 水下喷发火山岩的主要储集空间为原生气孔、杏仁体内孔和炸裂纹, 岩球岩枕间孔和粒间孔, 基质和斑晶蚀变孔缝, 后期构造缝。陆上喷发火山岩主要储集空间为原生孔隙和冷凝收缩节理缝、次生溶蚀孔、矿物解理缝和构造裂缝。

另外, 水中的含氧量远低于空气中的氧含量, 因而陆上喷发火山岩常具氧化壳, 而水下喷发火山岩一般不具有氧化壳。陆上喷发火山岩粒度较粗, 浮岩粒度是同保存其它岩屑的 2~3 倍, 水下喷发火山岩岩层顶部和过渡相带岩石的颗粒较细, 浮岩粒度是同保存其它岩屑的 5~10 倍^[19]。

2 陆上与水下喷发火山岩的特点

松辽盆地营城组火山岩既有陆上喷发火山岩也有水下火山喷发岩。陆上火山喷发岩主要发育陆上喷发陆上保存类型的火山岩。水下喷发火山岩包括

陆上喷发水下保存和水下喷发水下保存两种火山岩。

2.1 陆上喷发火山岩特征

陆上喷发火山岩在本区主要为陆上喷发陆上保存。陆上喷发火山口岩相对易于观察、研究, 前人已做了大量的工作。

2.1.1 岩性

松辽盆地营城组一段陆上喷发火山岩从基性—酸性均有分布, 以中酸性为主。主要的岩石类型有晶屑凝灰岩, 流纹岩, 玄武岩, 火山碎屑熔岩。其中流纹岩类又包括细晶流纹岩、气孔流纹岩、石泡流纹岩、具流纹构造的流纹岩和变形流纹构造的流纹岩。火山碎屑熔岩类包括灰白色凝灰质角砾熔岩、玄武质/安山质角砾熔岩、玄武质集块熔岩。营城组二段可见局部熔浆胶结的沉火山碎屑岩。营城组三段的主要岩石类型为玄武岩, 含火山弹的凝灰岩, 凝灰角砾岩, 流纹岩, 凝灰质砂砾岩, 火山碎屑熔岩类。其中流纹岩类包括气孔流纹岩、球粒流纹岩和柱状节理流纹岩, 玄武岩包括致密块状玄武岩、气孔杏仁玄武岩和含孔雀石铜矿化的玄武岩, 火山碎屑熔岩类包括玄武质角砾熔岩。

2.1.2 岩相

营一段陆上喷发火山岩岩相主要有爆发相, 包括空落亚相、热基浪亚相、热碎屑流亚相; 喷溢相, 包括下部亚相、中部亚相、上部亚相。营二段主要为火山保存相含外碎屑火山保存亚相。营三段主要为喷溢相, 包括下部亚相、中部亚相、上部亚相; 爆发相, 多见空落亚相、热碎屑流亚相; 火山保存相含外碎屑火山保存亚相。

2.1.3 结构构造

营城组火山岩爆发相空落亚相的结构构造主要为火山集块结构, 火山角砾结构, 火山凝灰结构(玻屑、晶屑、浆屑、岩屑结构); 热基浪亚相为层理构造, 玻屑、晶屑、浆屑、岩屑结构; 热碎屑流亚相为似流纹构造, 熔结凝灰结构, 玻屑、晶屑、浆屑、岩屑结构。喷溢相下部亚相结构构造主要为块状构造, 斑状结构, 角砾结构, 玻璃质结构; 中部亚相为流纹构造, 块状构造, 斑状结构, 球粒结构; 上部亚相为块状构造, 气孔(杏仁)构造, 石泡构造, 斑状结构, 隐晶质、细晶质结构, 球粒结构。火山保存相含外碎屑火山保存亚相为块状构造, 陆缘碎屑结构, 交错层理, 槽状层理, 粒序层理发育。

2.1.4 典型标志

角度不整合、风化壳 营城组一段底部不整合于基底二叠系之上,基底顶面为一长期暴露面(风化面)(图版 D)。

与植物共生 营城组一段、三段以火山岩为主,二段主要为陆相沉积岩。火山岩与陆相沉积岩共生,且可见到植物化石及硅化木,薄片中有炭化木(图版 E)。

流纹构造、柱状节理 营城组陆上喷发火山岩普遍见有流纹构造,柱状节理发育。

2.2 水下喷发火山岩特征

水下喷发火山岩在本区主要为陆上喷发水下保存及水下喷发水下保存两种类型。其中陆上喷发水下保存主要指陆上喷发的火山碎屑岩在水下得以保存的层状凝灰岩。水下喷发水下保存主要是指火山岩从火山通道侵出后,遇水快速冷却而形成的珍珠岩(枕状岩球)。

2.2.1 岩性

松辽盆地营城组一段水下喷发火山岩有珍珠岩,层状凝灰岩。营城组二段见有层状凝灰岩。营城组三段可见珍珠岩,层状凝灰岩。

2.2.2 岩相

营一段水下喷发火山岩岩相主要有侵出相中带亚相、内带亚相;火山爆发相空落亚相。营城组二段岩相主要为火山爆发相空落亚相。营城组三段侵出相中带—内带亚相;火山爆发相空落亚相。

2.2.3 结构构造

营城组火山岩侵出相内带亚相为珍珠构造,枕状、球状构造,斑状结构,玻璃质结构;中带亚相为珍珠构造,块状构造,斑状结构,玻璃质结构。火山爆发相空落亚相的层状凝灰岩水平层理发育,可见粒度粗细变化。

2.2.4 典型标志

纹层状凝灰岩 具有明显的层理,主要呈层状产出的火山碎屑岩多数是由水底火山喷出的碎屑物质、部分是由陆上火山喷出的碎屑物质在水体中的保存物固结而成。松辽盆地营城组层状凝灰岩主要为陆上喷发的细粒碎屑沉积在水中得以保存(图版 F、G)。

枕状珍珠岩岩球 松辽盆地营城组枕状珍珠岩岩球为酸性熔岩自火山通道侵出后,遇水快速冷却形成,围绕岩球岩枕边缘发生同生蚀变(图版 H)。

膨润土 营城组底部与二叠系的接触界面是灰

白色膨润土与灰褐色蚀变安山岩过渡带。膨润土的成因可能是细粒级火山灰屑、火山玻屑落入水中,先期注入水中的熔岩或碎屑岩散发的热量使水体温度升高,在热液的作用下发生蚀变形成的(图版 I)。

3 陆上与水下喷发火山岩对储集空间的影响

目前松辽盆地营城组喷发岩为主要的火山岩储层,储集空间类型按成因可分为原生孔隙,包括原生气孔、石泡空腔孔和杏仁体内孔等;次生孔隙,包括斑晶溶蚀孔、基质内溶蚀孔和断层角砾岩中角砾间孔;裂缝,包括构造裂缝、原生收缩裂缝、层间收缩缝和层间炸裂缝等²⁹①。

3.1 陆上喷发火山岩的储集空间

松辽盆地营城组陆上喷发火山岩主要储集空间包括原生气孔、石泡空腔孔、杏仁体内溶蚀孔、晶内溶蚀孔、基质内溶蚀孔、收缩缝、构造裂缝、层间炸裂缝等。

熔岩原生孔隙 岩浆自高温高压的地下喷出到地表的常温常压下时,由于压力降低,气体自熔岩中逸出,形成气孔构造。熔岩表面凝固时,气体逸出、体积缩小而产生具有空腔的多层同心圆球体——石泡空腔孔。早期形成的气孔被次生矿物充填形成杏仁体,当组成杏仁体矿物发生溶蚀时,其形成的杏仁体内溶蚀孔可作为储集空间(图版 J、K—N)。

熔岩次生孔隙 成岩后期,在热液或流体作用下火山岩中的斑晶被溶蚀产生晶内溶蚀孔。火成岩基质常由隐晶质和玻璃质组成,经脱玻化后变成粘土矿物,再经过蚀变形成基质内溶蚀孔。火山爆发过程中,在爆发应力的作用下,岩体中的矿物发生炸裂,形成矿物炸裂缝。矿物沿自身的解理形成微小解理缝(图版 O、P)。

熔岩裂缝 岩浆冷却收缩可形成火山岩收缩缝,常见的有柱状节理,沿岩层层面间的裂缝。火山岩成岩后,由于后期构造应力的作用而形成构造裂缝,有数毫米的微裂缝,也有穿切整个火山岩体的巨型裂缝。火山熔岩流在流动过程中,上部的熔岩先冷凝固结,而下部的熔岩流继续流动,在后续熔岩流或气射作用下,上部的熔岩被炸裂,形成层间炸裂缝。而裂缝内充填物主要为同期的岩汁和期后的热

① 王璞珺,刘万洙,程日辉,等.松辽盆地北部火山岩储层预测和评价.大庆:大庆油田勘探开发研究院,2003.

液, 由于充填物中不断地逸出气体, 使得裂隙内部的气孔发育, 可作为储集空间(图版 Q、R、S)。

碎屑岩储集空间 火山碎屑颗粒落到地表经压实作用成岩后, 其碎屑颗粒间常有残余孔隙, 即粒间孔。火山碎屑岩中较大的火山角砾之间可见角砾间接触缝(图版 T、U)。

3.2 水下喷发火山岩的储集空间

熔岩储集空间 岩浆自火山口涌出后, 遇水快速冷凝收缩, 形成一系列圆形和椭圆形不规则的裂缝, 因形似珍珠, 被称为珍珠岩。大型珍珠岩体内部(侵出相内带亚相)的“岩穹内松散体”由一系列枕状、球状珍珠岩堆砌而成, 球体内部原生环带状裂缝特别发育, 球体之间是成分同珍珠岩的、松散、砂级珍珠岩碎屑。微观和宏观尺度上均发育原生裂缝, 裂缝呈环带状。这些松散体的堆积物骨架坚硬, 其外的含角砾珍珠岩(侵出相中带亚相)和具流纹构造角砾熔岩(侵出相外带亚相)作为坚硬的外壳披覆其上, 起到保护作用, 使得储层物性不会随埋深变差, 可作为优质的储层(图版 H、V、W)。

碎屑岩储集空间 营城组另一种水下喷发火山岩为火山喷出的细粒物质(火山灰)落入水中经压实作用形成, 水平层理发育的层状凝灰岩(火山爆发相空落亚相)。富含水的凝灰岩在压实过程中可保留部分原生晶间孔, 成岩后的改造作用, 可形成次生的晶间溶孔及溶蚀孔^[21, 22]。目前还未在营城组层状凝灰岩中见到晶间孔和晶间溶孔及溶蚀孔储层, 但在显微照片上可见到成岩后构造作用形成的裂缝(图版 X)。

4 结 论

陆上与水下喷发火山岩的区别主要体现在岩性、结构构造、蚀变特征、产状、与下伏地层的接触关系、孔隙和裂缝发育特点等方面。松辽盆地营城组陆上喷发火山岩与水下喷发火山岩主要区别标志为, 陆上喷发火山岩与基底呈角度不整合接触, 风化壳因火山岩活动过程中构造不稳定和火山气射作用的共同影响, 不易完整保存, 见有硅化木、炭化木, 流纹构造、柱状节理。水下喷发火山岩以枕状珍珠岩岩球、层状凝灰岩、膨润土为特征。

松辽盆地营城组喷发岩为主要的火山岩储层, 陆上喷发熔岩储集空间包括原生气孔、石泡空腔孔、杏仁体内溶蚀孔、晶内溶蚀孔、基质内溶蚀孔、收缩缝、构造裂缝、层间炸裂缝等。水下喷发熔岩储集空

间主要为珍珠岩呈环带状原生裂缝, 以侵出相内带亚相为最好。水下碎屑岩储集空间以构造裂缝为主, 但不为好的储层。

参考文献(References):

[1] 顿铁军. 储层研究状况与发展趋向[J]. 西北地质, 1995, 16(2): 1—15.
DUN Tie-jun. Reservoir research and development trend[J]. Northwestern Geology, 1995, 16(2): 1—15.

[2] Maqara Kinji. Volcanic reservoir rocks of northwestern Honshu Island, Japan[J]. Geological Society Special Publications, 2003, 214: 69—81.

[3] Imamura Tetsumi, Annaka Hitoshi. Fracture analysis of the volcanic reservoir in the Minami—Nagaoka gas field, Japan (prediction of effective fractures in highly stressed field)[J]. Petrophysics, 2002 43(2): 116.

[4] 赵澄林, 刘孟慧, 胡爱梅, 等. 特殊油气储层[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 1—5.
ZHAO Cheng-lin, LIU Meng-hui, HU Ai-mei, et al. Special oil and gas reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press 1997: 1—5.

[5] 王金友, 张世奇, 赵俊青, 等. 渤海湾盆地惠民凹陷临商地区火山岩储层特征[J]. 石油实验地质, 2003, 25(3): 264—268.
WANG Jin-you, ZHANG Shi-qi, ZHAO Jun-qing, et al. Characteristics volcanic rock reservoirs in the Linshang area of the Huimin sag[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(3): 264—268.

[6] Sruoga P, Rubinstein Nora, 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, 2004, 132(1): 31—43.

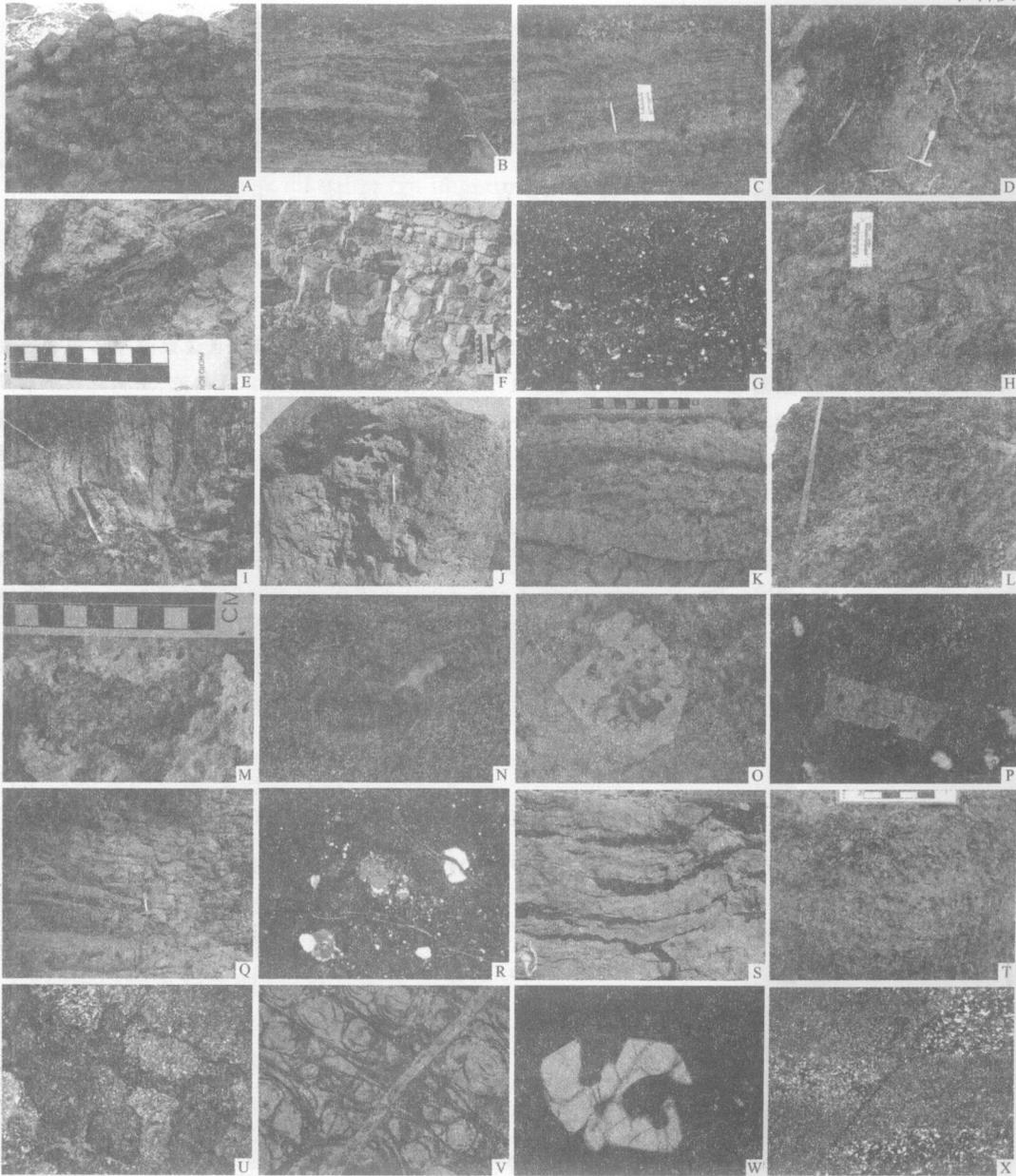
[7] Sruoga Patricia, Rubinstein Nora. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuquén basins, Argentina[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(1): 115—129.

[8] 陈建文, 魏斌, 李长山, 等. 火山岩岩性的测井识别[J]. 地质前缘, 2000, 7(4): 458.
CHEN Jian-wen, WEI Bin, LI Chang-shan, et al. Logging identification technique of volcanic rocks[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(4): 458.

[9] 王璞瑛, 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(3): 6—14.
WANG Pu-ying, ZHENG Chang-qing, SHU Ping, et al. Classification of deep basin volcanic rocks of the Songliao Basin, upper Jurassic—lower Cretaceous, NE

- China[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2007, **26**(3): 6—14.
- [10] 王璞珺, 吴河勇, 庞彦明, 等. 松辽盆地火山岩相: 相序、相模式与储层物性的定量关系[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2006, **36**(5): 805—812.
- WANG Pu-jun, WU He-yong, PANG Yan-ming, et al. Volcanic facies of the Songliao Basin: sequence model and the quantitative relationship with porosity & permeability of the volcanic reservoir[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2006, **36**(5): 805—812.
- [11] 王璞珺, 陈树民, 刘万洙, 等. 松辽盆地火山岩相与火山岩储层的关系[J]. *石油与天然气地质*, 2003, **24**(1): 18—27.
- WANG Pu-jun, CHEN Shu-min, LIU Wan-zhu, et al. Relationship between volcanic facies and volcanic reservoirs in Songliao Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2003, **24**(1): 18—27.
- [12] 王璞珺, 迟元林, 刘万洙, 等. 松辽盆地火山岩相: 类型、特征和储层意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2003, **33**(4): 449—456.
- WANG Pu-jun, CHI Yuan-lin, LIU Wan-zhu, et al. Volcanic facies of the Songliao Basin: classification, characteristics and reservoir significance[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2003, **33**(4): 449—456.
- [13] 邱家骧. 应用岩浆岩岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991: 1—4.
- QIU Jia-xiang. Application of magmatic rocks petrology[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1991: 1—4.
- [14] 邱家骧. 岩浆岩岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1985: 21—22.
- QIU Jia-xiang. Magmatic rocks petrology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985: 21—22.
- [15] 王德滋, 周新民. 火山岩岩石学[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 10—13.
- WANG De-zi, ZHOU Xin-min. Volcanic petrology[M]. Beijing: Science Press, 1982: 10—13.
- [16] 曾广策, 郑和荣, 王方正, 等. 东营凹陷纯西地区第三系火山岩地层划分及火山岩岩相分析[J]. *复式油气田*, 1996(2): 55—58.
- ZHENG Guang-ce, ZHENG He-rong, WANG Fang-zheng, et al. Tertiary volcanic stratigraphy division and volcanic facies analysis in the west Chunhua oilfield, Dongying sag[J]. *Multiple Oil-Gas Field*, 1996(2): 55—58.
- [17] Embley Robert W, Chadwick William W Jr, Baker Edward T, et al. Long-time eruptive activity at a submarine arc volcano[J]. *Nature*, 2006, **441**: 494—497.
- [18] Fox Christopher G, Chadwick William W Jr, Embley Robert W. Direct observation of a submarine volcanic eruption from a sea-floor instrument caught in a lava flow[J]. *Nature*, 2001, **412**: 727—729.
- [19] Cashman Katharine V, Fiske Richard S. Fallout of pyroclastic debris from submarine volcanic eruptions[J]. *Science*, 1991, **253**: 275—280.
- [20] 单玄龙, 迟元林, 万传彪, 等. 火山岩与含油气盆地[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 2002: 116—120.
- SHAN Xuan-long, CHI Yuan-lin, WAN Chuan-biao, et al. Volcanic rocks and oil-bearing basins[M]. Changchun: Jilin Science & Technology Publishing House, 2002: 116—120.
- [21] 李军, 王伟, 王书勋. 青西油田沉凝灰岩储集特征[J]. *新疆石油地质*, 2004, **25**(3): 288—290.
- LI Jun, WANG Wei, WANG Shu-xun. Bedded tuff reservoir in Qingxi oilfield[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2004, **25**(3): 288—290.
- [22] 高瑞琴, 杨继波, 丛培栋, 等. 二连油田沉凝灰岩储层特征分析[J]. *测井技术*, 2006, **30**(4): 330—333.
- GAO Rui-qin, YANG Ji-bo, CONG Pei-dong, et al. Analysis of the characteristics of tuffite reservoir in Erlian oilfield[J]. *Well Logging Technology*, 2006, **30**(4): 330—333.

图版



A. 柱状节理玄武岩, 顶部见有气孔, 韩国济州岛;
 B. 火山碎屑岩, 反丘构造, 德国Laacher See, 刘招君摄;
 C. 火山碎屑岩, 变形层理, 含火山弹, 韩国济州岛;
 D. 松辽盆地营城组底部膨润土与下伏二叠纪蚀变安山岩及上覆营城组流纹质角砾熔岩接触;
 E. 松辽盆地营城组二段土黄色凝灰质胶结砾岩中的的硅化木化石;
 F. 层状凝灰岩, 平行层理发育;
 G. 层状岩屑、晶屑凝灰岩, 基质为凝灰质, 总体呈层状, 微粒序层理 (正交偏光);
 H. 珍珠岩 (水下熔岩岩球, 围绕岩球岩枕边缘发生同生蚀变);
 I. 松辽盆地营城组一段底部膨润土;
 J. 气孔玄武岩, 喷发前海水通过构造裂隙与岩浆强烈作用, 韩国济州岛;
 K. 层状气孔流纹岩, 气孔被硅质充填, 沿流纹理气孔被拉长, 流纹构造;
 L. 原生气孔, 灰白色气孔流纹岩, 气孔构造发育, 气孔未被充填;
 M. 石泡空腔孔, 灰白色石泡流纹岩, 石泡充填硅质, 呈放射状, 可见流纹构造;
 N. 杏仁体内孔, 气孔呈环带状, 气孔中充填有致密细晶状绿泥石、绿鳞石、黑云母 (镜下);

O. 晶内溶蚀孔, 致密球粒斑状流纹岩 (镜下);
 P. 矿物解理缝, 长石解理缝 (镜下);
 Q. 柱状节理, 紫红色流纹岩;
 R. 构造裂缝, 流纹岩, 裂缝发育, 并切割斑晶, 并被硅质充填 (镜下);
 S. 层间炸裂缝, 层状流纹岩;
 T. 粒间孔隙, 棕红色角砾凝灰岩;
 U. 凝灰质角砾岩, 基质为凝灰质, 角砾主要为安山岩角砾, 玄武岩角砾, 凝灰质大部分已粘土矿化 (正交偏光, 1.25倍);
 V. 珍珠岩环带状裂缝 (镜下, 4倍);
 W. 矿物炸裂缝, 斑状珍珠岩, 斑晶表面碎裂明显, 形成斑晶炸裂缝 (正交偏光, 10倍);
 X. 流纹质晶屑凝灰岩与沉凝灰岩互层, 层理发育, 见断层错动 (镜下, 2倍);

J、K-S. 陆上喷发陆上保存火山熔岩;
 B、T、U. 陆上喷发陆上保存火山碎屑岩;
 C. 水下喷发陆上保存火山碎屑岩;
 A、H、V、W. 水下喷发水下保存火山熔岩;
 F、G、I、X. 陆上喷发水下保存火山碎屑岩;
 D、E. 营城组陆上喷发火山岩标志