

火山地层界面的类型、特征和储层意义

唐华风,孙海波,高有峰,衣健,姚瑞士

吉林大学地球科学学院,长春 130061

摘要:按照火山地层界面的形成过程和地质属性将其划分为5类,分别为喷发整合、喷发不整合、喷发间断不整合、构造不整合和侵入接触,除侵入接触外,其他不整合均可细分为角度不整合和平行不整合两种。喷发整合和喷发不整合两类界面上下岩层的间断为数分钟—数年,并且在界面上下均具有冷凝表壳或细火山碎屑层等,喷发不整合可为平行面状或交织曲面状,多为凹凸不平,分布范围小;喷发间断不整合界面形成时间为数十年—数千年,界面之下冷凝表壳或细碎屑层等明显遭受侵蚀,在横向上存在风化壳—沉积岩夹层的组合形式,界面平面展布多为波状曲面;构造不整合与喷发间断不整合在特征上相似,但形成时间为数千年—数百万年,界面分布范围更大。东北地区中生代火山岩剖面揭示:在喷发整合/不整合界面附近原生孔隙发育,随着与界面距离的增加孔隙度变小;具有交织曲面状界面岩层的面孔隙率大,孔隙发育带厚度及其占岩层比例均大于平行面状界面岩层。盆内钻井资料揭示喷发间断/构造不整合界面之下发育大量的次生孔隙,可与原生孔隙组合使储层物性变好,但当原生孔隙未能保存时其储层物性变化难以预测。

关键词:火山地层界面;不整合界面;地质属性;东北地区;中生代;火山岩

中图分类号:P618.13; P588.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5888(2013)05-1320-10

Types and Characteristics of Volcanostratigraphic Boundary and Its Signification of Reservoirs

Tang Huafeng, Sun Haibo, Gao Youfeng, Yi Jian, Yao Ruishi

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

Abstract: According to the forming process and geological attributions, the volcanostratigraphical boundaries will be divided into 5 types. They are eruptive conformity boundary (ECB, type I), eruptive unconformity boundary (EUB, type II), eruptive interval unconformity boundary (EIUB, type III), tectonic unconformity boundary (TUB, type IV) and intrusive nonconformity boundary (INB, type V). Except INB, the others unconformity boundaries can be divided into angular unconformity and paraconformity/angular unconformity. The time interval of ECB and EUB is from several minutes to years. There is chilling crust or fine pyroclastic layer above and below these surfaces. The two types' boundaries maybe curve or netlike plane, coarse and small ranges distribution. The time interval of EIUB is from decades to thousands years. There is weathered crust underlying the EIUB, and sedimentary rock bed overlying the EIUB. In most time, the weathered crust and thin sedimentary bed associate together. The boundary is smooth curve plane. The characteristics of TUB are similar to

收稿日期:2013-05-25

基金项目:国家“973”计划项目(2009CB219303,2012CB822002);国家自然科学基金青年基金项目(41002038)

作者简介:唐华风(1979—),男,副教授,博士,主要从事火山岩储层地质-地球物理研究, E-mail: tanghfhc@jlu.edu.cn

通信作者:高有峰(1982—),男,讲师,博士,主要从事火山岩储层和地层学研究, E-mail: gaoyf_1982@163.com.

EIUB's. The interval time of TUB is from thousands to millions years, and the distribution scale is bigger than EIUB's. The Mesozoic volcanic rocks of NE China reveal that there is high porosity zone (mainly contribute by the primary pore) near the EUB or EIUB, and the porosity decreases when it is apart from the boundary. Both porosity and the percentage of pore rich rock of netlike boundary are higher than the curved boundary's. The wells in Songliao basin show that there is abundant secondary pore below the EIUB or TUB. Its porosity may be enhanced when the primary pores exit. On the other hand, it is difficult to predict the change of porosity.

Key words: volcanostratigraphical boundary; unconformity boundary; geological attributions; Northeast part of China; Mesozoic; volcanic rocks

0 引言

火山喷发的特殊性导致了火山地层叠置关系的复杂^[1-2],如何有效地进行火山地层内部对比是现代火山和古火山地质研究需要解决的关键基础问题之一。其中,火山地层的界面识别及其地质内涵分析是火山地层对比的焦点。

对于现代火山,可借助历史文献记录和高精度地质调查方法来恢复火山喷发过程,确定火山地层界面。如由日本富士山的寄生宝永火山1707年(宝永四年)喷发记录可知,这次喷发持续16 d,可划分出17个单元,归并为6个喷发脉冲,进一步可合并为3个阶段,仅在K层和J层间可见不整合面^[3]。在长白山火山岩研究中已采取相应的方法^[4-5]。对于没有记录的火山往往依据火山地层中的标志层进行对比,如古土壤层、火山灰岩层等^[6]。此外,火山地层中发育丰富的不整合界面,这些界面由熔岩流动单元或火山碎屑岩堆积单元叠置时的产状变化体现^[7-8]。对于界面的时间属性可以划分为喷发脉冲间断(数分钟—数年)→喷发间断(数十年—数千年,可产生土壤层或侵蚀面)→喷发期间断(数千年—数百万年,可存在构造事件)^[9]。

我国火山地层发育,前人在地质填图和盆地勘探中均对火山地层的构成单元和界面特征进行了探索研究。如:将火山地层构成单元划分为岩流单元、冷却单元、冷凝单元、火山机构等^[10],进一步可划分出火山喷发期次、旋回等^[11-14],在地层划分时均借助于地球化学资料、沉积岩夹层界面或不整合界面^[15-17]。按照火山地层接触界面的特征可划分为4类,分别为喷发不整合、侵出不整合、嵌入喷发不整合和模糊侵入接触界面^[18]。有文献将火山地层不整合界面称为喷发不整合面^[19-20],并确定了一些界面的识别标志^[21],在密井网地区建立起了高分辨率

火山地层格架^[22]。

上述成果为火山岩地层界面、构成单元和地层对比提供了依据,但在火山地层界面的类型及其特征地质属性方面的研究还有待深化。为此,笔者以东北地区中生代典型火山岩剖面为例进行火山地层界面的刻画,探讨其地层界面地质属性,以期火山地层刻画提供理论依据。

1 火山地层界面类型

火山岩界面是熔浆流动单元、碎屑堆积单元及其组合体之间形成的界面,在海拉尔盆地和松辽盆地周缘的中生代火山地层中(位置见图1)广泛发育火山地层界面,根据其界面特征分为5类9型(表1),表现形式多样,本次着重介绍其地质属性。

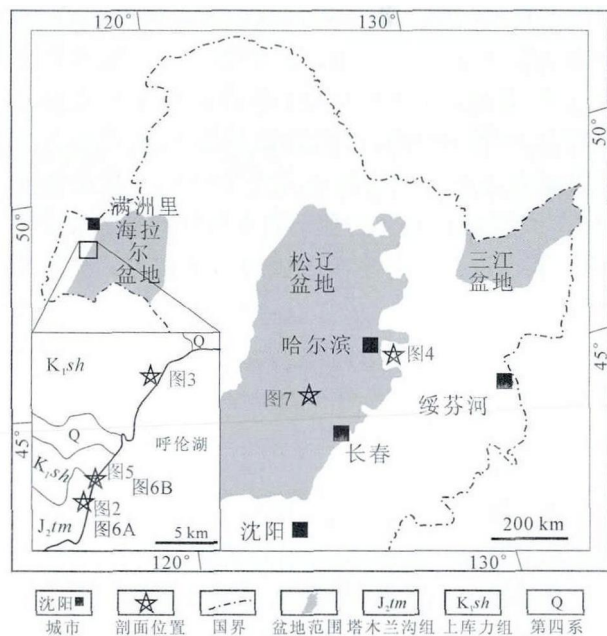


图1 研究区位置图

Fig. 1 The pilot map of study area

表 1 火山地层界面类型和地质属性

Table 1 Types of volcanostratigraphic boundary and their geological attributes

界面		地质属性			
类	型	界面上下的岩性差异	表现形式	展布特征	形成时间
喷发整合	整合	多数相同	熔岩或碎屑熔岩的数厘米厚冷凝表壳、火山碎屑岩的平行层理/水平层理/粒序层理的顶面	平行面状,分布范围小(与流动单元或堆积单元规模相同)	数分钟—数年
喷发不整合	平行角度	多数相同	熔岩同上,火山碎屑岩中可见侵蚀构造	波状或交织曲面,分布范围同上	数分钟—数年
喷发间断不整合	平行角度	多数不相同	风化壳表面→火山-沉积夹层底界组合	波状,分布范围中等(与火山机构规模相同)	数十年—数千年
构造不整合	平行角度	多数不相同	风化壳表面或/和火山-沉积夹层底界	曲面状-波状,分布范围大(整个断陷或次级构造单元)	数千年—数百万年
侵入接触	穿切平行	不相同	侵入岩的冷凝表壳和围岩的烘烤边表面	与侵入体产状有关	不定

1.1 喷发整合

喷发整合指流动单元/堆积单元之间没有时间间断或虽存在短暂间歇(数分钟—数年),但没能使火山喷出物产生明显的侵蚀或剥蚀,岩层产状一致,具有协调的接触关系,界面上下的岩性多具有一致性。喷发整合发育在熔岩或碎屑熔岩时,在界面上下均可见冷凝表壳,可表现为玻璃质表壳,也可为表层结晶程度与中心部位存在差别的表壳(如顶底面为微晶隐晶质,中部为显晶质的组合),一般厚度为数厘米;界面之下的岩层除上述特征外,还可发育渣状熔岩、绳状熔岩等,可能表现为氧化边;界面之上可表现为还原边。冷凝表壳由于发育丰富的微裂隙,有利于流体的渗透,所以在界面附近常常形成蚀变带,其厚度往往与冷凝表壳的厚度相当。喷发整合发育在碎屑岩或火山泥石流中时,界面往往是通过火山碎屑的成分、形状和排列方式来体现,比如完整(逆)粒序层理、平行层理等。

1.2 喷发不整合

喷发不整合指流动单元/堆积单元之间没有时间间断或虽存在短暂间歇(数分钟—数年),但没能使火山喷出物产生明显的剥蚀,岩层产状不一致、具有不协调的接触关系,界面上下的岩性多具有一致性。喷发不整合发育在熔岩或碎屑熔岩时,除产状特征与喷发整合界面不一致外,其他方面均一致;喷发角度不整合界面上下的岩层产状不一致。喷发不整合发育在碎屑岩或火山泥石流中时,界面往往是

通过火山碎屑的成分、形状和排列方式来体现的,比如不完整(逆)粒序层理、平行层理等;界面处常常可见冲刷面、重荷模和火山弹砸痕。所以,当界面上下的堆积单元间在产状上一致时,堆积单元间见冲刷面时为喷发平行不整合界面。喷发不整合界面的成因可能是火山喷发的地形地貌、同期火山掀斜和局部断层改造作用等。

1.3 喷发间断不整合

该类界面是指火山岩在经受喷发间歇期(一般为数十年—数千年)的侵蚀或剥蚀后与上覆火山岩形成的接触关系。界面上下的岩性可存在明显的差别,通常是冷却单元、火山机构、火山机构群等火山地层单元之间的界面。该类界面在横向上存在风化壳(相对正地形)和含下伏岩层碎屑的火山岩/沉积岩(相对负地形)的组合特征。具体表现为:在相对正地形区域的界面之下是熔岩时,其冷凝表壳缺失、且熔岩的上部层都可能遭受到侵蚀;界面之下是火山碎屑岩或泥石流时,其细颗粒层可缺失;界面之下的岩石在遭受侵蚀时还可形成风化壳,厚度可达到数十厘米,可延伸数千米。在相对负地形区域的界面之下的岩石可存在少量的侵蚀,界面之上的岩石中可含有下伏岩层的砾石,如熔浆胶结复成分砾岩、碎屑熔岩、凝灰质砾岩和火山沉积岩等。界面之上的岩石与喷发整合/喷发不整合具有一致的特征:如果界面上下单元间岩层倾向或倾角不一致(不协调)时为喷发间断角度不整合;如果产状一致(协调)则

为喷发间断平行不整合。

1.4 构造不整合

该类界面指以盆地或次级构造单元范围内的火山岩经历整体抬升剥蚀或差异埋藏后与上覆岩层间形成的接触关系。当构造抬升时,火山岩经受长期剥蚀夷平作用,发育着分布范围广、形态较为平整的风化壳。当差异埋藏时,由于火山地形的特殊性,往往是低洼处首先接受沉积,沉积岩与下伏火山岩之间可能不存在时间间断;而高处因为最后才能接受沉积,沉积岩与下伏火山岩之间可能存在一定的时间间断,所以在沉积岩和火山岩界面处常见超覆和前积现象,界面可为波状起伏;风化壳与沉积岩层规模往往大于喷发间断不整合。

1.5 侵入接触

该类界面指同期或后期岩浆的侵入活动产物与围岩间的接触关系。如果为岩枝或岩墙产状,常表现为与原有岩层的穿切关系,可称为侵入穿切侵入接触;如果为岩盖产状,可表现为顶底面与原有产状一致(协调),在侧面处则表现为穿切关系;如果为岩席和岩床产状,常表现为与原有岩层的产状一致(协调),可称为侵入平行侵入接触。

2 火山地层界面特征

在海拉尔盆地和松辽盆地周缘的火山地层中由不同充填单元的叠置体现了上述火山地层界面。下面就以典型露头掌子面进行火山地层界面属性的介绍。

2.1 喷发不整合

图2是内蒙古满洲里呼伦湖塔木兰沟组掌子面,岩性均为玄武岩,顶部和下部均为简单的熔岩流,中部为复合辫状熔岩流。根据岩层界面特征可识别出3类地层界面(喷发不整合、喷发间断不整合和构造不整合)。如P1所示为喷发不整合界面,界面上下均见冷凝表壳,界面上为灰绿色、界面之下为紫红色,单个流动单元的界面较为平整,由多个熔岩流动单元叠置而呈交织曲面状,界面附近岩石多发生蚀变。

由图3可知,该掌子面发育3个火山碎屑堆积单元,单元之间的界面为喷发不整合界面。该界面表现为由火山角砾岩—凝灰岩—火山灰构成的正粒序层理,每一个粒序层理顶面细碎屑层遭受侵蚀而形成凹凸不平的接触面,这可能是由于上覆单元的粗碎屑的冲刷作用对界面的改造而形成的,该类界

面分布范围受古地形的限制。

2.2 喷发间断不整合

图2的P2和P3所示为喷发间断不整合界面。P2表现为发育注入构造,界面之上发育玻璃质表壳,界面之下为含有小气孔的玄武岩,未见冷凝表壳,界面不平整,野外观察到注入构造起伏可为10~50 cm;如P3所示,顶部发育古土壤,缺少玻璃质表壳或/和上部气孔密集带,界面之上发育玻璃质表壳和管状气孔。整体上该界面较为平整、延伸范围大。

图4为呼伦湖天然洞掌子面,岩性以流纹岩为主,可见2个简单熔岩流单元,二者的界面为喷发间断不整合界面。界面之上(单元②底部)见一层厚约1 m的含晶屑/岩屑/角砾/集块的流纹岩(图4P1),见冷凝表壳,在底部变形流纹构造发育,向上过渡为流纹构造流纹岩、不含火山碎屑;横向上存在流纹构造—变形流纹构造—柱状节理的过渡关系(图4P2、P3)。界面之下为块状流纹岩,流纹岩的顶面缺少冷凝表壳。据此推测该界面为喷发间断不整合。整体上该界面表现为波状起伏、较为平整。

2.3 构造不整合

图5为呼伦湖塔木兰沟组与上库力组火山岩接触形成的构造不整合界面。界面之下岩性为具有稀疏圆状气孔的玄武岩,缺少冷凝表壳和顶部气孔密集带。界面之上为熔浆胶结复成分砾岩,砾石磨圆为棱角一次圆状,多数砾石为灰黑色玄武岩,与下伏紫红色玄武岩存在明显差别,也存在少量与下伏岩性相同的砾石;这可能指示了多数砾石是异地剥蚀搬运而来,少量砾石是原地砾石。该地区在上库力组火山岩形成前,塔木兰沟组经受了长期风化剥蚀,界面产状为波状光滑,延伸范围大。

3 火山地层界面的储层意义

3.1 喷发整合/不整合界面与储层的关系

从内蒙古满洲里呼伦湖塔木兰沟组火山岩剖面上来看,喷发整合/不整合界面附近主要发育原生孔隙空间,以气孔和冷凝收缩缝为主。如图6所示,在喷发整合/不整合界面上下均存在气孔发育带,气孔直径可达数厘米,在界面之上的面孔率随与界面距离增大而变小,其孔隙发育带厚度在几十厘米的范围。由于孔隙直径较大,目前孔隙度测试方法对该类产品还不能十分有效地处理。所以本次采用图像分析技术计算面孔率。利用其结果进行储层对比分析,

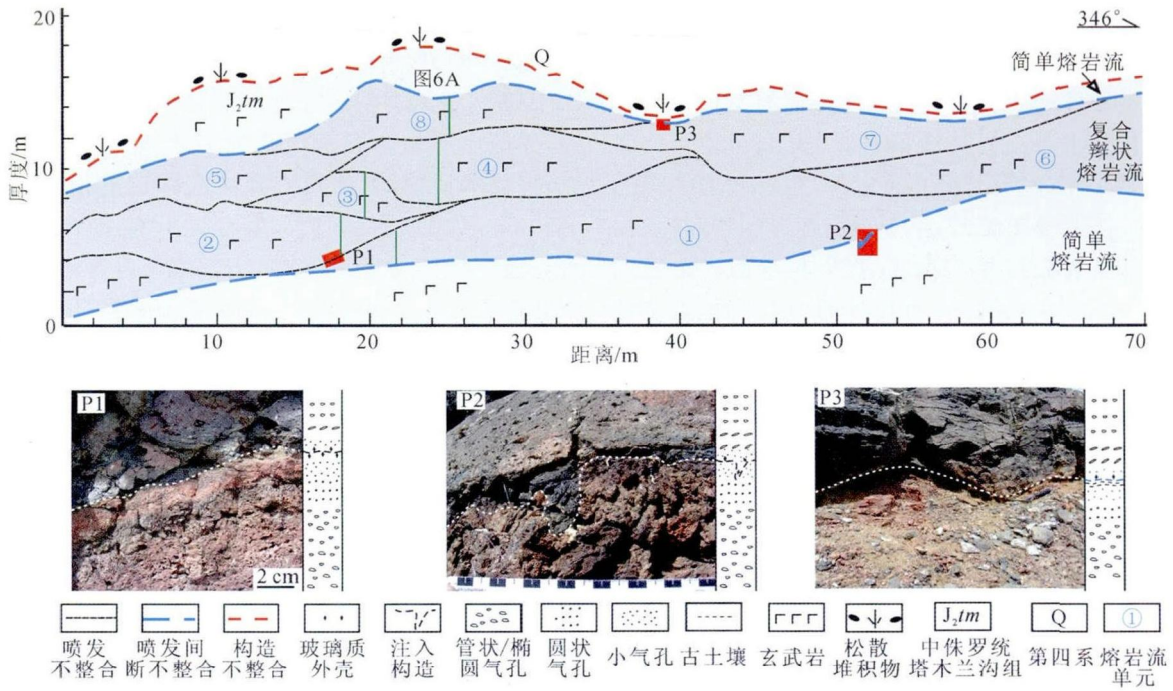


图 2 内蒙古满洲里呼伦湖塔木兰沟组玄武质复合辫状熔岩流界面特征

Fig. 2 Boundary characteristics of basaltic compound-braided lava flows of Tamulangou Formation of Hulun Lake of Manchuri in Inner Mongolia

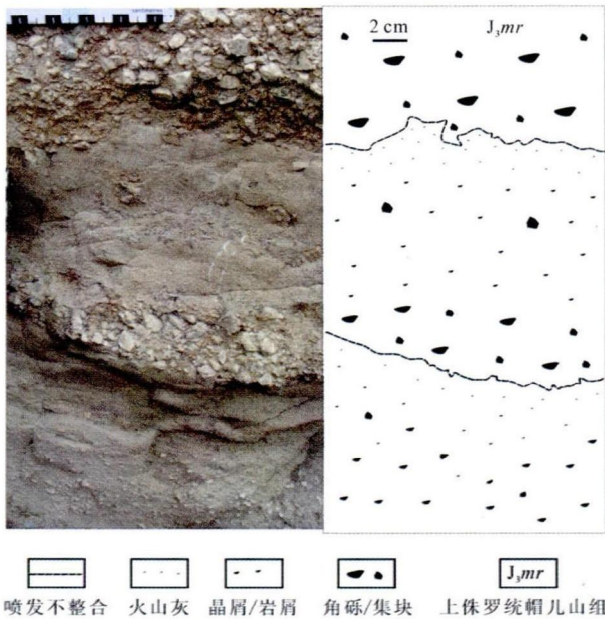


图 3 黑龙江尚志市帽儿山镇帽儿山组粗安质火山碎屑堆积单元界线

Fig. 3 Boundary characteristics of trachyandesitic pyroclastic flows of Maoershan Formation of Shangzhi City of Hilongjiang Province

可知整体上界面之下的面孔率随与界面距离增大而变小,达到一定距离后面孔率变化不明显。相比较而言,具有交织曲面状界面的辫状熔岩流的面孔率、孔隙发育带厚度和占岩层的比例均比平行面状界面的大,应该是更好的储层。

3.2 喷发间断/构造不整合界面与储层的关系

喷发间断不整合和构造不整合界面对于储层的约束主要在于界面之下的岩层,由于风化淋滤作用使下伏岩层遭受改造。由图 7 可知,YS1 井区的钻井揭示营城组流纹质火山地层发育喷发间断不整合。在该区主要有两种表现:一为处于相对正地形 YS1 井的风化壳(高伽马、低密度、低电阻)与上覆岩层接触;二是与之对应处于相对负地形的 YS101 井火山岩与上覆凝灰质泥岩(高伽马、中密度、特低电阻)接触。二者虽发育在不同流动单元上,但是在横向上可组合形成一个波状等时界面。从图 7D 中可知:位于高部位的 YS1 井在界面之下发育丰富的溶蚀孔和晶间微孔,还有少量的气孔;孔隙度在界面处存在一个数十厘米的低值带,随后出现一个 4 m 左右的高值带,然后孔隙度迅速变小;整体上看,孔隙度随与界面距离的增大而减小,该特征与图 6 中

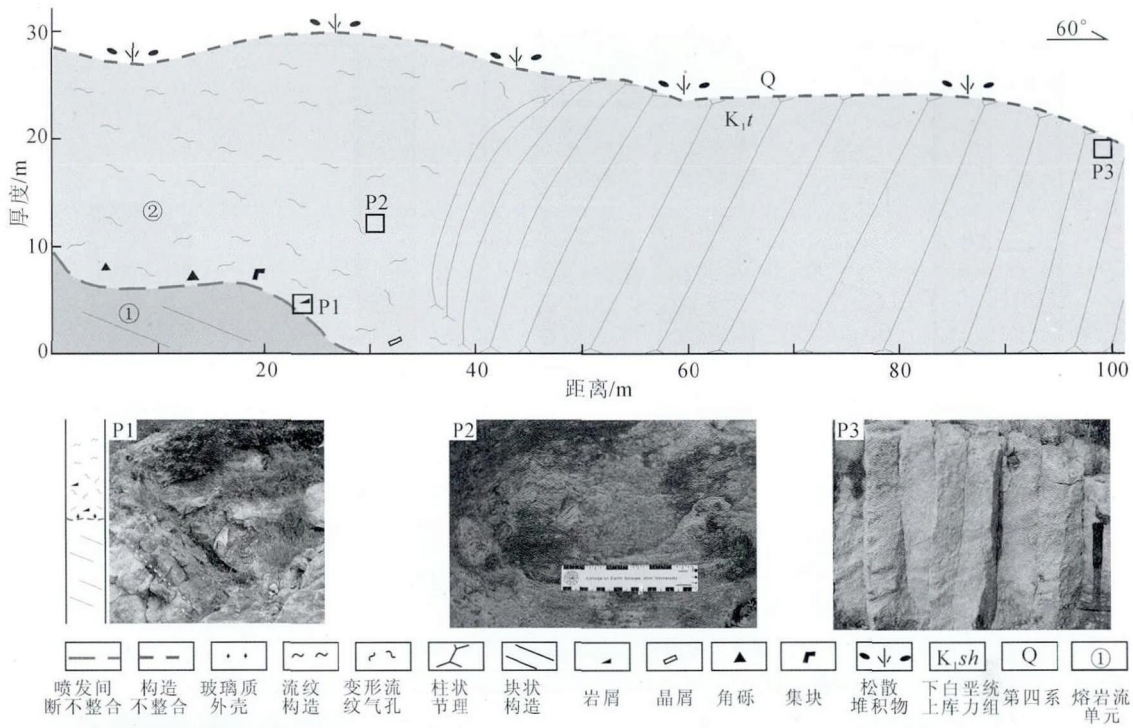


图 4 内蒙古满洲里天然洞上库力组流纹质简单熔岩流的界面特征

Fig. 4 Boundary characteristics of rhyolitic simple lava flows of Shangkuli Formation of Tianrandong of Manchuri in Inner Mongolia

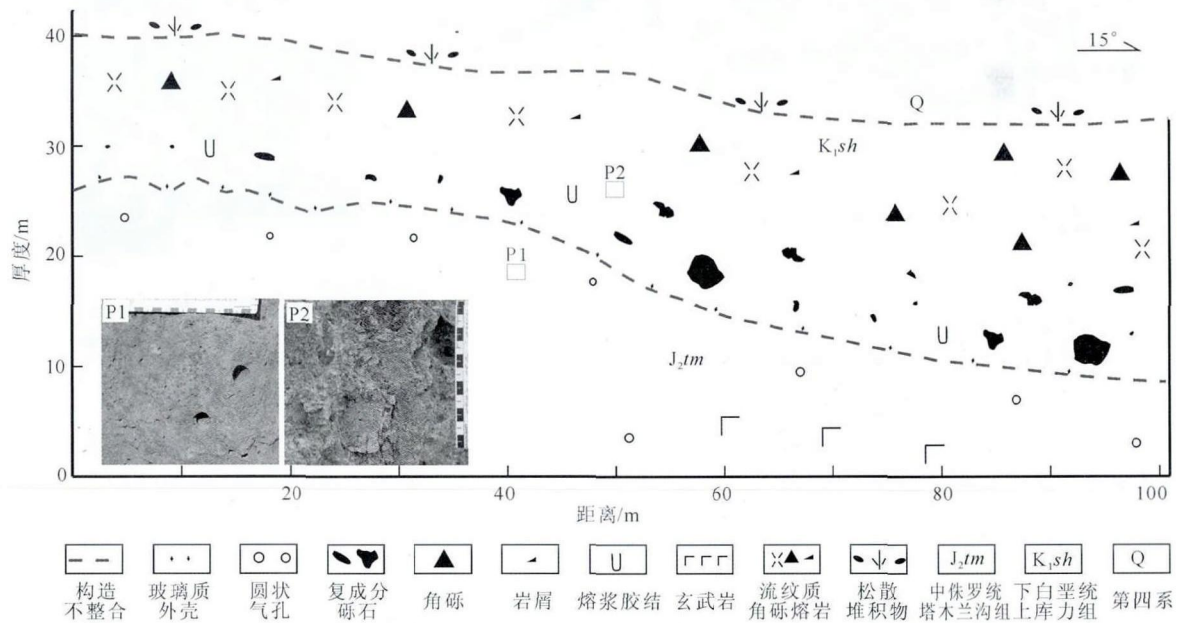


图 5 内蒙古满洲里呼伦湖上库力组与塔木兰沟组火山岩界面特征

Fig. 5 Boundary characteristics of volcanic rocks between Tamulangou Formation and Shangkuli Formation of Hulun Lake of Manchuri in Inner Mongolia

所示的喷发不整合界面的储层特征存在明显差别。而处于低部位的 YS101 井发育丰富的气孔,溶蚀孔

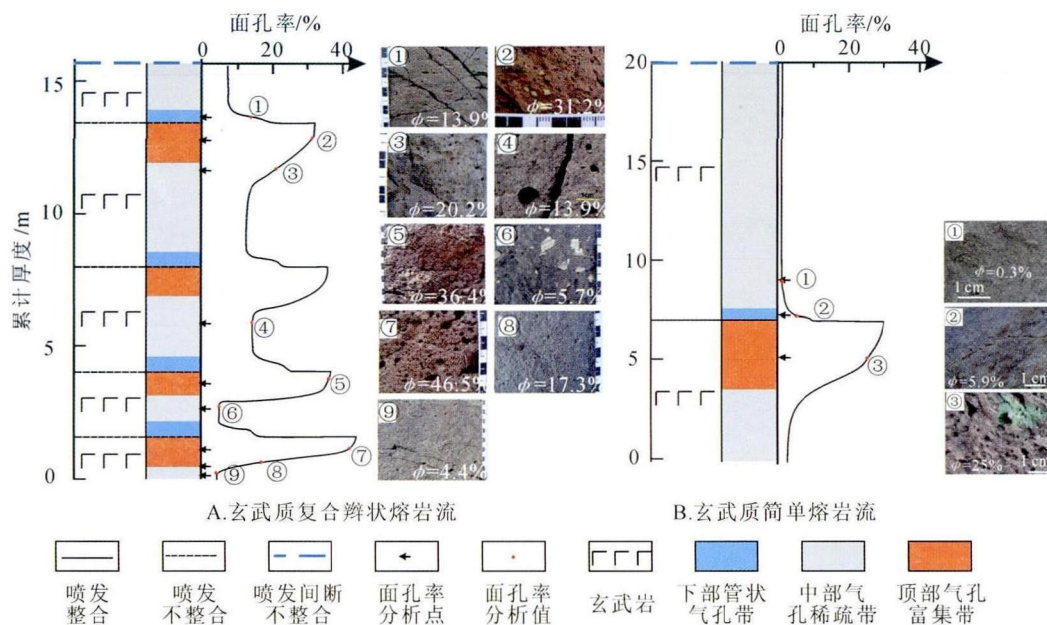
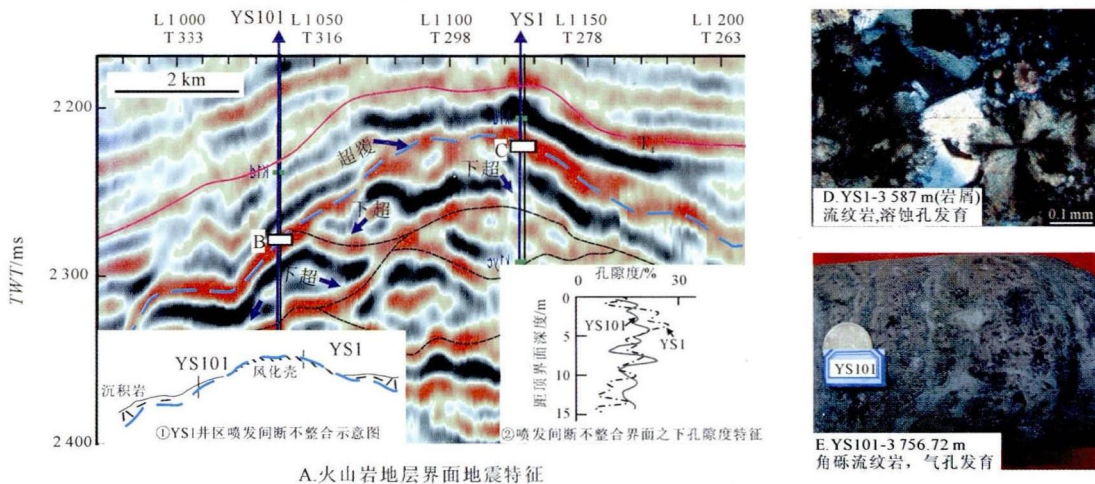
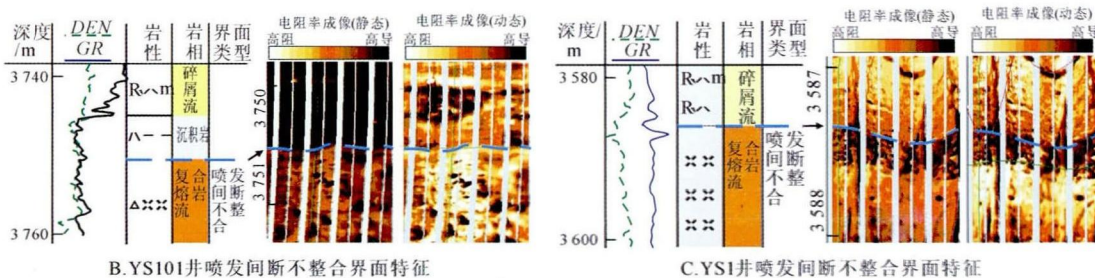


图 6 喷发不整合界面与储层的关系

Fig. 6 The relationship between eruptive unconformity boundary and reservoirs

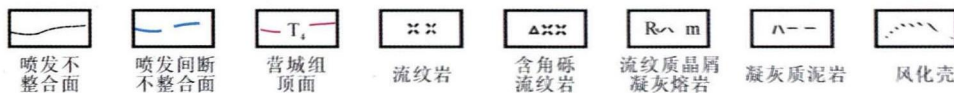


A. 火山岩地层界面地震特征



B. YS101井喷发间断不整合界面特征

C. YS1井喷发间断不整合界面特征



TWT. 双程旅行时。

图 7 喷发间断不整合界面与储层的关系

Fig. 7 Relationship between eruptive interval unconformity boundary and reservoir

不发育,其孔隙度变化特征与图6所示的相似。成因可能是风化作用造成YS1井处界面附近虽使原生孔隙遭受破坏、但产生丰富的次生孔隙,使孔隙度增加,但其变化特征已不同于喷发不整合界面;而在YS101井处则改造不明显,次生孔隙少,还保留了喷发不整合界面的特征。但处于高部位的岩层储层改造结果可能存在气孔带保留或未保留两种情况:当气孔带能保留时情况如YS1井;当气孔带被侵蚀完毕时,风化改造的是致密岩石,储集空间类型以溶蚀孔为主,其物性条件与原始状态的差别难以准确预测,多数情况小于原生气孔能够保存时的状况。

构造不整合界面与喷发间断不整合界面在储集空间和储层物性分布规律方面具有相似性。所不同的是,构造不整合界面形成时间较长,地表流体与火山岩有充足的接触时间,特别是当与交织曲面状的喷发不整合界面组合时,流体可沿着高孔隙带向下渗透,可达到更大的影响范围。在新疆准噶尔盆地石炭系火山岩风化壳可达到数百米,风化壳处的储层明显高于未风化的部位^[23-25]。

4 结论

1)根据熔浆流动单元或堆积单元的界面地质属性及其组合特征,可将东北地区中生代火山地层界面划分为5类9型,5类分别为喷发整合、喷发不整合、喷发间断不整合、构造不整合和侵入接触,除侵入接触外其他不整合均可细分为角度和平行两种,侵入接触可细分为穿切和平行两种。

2)喷发整合和喷发不整合两类界面在形成时间上基本没有间断,并且在界面上下均具有冷凝表壳或细碎屑层,这两类界面的平面展布均可为平行面状和交织曲面状,多为凹凸不平,分布范围小;喷发间断不整合界面之下冷凝表壳或细碎屑层明显遭受侵蚀,在横向上存在风化壳-沉积岩夹层的组合形式,界面平面展布多为光滑面状;构造不整合与喷发间断不整合在特征上相似,但形成时间更长,界面分布范围大。

3)露头 and 盆内钻井均揭示火山地层界面附近储层最发育。在喷发整合/不整合界面附近原生孔隙发育,随着与界面距离的增加孔隙度变小;具有交织曲面状界面岩层的面孔率大,孔隙发育带厚度及其占岩层比例均大于平行面状界面岩层。喷发间断/构造不整合界面之下发育大量的次生孔隙,可与原生孔隙组合使储层物性变好,但当原生孔隙未能保

存时其储层物性变化难以预测。

参考文献(References):

- [1] 唐华风,白冰,边伟华,等. 松辽盆地营城组火山机构地层结构定量模型[J]. 石油学报,2012,33(4):541-550.
Tang Huafeng, Bai Bing, Bian Weihua, et al. Quantitative Models of Strata Texture Within Volcanic Edifices of Yingcheng Formation in the Songliao Basin, NE China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012,33(4):541-550.
- [2] 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.
- [3] Miyaji N, Kan'no A, Kanamaru T, et al. High-Resolution Reconstruction of the Hoei Eruption (AD 1707) of Fuji Volcano, Japan [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2011, 207: 113-129.
- [4] Isaia R, Antonio M D, Erba F D, et al. The Astroni Volcano: The Only Example of Closely Spaced Eruptions in the Same Vent Area During the Recent History of the Campi Flegrei Caldera (Italy) [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2004,133:171-192.
- [5] 崔钟燮,金东淳,李霓. 长白山天池火山公元1199-1200年大喷发历史记载的发现及其意义[J]. 岩石学报,2000,16(2):191-193.
Cui Zhongxie, Jin Dongchun, Li Ni. The Historical Record Discovery of 1199-2000 AD Larger Eruption of Changbaishan Tianchi Volcano and Its Significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 2000, 16(2): 191-193.
- [6] 刘祥. 长白山火山历史上最大火山爆发火山碎屑物层序与分布[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2006,36(3):313-318.
Liu Xiang. Sequence and Distribution of the Pyroclastic Deposits of the Greatest Eruption of Changbaishan Volcano During the Period of History [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2006,36(3):313-318.
- [7] Corsaro R A, Neri M, Pompilio M. Paleo-Environmental and Volcano-Tectonic Evolution of the

- Southeastern Flank of Mt. Etna During the Last 225 ka Inferred from the Volcanic Succession of the 'Timpe', Acireale, Sicily [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2002, 113: 289 - 306.
- [8] Gehring I. The Use of Grain-Size Dependent Magnetic Susceptibility and Gamma-Ray Measurements for the Detailed Reconstruction of Volcanostratigraphy: The Case of La Fossa di Vulcano, S Italy[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2004, 138:163 - 183.
- [9] Rita D D, Giordano G, Milli S. Forestepping-Backstepping Stacking Pattern of Volcaniclastic Successions: Roccamonfina Volcano, Italy [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1997, 78: 267 - 288.
- [10] 陈业全,李宝刚.塔里木盆地中部二叠系火山岩地层的划分与对比[J]. *石油大学学报:自然科学版*, 2004,28(6):6 - 10.
Chen Yequan, Li Baogang. Classification and Correlation of Permian Volcanic Rocks in Mid-Tarim Area[J]. *Journal of the University of Petroleum, China: Science & Technology Edition*, 2004,28(6):6 - 10.
- [11] 谢家莹,陈鹤年,郑惠文,等.福建浦城—三都澳火山喷发带:早白垩世火山地层划分对比[J]. *福建地质*, 1994,13(1):26 - 36.
Xie Jiaying, Chen Henian, Zheng Huiwen, et al. Classification and Correlation of Early Cretaceous Volcanic Strata of the Pucheng - Sandu'ao Volcanic Eruptive Belt in Fujian Province [J]. *Geology of Fujian*, 1994,13(1):26 - 36.
- [12] 陈庆,钱根宝,党艳,等.克 92 井区火山岩地层格架与岩相研究[J]. *西南石油大学学报:自然科学版*, 2008,30(4):48 - 50.
Chen Qing, Qian Genbao, Dang Yan, et al. A Study on Stratigraphic Sequences and Lithofacies of the Igneous Rocks in Ke Well - 92 Region[J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2008, 30(4):48 - 50.
- [13] 孟宪锋,高建斌.冀北中生代陆相火山-沉积地层填图单位划分探讨[J]. *地质调查与研究*, 2004,27(1):58 - 63.
Meng Xianfeng, Gao Jianbin. Division of Cartographic Unit in the Mesozoic Continental Volcano-Deposit Basin in Northern Hebei, China [J]. *Geological Survey and Research*, 2004,27(1):58 - 63.
- [14] 蔡道冠,符国祥.海南同安岭—牛腊岭火山地层划分与对比[J]. *中国区域地质*, 1997,16(4):348 - 358.
Cai Daoguan, Fu Guoxiang. Classification and Correlation of Tong'anling - Niulaling Volcanic Strata in Southern Hainan[J]. *Regional Geology of China*, 1997, 16(4):348 - 358.
- [15] 贾炳文,张俊计.冀北辽西晚古生代煤系地层中火山碎屑岩层的发现与研究[J]. *沉积学报*, 1996,14(2): 163 - 171.
Jia Bingwen, Zhang Junji. Discovery and Research of Pyroclastic Layers in Coal Measures, Late Carboniferous, North Parts of Hebei and West Parts of Liaoning[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1996,14(2):163 - 171.
- [16] 唐华风,边伟华,王璞珺,等.松辽盆地白垩系营城组火山岩喷发旋回特征[J]. *天然气工业*, 2010,30(3): 35 - 39.
Tang Huafeng, Bian Weihua, Wang Pujun, et al. Characteristics Volcanic Eruption Cycles of Yingcheng Formation in Songliao Basin, Early Cretaceous, NE China [J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(3):35 - 39.
- [17] 黄玉龙,王璞珺,门广田,等.松辽盆地营城组火山岩旋回和期次划分:以盆缘剖面和盆内钻井为例[J]. *吉林大学学报:地球科学版*, 2007, 37(6):1183 - 1191.
Huang Yulong, Wang Pujun, Men Guangtian, et al. Division of Volcanic Cycles and Stages of the Yingcheng Formation of the Songliao Basin: Take the Cross Sections at the Margin and the Boring Holes as Examples [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2007, 37(6):1183 - 1191.
- [18] 赵玉琛.宁芜地区中生代火山岩地层划分及其特征[J]. *地质科学*, 1990,25(3): 243 - 258.
Zhao Yuchen. Stratigraphic Division of Mesozoic Volcanic Strata and Their Characteristics in Nanjing - Wuhu Area[J]. *Chinese Journal of Geology*, 1990, 25(3): 243 - 258.
- [19] 唐华风,赵密福,单玄龙,等.松辽盆地营城组火山地层单元和地震地层特征[J]. *石油地球物理勘探*, 2012,47(2):323 - 330.
Tang Huafeng, Zhao Mifu, Shan Xuanlong, et al. Characteristics of Volcanic Stratigraphy's Unit and Seismic Stratigraphy of Yingcheng Formation in Songliao Basin, NE China [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2012,47(2):323 - 330.
- [20] 傅树超,卢清地.陆相火山岩区填图方法研究新进展:“火山构造-岩性岩相-火山地层”填图方法[J]. *地*

- 质通报, 2010, 29(11): 1640 - 1648.
Fu Shuchao, Lu Qingdi. New Progress of Mapping Method in the Nonmarine Volcanic Terrain: 'Volcanic Construction-Lithologic Rock Facies-Volcanic Strata' Mapping Method [J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(11): 1640 - 1648.
- [21] 张春芳, 王奖臻, 许模, 等. 白鹤滩峨眉山玄武岩系熔岩层界面的鉴别标志 [J]. 水土保持研究, 2008, 15(2): 217 - 219.
Zhang Chunfang, Wang Jiangzhen, Xu Mo, et al. The Identification Symbols of the E'mei Mountain Basalt Lava Lay-Series in Baihetan Hydropower Plant [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(2): 217 - 219.
- [22] 唐华风, 徐正顺, 王璞璐, 等. 松辽盆地白垩系营城组埋藏火山机构岩相定量模型及储层流动单元特征 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2007, 37(6): 1074 - 1082.
Tang Huafeng, Xu Zhengshun, Wang Pujun, et al. Facies Quantitative Model and Characteristics of Reservoirs Flow Unit of Buried Volcanic Edifice of Yingcheng Formation in Songliao Basin, Cretaceous, NE China [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(6): 1074 - 1082.
- [23] 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.
- [24] 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: D辑, 2011, 41(11): 1613 - 1626.
Zou Caineng, Hou Lianhua, Tao Shizhen, et al. Hydrocarbon Accumulation Mechanism and Structure of Large-Scale Volcanic Weathering Crust of the Carboniferous in Northern Xinjiang, China [J]. Science China: Series D, 2011, 41(11): 1613 - 1626.
- [25] 王京红, 靳久强, 朱如凯, 等. 新疆北部石炭系火山岩风化壳有效储层特征及分布规律 [J]. 石油学报, 2011, 32(5): 757 - 766.
Wang Jinghong, Jin Jiuqiang, Zhu Rukai, et al. Characters and Distribution Patterns of Effective Reservoirs in the Carboniferous Volcanic Weathering Crust in Northern Xinjiang [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(5): 757 - 766.

下期要目

- 再论鄂尔多斯盆地寒武纪岩相古地理及沉积构造演化 陈启林, 白云来, 马玉虎, 等
松辽盆地东南缘营城组流纹岩类型及其火山岩地层分析中的意义 王腾飞, 程日辉, 沈艳杰
黑龙江漠河县八里房金矿床地球化学特征及成因 张国宾, 杨言辰, 王献忠, 等
延边地区晚中生代柳洞岩体的成因: 锆石 U - Pb 年代学和地球化学证据 张超, 徐仲元, 刘正宏, 等
马卡山不同植被群落下非饱和带大孔隙流路径示踪试验 张家明, 徐则民
三轴压缩下南京下蜀土的宏观性状试验 韩爱民, 肖军华, 乔春元, 等
闽江河口区水体中镭的分布特征及河水与海水的混合速率 刘花台, 郭占荣, 高爱国, 等
利用 TDR100 系统原位监测深厚包气带水热动态 何雨江, 蔺文静, 王贵玲
二氧化碳泄漏停止后天然条件下浅层含水层的自我修复能力评价 杜尚海, 苏小四, 郑连阁
地球物理勘探中几种二维插值方法的误差分析 王兆国, 程顺有, 刘财
基于不等式约束的磁共振信号 T_2 谱多指数分解法及算法改进 林君, 慧芳, 孙淑琴, 等