内蒙古塔木素地区断层铁化学种特征 及其对断层活动性的指示

郭超¹⁾,黎广荣^{1,2,3)},王超¹⁾,张炜强¹⁾,刘帅³⁾,龚志军³⁾,刘晓东^{1,3)}
1)东华理工大学放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室,南昌,330013;
2)南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室,南京,210093;
3)东华理工大学地球科学学院,南昌,330013

内容提要:塔木素地区的构造稳定性对其作为高放射性废料处置预选地至关重要,需要进行全方位系统调查与 安全评价。结合野外地质资料,利用 X 射线衍射和穆斯堡尔谱技术对该地区 3 条断层的断层泥及其围岩进行矿物 组成和铁化学种分布特征研究发现:① 塔木素断层(F₂)围岩和断层泥主要以石英、长石为主,断层泥中含少量粘土 矿物而其围岩几乎不含粘土矿物;样品中均只含氧化性铁。② 乌兰铁布科断层(F₄)围岩和断层泥中矿物以粘土矿 物和方解石为主,见有微量黄铁矿,粘土矿物主要为伊利石、蒙脱石、伊蒙混层;断层围岩中只含还原性铁,但断层泥 中含有少量的氧化性铁。③ 除样品 TMS04 不含方解石,那仁哈拉断层(F₇)围岩和断层泥均含石英、长石和粘土矿 物及少量方解石,粘土矿物主要为绿泥石和伊利石、蒙脱石;在断层泥及围岩中均检测到氧化性铁和还原性铁,除 TMS04 中氧化性铁含量较高于还原性铁以外,其余所有样品中氧化性铁含量均稍低于还原性铁。断层泥和断层围 岩的矿物组成和铁化学种分布特征与断层的发展演化密切相关,其差异性显示塔木素地区断层与深部和外界的复 杂连通性关系,总体显示断层处于相对稳定状态。

关键词:断层泥;X射线衍射;穆斯堡尔谱;铁化学种;塔木素

随着我国核工业的发展,高放射性废料安全处 置问题已不可回避,甚至越加突出。经过多年研究 与实践,将高放废物处置在深部稳定的地质体中是 目前公认的优选方案(Laverov et al., 1994; Costin, 1997; 王驹, 1998; 郭永海等; 2001)。处置库周围的 地质体(也称为围岩)作为放射性核素进入环境中 的最后一道屏障,其性质关系到处置库长期安全运 行及隔离核废物的有效性,因此选择合适的围岩显 得尤为重要。世界各国对处置库的"可能"围岩进 行了详细的研究(王驹等,2006),大多数国家选择 花岗岩或粘土岩作为处置库围岩。相比花岗岩中发 育大量规律性较差的裂隙(这些裂隙作为地下水等 流体的活动通道十分不利于隔离核废物)(郭永海 等,2016),粘土岩则具有更低的导水率和更强的自 封闭能力等特点,将其作为处置库围岩优势凸显 (Agency ONE, 1999;郑华玲等, 2007)。结合我国社 会经济等条件,粘土岩处置库的选址成为当前我国

高放废物处置研究的热点。除此之外,区域地壳稳 定性也是处置库选址的重要影响因素,其本质在于 区域断层的活动特征。

断层泥是地壳浅层脆性活动断裂带中常见的一种断层变形产物(Sibson,1977;Bos et al.,2000)。作为断层活动的直接产物,断层泥主要由岩石碎屑和粘土矿物组成(邵顺妹,1994;Vrolijk et al.,1999), 其特征记录了断层活动的各种重要信息(Hoffman et al.,1979;赵军等,2009;Schleicher,2010)。在断层活动过程中,断层带内流体(包括地下水等)十分活跃,强烈且持续的水一岩作用可形成大量新生粘土矿物(O'Neil,1984;Bradbury et al.,2015)。这些粘土矿物对外界环境十分敏感,并且在一定条件下可以相互转化,因此断层泥中粘土矿物的类型及组合可以揭示断层的演化过程(张秉良等,1994)。此外,断层活动可能导致断层泥化学成分发生改变(段庆宝等,2015)。断层泥的化学成分不仅与其围

注:本文为国家国防科技工业局高放废物地质处置西北地区粘土岩场址筛选与评价调查研究项目(编号:科工二司[2014]1587号)和江西 省数字国土重点实验室开放基金项目(编号:DLLJ201714)的成果。

收稿日期:2018-04-03;改回日期:2018-07-23;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2018.06.005

作者简介:郭超,男,1992年生,硕士研究生,构造地质学、地球化学专业。Email:653728136@qq.com。通讯作者:黎广荣,男,1979年生,博士,讲师,主要从事磁组构与岩浆流动、矿物精细结构研究和教学工作。Email: liguangrong0086@ecit.en。



图 1 中国西部青藏高原型变形系统(据李锦轶等,2014)及塔木素地区构造体系图(据管伟村等,2014) Fig.1 Deformation system of the Tibetan plateau type in west China (from Li Jinyi et al., 2014&) and Map of the tectonic system in Tamusu area (from Guan Weicun et al., 2014&)

岩相关,还与断层泥的性质、赋存的环境等密切相关 (王华林等,2017),特别是断层带的氧化还原条件 对断层泥的形成和聚集起明显的控制作用(郑国 东,2008)。研究表明,断层带的氧化--还原条件与 断层的活动特征具有明显的对应关系(郑国东等, 2011)。铁是一种分布极广,而且对氧化--还原条 件非常灵敏的变价元素,对环境变化具有良好的指 示作用。利用断层泥中铁元素化学种的分布特征可 以判识其所处的氧化还原条件,进而分析断层的构 造活动性及其演化特征 (Zheng Guodong et al., 2008)。塔木素地区作为高放废物粘土岩预选区之 一,其区域内断层的断层泥的矿物组成及其铁元素 地球化学特征的研究对探索断层演化环境、活动特 征等问题具有重要意义,更有助于了解区域地质体 的稳定性(Sammis et al., 1989; Ferri et al., 2010; Haines et al., 2013; 王正阳等, 2014)。

1 区域构造背景

研究区位于古亚洲构造域和特提斯构造域的交 汇部位,处于塔里木、哈萨克斯坦、西伯利亚和华北 四大板块构造的结合部位(图1)。从早古生代早期 板块的分离状态,到晚奥陶世开始碰撞,在晚古生代 末完全拼合形成了褶皱基底与前寒武纪结晶陆块双 重性基底,塔木素地区一直处于被动陆缘和缝合带 环境(张代生等,2003)。从三叠纪开始,研究区全 面进入陆内盆山构造演化阶段。受印支运动的影 响,在早、中三叠世整个地区处于造山期的隆升环境 中。晚三叠世开始,研究区进入造山期后的地壳拉 伸松弛阶段,地壳表层处于张性构造条件下,从而形 成以北东向为主的一组张性断裂系统(王廷印等, 1993;陈启林等,2006)。从侏罗纪早期开始,受东太 平洋板块向北西方向俯冲与西伯利亚板块南移双重 作用的影响,研究区整体表现为区域性张扭应力状 态,在继承晚三叠世张性构造与基底断层的基础上, 发育了呈北东向和北东东向断层。受阿尔金断裂及 其分支的走滑影响,研究区在中侏罗世至早白垩世 形成一系列的拉分盆地群。随着早白垩世末期强烈 的火山活动,地下能量大量释放。到晚白垩世,裂陷 作用终止,并由早期的裂陷作用转化为冷却收缩和 岩石圈的大幅度拉伸沉降,区域性补偿作用使其在



图 2 塔木素地区断层野外露头及采样点 Fig.2 The outcrops and sampling points in the Tamusu area

更大的范围内形成坳陷,表现为平稳的整体坳陷沉降(刘春燕等,2006;陈启林等,2006)。第三纪以来,印度板块向北俯冲以至与欧亚板块相撞,对研究区的构造应力场发生明显影响,由前期引张变为挤压应力状态,从而使盆地形成挤压抬升的构造背景并产生大量新断层(张成勇等,2015)。区内构造以NE向、近EW向或NW向断裂构造为主(图1),褶皱构造不发育(陈高潮等,2015)。这些断裂构造与区域断裂及控盆断裂的复合,不仅控制了盆地隆拗相间的构造格局,同时也控制了沉积相、沉积体系的类型和空间展布状况,而且还进一步控制了盆地的构造演化(管伟村等,2014)。

针对所圈定的处置库预选地段及周围断层出露 状况,选择其中3条断层为研究对象,分别为 F₂, F₄,F₇。野外踏勘显示:

塔木素断层(F₂)走向呈北东 70°,向南东倾斜, 倾角 70°~80°,长约 40 km。沿走向略显舒缓波状, 南盘常出现 0~3 m 的断层陡坎,断层西段中侏罗统 逆冲到下白垩统巴音戈壁组下段之上。据巴音戈壁 组下段岩层拖曳现象分析,可能曾发生过微弱左行 扭动,属压性断层。研究剖面(图 2a)主要出露土黄 色断层泥,断层泥中含少量角砾,未见构造透镜体和 揉皱现象。断层泥的厚度约为 30~50 cm 不等,粘 土含量亦不均匀。断层两侧岩石较为破碎,节理十 分发育,岩性以含砾粗砂岩为主。

乌兰铁布科断层(F₄)呈北东走向,西段总体走

向 67°,自乌兰铁布科向东至乌兰陶勒盖渐转为 90° 左右。断层在区内延伸长度约为 65 km,大部分地 段被第四系覆盖,仅部分地区出露下白垩统地层。 局部造成下白垩统巴音戈壁组上、下岩段间以断层 相接。该断层大多数地段发育在巴音戈壁组下段, 形成岩石破碎带,沿破碎带可见大多数岩石发生碳 酸盐化。断层的宏观展布地貌特征显示为一压性断 层。该断层形成于燕山期,在喜马拉雅期仍有活动 (王凤岗等,2018)。钻孔岩芯显示(图 2b),该断层 主要发育灰黑色断层泥,断层泥含有极少量角砾,无 揉皱等变形现象。围岩靠近断层泥部位发育劈理, 断层泥与围岩接触部位可见擦痕。

那仁哈拉断层(F₇)规模较大,总长大于 250 km,多被上白垩统红层和第四系覆盖,为一隐伏大 断层。该断层仅在那仁哈拉晚石炭世地层中才能见 到较清晰的构造形迹,断层造成山前平直陡坎或山 间条形洼地,带内岩石破碎,各种劈理发育。北西盘 发育同组小断层,产状 337°∠64°,与主裂面产状一 致,小断层中见有断层泥及岩石的强烈破碎现象,其 南东盘上白垩统红层中小裂面则不甚发育。那仁哈 拉山两侧上白垩统冲积扇相砂砾岩发育,可见巨砾 岩,说明该断层主要活动时期应在燕山早期或印支 晚期,那仁哈拉山在燕山晚期隆起。该断层在那仁 哈拉一带造成石炭纪地层的隆起。野外调查选取两 个观测剖面(图 2c 和图 2d、图 2e)。图 2c 和图 2d 中两条次级断层互相切穿,并在近地表出露。断层 剖面主要发育灰白色—灰黑色断层泥,断层泥厚度 达50 cm,含少量角砾,未见构造透镜体和揉皱现 象。不同部位断层泥粘土含量具有较大差异。局部 断层泥中发育厚度约10 cm的方解石脉(图2d)。 图 2e 中断层观测剖面显示断层两侧岩石破裂严重, 局部发育约5 cm 厚的灰黑色含少量角砾断层泥。

2 样品采集与分析方法

2.1 样品采集

野外踏勘发现,所研究的3条断层大部分隐伏, 仅局部出露地表。在新开挖揭露出的断层面处,清 除外层风化的岩土体,记录野外采样位置,采集新鲜 的断层泥与断层围岩样品(图2),装在密封塑料袋 中,尽快运回实验室分析处理。其中,F₂ 断层上盘 围岩以土黄色含砾中粗砂岩为主,断层泥呈土黄色; F₄ 断层围岩为灰黑色泥岩,断层泥呈灰黑色,肉眼 可见黄铁矿颗粒,样品采集于钻孔 81 m 深处的岩 芯;F₇ 断层围岩以灰色—灰白色中粗砂岩为主,断 层泥呈灰色或灰白色。采样位置及编号见表1。

表1样品特征及采样位置

 Table 1 Sample characteristics and sampling position

样品编号	样品特征	采样位置	采样坐标
TMS01	土黄色断层泥	F ₂ 断层带	N 40°41′8″
TMS02	土黄色中粗砂岩	F ₂ 断层上盘	E 103°15'26"
TMS04	灰白色断层泥	F ₇ 断层带	N 40927/15"
TMS05	灰白色中粗砂岩	F7 断层下盘	E 102942/28''
TMS06	灰色断层泥	F ₇ 断层带	E 105 45 58
TMS07	灰黑色断层泥	F ₇ 断层带	N 40°37′4″
TMS08	灰色中粗砂岩	F7 断层上盘	E 103°43'45"
TMS09-1	灰黑色断层泥	F ₄ 断层带	N 40°39'28"
TMS09-2	灰黑色泥岩	F ₄ 断层上盘	E 103°32'5"

2.2 分析方法

2.2.1 X 射线衍射测试

X 射线衍射(XRD)实验是矿物鉴定最常用的 方法,可以对矿物组成进行定性半定量分析。样品 的 XRD 分析测试由全岩分析和粘土矿物分析两部 分组成。首先将新鲜的断层泥及围岩样品置于 60° 的烘箱中烘干一天。将少量烘干的样品置于玛瑙研 钵中研磨至粉末状(<200 目),取少许粉末样品置 于样品盒的凹槽内,利用毛玻璃片将样品压实、压平 以制成用于全岩 X 射线物相组成分析的样品。粘 土矿物物相组成分析采用粒径<2 μm 颗粒大小的 粘土矿物定向样品,粘土矿物提纯采用沉淀法 (Jackson,1985),制备过程如下:取少量研磨后的全 岩样品粉末置于烧杯中加一定量蒸馏水和少量分散 剂,加入有机酸热处理去除碳酸盐矿物,加入 30% 双氧水去除有机质并采用 DCB 方法去除含铁、铝等 氧(氢氧)化物,充分搅拌 60 min 后静置 8 h,吸取上 层悬浮液置于离心杯中,经离心机离心处理之后即 可得到提纯的粘土矿物。将分离提纯的粘土矿物泥 浆涂于玻璃上(厚约 0.3 mm),置于室内自然干燥, 即可制成粘土矿物自然定向片。在实验过程中,某 些粘土矿物在某一入射角度具有相似的衍射图谱。 由于不同的粘土矿物具有不同的特殊性质(如膨胀 稳定性等),因此,在实验前对样品进行特殊处理可 准确鉴定粘土矿物成分。本次实验对测试样品采用 乙二醇饱和处理,即将制成的粘土矿物自然定向片 置于乙二醇饱和蒸汽中在 70℃条件下保持 3~4 h 制成乙二醇饱和粘土矿物试样。

XRD 分析测试在中国地质大学(武汉)地质过 程与矿产资源国家重点实验室完成。全岩 X 射线 分析仪器为 X^{*}Pert PRODY 2198 型(荷兰产). 入射 光源为 CuKα 辐射, Ni 片滤波, X 光管工作电压为 40 kV, 管电流为 40 mA; 光阑系统为 DS=SS=1°, RS =0.3 mm。采用连续扫描方式,扫描速度为 0.1°20 ·s⁻¹,扫描范围为3°~65°。粘土矿物定向样品分析 仪器为丹东通达公司生产的 TD-3500, 入射光源为 CuKα辐射,Ni片滤波,X光管工作电压为30kV,电 流为 30 mA: 光阑系统为 DS=SS=1°。粘土矿物定 向样品衍射谱图中,衍射峰仅出现001及其多级衍 射,且集中在 30°以内(洪汉烈等,2017)。因此为了 采集强度足够大日精度更高的衍射数据,对于粘土 矿物定向样品的衍射谱图,扫描速度减小为0.02° 2θ·s⁻¹,扫描范围为 3°~30°。非粘土矿物的半定 量计算方法按中国石油天然气行业标准《沉积岩中 黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法》 (SY/T5163-2010)进行。粘土矿物的半定量分析利 用 Newmod II 软件基于饱和片 X 射线衍射图谱拟合 所得(Reynolds et al., 1996)。

2.2.2 穆斯堡尔谱测试

穆斯堡尔谱在确定铁离子占位、核外环境及氧 化态方面具有独特的优势(郭海棠等,2014),并且 具有极高的灵敏度和分辨率,目前已广泛用于精细 测试各种铁元素化学种。实验前首先选取适量的新 鲜的断层泥和围岩样品进行加工,使用玛瑙研钵中 将样品研磨至 200 目左右粉末状,并在干燥密闭条 件下封存,以避免样品在保存过程中可能发生氧化 还原作用进而影响测试结果。穆斯堡尔谱测试在武 汉大学物理科学与技术学院的穆斯堡尔谱实验室完



Cal-方解石(calcite); Pyr-黄铁矿(pyrite); Dol-白云石(dolomite)

图 3 塔木素地区样品 X 射线衍射图

Fig. 3 X-ray powder diffraction spectra of samples in Tamusu area

成,分析仪器为德国 Wissel 公司生产的 Bench MS-500,放射源为57Co,强度 25 mCi。样品谱测试采用 透射法。实验前参考张富良等(1997)的方法,计算 出需要测试样品的最佳质量为 150~250 mg,以获取 较高质量的穆斯堡尔谱图。按照最佳质量,将测试 样品放入样品盒并置于仪器样品架中进行穆斯堡尔 谱测试。样品测试在低温(约77K)和室温(约293 K)条件下进行。样品中的铁元素受到放射源发射 的γ射线照射,发生无反冲共振吸收(即穆斯堡尔 效应)。测量透过样品的 γ 射线计数与入射 γ 射线 能量变化(即与多普勒速度)的关系,可得到测试样 品的穆斯堡尔吸收谱。采用 WinNoroms-for-Igor 软 件对所测样品的穆斯堡尔数据解谱,根据谱图的吸 收峰样式、位置和相关的穆斯堡尔参数,确定样品中 的铁化学种,利用各铁元素化学种谱线的面积可计 算其相对含量。

3 分析结果

3.1 断层泥及围岩矿物组成

矿物种类的鉴定主要是利用物相的特征衍射峰 来判断。对于粘土矿物,可通过自然定向片矿物的 特征衍射峰与乙二醇饱和后的矿物特征衍射峰对 比,进而区分不同种类的粘土矿物(洪汉烈等, 2017)。根据样品的全岩和粘土矿物的X射线衍射 图谱(图3,图4),确定样品中的矿物种类和相对含 量(表2,表3)。

表 2 塔木素地区样品 X 射线分析结果									
Table 2 X-ray powder diffraction results of samples									
• •									

in Tamusu area

样品编号	所属 断层	矿物含量(%)							
		石英	长石	白云石	方解石	黄铁矿	方沸石	黏土	
								总量	
TMS01	F ₂	9	87					4	
TMS02		33	65					2	
TMS04	F ₇	35	25					40	
TMS05		10	24		1			65	
TMS06		6	5		2			87	
TMS07		19	33		10			38	
TMS08		21	30		5			44	
TMS09-1	F ₄	3	4	4	36	1		52	
TMS09-2		7	5	7	18	2	12	49	

表 3 塔木素地区样品粘土矿物 X 射线综合分析结果

Table 3 X-ray powder diffraction results of clay minerals

in Tamusu area

样品编号	所属 断层	黏土含量(%)							
		伊利石	绿泥石	伊蒙混层	高岭石	蒙脱石	白云母		
TMS01	Г			39	25	14	22		
TMS02	r ₂								
TMS04	F ₇	77	8			15			
TMS05		19	67			14			
TMS06		10	63			27			
TMS07		33	57			10			
TMS08			85			15			
TMS09-1	F ₄	55	2		4	39			
TMS09-2		62	4	24	6	6			

全岩分析结果显示 TMS02 样品中粘土矿物含量仅 为2%,现有实验条件下无法提纯足量的粘土制作 定向片,因此无法对其粘土矿物进行定性定量分析。 从 X 射线衍射分析结果可以看出, F, 断层中断层围 岩及断层泥成分主要为石英、长石及少量粘土矿物: 断层泥粘土矿物以白云母、伊蒙混层、蒙脱石、高岭 石为主。F、断层的断层围岩和断层泥主要成分均 为方解石和粘土矿物,含少量石英、长石、白云石和 微量黄铁矿,但围岩中含有大量方沸石(12%),而 断层泥中不含方沸石。对于该断层样品的粘土矿 物,围岩以伊利石和伊蒙混层为主,含有少量蒙脱 石、高岭石和绿泥石,断层泥中则主要为伊利石和蒙 脱石,伴有少量高岭石和绿泥石。F,断层围岩和断 层泥主要由石英、长石及粘土矿物组成,含少量方解 石;除TMS08中不含伊利石,其余围岩和断层泥样 品中粘土矿物主要为伊利石、绿泥石和蒙脱石。总 体来看,三条断层围岩与其断层泥矿物组成相似,但 是其成分含量具有差异性。

3.2 断层围岩及断层泥穆斯堡尔谱特征

断层围岩和断层泥样品的穆斯堡尔谱如图 5 所 示。所有样品在室温(约 293K)条件下测试仅出现 双线吸收峰。在室温条件下测试 F₂ 断层断层泥 TMS01时,穆斯堡尔谱拟合质量较低,其原因可能 与样品中铁含量低有关。塔木素地区所有样品主量 元素结果表明(另文待发表),TMS01和TMS02 样品 中全铁含量分别仅为 2.47%和 0.52%。一方面,穆 斯堡尔核少导致实验获取的谱线强度较弱,难以获 得精度较高的穆斯堡尔参数(张富良等,1997);另 一方面,测试温度降低可以增强穆斯堡尔效应(张 金升等,2003)。因此,为了得到高质量穆斯堡尔 谱,在低温(约77 K)条件下对TMS01和TMS02两 个样品进行测试(表4)。低温条件下,穆斯堡尔谱 出现单线和六线吸收峰。对于单线吸收峰,其特征 是四极分裂值较小而形成单峰型穆斯堡尔谱(郭海 棠等,2014)。对于双线吸收峰,四极分裂值较大的 双峰一般被认为是粘土矿物(如绿泥石等)中或与 有机质结合的顺磁低价铁(para-Fe²⁺);四极分裂值 较小的一般被认为是粘土矿物或氢氧化物中的顺磁 高价铁(para-Fe³⁺)(Heller-Kallai et al.,1981;Zheng Guodong,2001,2002)。对于六线吸收峰,是由于铁 磁性矿物中的 Fe 所引起的,根据相关穆斯堡尔谱参 数,我们认为引起这种谱线的铁磁性矿物是赤铁矿

表 4 塔木素地区断层围岩及断层泥样品穆斯堡尔谱参数及其各种铁化学种的相对含量

Table 4 Parameters of Mossbauer spectrum and relative contents of iron species in fault gouges and wall rocks of Tamusu area

样品号	铁离种类	岩性	相对含量(%)	IS(mm/s)	QS(mm/s)	HW(mm/s)	Hi(kOe)	Fe ²⁺ /Fe ³⁺	
F ₂ 断层									
TMCO1	para-Fe ³⁺	断层泥	45.00 ±0.86	0.28 ±0.14	0.52 ±0.35	0.30 ±0.21			
1M501	para-Fe ³⁺		55.00 ±0.87	0.42 ±0.21	0.83 ±0.33	0.372 ±0.092			
	para-Fe ³⁺		25.00 ±0.59	0.382 ±0.032	0.27 ±0.34	0.35 ±0.42			
TMS01	para-Fe ³⁺	断层泥	21.00 ±0.57	0.412 ±0.058	0.91 ±0.47	0.35 ±0.25			
(77K)	mag-Fe ³⁺		23.00 ±0.29	0.59 ±0.34	0.02 ±0.38	0.40 ±0.20	453.2 ±4.1		
	mag-Fe ³⁺		31.00 ±0.28	0.37 ±0.22	-0.46 ±0.22	0.35 ±0.14	451.4 ±2.6		
	para-Fe ³⁺		24.00 ±0.10	0.136 ±0.081	0.56 ±0.13	0.229 ±0.093			
TMS02	para-Fe ³⁺	般自国帝	10.00 ±0.13	0.65 ±0.30	0.20 ±0.13	0.34 ±0.58			
(77K)	mag-Fe ³⁺	则压凹石	34.00 ±0.25	0.95 ±0.20	0.00 ±0.18	0.50 ±0.34	465 ±12		
	mag-Fe ³⁺		32.00 ±0.22	0.05 ±0.16	-0.56 ±0.15	0.42 ±0.27	459.2 ±9.8		
				F4 断层					
	para-Fe ²⁺		31.40 ±0.30	1.097 ±0.022	2.640 ± 0.043	0.237 ±0.030			
TMS09-1	-1 pyr-Fe ²⁺ 断	断层泥	64.70 ±0.31	0.3132 ± 0.0084	0.614 ± 0.016	0.214 ±0.013		24.641	
	para-Fe ³⁺		3.90 ±0.28	0.502 ± 0.076	1.28 ±0.14	0.14 ±0.11			
TMS00 2	para-Fe ²⁺	船居国帝	41.60 ±0.34	1.119 ±0.015	2.559 ± 0.028	0.213 ±0.021			
111309-2	pyr-Fe ²⁺	明云凹石	58.40 ±0.32	0.332 ±0.020	0.599 ± 0.031	0.305 ±0.031			
				F ₇ 断层					
	para-Fe ²⁺		42.70 ±0.38	1.144 ±0.014	2.657 ± 0.028	0.167 ±0.018			
TMS04	para-Fe ³⁺	断层泥	28.40 ±0.66	0.364 ±0.023	2.030 ± 0.048	0.204 ±0.043		0.7452	
	para-Fe ³⁺		28.90 ±0.76	0.232 ±0.069	0.620 ± 0.013	0.330 ±0.013			
	para-Fe ²⁺		53.70 ±0.17	1.1310 ± 0.0051	2.611 ±0.010	0.1637 ±0.0064			
TMS05	para-Fe ³⁺	断层围岩	34.80 ±0.32	0.306 ±0.025	0.753 ± 0.052	0.321 ±0.044		1.1598	
	para-Fe ³⁺		11.50 ±0.24	0.344 ±0.016	2.039 ±0.034	0.151 ±0.031			
	para-Fe ²⁺	断层泥	56.90 ±0.30	1.120 ±0.010	2.628 ±0.020	0.162 ±0.011			
TMS06	para-Fe ³⁺		23.00 ±0.13	0.428 ±0.071	1.09 ±0.022	0.29 ±0.10		1.2902	
	para-Fe ³⁺		21.10 ±0.11	0.352 ±0.029	0.555 ± 0.070	0.174 ±0.055			
	para-Fe ²⁺	断层泥	53.20 ±0.18	1.1353 ±0.0071	2.619 ±0.015	0.1685 ±0.0073			
TMS07	para-Fe ³⁺		24.00 ±0.25	0.374 ±0.053	1.010 ± 0.051	0.366 ±0.081		1.1367	
	para-Fe ³⁺		22.80 ±0.23	0.370 ±0.016	0.599 ±0.066	0.187 ±0.073			
	para-Fe ²⁺		50.40 ±0.18	1.1262 ± 0.0051	2.618 ±0.010	0.1758 ± 0.0080		1.0100	
TMS08	para-Fe ³⁺ 断层围岩	断层围岩	12.40 ±0.21	0.332 ±0.016	2.006 ± 0.033	0.154 ±0.028			
	para-Fe ³⁺		37.20 ±0.21	0.363 ±0.014	0.651 ±0.025	0.252 ±0.022			

注: para-Fe³⁺为顺磁性高价铁, para-Fe²⁺为顺磁性低价铁; mag-Fe³⁺为磁性的三价铁; Pyr-Fe²⁺为黄铁矿中 Fe²⁺; 穆斯堡尔谱参数分别为: IS—同质异能移动; QS—四极分裂; HW—半线宽; Hi—超精细场强度。



图 4 塔木素地区样品粘土矿物 X 射线综合分析图谱

Fig.4 X-ray powder diffraction spectra of clay minerals in Tamusu area





1373

(α-Fe₂O₃)(应育浦等,1997;王随继等,1998)。此 外,一般来说,在氧化物、氢氧化物、硅酸盐矿物中, Fe²⁺同质异能位移分布于 1.00~1.60 mm/s,Fe³⁺同 质异能位移分布于 0.35~0.80 mm/s(应育浦等, 1997;夏元复,1987)。表4列出了所测样品中各类 铁元素化学种的相对含量及其穆斯堡尔谱参数拟合 结果。

结合样品的矿物组成与穆斯堡尔谱结果(表 4) 来看, F_2 断层样品中的 para-Fe³⁺均来源于粘土矿物;实验中未检测到 para-Fe²⁺,可能是粘土矿物含量 较低,粘土矿物中的 para-Fe²⁺不足以引起明显的穆 斯堡尔效应。X 射线衍射实验未检测到磁性含铁物 质,这可能是由于 TMS01 和 TMS02 样品中全铁含量 较低所致。通过与前人的研究对比,我们认为含有 磁性铁(mag-Fe³⁺)的磁赤铁矿可能形成于古风化环 境且附着在陆源粘土表面而进入沉积盆地且得以保 存(王随继等,1998;Kuno et al.,2002)。相比之下, F_4 和 F_7 断层样品中的铁元素化学种均来源于样品 中的粘土矿物。

从3条断层样品的Fe化学中分布特征(图6) 来看, F_2 断层围岩和断层泥中未检测出二价铁,显 示断裂带内相对较强的氧化环境。 F_4 断层围岩只 检测到 para-Fe²⁺和 Pyr-Fe²⁺,而断层泥中还检测到



wall rocks of Tamusu area

少量 para-Fe³⁺,显示断裂带内相对较强的还原环境。 F₇ 断层围岩和断层泥中均检测到 para-Fe²⁺和 para-Fe³⁺,两者含量几乎相等,显示断裂带内还原环境相 对较弱。

4 讨论

4.1 矿物共生组合及其指示意义

通常来说,断层泥是地震断层快速滑动过程中 岩石--流体的相互作用的结果(付碧宏等,2008), 因此断层泥中矿物组合的特征可以反映出断层的演 化历史以及断层活动过程中的环境变化。从造岩矿 物来看,F,断层泥(TMS01)中石英含量明显低于围 岩,而长石含量相对高于围岩。由于断层快速滑动, 断层带内部处于高温高压状态(段庆宝等,2015)。 实验证明,石英在高温高压下形成 SiO, 胶体 (Frederickson et al., 1954;张生, 1997), 而断层成为 这些胶体的迁移通道(Goddard et al., 1995)。这些 胶体在地质应力作用下迁移,使得局部断层泥中长 石相对含量比围岩较高。相比其他矿物,F。断层泥 和断层围岩中方解石含量差别较大(断层泥中方解 石含量为36%,围岩中方解石含量仅18%)。这一 现象可能是由于断层活动时,围岩中矿物(如方沸 石)受到热液(中、低温热液为主)蚀变,造成断裂带 中富集大量新生方解石。断层围岩和断层泥样品采 于地下深处 81 m 的岩芯样品, 而地表出露的岩石破 碎带中大多数岩石已碳酸盐化,这可能与断层活动 过程中热液活动相关。F, 断层泥和断层围岩中均 检测到方解石(除TMS04外),断层泥中方解石含量 高于断层围岩,TMS06样品采集点附近见有方解石 脉,表明断层为热液活动提供通道。断裂带内热液 的作用,一方面持续的水—岩作用可以促使粘土矿 物的形成:另一方面,新形成的粘土矿物可能随流体 迁移,造成断层带中局部粘土的富集,而某些部位较 匮乏。

相较于造岩矿物,粘土矿物对外界环境的变化 非常敏感,因此断层泥中粘土矿物的不同类型及组 合,实际上反映了断层活动的环境条件,甚至不同的 活动方式(林传勇等,1995)。长石类矿物在特定条 件下(比如水介质的酸碱性),经过不同的矿物变化 途径形成粘土矿物(Wu et al.,1975,1978;张汝藩, 1992)。而在一定条件下,这些粘土矿物可以相互 转化(Tanaka et al.,2001;Velde et al.,1992;Moore et al.,1997)。研究证实,蒙脱石在温度和富 K⁺流体的 作用下形成伊利石—蒙脱石混层,随着温度升高,混 层比变大,最后形成伊利石(Vrolijk et al., 1999;黄 思静,1990;周张健,1994);伊利石在潮湿的环境中 可以转化为蒙脱石(党嘉祥等,2012)。F,断层围岩 与断层泥中矿物主要以石英、长石为主,从F,断层 泥中粘土矿物含量(4%)和围岩中粘土矿物含量 (2%)差异来看,F,断层活动强度较小,断层带中 水--岩作用较弱。从 F₇ 断层围岩和断层泥粘土矿 物类型和含量上来看,断层泥中绿泥石含量明显低 于围岩,而伊利石和蒙脱石含量较高,这一现象可能 指示断层活动中存在富 K 流体的参与。根据野外 断层产出状态,不同采样点的断层泥粘土组合差异 可能与断层的多期次活动相关。F₄断层中断层泥 和断层围岩仅表现出蒙脱石含量的增加和伊蒙混层 含量的减少,并无其他新生矿物,断层泥与围岩粘土 矿物含量相差较小,揭示断层带长期处于湿润状态, 流体活动促使伊利石和伊蒙混层中 K⁺不断迁移被 析出,最后形成蒙脱石。

此外,断层泥中粘土矿物类型与断层活动方式 相关(张秉良等,1989)。富伊利石及高岭石的断层 泥是断层粘滑活动的产物,富蒙脱石断层泥则是断 层蠕滑活动的产物(Isaacs et al.,2007,袁仁茂等, 2013)。从断层泥与围岩中粘土矿物组合差异特征 来看,推测 F_2 和 F_7 断层最新活动方式主要为粘滑, F_4 断层最新活动方式主要为蠕滑。

4.2 Fe 化学种分布特征及其指示意义

断层泥的地球化学特征与断层演化联系密切, 其所处的环境条件,特别是断层内的氧化还原条件 可能对断层泥的形成与聚集,甚至是断层的形成时 间及其活动特征具有一定的指示意义(Zheng Guodong et al., 2008)。郑国东(2008)、马向贤等 (2014)通过对映秀—北川断裂带中新鲜的黑色、深 灰色断层泥研究发现,断层泥以还原性S、Fe 化学种 富集为主,认为这是与深部还原性物质交换的结果. 显示映秀—北川断裂为典型的活动断层。Zheng Guodong 等(2008)从日本牛首断裂新老断层的断层 泥中 Fe、Mn、S 元素化学种分布特征来看,老断裂的 断层泥以氧化性元素化学种富集为主而新断裂断层 泥则主要含还原性元素化学种,由此认为这一现象 与断层的形成年龄及断层带内物质与外界或深部的 物质交换有关。王华林等(2017)对山东黄县弧形 断裂断层剖面上多种不同颜色的断层泥 Fe 元素化 学种分布特征的研究结果也显示断层泥的 Fe 元素 化学种与断裂带的演化历史密切相关。同时,上述 认识与其野外调查等其他研究结果具有较好的一致

性。结合前人研究,断层泥中的某些氧化还原条件 敏感性元素化学种分布与其所处的氧化还原环境相 关,断层的活动特征与断层带所处的氧化还原条件 具有明显的对应关系,断层带处于氧化条件说明断 层处于较长时间的相对稳定状态,而断层带处于还 原条件则揭示断层形成时间相对较短,可能仍存在 与地下深部还原性物质的交换,表明断层的现今活 动性。

穆斯堡尔谱实验结果显示,F,断层泥和围岩均 只显示高价铁,缺乏低价铁,表明断层带处于强氧化 条件。一般来讲,压性断裂往往是一个封闭系统,断 裂带容易成为还原条件(李振生等,2005),而主量 元素结果显示断层泥中铁元素含量(2.47%)远大于 断层围岩(0.52%),揭示断层在演化过程中断层带 由封闭系统转化为开放系统。由于铁的溶解度极 低.三价铁几乎不能被搬运,因此可以认为断层中的 Fe³⁺由易溶于水的 Fe²⁺搬运到断层带中被氧化而发 生沉淀,断层带中地球化学条件由还原条件变为氧 化条件(杨为民等,2002)。F,断层围岩和断层泥的 铁元素化学种分布特征显示 F, 断层构造活动很可 能发生在浅地表,断裂带与外界连通性较好,因此推 测 F, 断层可能为浅部断层或地质块体内断层(马向 贤等,2014)。F₄ 断层围岩和断层泥中均见有黄铁 矿,表明断层泥及围岩均处于还原环境。F₄断层的 样品采集于钻孔 81 m 处的岩芯,相比断层围岩全部 显示还原性铁,而断层泥中出现少量的氧化性铁,表 明断层在演化过程中由于挤压应力的衰减,断层逐 渐趋向于开放,断层带由还原条件向氧化条件过渡。 断层泥在形成过程中不断充填在断层裂隙中,造成 断层深部与外界连通性较弱,使得断层带深部仍处 于较强的还原条件或仅出现较弱的氧化痕迹。除 TMS04 样品外, F7 断层围岩和断层泥中还原性铁都 稍高于氧化性铁,并且断层泥中还原性铁相对含量 略大于围岩。据断层野外产出特征来看,TMS04 样 品所表现出的氧化还原条件可能与富含溶解氧的地 表水灌入有关。F₇断层样品采于人工爆破的露头, F₇断层为一隐伏大断层,被上白垩统和第四系地层 覆盖,因而断裂带与外界连通极弱,而断裂带内新生 矿物的充填会降低断裂带与地下深部连通性,使得 断裂带处于相对"封闭"的状态(赵军等,2009)。断 层泥与围岩的 Fe 元素化学种分布差异指示 F₇ 断层 带内与深部还原性地质流体交换作用较弱,断层活 动时间距今较远,长期处于较稳定状态。

1375

5 结论

(1)塔木素地区3条断裂断层围岩及断层泥矿 物组成反映出断层泥受断层活动和断层带所处环境 的明显影响,其差异性特征可能反映断层的演化及 其活动特征。对比断层泥及其围岩的造岩矿物和其 中粘土矿物组成特征发现,F₂断层演化过程中水— 岩作用较弱,断层活动强度较低;F₄断层活动较弱 且活动时间相对较短,断层活动性较低;F₇断层活 动受热液和外界流体作用,具有多期次活动特征。

(2)塔木素地区3条断裂铁元素化学种特征显示,F₂断层处于强氧化条件,断层可能为浅部断层 或地质块体内断层;F₄断层围岩及断层泥形成于还 原环境,由于断层中充填物的影响,使得断层较深的 部位出现较弱的氧化痕迹;F₇断层由于断裂带充填 物的影响,断层与深部流体缺乏连通,断层基本处于 相对"封闭"的状态。

(3)综合塔木素地区3条断层的断层泥及其围 岩矿物组成和铁元素化学种分布特征,塔木素地区 断层总体上处于较稳定状态。除F₂断层以外,F₄ 和F₇断层泥和围岩均发育大量粘土矿物,有利于断 层活动,其活动性与发震可能性应引起重视。

致谢:中国科学院兰州油气资源研究中心的郑 国东研究员、马向贤副研究员、武汉大学左文彬博士 以及中国地质大学(武汉)王朝文博士在穆斯堡尔 谱和 XRD 数据解释中给予的大力指导和无私的帮 助。在野外的工作过程中,核工业 208 大队给予了 极大的帮助!

参考文献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; the literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

- 陈高潮, 史冀中, 姜亭,张慧元, 李渭, 王宝文. 2015. 内蒙古阿拉善 右旗塔木素地区酸性侵入岩锆石 U-Pb 年龄与地球化学特征. 地质通报, 34(10): 1884~1896.
- 陈启林,卫平生,杨占龙.2006.银根—额济纳盆地构造演化与油气 勘探方向.石油实验地质,28(4):311~315.
- 段庆宝,杨晓松,陈建业.2015.地震断层带流体作用的岩石物理和 地球化学响应研究综述.地球物理学进展,30(6):2448~2462.
- 付碧宏, 王萍, 孔屏, 郑国东, 王刚, 时丕龙. 2008. 四川汶川 5.12 大 地震同震滑动断层泥的发现及构造意义. 岩石学报, 24(10): 2237~2243.
- 党嘉祥,周永胜,韩亮,何昌荣,陈建业,党新增,杨晓松.2012.虹 口八角庙—深溪沟炭质泥岩同震断层泥的 X 射线衍射分析结 果. 地震地质,34(1):17~27.
- 管伟村,刘晓东,刘平辉.2014.巴音戈壁盆地塔木素地区黏土岩地 质特征研究.世界核地质科学,31(2):95~102.

- 郭海棠,许英霞,秦克章. 2014 东疆红山 Cu—Au 矿床氧化带硫酸 盐矿物穆斯堡尔谱特征及其意义.地质与勘探,50(3):486~ 493.
- 郭永海,李娜娜,周志超,董建楠,张明,刘淑芬. 2016. 高放废物处 置库新疆雅满苏和天湖预选地段地下水同位素特征及其指示意 义.地质学报,90(2):376~382.
- 郭永海, 王驹, 金远新. 2001. 世界高放废物地质处置库选址研究概况及国内进展. 地学前缘, 8(2): 327~332.
- 洪汉烈, 方谦, 王朝文, 宫旎娜, 赵璐璐. 2017. 岩浆母质对蚀变粘土 矿物的约束: 以贵州新民剖面 P—T 界线附近火山灰层为例. 地 球科学, 42(2): 161~172.
- 黄思静. 1990. 混层伊利石—蒙脱石的鉴定及其成岩意义. 岩相古地 理, (5): 23~29.
- 李锦轶,张进,刘建峰,曲军峰,李亚萍,孙桂华,朱志新,冯乾文,王励 嘉,张晓卫. 2014. 中国大陆主要变形系统. 地学前缘. 21(3): 226~245.
- 李振生,刘德良,刘波,杨强.2005.断裂性能差异的力学和化学因素分析.天然气地球科学,16(4):485~491.
- 林传勇,史兰斌,刘行松,唐汉军,陈孝德. 1995. 断层泥在基岩区断 层新活动研究中的意义. 中国地震, 11(1): 26~32.
- 刘春燕,林畅松,吴茂炳,巩固,郑孟林.2006.银根—额济纳旗中 生代盆地构造演化及油气勘探前景.中国地质,33(06):1328 ~1335.
- 马向贤, 王华林, 张志武, 时丕龙, 赵军, 张海峰, 宋振江. 2014. 青 藏高原东缘 3 条断裂带断层泥铁元素化学种的分布特征. 矿物 岩石地球化学通报, 33(3): 348~354.
- 王凤岗,侯树仁,张良,门宏,王俊林.2018.巴音戈壁盆地南部塔 木素铀矿床水岩作用特征及其与铀成矿关系研究.地质论评, 64(3),633~646.
- 王华林,郑国东,王纪强,付海清,马向贤,胡超.2017.山东黄县弧 形断裂带断层泥铁元素化学种分布特征及其地震地质意义.中 国地震,33(02):248~259.
- 王驹. 1998. 论我国高放核废物深地质处置. 中国地质, (7): 33~35.
- 王驹,徐国庆,金远新. 2006. 论高放废物地质处置库围岩. 世界核 地质科学,23(4):222~231.
- 王廷印,吴茂炳. 1993. 阿拉善地区华北板块北部陆缘区成矿作用的 研究. 兰州大学学报(自科版), 29(4): 252~256.
- 王随继,曾凡刚,黄杏珍,牛木林,孟庆华.1998. 含油气盆地中粘 土矿物的穆斯堡尔效应及应用——以柴达木盆地第三系为例. 沉积学报,16(2):109~112.
- 王正阳,曹建劲,罗松英,廖宜鹏.2014. 汶川地震带断层泥 X 射线 衍射和红外光谱分析.光谱学与光谱分析,34(5):1416~1420.
- 邵顺妹. 1997. 断层泥研究的现状和进展. 高原地震, 6(3): 51~56.
- 夏元复, 陈懿. 1987. 穆斯堡尔学基础和应用.北京:科学出版社, 1~ 280.
- 杨为民,黄文辉.2002.安徽淮南煤田南北缘断裂带构造地球化学特征.现代地质,16(3):251~256.
- 应育浦,李哲.1997.穆斯堡尔谱在矿物学中的应用.北京:地质出版 社,50~102.
- 袁仁茂,张秉良,徐锡伟,林传勇.2013. 汶川地震北川—映秀断裂 北段断层泥显微构造和黏土矿物特征及其意义. 地震地质,35 (4):685~700.
- 张秉良,冯锦江,牛娈芳,胡碧茹.1989.红河断裂带断层泥中粘土 矿物特征及其地震地质意义.地震地质,11(3):96~97.
- 张秉良,刘桂芬,方仲景,林西生,郑乃宣. 1994. 云南小湾断层泥 中伊利石矿物特征及其意义. 地震地质, 16(1): 89~96.
- 张成勇,聂逢君,侯树仁,王俊林,邓薇,张良.2015.巴音戈壁盆地 构造演化及其对砂岩型铀矿成矿的控制作用.铀矿地质,31

(3): 384~388.

- 张代生,李光云,罗肇,李兴亮. 2003. 银根—额济纳旗盆地油气地 质条件. 新疆石油地质, 24(2): 130~133.
- 张富良,易凡,陈义龙,徐斌富.1997.穆斯堡尔谱学中样品最佳厚度 的确定.武汉大学学报(自然科学版),43(3):348~352.
- 张金升, 尹衍升,张银燕,马来鹏,张淑卿. 2003. 一种强有力的表征 手段—穆斯堡尔谱学.现代仪器,9(6):33~36.
- 张汝藩. 1992. 扫描电镜在矿物变化研究中的应用—长石的粘土矿 物转化. 地质科学, (1): 66~70.
- 张生. 1997. 二氧化硅水溶物种与热力学性质. 世界地质, 16(2): 17 ~23.
- 赵军,郑国东,付碧宏. 2009. 活动断层的构造地球化学研究现状. 地球科学进展,24(10):1130~1137.
- 郑华铃,傅冰骏,范显华,陈式,孙东辉.2007.建议我国重点研究 粘土岩处置库预选场址.辐射防护,27(2):92~98.
- 郑国东. 2008. 基于穆斯堡尔谱技术的铁化学种及其在相关表生地 球科学研究中的应用. 矿物岩石地球化学通报, 27(2):161~ 168.
- 郑国东,梁收运,梁明亮,马向贤. 2011. 穆斯堡尔谱技术在地震断层 研究中的应用.第十一届全国穆斯堡尔谱学会议论文集.
- 周张健. 1994. 蒙脱石伊利石化的控制因素、转化机制及其转化模型的研究综述. 地质科技情报, 13(4): 41~46.
- Agency O N E. 1999. Radioactive Waste Management Geological Disposal of Radioactive Waste: Review of Developments in the last decade. Sourceoeed Nuclear Energy, 1~109.
- Bos B, Peach C J, Spiers C J. 2000. Frictional—viscous flow of simulated fault gouge caused by the combined effects of phyllosilicates and pressure solution. Tectonophysics, 327(3): 173 ~194.
- Bradbury K K, Davis C R, Shervais J W, Janecke S U, Evans J P. 2015. Composition, alteration, and texture of fault-related rocks from Safod core and surface outcrop analogs: evidence for deformation processes and fluid ~ rock interactions. Pure & Applied Geophysics, 172(5): 1053~1078.
- Chen Gaochao, Shi Jizhong, Jiang Ting, Zhang Huiyuan, Li Wei, Wang Baowen. 2015&. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemistry of granitoids in Tamusu, Alxa Right Banner, Inner Mongolia. Geological Bulletin of China, 34(10):1884~1896.
- Chen Qilin, Wei Pingseheng, Yang Zhanlong. 2006&. Tectonic evolution and petroleum prospection in the Yin' gen—Ejina basin. Petroleum Geology & Experiment, 28(4): 311~315.
- Costin L S. 1997. Election and characterization processes for deep geologic disposal of high level nuclear waste. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports.
- Dang Jiaxiang, Zhou Yongsheng Han Liang, He Changrong, Chen Jianye, Dang Xinzeng, Yang Xiaosong. 2012&. X-ray diffraction analysis result of co-seismic fault gouge in carbon mudstone at outcrops of bajiaomiao and shenxigou in hongkou. Seismology and Geology, 34(1): 17~27.
- Duan Qingbao, Yang Xiaosong, Chen Jianye. 2015&. Review of geochemical and petrophysical responses to fluid processes within seismogenic fault zone. Process in Geophysics, 30 (6): 2448 ~ 2462.
- Ferri F, Toro G D, Hirose T, Shimamoto T. 2010. Evidence of thermal pressurization in high-velocity friction experiments on smectite-rich gouges. Terra Nova, 22(5): 347 - 353.
- Fu Bihong, Wang Ping, Kong Ping, Zheng Guodong, Wang Gang, Shi Peilong. 2008&. Preliminary study of coseismic fault gouge occurred in the slip zone of the Wenchuan Ms 8.0 earthquake and its tectonic

implications. Acta Petrologica Sinica, 24(10): 2237~2243.

- Frederickson A F, Cox J E. 1954. Mechanism of solution of quartz in pure water at elevated temperatures and pressures. Amer. Min., (39): 886~900.
- Guan Weicun, Liu Xiaodong, Liu Pinghui. 2014&. Study on the Geological characteristics of claystone in Tamusu area of Bayingebi basin. World Nuclear Geoscience, 31(2): 95~102.
- Guo Haitang, Xu Yingxia, Qin Kezhang. 2014&. Mossbauer spectra characteristics of eight sulfate minerals in oxidization zone of Hongshan Hs-epithermal Cu—Au deposit, eastern Tianshan, NW-China, and their geological significance. Geology and Exploration, 50 (3): 0486~0493.
- Guo Yonghai, Li Nana, Zhou Zhichao, Dong Jiannan, Zhang Ming, Liu Shufen. 2016&. Characteristics and implication of groundwater isotopes in Yamansu and Tianhu preselected section for China 's high level radioactive waste disposal repository. Acta Geologica Sinica, 90(2): 376~382.
- Guo Yonghai, Wang Ju, Jin Yuanxin. 2001&. The general situation of geological disposal repository siting in the world and research progress in China. Earth Science Frontiers. 8(2): 327~332.
- Goddard J V, Evans J P. 1995. Chemical changes and fluid—rock interaction in faults of crystalline thrust sheets, northwestern Wyoming, U.S.A. Journal of Structural Geology, 17(4): 533~547.
- Haines S H, Kaproth B, Marone C, Saffer D, Pluijm B V D. 2013. Shear zones in clay-rich fault gouge: A laboratory study of fabric development and evolution. Journal of Structural Geology, 51(6): 206~225.
- Heller-Kallai L, Rozenson I. 1981. The use of mossbauer spectroscopy of iron in clay mineralogy. Physics & Chemistry of Minerals, 7(5): 223~238.
- Hong Hanlie, Fang Qian, Wang Chaowen, Gong Nina, Zhao Lulu. 2017& Constraints of parent magma on altered Clay mineral: A case study on the Ashes near the Permin—Triassic boundary in Xinmin Section, Guizhou Province. Earth Science, 42(2): 161~172.
- Huang Sijing. 1992 & Identification and diagenetic significance of interstratified illite—montmorillonite series. Sedimentary Facies and Palaeogeography, (5): 23~29.
- Hoffman J, Hower J. 1979. Clay Mineral Assemblages as Low Grade Metamorphic Geothermometers: Application to the Thrust Faulted Disturbed Belt of Montana, U.S.A. Aspects of Diagenesis, 55~79.
- Isaacs A J, Evans J P, Song S R, Kolesar P T. 2007. Structural, Mineralogical, and Geochemical Characterization of the Chelungpu Thrust Fault, Taiwan. Terrestrial Atmospheric & Oceanic Sciences, 18(2): 183~221.
- Jackson M. L., 1985. Soil Chemical Analysis——Advanced Course, 2nd edition. University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisconsin.
- Kuno A, Zheng Guo Dong, Matsuo M, Shi J A, Wang Q. 2002. Mossbauer spectroscopic study on Vertical Distribution of Iron Species in sediments from Qinghai Lake, China. Hyperfine Interactions, 141~142(1~4): 321~326.
- Laverov N P, Omelianenko B L, Velichkin V I. 1994. Geological aspects of the nuclear waste disposal problem. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports.
- Li Jinyi, Zhang Jin, Liu Jianfeng, Qu Junfeng, Li Yaping, Sun Guihua, Zhu Zhixin, Feng Qianwen, Wang Lijia, Zhang Xiaowei. 2014&. Major deformation systems in the mainland of China. Earth Science Frontiers, 21(3): 226~245.
- Li Zheng, Liu Deliang, Liu Bo, Yang Qiang. 2005&. The analysis of mechanical and chemical factors making the difference of fault's action. Natural Gas Geoscience, 16(4): 485~491.

1377

- Lin Chuanyong, Shi Lanbin, Liu Xingsong, Tang Hanjun, Chen Xiaode. 1995&. Significances of fault gouge in the study of recent activity of fault in Bedrock area. Earthquake Research in China, 11(1): 26~ 32.
- Liu Chunyan, Lin Changsong, Wu Maobing, Gong Gu, Zheng Menglin. 2006&. Tectonic evolution and petroleum prospects of the Mesozoic Yingen—Ejinaqi basin, Inner Mongolia. Geology in China, 33 (06): 1328~1335.
- Ma Xiangxian, Wang Hualin, Zhang Zhiwu, Shi Pilong, Zhao Jun, Zhang Haifeng, Song Zhenjiang. 2014 &. Distribution characteristics of Iron species in Three fault along the Eastern Margin of the Tibetan Plateau, China. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 33(3): 348~354.
- Moore D M, Reynolds R C J. 1989. X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. Oxford University Press, 210~211.
- O' Neil J R. 1984. Water—rock interactions in fault gouge. Pure & Applied Geophysics, 122(2~4): 440~446.
- Reynolds Jr R C, Reynolds III R C. 1996. NEWMOD-for-Windows. The Calculation of One-Dimensional X-ray diffraction patterns of Mixed Layered Clay Minerals. Hanover, New Hampshire.
- Sammis C G, Biegel R L. 1989. Fractals, fault-gouge, and friction. Pure and Applied Geophysics, 131(1~2): 255~271.
- Schleicher A M, Pluijm V D, Warr L N. 2010. Nanocoatings of clay and creep of the San Andreas fault at Parkfield, California. Geology, 38 (7): 667~670.
- Shao Shunmei. 1997&. Present condition and progress of gault gouge research. Earthquake Research in Plateau, 6(3): 51~56.
- Sibson R H. 1977. Fault rock s and fault mechanisms. J. Geol. Soc. London, 133(3): 191~213.
- Tanaka H, Fujimoto K, Ohtani T, Ito H. 2016. Structural and chemical characterization of shear zones in the freshly activated Nojima fault, Awaji Island, southwest Japan. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 106(B5): 8789~8810.
- Vrolijk P, Van d P B A. 1999. Clay gouge. Journal of Structural Geology, 21(8): 1039~1048.
- Velde B, Vasseur G. 1992. Estimation of the diagenetic smectite to illite transformation. American Mineralogist, 77(9):967~976.
- Wang Fenggang, Hou Shuren, Zhang Liang, Men Hong, Wang Junlin. 2018. Study on the characteristics of Water—Rock Interaction and Its relation to Uranium Mineralization in Tamusu Uranium deposit, Southern Bayin Gobi basin. Geological Review, 64(3): 633~646.
- Wang Hualin, Zheng Guodong, Wang Jiqiang, Fu Haiqing, Ma Xiangxian, Hu Chao. 2017&. Iron speciation of fault gouge from the Huangxian Arc fault in Shandong Province, eastern China and its seismo-geological implications. Earthquake Research in China, 33 (02): 248~259.
- Wang Ju. 1998#. Deep geological disposal of High-level Nuclear Waste in China. Geology in China, (7): 33~35.
- Wang Ju, Xu Guoqing, Jin Yuanxin. 2006&. On the host rock for the geological repositories of high level radioactive waste. World Nuclear Geoscience, 23(4): 222~231.
- Wang Tingyin, Wu Maobing. 1993&. A study on the mineralization of the northern continental margin of North China Plate in Alashan region. Journal of Lanzhou University (Natural Science), 29(4): 252 ~ 256.
- Wang Suiji, Zeng Fangang, Huang Xingzhen, Niu Mulin, Meng Qinghua. 1998 &. The Mossbauer effect of clay minerals in oil basin and its application——taking Tertiary System of Qaidam basin as an example. Acta Sedimentologica Sinica, 16(2): 109~112.

- Wang Zhengyang, Cao Jiansong, Luo Songying, Liao Yipeng. 2014&. Xray diffraction and infrared spectrum analysis of fault gouge in Wenchuan Seismic belt. Spectroscopy and Spectral Analysis, 34 (5): 1416~1420.
- Wu F T, Blatter L, Roberson H. 1975. Clay gouges in the San Andreas fault system and their possible implications. Pure & Applied Geophysics, 113(1): 87~95.
- Wu F T. 1978. Mineralogy and physical nature of clay gouge. Pure & Applied Geophysics, 116(4~5): 655~689.
- Xia Yuanfu. Chen Yi. 1987#. Mossbauer Spectroscopy Foundation and Application. Beijing: Science Press: 1~280.
- Yang Weiming, Huang Wenhui. 2002&. The characteristics of tectonic geochemistry of the fault zones on the southern and northern edges of Huainan coalfield, Anhui province. Geoscience, 16(3): 251~256.
- Ying Yupu, Li Zhe. 1997. Application of Mossbauer Spectroscopy in Mineralogy. Beijing; Geological Publishing House; 50~102.
- Yuan Renmao, Zhang Bingliang, Xu Xiwei, Lin Chuanyong. 2013&. Microstructural features and mineralogy of clay-rich fault gouge at the northern segment of the Yingxiu—Beichuan fault, China. Seismology and Geology, 35(4): 685~700.
- Zhang Bingliang, Feng Jinjiang, Niu Luanfang, Hu Biru. 1989 #. Characteristic of Clay mineral in fault gouge from Honghe fault zone and their Seismogeologic implication. Seismology and Geology, 11 (3): 96~97.
- Zhang Bingliang, Liu Guifen, Fang Zhongjing, Lin Xisheng, Zheng Naixuan. 1994&. Characteristics of illite minerals in fault gouge from Xiaowan, YunNan and their geological significance. Seismology and Geology, 16(1): 89~96.
- Zhang Chenyong, Nie Fengjun, Hou Shuren, Wang Junlin, Deng Wei, Zhang Liang. 2015&. Tectonic evolution characteristics of Bayingebi basin and its control on the Mineralization of Sandstone Type uranium deposits. Uranium Geology, 31(3): 384~388.
- Zhang Daisheng, Li Guangyun, Luo Zhao, Li Xingliang. 2003&. Characteristics of Petroleum Geology in Yingen—Ejinaqi Basin. Xiangjiang Petroleum Geology, 24(2): 130~133.
- Zhang Fuliang, Yi Fan, Chen Yilong, Xu Binfu. 1997& Determination of the optimum thicknese of an Mossbauer spectroscopy. J. Wuhan Univ. (Nat. Sci. Ed.), 43(3): 348~352.
- Zhang Jinsheng, Yin Yansheng, Zhang Yinyan, Ma Laipeng, Zhang Shuqing. 2003&. Mossbauer apparatus——A powerful characterization technique. Modern Instruments, 9(6): 33~36.
- Zhang Rufan. 1992&. Application of scanning electron microscopy to study of mineral change—transformation of feldspar into clayminerals. Scientia Geologica Sinica, (1): 66~70.
- Zhang Sheng. 1997&. Aqueous species of dissolved Silica and their Thermodynamic properties. World Geology, 16(2): 17~23.
- Zhao Jun, Zheng Guodong, Fu Bihong. 2009&. Current development of tectonic—geochemical studies of active fault zones. Advances in Earth Science, 24(10): 1130~1137.
- Zheng Guodong, Takano B, Kuno A, Matsuo M. 2001. Iron speciation in modern sediment from Erhai Lake, southwestern China redox conditions in an ancient environment. Applied Geochemistry, 16 (9): 1201~1213.
- Zheng Guodong, Lang Yuhua, Takano B, Matsuo M, Kuno A, Tsushima H. 2002. Iron speciation of sliding mud in Toyama Prefecture, Japan. Journal of Asian Earth Sciences, 20(8): 955~963.
- Zheng Guodong, Fu Bihong, Takahashi Y, Miyahara M, Kuno A, Matsuo M, Miyashita Y. 2008. Iron speciation in fault gouge from the Ushikubi fault zone central Japan. Hyperfine Interactions, 186(1 ~3): 39~52.

- Zheng Guodong. 2008&. Iron speciation by Mössbauer spectroscopy and its implications in various studies on the Earth surface processes. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 27(2): 161~ 168.
- Zheng Guodong, Liang Shouyun, Liang Mingliang, Ma Xiangxian. 2011# . Application of Mossbauer spectrum technology in seismic fault study. Proceedings of the 11th National Mossbauer Probability Conference.
- Zheng Hualing, Fu bingjun, Fan Xianhua, Chen Shi, Sun Donghui. 2007&. Focusing on clay formation as Hose Media of HLW geological disposal in China. Radiation Protection, 27(2): 92~98.
- Zhou Zhangjian. 1994&. Summary of the studying for illitization of the smectite on its controlling factors, transformation mechanism and models. Geological Science and Technology Information, 13(4): 41 ~46.

Distribution of Iron Species in Faults and Its Indication of Fault Activity in Tamusu Area, Inner Mongolia

GUO Chao¹⁾, LI Guangrong^{1,2,3)}, WANG Chao¹⁾, ZHANG Weiqiang¹⁾, LIU Shuai³⁾,

GONG Zhijun³⁾, LIU Xiaodong^{1,3)}

1) Key Laboratory of radioactive geology and exploration technology, East China University of Technology, Nanchang, 330013;

2) State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Nanjing University, Nanjing, 210093;

3) Collage of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang, 330013

Abstract: The tectonic stability of the Tamusu region is crucial for its pre-selection as a high-level radioactive waste disposal site, and comprehensive system investigations and safety assessments are required. Combined with field geological data, Mineral composition and iron species of fault gouges and its wall rocks in three fault zones of Tamsu area had been analyzed by the X-ray diffraction and the Mossbauer spectroscopy. The results showed that (1) the fault gouge and its wall rock of Tamusu fault (F_2) mainly consist of quartz and feldspar, the fault gouge contains a small amount of clay minerals and the wall rocks contain almost no clay minerals, the fault gouge and its wall rock only contain para-Fe³⁺ and mag-Fe³⁺; (2) The fault gouge and its wall rock of Wulantiebuke fault (F₄) are dominated by clay minerals and calcite with trace amounts of pyrite, the clay minerals are mainly illite, smectite and illite mixed layer, the iron species of wall rock only contain para-Fe^{$^{2+}$} and pyr-Fe^{$^{2+}$}, whereas the fault gouge contains a small amount of para-Fe3+; ③ Except the TMS04 do not contain calcite, he fault gouges and its wall rocks of Narenhala fault (F_7) consist of quartz, feldspar, clay minerals and a small amount of calcite. Clay minerals are mainly composed of chlorite, illite and smectite. The fault gouges and wall rocks only detected the para-Fe²⁺ and para-Fe³⁺. The para-Fe³⁺ in TMS04 was higher than that of para-Fe²⁺, and the para-Fe²⁺ in all samples was slightly higher than that of para-Fe³⁺. The mineral composition and iron species distribution of fault gouges and wall rocks were closely related to the evolution of faults, and their differences showed that the complex connectivity relationships between the faults and the deep and the outside world in the Tamusu region, and the faults are in a relatively stable state.

Keywords: fault gouge; X-ray diffraction; Mossbauer spectroscopy; iron species; Tamusu

Acknowledgments: We sincerely thanks to Prof. Zheng Guodong and Ma Xiangxian (from Lanzhou Center for Oil and Gas Resources, Institute of Geology and Geophysics, CAS), Dr. Zuo Wenbin (from Wuhan University), Dr. Wang Chaowen (from China University of Geosciences) and Geologic Party No.208, CNNC for their selfless help. The work is financially supported by the project of "Sitting of clay formation as the host rocks for high-level radioactive waste deposal repository, SASTIND" (No. 2014-1587) and Key Laboratory for Digital Land and Resources of Jiangxi Province, East China University of Technology(No. DLLJ201714)

First author: GUO Chao, Male, born in 1992. Master Degree Candidate. Research in Tectonic Geology. Email: 653728136@ qq.com

Corresponding author: LI Guangrong, Male, born in 1979. Doctor. Research in Magnetic Fabric and Tectonic Geology. Email: liguangrong0086@ ecit.cn

Manuscript received on:2018-04-03; Accepted on:2018-07-23; Edited by:LIU Zhiqiang **Doi**:10.16509/j.georeview.2018.06.005