

刘元晴, 周乐, 王新峰, 等. 北方岩溶区断裂带水文地质性质及结构模型[J]. 中国岩溶, 2022, 41(6): 975-985.

DOI: 10.11932/karst20220609

北方岩溶区断裂带水文地质性质及结构模型

刘元晴^{1,2,3,4}, 周乐³, 王新峰³, 吕琳³, 路小慧^{1,2}, 于开宁⁴, 张伟峰⁵

(1. 山东省鲁南地质工程勘察院(山东省地质矿产勘查开发局第二地质大队), 山东 济宁 272100; 2. 山东省地热清洁能源勘查开发工程研究中心, 山东 济宁 272100; 3. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051; 4. 河北地质大学河北省高校生态环境地质应用技术研发中心, 河北 石家庄 050031; 5. 山东省第一地质矿产勘查院, 山东 济南 250014)

摘要: 断层带结构和内部流体流动特性是水文地质研究领域的难点问题。石油地质领域, 在油气运移与成藏方向已形成较成熟的断层封闭性定量评价技术手段。相比较, 断裂的水文地质性质研究尚停留在断裂的力学性质对断层导水、阻水特性的定性评价阶段, 尚未详细开展断裂带结构、渗透性各向异性等方面的研究工作。文章梳理总结国外断裂带水文地质性质研究中关于结构组成、断裂带演化、渗透率影响因素等方面的研究成果, 引入断裂带渗透率结构模型, 并以中国北方岩溶区碳酸盐岩与碎屑岩互层含水岩组为例, 构建断裂带水文地质结构模型。断裂带研究尺度和精度不同、断裂带发育部位不同, 导致其结构及水文地质性质亦不相同, 如何建立起精确、典型的断裂带水文地质结构模型, 需要各领域数据共享及多学科融合共同开展研究工作。

关键词: 水文地质; 断层核; 破裂带; 渗透率; 岩溶山区

中图分类号: P641.1 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2022)06-0975-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

断层是岩体在应力作用下发生破裂, 并沿破裂面产生明显相对位移的一种构造变形现象, 是广泛存在于地壳中的一种构造样式^[1-2]。在水文地质学中, 断层是岩石中非常重要的不连续面类型, 并以多种方式对地下水产生影响。主要包括: 断层控制着含水层的分布状态, 造成含水层的断穿、重复、缺失和位移; 断层也可造成两盘间不同含水层、隔水层的相间或相连, 从而影响地下水的流动和分布; 断层对含水层的截断可导致地下水渗流, 并沿断层成泉; 断层下降盘分布的粗粒沉积物可形成良好的含水层; 断

层可产生局部地下水位坡降, 改变地下水径流状态; 断层活动产生次生裂隙、断穿直立岩墙及岩脉, 形成地下水的径流通道^[2]。应力造成的位移错动很少能聚集发生在一个独立且明确的滑动面上, 通常会出现规模不同的复杂区带来承担形变, 这个复杂区带由裂隙、裂隙带及滑动面相互作用和连接而成, 即为“断裂带”^[3-4]。

尽管断裂带只是地壳很小的组成部分, 但它们对地壳的力学性质和流体流动特性有着控制性的作用, 并广泛参与地壳的活动过程^[5]。特别是在地壳浅部区(<1 km), 由断裂带引起的岩体渗透率的非均质性和各向异性, 对含水层中地下水流动模式、油气运

资助项目: 山东省中央引导地方科技发展资金项目(YDZX20203700002937); 河北省高校生态环境地质应用技术研发中心开放课题(JSYF-202101); 中国地质调查局地质调查项目(DD2022175403)

第一作者简介: 刘元晴(1988—), 高级工程师, 主要从事基岩山区水文地质调查工作。E-mail: lyq198896@126.com。

通信作者: 于开宁(1965—), 教授, 主要从事水文地质、环境地质方面的研究。E-mail: 1211931193@qq.com。

收稿日期: 2021-09-23

移和圈闭成藏^[6-7]、核废料安全存储^[8]、CO₂地质封存^[9]、热液循环成矿^[10]等过程有重要影响。断层带通常被视为地壳浅部和深部环境的连接通道;由于其内部结构及组成的复杂特性,断裂带又被看作流体流动的有效屏障。因此,直接有效评估断裂带对流体流动模式的影响至今仍是地质领域的挑战^[11]。

目前国内外许多学者及团队对断裂带内部结构特征、断裂带对流体流动的影响做了大量有意义的探讨及研究^[12]。2008年,伦敦地质学会整理了2005年和2006年在维也纳举行的两届欧洲地球科学联盟大会中相关研究论文,并出版了《断裂带内部结构:流体流动特征和机制的影响》专辑。该专辑通过现场及实验室测试手段对断裂带结构及断层岩石特性进行研究,从地震数据分析到耦合水力和流变模型对断裂带流体流动性质进行研究^[13]。2016年,国际知名地学期刊《Geofluids》针对断裂带水文地质研究推出专辑^[14],记录了Giwelli等^[15]利用X射线及CT成像等新技术手段研究断裂带结构;Scibek等^[16]通过搜集和对比分析水文、矿产、构造地质和油气地质等不同领域已发表数据,研究特定断裂带的水文地质特性,并证实不同领域存在认知偏差。国内在石油地质领域,特别是在油气运移与成藏中断层封闭性影响方面,对断裂带及流体流动特性的研究已形成较成熟的断层封闭性定量评价手段^[7,17-19]。目前,对于断裂的水文地质学性质研究仅停留在定性评价断裂的力学性质对断层的导水、阻水特性阶段^[20],尚未开展断裂带结构、渗透性各向异性等方面的研究工作。

由于断层带结构是断裂带内部流体流动特性的主要控制因素,因此,定量描述断裂带内流体流动过程需要建立一个精确的断层带结构模型,使得该模型与断裂带各组成部分的流体流动特性相耦合^[21],进而开展断裂带通道、屏障或者通道—屏障兼有的水文地质学性质研究。本文总结国内外关于断裂带的结构组成、渗透率影响因素方面的研究进展,并详细论述广义断裂带结构模型,以期为更好研究岩溶区断裂带水文地质性质提供依据。

1 断裂带结构及发育过程

1.1 断层带结构

断层带结构的复杂性在很大程度上取决于围岩

岩性、断裂位移、早期构造、应力状态及演化规律等因素^[22]。单条断层即使在相对较短的长度范围内,也可能表现出走向或倾向上复杂变化的特点^[23]。野外观测结果表明,脆性断裂带具有高度结构化的特征,断裂带通常是由P叶理、R剪切、Y剪切、断层泥及断层角砾岩组成^[24-25]。尽管野外调查过程中,地表和近地表存在很多断层形迹,但是适合进行详细结构分析的脆性断裂实例存在较少^[26]。Chester等^[27]在对南加州圣安德利亚斯断裂系统中的Gabriel和Punchbowl断裂野外详细观测的基础上,建立断裂带结构标准模型,即断层由狭窄的断层核部、破碎带和未变形原岩组成;Caine等^[28]在研究断裂带组成及渗透率结构时,同样采用了该3分模式,并且该分类模式已被其他学者广泛运用到了后续相关研究工作中^[5,29-31]。国内学者多从应用角度出发,将断裂带划分为破碎带、诱导断裂带和围岩3部分^[18,32]。本文采用Chester及Caine的断裂带结构划分方法,其断裂带详细结构见图1。

断层核是断裂带构造、岩性及形态的重要组成部分,承载并接纳断裂带大部分的位移变化^[28]。断层核的组成包括单一滑动面、松散且富含黏土的断层泥带、角砾岩及地球化学蚀变带或高度硬化的碎裂岩带^[27]。野外观测结果表明,断层核垂向和走向的厚度变化、内部结构和组成共同控制断裂带核部流体的流动特征。其中,断层核内部碎裂原岩粒度的减小、矿物质的沉淀通常会导致断层核部孔隙度和渗透率的降低,从而使得断层核充当流体流动的屏障^[27-28]。破裂带是指连接和包围断层核的附属结构裂隙网络。与断层相关的附属结构包括次级断裂、矿脉、裂缝、解理和褶皱,这些结构决定了断裂带渗透性的非均质性和各向异性^[33]。规模尺寸较大的破裂带可能是多次滑动和连续变形事件的叠加^[28]。

1.2 断裂演化过程

断裂带厚度通常被认为是高度变形的断层岩石的厚度。由于断裂带内部结构中很少保留可识别的断裂初始结构,因此,如何研究断裂带发展阶段及演化过程便成为难题。研究人员通过分析断裂带厚度和断层位移量的线性关系,得出断裂带中断层两侧岩体的持续磨损程度是断裂位移量增加的函数^[34-35],该线性关系较好反映出断层的演化过程及发育阶段。因此,通常对比不同尺度的断裂带实例,来研究断裂

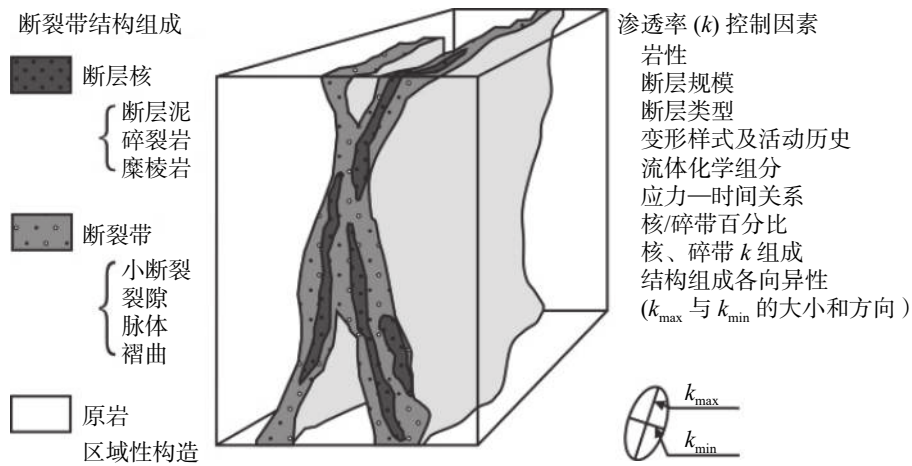


图 1 断裂带结构组成图^[28]

Fig. 1 Structural composition of the fault zone

带的演化过程,即假设一系列断层系统中存在的较小断层,其可作为断裂带系统中较大规模断层的早期发育阶段。

在充分总结前人研究的基础上,Wibberley 等^[13]将断裂带演化过程简化为围岩弱化及破裂阶段、位移增加及分段断层桥接阶段,并建立不同尺度断裂带演化对比模型(图 2)。图 2 中展示了断裂带在平面(图 2 数字③)和剖面(图 2 数字②)上的演化阶段以及不同尺度(图 2 数字①)断裂带演化阶段的对比。低孔隙度岩石在初始破裂形成一系列膨胀裂隙时,便可能沿着初始破裂带周围形成断层^[36],即为断裂初始阶段;两个或多条狭窄的膨胀裂隙连接,并形成

一个更宽的调节带,使得断层宽度突然增加(图 2 中数字 i 部分)。由于断层的发展很大程度上取决于周围裂缝的生成及与主断裂面之间的相互作用,膨胀裂隙持续的生成导致靠近断层位置的围岩发生弱化,并以此参与断裂带的形成,成为断裂带的组成部分。因此,断裂带的扩大与发展受控于不断变化的围岩性质和断层岩石的流变性质。随着断层位移的增加,这些调节带被断层泥或其他高应变断层岩透镜体充填,断层带的发展使得这些充填物质被持续带入正在发育的断裂带中充分粉碎(图 2 中数字 ii 部分及 FZ1),形成超碎裂岩带。随着带入物质及断裂带宽度的增加,早期较小规模的膨胀裂隙对已形成断裂

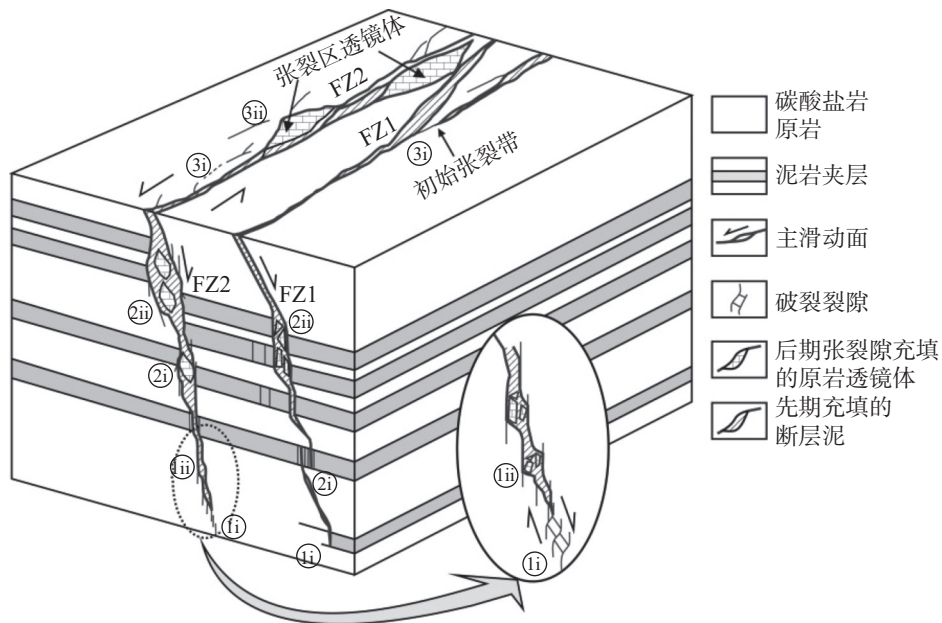


图 2 不同尺度断裂带演化对比模型图^[13]

Fig. 2 Comparison model of fault zone evolution in different scales

带的影响作用减小。随着变形强度增加,较大规模的断面(比如R剪切带等)及断面交叉带产生,造成更大范围的围岩破裂弱化,并将崩落剪切的围岩块体并入断裂带,使得断裂带持续扩大(图2中的FZ2)。

2 断裂带水文地质研究

水文地质学家和构造地质学家使用不同方法来研究断层带水文地质性质,但是两领域之间通常缺乏交流和整合。Bense等^[11]对不同领域学者采用的方法手段、所需数据、优势及局限性进行对比分析。结果显示:构造地质学领域主要以地表的断裂露头为研究对象,采用露头测绘等手段,研究断裂带裂缝长度、方向、断层岩石粒度和孔隙度,测定渗透率,进而根据露头测量数据建立断裂带流体数值模型。然而,现场小尺度露头岩石样品的测试不能代表全部断裂带渗透率值,并且该方法通常缺乏断裂对流体流动影响的直接水文地质证据。相比较,水文地质领域通常从钻孔、泉水阵列分布及地下水监测方面推断研究地表以下断裂的水文地质性质:断裂带水力梯度坡降可直观用于断裂带流体流动方向和速率的研究,以判断断裂带的水文地质性质(阻水或导水);地下水温度、化学组分和年龄数据可结合水头观测数据确定穿过断裂带的地下水流动路径;水文钻孔的压水和抽水试验可计算渗透率等断裂带水文地质参数。

利用水文地质方法进行分析的尺度通常远大于断层核的结构尺度,这使得该方法只能推测断层带的水文地质影响,而不能详细分析断层带的内部渗透结构。相比较,构造地质方法进行的小尺度研究中可能很难阐明断层对流体流动的区域影响(图3)。因此,为实现更为全面地研究断层带的水文地质性质,需要构造地质和水文地质共同定位研究区域、明确并细化水文地质结构模型,共享技术方法和研究数据融合^[11]。

3 断裂带渗透性影响因素

断裂带水文地质性质研究最重要的是确定各组成部分的渗透率特征,断裂带核部与破碎带的几何结构及渗透率大小是断裂带屏障—通道系统划

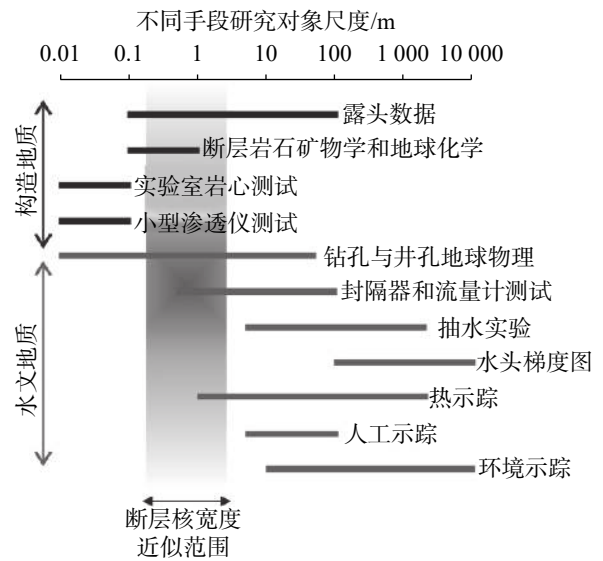


图3 各领域采用的断裂带水文地质研究方法对比^[11]

Fig. 3 Comparison of hydrogeological research methods of fault zones adopted in various fields

分的主要控制因素。断裂带核部的裂隙密度通常明显小于破碎带^[37],因此,断裂带核部的渗透率可能由断层岩石的粒度渗透率决定,而破碎带的渗透率则由其裂隙网络的水力性质决定^[28]。Caine^[28]认为断裂带渗透率影响因素包括:断层两盘岩性、断层规模、断层类型、断裂变形样式及活动历史、流体化学成分、应力—时间关系(与断裂活动历史同)、断层核/破碎带厚度比及渗透率组成、断裂带组成部分各向异性等(图1)。Yamashita等^[21]总结前人研究成果,认为断裂带渗透率的影响因素主要有断裂带结构特征、断裂带核部黏土含量、断裂带所受应力大小、断层滑动等方面。Bense等^[11]认为在围岩未成岩或者弱成岩断裂带中的颗粒流、围岩成岩较高断裂带中的破裂作用和角砾岩可导致断裂带渗透率呈数量级增加;混入分选较差沉积物的颗粒流、泥岩涂抹作用、未岩化岩石断裂带的压实和胶结作用可导致断裂带渗透率明显降低,此外断裂带裂隙网络中溶解和胶结作用、区域应力场等对断裂带渗透率均产生复杂影响。

综合前人研究结果,断裂带渗透率影响因素主要包括“内因”和“外因”两部分。“内因”是指断裂带结构特征,主要包含断层核/破碎带厚度关系、断层核组成部分(断层泥厚度、角砾岩粒度及分选等)、破碎带结构(岩性即脆性或易碎性、裂隙密度及连通性)等;“外因”包括穿过断裂带流体性质(裂缝岩石—流体相互作用下矿物溶解与沉淀)、构造

应力(应力方向导致的裂隙各项异性)、断裂滑动规模(两盘岩性接触情况)等,“内因”通常为“外因”施加后岩石变形的现状表现,内因、外因相互影响,共同控制断裂带渗透率的空间分布特征及水文地质特性。

4 断裂带渗透率结构模型

Caine 等^[28] 根据结合前人在 Shawangunk Mountains 断层、Hill 断裂带、Stillwater 断裂带及 San Gabriel 碎裂岩带野外露头观测结果的基础上,结合断裂带中断层核与破碎带厚度与断裂带总厚度的占比,建立 4 种不同模式的断裂带渗透率模型(图 4)。模型中,断裂带根据组成部分厚度占比共划分为单一断层、分散变形带、局部变形带及复合变形带 4 种类型,同时对应的渗透率结构为局部导水、分散导水、局部阻水、复合导水—阻水 4 种结构。各渗透率结

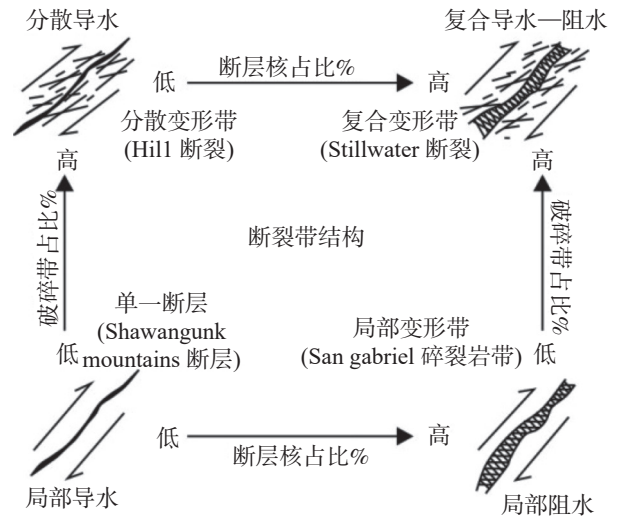


图 4 断裂带渗透率模型^[28]

Fig. 4 Permeability model of fault zone

构及其所对应的断裂带结构组成、代表实例及可应用的流体流动模型见表 1。

表 1 断裂带组成样式及渗透率结构^[28]

Table 1 Fault zone architectural styles and permeability structures

渗透率结构	断裂带结构	断层核	破碎带	实例	应用的流动模型
局部导水	沿单一曲面或长的离散平面发生局部滑动	缺失或发育较窄	缺失或发育较少	Shawangunk Mountains 断层	具有平行外壁的离散导管
分散导水	沿分布表面和裂缝分布发生滑移	缺乏或发育较窄,狭窄、离散和不连续带	发育的离散滑动面和相关的断裂网络	Hill 断裂带	等效多孔介质
局部阻水	破碎带内局部滑动	发育较好的断层核碎裂岩	缺失或发育较少	San Gabriel 碎裂岩带	高渗透性含水层(原岩)中的弱透水层(断层核)
复合导水—阻水	变形适应于局部破碎带和次生构造分布区	发育较好的断层核碎裂岩	发育的离散滑动面和相关的断裂网络	Stillwater 断裂带	夹在两个含水层之间的弱透水层(断层核)

由图 4 结合表 1, 可看出“单一断层”模式属于“分散变形带”的一个特例, 变形作用是沿着单一断裂进行的; “复合变形带”是“分散变形带”与“局部变形带”的混合, 是断层核部与破碎带均发生形变形成的。4 个断裂带结构端元对应着 4 种不同的断裂带渗透率结构状态, 即 4 种不同的水文地质特征表现形式。每个理想化的断裂带结构在时间和空间上只代表了一个特定时刻的状态, 由于断裂带的结构随着时间的推移而演变, 图 4 中的各种样式可能会沿着单个断裂带的不同空间部位或者演化阶段找到对应类型^[38]。

5 北方岩溶区断裂带水文地质结构模型

在断层核和破碎带发育的断裂带中, 断层核与

破碎带之间厚度占比为描述断裂带的水文地质特征提供了一个方便、概化的框架。如果将断裂带每一组成部分的渗透率与地质图、地质剖面或断裂带三维结构模型相结合, 断层带的渗透率结构便可从野外露头中实测获得。Bense 等^[11] 建立不同岩性原岩的断裂带结构模型, 主要包括未成岩—已成岩的硅质碎屑岩、结晶岩、火成岩及碳酸盐岩 4 大类。不同地质条件下, 在各级别断裂带范围内, 建立的这种断裂带水文地质概念模型在具有类似地质参数(原岩的岩性、有效应力等)的地区具有通用性。

占据全球陆地表面积 12% 的岩溶含水层, 存储着全球 20%~25% 人口总量赖以生存的水资源^[39]。在国内, 岩溶地下水作为工农业及居民生活的优质水源供给北方 30 多个地级以上城市、100 多个县级城市, 以及南方 70% 以上县城、乡镇、村屯使用^[40-43]。

与南方高度管道化、强烈不均一的岩溶发育特征不同,北方岩溶含水介质则相对均一,以岩溶裂隙为主。在垂向分布上主要有中上元古界和下古生界2个连续沉积的碳酸盐岩含水岩组,其间为上元古界—寒

武系碎屑岩与碳酸盐岩互层的含水岩组结构特征^[44-45]。本文以北方具有特色的碳酸盐岩与碎屑岩互层为结构模型,讨论碳酸盐岩断裂带水文地质结构模型(图5)。

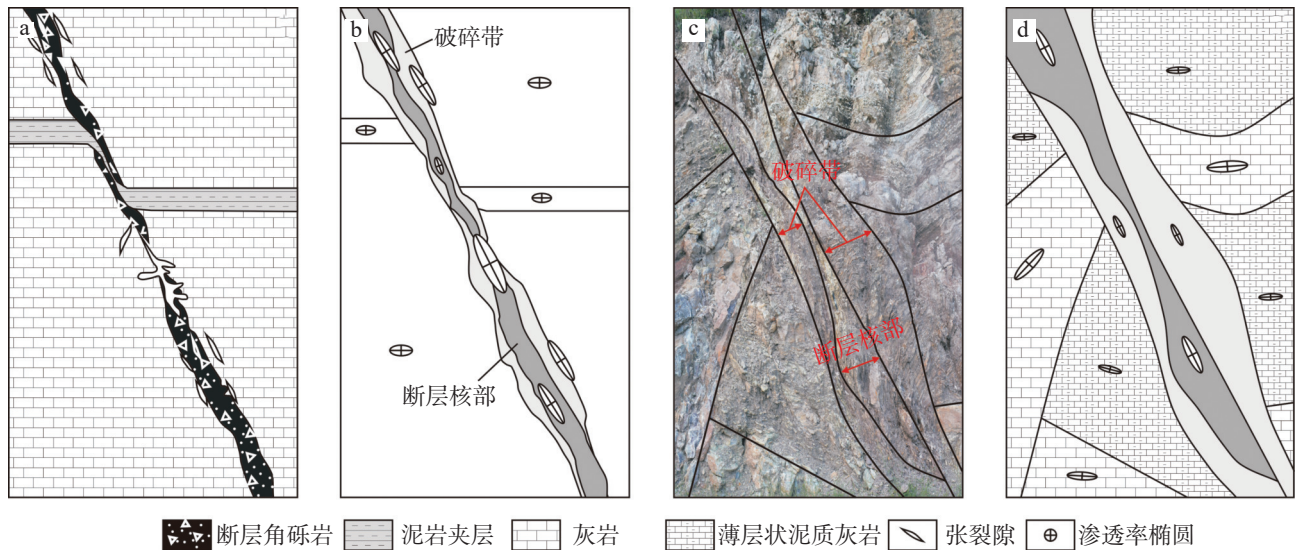


图5 碳酸盐岩断裂带水文地质结构模型及应用

Fig. 5 Hydrogeological structural model of carbonate fault zone and its application

相对于溶蚀作用在碳酸盐岩水文地质性质中的主导地位,断层和破裂对碳酸盐岩水文地质性质中的渗透率同样有着重要的影响作用^[46]。由于水—岩相互作用在碳酸盐岩系统中的重要性,碳酸盐岩断层的渗透率结构表现为瞬态、非均匀和各向异性的特点^[47]。未胶结的断裂网络、角砾岩和张裂隙的存在增加了断层带的渗透性,而细粒碎裂断层岩的形成、黏土渗入断层核以及断裂网络内矿物沉淀作用又降低了断层带的渗透性,改变断裂带渗透率^[48](图5a)。因此,碳酸盐岩断裂带的渗透性结构表现为顺断层滑动面发育的破碎带、断层核部溶蚀的张开裂隙和角砾岩通常表现为高渗透率特征;而断裂带核部细粒物质充填的角砾岩分布区、矿物沉淀的破碎带网络区表现为低渗透率特征。断层两盘原岩部分,碳酸盐岩顺层岩溶裂隙发育区表现为高渗透率特征,泥质夹层则为低渗透率分布区,且渗透率椭球体中最大渗透率值方向多沿岩层走向分布(图5b)。以太行山北段野外实测的发育在寒武系张夏组碳酸盐岩夹碎屑岩含水岩组中的断层为例,图5c中可见明显的断层带断层核部、破碎带及两侧构造变形的原岩结构。断层核部具有明显的原岩角砾岩、张开裂隙,破碎带则由细粒物质充填的网络结构组成,两侧原

岩岩性则为变形的灰岩和相对隔水的薄层状泥质灰岩。对图5c进行渗透性结构概化,结合断层两侧裂隙及溶蚀发育特征,修正渗透率椭球体分布(图5d),具体渗透率值则依靠相关野外试验进行获取。

6 问题及讨论

断裂带规模和组成是不规则的,其通常表现为内部结构极端复杂和应变高度差异分布的特点。即使是被认为单一存在的断裂滑动面,根据观察精度的放大,断裂面通常可表现为多个断层岩带(断层泥、角砾岩、碎裂岩)分布的特点,可在若干毫米到千米级别的尺度上进行分支和结合^[5,49]。因此,野外研究精度不同,断裂带及其对应的渗透率结构存在不同。图6很好反映了这一现象,图6a是较大尺度、较小精度下断裂带结构组成、裂隙密度及渗透率结构模型;而图6b为研究精度放大条件下,断裂带内部实为多条次级断裂带的叠加与组合,其中次级断裂带破碎带与破碎带之间沟通、连接,次级断层核与破碎带之间叠加,均可形成复杂的断裂带渗透特性。因此,需要根据实际工作要求选择研究精度,准确计算断裂带渗透率或模拟断裂带渗透率结构,进而确定

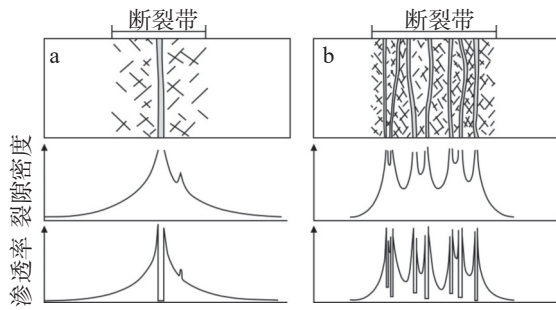


图 6 不同研究精度与尺度条件下断裂带及其渗透率结构模型

Fig. 6 Fault zone and its permeability structure model in different precision and scales

断裂带水文地质特征。

此外,野外观测研究过程中,在同一断裂带不同空间部位处,断裂带结构特征、渗透性及水文地质特征也存在显著差异。特别是中国北方寒武系碳酸盐岩含水层中夹有不同厚度相对隔水的碎屑岩(以薄层泥页岩为主),同一断裂带的不同位置处,断裂两盘泥页岩隔水层分布特征、断裂带破裂机制不同造成了同一断裂带不同位置渗透性及水文地质特征的显著差异。

本文基于 Micarelli 等^[50]提出的距离断层尖端的不同位置进行观测的断裂结构模型展开讨论。断裂带滑动面产出角度与断穿地层岩性及厚度相关,通常厚层灰岩地层断裂带表现高角度特征,而薄层灰岩与泥岩互层地层中断裂带倾角变缓^[51]。厚度较大的灰岩或泥页岩地层会抑制或限制断层尖端在岩层中的垂直传播,应力集中释放,使得断层尖端区厚层灰岩张开,形成垂直裂隙,被后期方解石脉体充填(图 7a);随着距离尖端位置的增大,灰岩地层弯曲度增加,厚度大于局部断层位移的灰岩被拖拽到两滑动面之间,岩层未完全错开,灰岩周围的泥页岩夹层被剪切,但通常保持其连续性,两滑动面之间岩层裂隙持续扩张,被脉体充填,断裂两侧岩体未形成流体沟通通道,使得两侧流体呈现局部流动状态(图 7b);随着距离尖端位置的增加,变形继续增强,由于相邻滑动面之间岩层的断裂和错位,单个滑动面可穿过岩层或通过形成的膨胀裂隙或方解石连接到相邻滑动面,形成滑动面重叠部分的桥接,此时厚层灰岩与周围泥页岩地层被错断、切割,滑动面中间的厚层灰岩内部形成张裂空隙和角砾,或被脉体充填,断裂两盘形成流体流动通道,流体表现出非稳态流动状态(图 7c)。因此,为准确反映所研究断裂带水文地质性质,在构

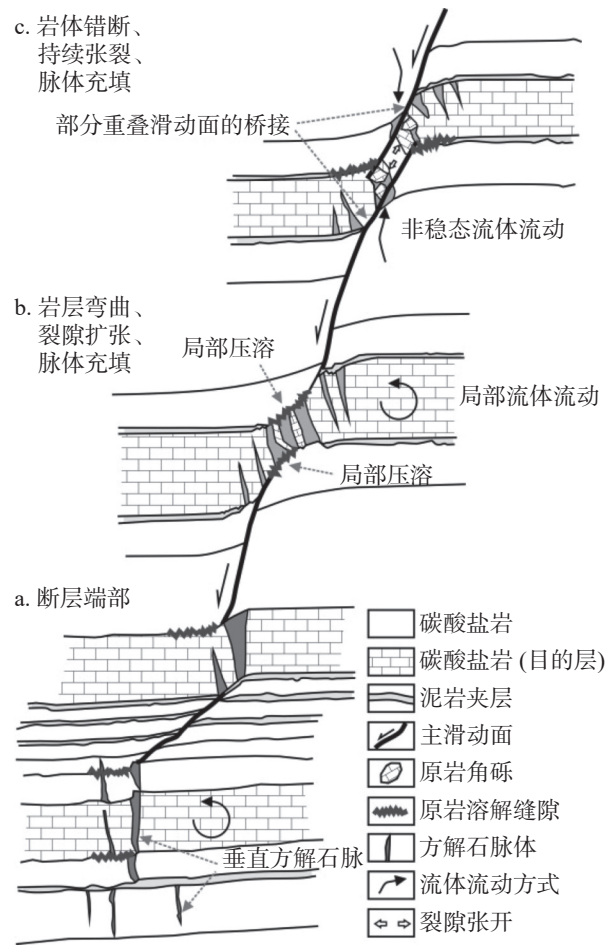


图 7 距离断层尖端的不同位置处断裂带结构模型^[47]

Fig. 7 Fault zone structure model at different positions from fault tip

建水文地质结构模型时,应充分考虑到断裂带的不同位置,均进行渗透率结构概化处理。

7 结论与建议

(1)目前被广泛应用的断裂带结构由狭窄的断层核部、破碎带和未变形原岩 3 部分组成。根据断裂带中断层核与破碎带厚度与断裂带总厚度的占比,划分出局部导水、分散导水、局部阻水、复合导水—阻水 4 种不同模式的断裂带渗透率模型;

(2)以北方具有特色的碳酸盐岩与碎屑岩互层为结构模型,讨论碳酸盐岩断裂带水文地质结构模型,既要选择研究精度,又要充分考虑到断裂带的不同位置,根据实际工作进行断裂带渗透率结构概化处理,确定断裂带水文地质特征;

(3)断裂带水文地质特征研究是断裂带研究的热点和难点问题,如何确立断裂带空间结构特征和

渗透性是精确评价断裂带水文地质特征的基础和前提,这要求水文地质工作者,除了掌握常规水文地质调查与研究手段外,还应具备构造地质、岩体力学、数值模拟等领域相关专业基础知识,各领域数据共享、多学科融合的开展研究工作,建立起精确、典型的断裂带水文地质结构模型,从而推动断裂带及岩溶山区水文地质学科的发展。

参考文献

- [1] Wibberley C A J, Shimamoto T. Internal structure and permeability of major strike-slip fault zones: the Median Tectonic Line in Mie Prefecture, Southwest Japan[J]. *Journal of Structural Geology*, 2003, 25(1): 59-78.
- [2] Singhal B B S, Gupta R P. Applied Hydrogeology of Fractured Rocks (second edition)[M]. Springer, 2010: 1-408.
- [3] Childs C, Watterson J, Walsh J J. A model for the structure and development of fault zones[J]. *Journal of the Geological Society*, 1996, 153: 337-340.
- [4] Tondi E, Cilona A, Agosta F, Aydin A, Rustichelli A, Renda P, Giunta G. Growth processes, dimensional parameters and scaling relationships of two conjugate sets of compressive shear bands in porous carbonate grainstones, Favignana Island, Italy[J]. *Journal of Structural Geology*, 2012, 37: 53-64.
- [5] Faulkner D R, Jackson C A L, Lunn R J, Schlische R W, Wibberley C A J, Withjack M O. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones[J]. *Journal of Structural Geology*, 2010, 32: 1557-1575.
- [6] Aydin A. Fractures, faults, and hydrocarbon entrapment, migration and flow[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2000, 17(7): 797-814.
- [7] 付晓飞, 许鹏, 魏长柱, 吕延防. 张性断裂带内部结构特征及油气运移和保存研究[J]. *地学前缘*, 2012, 19(6): 200-212.
FU Xiaofei, XU Peng, WEI Changzhu, LV Yanfang. Internal structure of normal fault zone and hydrocarbon migration[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(6): 200-212.
- [8] Douglas M, Clark I D, Raven K, Bottomley D. Groundwater mixing dynamics at a Canadian Shield mine[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 235(1-2): 88-103.
- [9] Dockrill B, Shipton Z K. Structural controls on leakage from a natural CO₂ geologic storage site: Central Utah, U. S. A.[J]. *Journal of Structural Geology*, 2010, 32(11): 1768-1782.
- [10] Person M, Banerjee A, Hofstra A, Sweetkind D, Gao Y. Hydrologic models of modern and fossil geothermal systems in the Great Basin: Genetic implications for epithermal Au-Ag and Carlin-type gold deposits[J]. *Geosphere*, 2008, 4(5): 888-917.
- [11] Bense V F, Gleeson T, Loveless S E, Bour O, Scibek J. Fault zone hydrogeology[J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 127: 171-192.
- [12] 宋佳佳, 孙建孟, 王敏, 傅爱兵, 高建申. 断层内部结构研究进展[J]. *地球物理学进展*, 2018, 33(5): 1956-1966.
SONG Jiajia, SUN Jianmeng, WANG Min, FU Aibing, GAO Jianshen. Research progress in the internal structure of the fault[J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 33(5): 1956-1966.
- [13] Wibberley C A J, Kurt W, Imber J. The internal structure of fault zones: Implications for mechanical and fluid-flow properties[M]. Geological Society, 2008: 1-367.
- [14] Bense V F, Shipton Z K, Kremer Y, Kampman N. Fault zone hydrogeology: Introduction to the special issue[J]. *Geofluids*, 2016, 16(4): 655-657.
- [15] Giwelli A, Delle Piane C, Esteban L, Clennell M B, Dautriat J, Raimon J, Kager S, Kiewiet L. Laboratory observations of fault transmissibility alteration in carbonate rock during direct shearing[J]. *Geofluids*, 2016, 16(4): 658-672.
- [16] Scibek J, Gleeson T, McKenzie J M. The biases and trends in fault zone hydrogeology conceptual models: global compilation and categorical data analysis[J]. *Geofluids*, 2016(4): 782-798.
- [17] 付广, 李世朝, 杨德相. 断裂输导油气运移形式分布区预测方法及其应用[J]. *沉积学报*, 2017, 35(3): 592-599.
FU Guang, LI Shichao, YANG Dexiang. A method forecasting distribution areas of fault transporting oil-gas migration and its application[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(3): 592-599.
- [18] 付晓飞, 方德庆, 吕延防, 付广, 孙永河. 从断裂带内部结构出发评价断裂垂向封闭性的方法[J]. *地球科学*, 2005, 30(3): 328-336.
FU Xiaofei, FANG Deqing, LV Yanfang, FU Guang, SUN Yonghe. Method of evaluating vertical sealing of faults in terms of the internal structure of fault zones[J]. *Earth Science*, 2005, 30(3): 328-336.
- [19] 吴智平, 陈伟, 薛雁, 宋国奇, 刘惠民. 断裂带的结构特征及其对油气的输导和封堵性[J]. *地质学报*, 2010, 84(4): 570-578.
WU Zhiping, CHEN Wei, XUE Yan, SONG Guoqi, LIU Huimin. Structural characteristics of faulting zone and its ability in transporting and sealing oil and gas[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(4): 570-578.
- [20] 潘晓东, 曾洁, 任坤, 焦友军, 彭聪, 兰干江. 贵州毕节岩溶斜坡地带地下水赋存规律与钻探成井模式[J]. *地球学报*, 2018, 39(5): 606-612.
PANG Xiaodong, ZENG Jie, REN Kun, JIAO Youjun, PENG Cong, LAN Ganjiang. Groundwater occurrence characteristics and drilling well models in karst slope zone, Bijie, Guizhou Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2018, 39(5): 606-612.
- [21] Yamashita T, Tsutsumi A. Involvement of fluids in earthquake ruptures[M]. Springer Japan, 2018: 1-185.
- [22] Butler C A, Holdsworth R E, Strachan R A. Evidence for Caledonian sinistral strikeslip motion and associated fault zone weakening, Outer Hebrides Fault Zone, Scotland[J]. *Journal of the Geological Society*, 1995, 152(5): 743-746.
- [23] Schulz S E, Evans J P. Spatial variability in microscopic defor-

- mation and composition of the Punchbowl fault, Southern California: Implications for mechanisms, fluid-rock interaction, and fault morphology[J]. *Tectonophysics*, 1998, 295(1-2): 223-244.
- [24] Chester F M, Friedman M, Logan J M. Foliated cataclasites[J]. *Tectonophysics*, 1985, 111(1-2): 139-146.
- [25] Jefferies S P, Holdsworth R E, Wibberley C A J, Shimamoto T, Spiers C J, Niemeijer A R, Lloyd G E. The nature and importance of phyllonite development in crustal-scale fault cores: An example from the Median Tectonic Line, Japan[J]. *Journal of Structural Geology*, 2006, 28(2): 220-235.
- [26] Faulkner D R, Lewis A C, Rutter E H. On the internal structure and mechanics of large strike-slip fault zones: Field observations of the Carboneras fault in Southeastern Spain[J]. *Tectonophysics*, 2003, 367: 235-251.
- [27] Chester F M, Logan J M. Implications for mechanical properties of brittle faults from observations of the Punchbowl fault zone, California[J]. *Pure Applied Geophysics*, 1986, 124(1-2): 79-106.
- [28] Caine J S, James P E, Craig B F. Fault zone architecture and permeability structure[J]. *Geology*, 1996, 24(11): 1025-1028.
- [29] Gudmundsson A, Berg S S, Lyslo K B, Skurtveit E. Fracture networks and fluid transport in active fault zones[J]. *Journal of Structural Geology*, 2001, 23(2): 343-353.
- [30] Caine J S, Bruhn R L, Craig B F. Internal structure, fault rocks, and inferences regarding deformation, fluid flow, and mineralization in the seismogenic Stillwater normal fault, Dixie Valley, Nevada[J]. *Journal of Structural Geology*, 2010, 32: 1576-1589.
- [31] James P E, Craig B F, Jame V G. Permeability of fault-related rocks, and implications for hydraulic structure of fault zones[J]. *Journal of Structural Geology*, 1997, 19(11): 1393-1404.
- [32] 罗胜元, 何生, 王浩. 断层内部结构及其对封闭性的影响[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(2): 154-164.
LUO Shengyuan, HE Sheng, WANG Hao. Review on fault internal structure and the influence on fault sealing ability[J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(2): 154-164.
- [33] Bruhn R L, Parry W T, Yonkee W A, Thompson T. Fracturing and hydrothermal alteration in normal fault zones[J]. *Pure & Applied Geophysics*, 1994, 142(3): 609-644.
- [34] Scholz C H. Wear and gouge formation in brittle faulting[J]. *Geology*, 1987, 15(6): 493-495.
- [35] Hull J. Thickness-displacement relationships for deformation zones[J]. *Journal of Structural Geology*, 1988, 10(4): 431-435.
- [36] Wibberley C A J, Petit J P, Rives T. Micromechanics of shear rupture and the control of normal stress[J]. *Journal of Structural Geology*, 2000, 22(4): 411-427.
- [37] Chester F M, Evans J P, Biegel R L. Internal structure and weakening mechanisms of the San-Andreas fault[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1993, 98(B1): 771-786.
- [38] Caine J S, Forster C B. Fault zone architecture and fluid flow: Insights from field data and numerical modeling[C]// Haneberg W C, Mozley P S, Moore J C. *Faults and Subsurface Fluid Flow in the Shallow Crust*. Washington DC, AGU, 1999: 101-127.
- [39] Darnault C J G. Overexploitation and contamination of shared groundwater resources [M]. Netherland: Nato Security Through Science, 2011: 203-226.
- [40] 王焰新. 我国北方岩溶流域生态修复策略研究: 以晋祠泉为例[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(3): 331-344.
WANG Yanxin. Study on ecological restoration strategy of karst spring region in North China: Taking Jinci spring as an example[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(3): 331-344.
- [41] 梁永平, 王维泰, 赵春红, 王玮, 唐春雷. 中国北方岩溶水变化特征及其环境问题[J]. *中国岩溶*, 2013, 32(1): 34-42.
LIANG Yongping, WANG Weitai, ZHAO Chunhong, WANG Wei, TANG Chunlei. Variations of karst water and environmental problems in North China[J]. *Carsologica Sinica*, 2013, 32(1): 34-42.
- [42] 梁永平, 申豪勇, 赵春红, 王志恒, 唐春雷, 赵一, 谢浩, 石维芝. 对中国北方岩溶水研究方向的思考与实践[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(3): 363-380.
LIANG Yongping, SHEN Haoyong, ZHAO Chunhong, WANG Zhiheng, TANG Chunlei, ZHAO Yi, XIE Hao, SHI Weizhi. Thinking and practice on the research direction of karst water in northern China[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(3): 363-380.
- [43] 高旭波, 王万洲, 侯保俊, 高列波, 张建友, 张松涛, 李成城, 姜春芳. 中国北方岩溶地下水污染分析[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(3): 287-298.
GAO Xubo, WANG Wanzhou, HOU Baojun, GAO Liebo, ZHANG Jianyou, ZHANG Songtao, LI Chengcheng, JIANG Chunfang. Analysis of karst groundwater pollution in Northern China[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(3): 287-298.
- [44] 卢海平, 张发旺, 赵春红, 夏日元, 梁永平, 陈宏峰. 我国南北方岩溶差异[J]. *中国矿业*, 2018, 27(S2): 317-319.
LU Haiping, ZHANG Fawang, ZHAO Chunhong, XIA Riyuan, LIANG Yongping, CHEN Hongfeng. Differences between southern karst and northern karst besides scientific issues that need attention[J]. *China Mining Magazine*, 2018, 27(S2): 317-319.
- [45] 梁永平, 申豪勇, 高旭波. 中国北方岩溶地下水的研究进展[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(5): 199-219.
LIANG Yongping, SHEN Haoyong, GAO Xubo. Review of research progress of karst groundwater in Northern China[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(5): 199-219.
- [46] Matonti C, Lamarche J, Guglielmi Y, Marie L. Structural and petrophysical characterization of mixed conduit/seal fault zones in carbonates: Example from the Castellans fault (SE France)[J]. *Journal of Structural Geology*, 2012, 39: 103-121.
- [47] Agosta F. Rock physical properties of carbonate fault rocks, Fucino Basin (central Italy): Implications for fault seal in platform carbonates[J]. *Geofluids*, 2007, 7(1): 19-32.
- [48] Ferrill D A, Morris A P. Dilational normal faults[J]. *Journal of Structural Geology*, 2003, 25(2): 183-196.
- [49] Childs C, Manzocchi T, Walsh J J, Bonson C G, Nicol A, Schopfer M P J. A geometric model of fault zone and fault rock

- thickness variations[J]. *Journal of Structural Geology*, 2009, 31(2): 117-127.
- [50] Micarelli L, Benedicto A. Normal fault terminations in limestones from the SE-Basin (France): Implications for fluid flow[C]//Wibberley C A J, Kurz W, Imber J. The internal structure of fault zones: Implications for mechanical and fluid-flow properties. Geological Society, 2016: 123-138.
- [51] Peacock D C P, Xing Z. Field examples and numerical modelling of oversteps and bends along normal faults in cross-section[J]. *Tectonophysics*, 1994, 234(1-2): 147-167.

Hydrogeological structure model of the fault zone in the karst area of north China

LIU Yuanqing^{1,2,3,4}, ZHOU Le³, WANG Xinfeng³, LV Lin³, LU Xiaohui^{1,2}, YU Kaining⁴, ZHANG Weifeng⁵

(1. Shandong Lunan Geological Engineering Survey Institute(Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources No.2 Geological Brigade), Jining, Shandong 272100, China; 2. Shandong Provincial Engineering Research Center of Geothermal Energy Exploration and Development, Jining, Shandong 272100, China; 3. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, CGS, Baoding, Hebei 071051, China; 4. Hebei Center for Ecological and Environmental Geology Research, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031, China; 5. No.1 Institute of Geology and Mineral Resources of Shandong Province, Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract The fault zone has a controlling effect on the mechanical properties and fluid flow characteristics of the crust. It is an extensively distributed and very important structural pattern in the upper crust, and widely participates in the crustal activity process. At present, the structural composition and fluid flow pattern of fault zones are hot and difficult points in foreign research, and the research methods and understandings are different in various fields. In the field of petroleum geology, mature quantitative evaluation techniques for fault sealing have been developed in hydrocarbon migration and accumulation. In contrast, research of hydrogeological properties of faults is still in the stage of qualitative evaluation of mechanical properties on the water conductivity or water resistance of faults. Studies on fault zone structure, permeability anisotropy and other aspects have not yet been carried out. At present, many scholars and teams at home and abroad have done much meaningful research and discussion on the internal structure characteristics of the fault zone and its influence on fluid flow. This paper summarizes the results of foreign studies on the hydrogeological properties of fault zones in terms of structural composition, fault zone evolution, permeability factors, etc. The hydrogeological structure model of the fault zone in the northern part of the Taihang Mountains is introduced by taking the fault that is developed in the carbonates of the Cambrian Zhangxia formation with clastic water-bearing rocks as an example.

In previous studies on the composition and permeability structure of fault zone, its composition is divided into fault core and fracture zone. The structure of fault core and fracture zone determines the heterogeneity and anisotropy of permeability structure of fault zone. In the fault zone, the thickness ratio between fault core and fracture zone provides a convenient and generalized framework for describing the hydrogeological characteristics of fault zone. If the permeability of each component of the fault zone is combined with geological maps, geological profiles, or three-dimensional structural models of the fault zone, the permeability structure of the fault zone can be obtained from field outcrops. The permeability characteristics of each component of the fault zone are the most important to study the fluid flow properties of the fault zone. The permeability characteristics are mainly affected by the structural characteristics of the fault zone, the properties of the fluid passing through the fault zone, the tectonic stress, the scale of the fault slip and other factors. The geometric structure and permeability of the core and fracture zone are the main controlling factors to characterize the hydrogeological properties of the fault zone, which is characterized by the type of water-blocking and water-guiding system of fluid flow. According to the thickness ratio of its component parts, the fault zone can be divided into four types: single fault, dispersed deformation zone, local deformation zone and composite

deformation zone. Meanwhile, the corresponding permeability structures are local water conduction, dispersed water conduction, local water resistance, and composite water-resistance. In order to accurately reflect the hydrogeological properties of the fault zone, in this study, we should take the different positions of the fault zone into full consideration when constructing the hydrogeological structure model, and to generalize the permeability structure. The structure and hydrogeological properties of the studied fault zone will be different due to the different scale and precision of the selected fault zone and the different development sites. Taking the northern Cambrian carbonate aquifer as an example, there are clastic rocks with different thickness and relative water isolation, where lithology is dominated by thin layer shale. At different positions of the same fault zone, the different distribution characteristics of the water-proof layer and the fracture mechanism result in significant differences in the permeability and hydrogeological characteristics.

How to establish the characteristics of the spatial structure and permeability of the fault zone is the basis and premise for the accurate evaluation of the fluid flow characteristics of the fault zone, which requires geologists to have the professional knowledge of structural geology, rock mechanics, numerical simulation and other fields. Through the sharing of data in various fields and the integration of multidisciplinary methods, accurate and typical permeability structure models of fault zone are established so as to promote the study on development of fault zone and fluid flow characteristics.

Key words hydrogeology, fault core, fracture zone, permeability, karst mountainous area

(编辑 黄晨晖)

中国地质调查局发布五大类地质信息服务新产品

据自然资源部网站 11 月 24 日消息：自然资源部中国地质调查局面向国家能源资源安全、生态文明建设、区域发展规划、重大工程建设、地球科学研究、地学科普等多元需求，组织各直属单位开展地质数据采集更新和集成整合工作，开发上线了 5 大类地质信息产品，并面向社会全面公开，进一步释放地质大数据潜在价值。

此次公开的地质信息服务产品主要包括：一是全球尺度地质科研数据产品；二是基础地质与能源矿产调查数据产品；三是水工环地质调查与监测信息产品；四是具有自主知识产权的软件产品；五是全新版地质云 APP 野外助手模块，新增数字岩心、遥感数据、地质调查年报、成果报告等模块，进一步提升了用户操作的便捷性。