

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.177>



基性岩侵入对页岩矿物学特征的影响:以松辽盆地嫩江组为例

王 岩¹, 荣 辉^{1*}, 焦养泉¹, 徐 尚¹, 贾俊民¹, 曹民强², 程璇¹

1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 辽河石油勘探局新能源开发公司, 辽宁盘锦 124010

摘要:已有研究表明岩浆侵入对页岩矿物学特征产生影响,然而对其影响范围及程度缺少精细解剖,制约了岩浆活动对页岩矿物学特征影响机理的准确认识。以松辽盆地南部与辉绿岩接触的嫩江组页岩为对象,利用岩心观察、XRD、偏光显微镜及扫描电镜等手段,将接触带页岩距辉绿岩由远及近划分为5个带:(1)灰色页岩带,厚19 m,(2)深灰色页岩带,厚11 m,(3)灰黑色页岩带,厚12.9 m,(4)青灰色页岩带,厚1.5 m,(5)灰白色页岩带,厚2.2 m。石英含量增多,平均含量分别为27.0%、33.6%、51.7%、56.7%和52.7%,由陆源碎屑石英过渡为高温自生石英(微晶自形石英及微晶球状石英),重结晶现象加剧;长石含量增多,平均含量分别为8.8%、12.0%、14.0%、15.1%和18.2%,由他形过渡为半自形—自形,重结晶现象加剧;碳酸盐矿物含量先减少后增多,平均含量分别为9.0%、10.0%、7.5%、4.5%和6.0%,菱铁矿及方解石由自形过渡为胶状及脉状;黄铁矿含量逐渐减少,平均含量分别为5.4%、3.5%、1.0%、0%和0%,由草莓状及自形过渡为他形粒状;粘土矿物含量逐渐减少,平均含量分别为46.0%、36.5%、22.5%、20.1%和19.0%,由片状蒙脱石过渡为絮状伊利石。结果表明,基性岩侵入页岩不仅加速了页岩成岩演化进程,而且使页岩脆性矿物增加、塑性矿物减少,可提高页岩储层的脆性及可压性,减弱了页岩气的赋存能力。

关键词:基性岩;页岩;嫩江组;松辽盆地;石油地质。

中图分类号: P572

文章编号: 1000-2383(2021)06-2188-16

收稿日期: 2020-03-30

Effects of Basic Intrusions on Shale Mineralogy: A Case Study from Nenjiang Formation in Songliao Basin

Wang Yan¹, Rong Hui^{1*}, Jiao Yangquan¹, Xu Shang¹, Jia Junmin¹, Cao Minqiang², Cheng Xuan¹

1. School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Development Company of New Energy Sources of Liaohe Petroleum Exploration Bureau, CNPC, Panjin 124010, China

Abstract: Existing studies have shown that magmatic intrusion has effects on shale mineralogical characteristics, but the lack of a detailed anatomy of its scope and extent has restricted the accurate understanding of the influence mechanism of magmatic activities on shale mineralogical characteristics. Based on contact with diabase in southern Songliao basin shale as an object of the Nenjiang Formation, by means of core observation, XRD, polarizing microscope, and scanning electron microscopy, the contact zone shale is divided from the diabase intrusion from far and near into five zones: gray shale zone, 19 m thick; dark gray shale zone, thick 11 m; gray-black shale zone, 12.9 m thick; blue-gray shale zone, 1.5 m thick; gray-white shale zone, 2.2 m thick. Quartz content increases, with average contents of 27.0%, 33.6%, 51.7%, 56.7%, and 52.7%, respectively. The transition from terrestrial

基金项目:国家重点研发计划项目(No.2018YFC0604202);国家青年科学基金项目(No.41502105);中国地质大学(武汉)学科杰出人才基金项目(No.102-162301192664)。

作者简介:王岩(1996—),男,硕士研究生,矿产普查与勘探专业。ORCID: 0000-0002-8246-5308. E-mail: 3082592561@qq.com

*通讯作者:荣辉,E-mail:ronghui0411@163.com

引用格式:王岩,荣辉,焦养泉,等,2021.基性岩侵入对页岩矿物学特征的影响:以松辽盆地嫩江组为例.地球科学,46(6):2188—2203.

elastic quartz to high-temperature in-situ quartz (microcrystalline self-shaped quartz and microcrystalline spherical quartz), the recrystallization phenomenon intensified. The content of feldspar increases, with average contents of 8.8%, 12.0%, 14.0%, 15.1%, and 18.2%, respectively, which changes from semi-morphic to semi-self-shaped, and the recrystallization phenomenon intensified. The content of carbonate minerals decreases first and then increased, with the average contents of 9.0%, 10.0%, 7.5%, 4.5%, and 6.0%, respectively. The shape of siderite and calcite changes from self-shaped to colloidal and veined. The pyrite content gradually decreases, with average contents of 5.4%, 3.5%, 1.0%, 0%, and 0%, respectively, and transformed from strawberry-like and self-shaped to other-shaped granular. The clay mineral content gradually decreases, with average contents of 46.0%, 36.5%, 22.5%, 20.1%, and 19.0%, respectively, transformed from platy montmorillonite to floc illite. The results show that the intrusion of basic rock into shale not only accelerates the diagenetic evolution of shale, but also increases the brittle minerals and decreases the plastic minerals, which can improve the brittleness and compressibility of shale reservoirs but weaken the ability of shale gas to exist.

Key words: basic intrusion; shale; Nenjiang Formation; Songliao basin; petroleum geology.

0 引言

页岩矿物学特征对页岩油、气的形成、运移、储集及开发具有重要影响,因而其制约因素的研究受到广泛的关注(Bowker, 2007; Ross and Bustin, 2009; 李玉喜等, 2009; 张林晔等, 2009; 邹才能等, 2010; 陈尚斌等, 2011; 于志超等, 2012; 陈吉和肖贤明, 2013; 赵迪斐等, 2014; 翟刚毅等, 2017).已有研究表明沉积盆地中岩浆侵入是影响页岩矿物学特征的重要因素:岩浆侵入页岩时产生大量热烘烤和热液流体,促使页岩中矿物的溶解和生成,进而影响其中脆性及塑性矿物的含量(Einsele *et al.*, 1980; Fernando de Ros, 1998; 张映红等, 2000; Othman *et al.*, 2001; Vaclav *et al.*, 2004; 王颖等, 2010; Mil-liken *et al.*, 2012; 赵佩, 2014; 董春梅等, 2015; 刘超等, 2015; 李香兰等, 2015; 栾国强等, 2016; 王清斌等, 2019).例如李丹等(2014)和李霞(2016)认为花岗岩侵入罗村剖面荷塘组硅质泥岩时,带来大量的热和富硅流体,使得岩石硅化及矿物发生脱水反应,越靠近侵入体时,石英含量明显增加;于志超等(2012)发现基性岩浆脱气带来的大量富CO₂热流体导致辉绿岩侵入体接触部位碳酸盐矿物含量的增加;刘超等(2017)研究表明辉绿岩侵入带来的热液流体使得接触带页岩中的粘土矿物发生绢云母化,含量减少,造成粘土矿物的不均匀分布.然而,以往研究中遭受岩浆侵入改造的页岩往往经历了复杂的埋藏成岩演化历史,导致研究岩浆侵入对页岩矿物学特征影响过程中很难排除其他成岩作用的干扰.页岩受到岩浆岩侵入带来的高温或热液作用而产生以岩浆岩为中心的环状分布的蚀变带,其分带

性特征是围岩所达到的温度及其他物化条件的反映(罗文积和陈家清, 1997; 马野牧等, 2013; 刘超等, 2015, 2017; 张旗等, 2016).因此,岩体外接触带页岩蚀变分带性特征是准确认识岩浆侵入对页岩矿物学特征影响的前提.但目前国内外对岩体外接触带页岩的蚀变分带性精细研究很少,制约了对岩浆活动对页岩矿物学特征影响机理的准确认识.

松辽盆地晚白垩世嫩江组发育大套稳定分布的黑色泥页岩,它们不仅构成了盆地重要的主力烃源岩系,也是油页岩的主要赋存层位(高瑞祺和蔡希源, 1997; 黄福堂等, 1998; 侯读杰等, 2003; 刘鸿友等, 2003; 黄清华等, 2007; 贾建亮等, 2014).近年来,松辽盆地南部砂岩型铀矿勘探取得重要突破,发现了一个赋存于上白垩统姚家组的超大型砂岩型铀矿床——钱家店铀矿床,其中该矿床顶板隔水层即为嫩江组大套黑色泥页岩(夏毓亮等, 2003; 荣辉, 2012; 焦养泉等, 2015; 荣辉等, 2016).矿区很多钻孔中可见基性岩脉侵入造成了嫩江组泥页岩发生了明显的热变质作用.地层埋藏史研究显示钱家店地区嫩江组所经历的埋深不超过500 m、古低温不超过56 °C(李宏涛等, 2008).因此,钱家店地区嫩江组泥页岩早期成岩作用对岩浆岩侵入其中所引起的蚀变作用研究的干扰非常小,是研究岩浆侵入对泥页岩矿物学特征影响的良好案例.鉴于此,本文选取松辽盆地南部钱家店有大规模辉绿岩侵入的嫩江组页岩为研究对象,利用岩心观察、XRD、偏光显微镜及扫描电镜等手段,阐明接触带页岩矿物学特征,构建基性岩接触带页岩蚀变分带模型,并探讨基性岩侵入对页岩矿物学特征的影响机制及地质意义.

1 地质背景

松辽盆地是中国第二个大型的中—新生代具有断—坳双重结构的陆相沉积盆地，位于西伯利亚板块和华北板块各自向外增生的褶皱带上。其西部为内蒙古海西晚期褶皱带，东部为吉林—黑龙江海西晚期褶皱带，南部为华北地台北缘—内蒙古地轴，总面积 $2.6 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。二叠纪末—早侏罗世，由于华力西运动、印支运动、燕山运动，地槽回反为地台形成基底，并产生断裂；晚侏罗世—早白垩世早期，由于燕山运动形成了大陆内坳陷，产生了一系列单断和双断断陷盆地群并伴有大规模的火山喷发；早白垩世晚期到新生代发育了大型坳陷盆地。松辽盆地分为 7 个主要的构造单元：北部倾没区、中央坳陷区、东北隆起区、东南隆起区、西部斜坡区、西南隆起区、开鲁凹陷区（图 1a）（沈安江等，2006；郭莹莹，2008；于文斌，2009）。

钱家店构造上处于松辽盆地南部开鲁凹陷与架玛吐隆起带的过渡部位，即东南隆起的东北部，呈向带状展布（图 1a）（殷敬红，2000；庞雅庆，2010；罗毅等，2012；荣辉等，2016）。钱家店地区的地层与

开鲁凹陷地层相似，但缺失泉头组（K_{2q}）、四方台组（K_{2s}）、明水组（K_{2m}）。本文研究的目的层位为上白垩统嫩江组（K_{2n}），以大套泥页岩为特点，是含铀岩系姚家组顶板隔水层（图 1b）。嫩江组沉积时期，松辽盆地处于热沉降坳陷阶段，在盆地广阔范围内发育半深湖—深湖和浅湖沉积，形成厚度可观、生烃强度高的暗色泥岩和油页岩（郭巍等，2009；贾建亮等，2014）。本次研究目的岩段主要位于嫩江组下部页岩段：以大套灰色页岩为特点，夹薄层鲕粒灰岩（图 1c）。

2 样品情况与测试分析

本文选取样品为松辽盆地钱家店地区 ZKY2-1 井段中的页岩（图 1c），ZKY2-1 井具体地理位置见（图 1a）。ZKY2-1 井所包含的层位为嫩江组及姚家组顶部，嫩江组下部以灰色页岩为主，含少量鲕粒灰岩；上部发育较多灰绿色与棕红色页岩，夹有少量泥质粉砂岩、粉砂岩及细砂岩薄层。其上部和下部都有岩浆侵入页岩且分别形成规模较大的辉绿岩侵入体，嫩江组上部辉绿岩侵入体厚度为 43 m，下

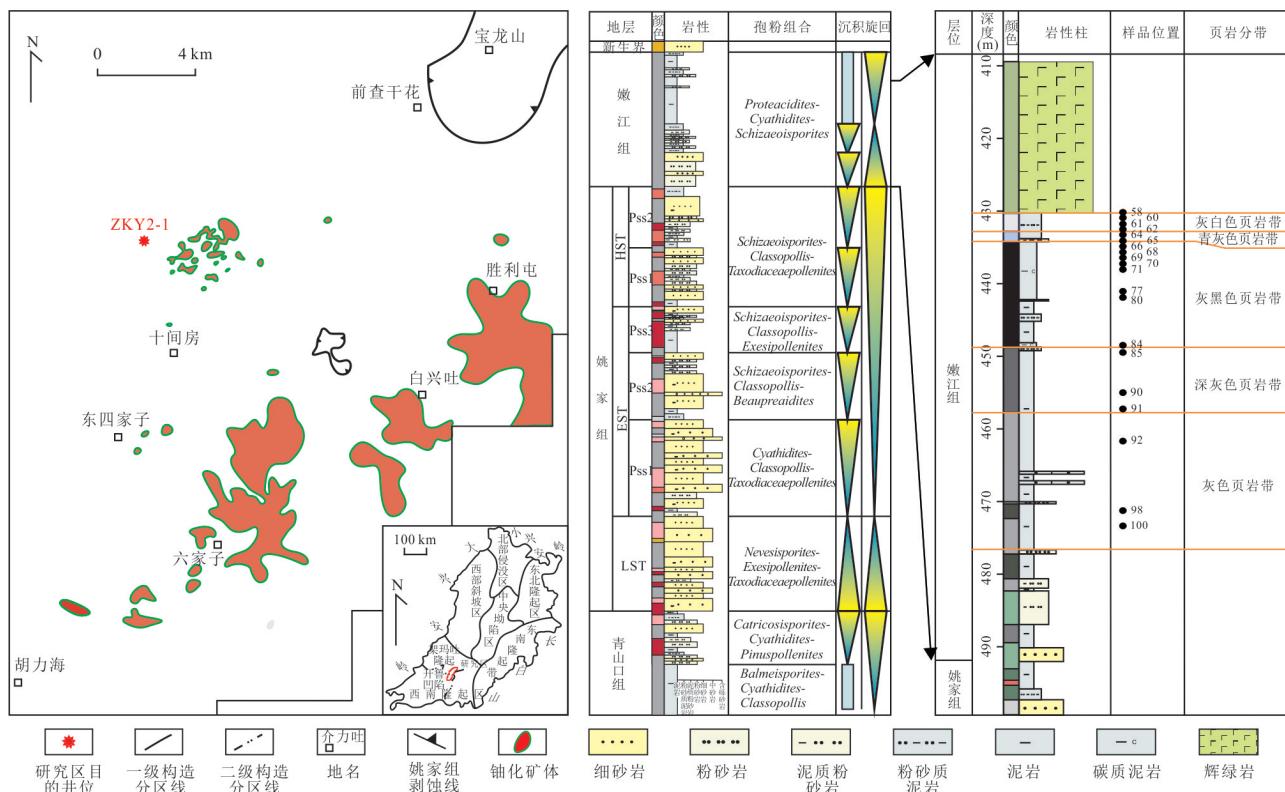


图 1 地质背景及采样情况

Fig.1 Geological background and sampling conditions

a. 钱家店地区 ZKY2-1 井的位置；b. 钱家店地区地层综合柱状图；c. ZKY2-1 井垂向序列；据荣辉等（2016）修改

部辉绿岩侵入体厚度为48 m.

样品选取ZKY2-1嫩江组下部与辉绿岩接触的页岩为研究对象,与辉绿岩接触的页岩距接触带由近及远依次为灰白色页岩带、青灰色页岩带、灰黑色页岩带、深灰色页岩带、原生灰色页岩带.本次选样针对不同分带页岩由顶及底分别进行连续密集采样,其中灰白色页岩带样品5个,青灰色页岩带样品5个,灰黑色炭质页岩带样品10个,深灰色页岩带样品3个,灰色页岩带样品5个,共采集样品28个.样品在中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室进行了偏光显微镜观察、扫描电镜测试等工作,采用的偏光显微镜为尼康偏光显微镜(Nikon ECLIPSE LV100POL).扫描电镜型号为EVO LS 15环境扫描电子显微镜,与扫描电镜相连的能谱仪型号是Aztec XMax 20能谱仪,分析元素范围是Be 4-Cf 98.环境扫描电镜分辨率:低真空,4.5 nm,30 kV,BSD(VP模式).环境扫描电镜环境条件:室温21 °C,湿度小于60%.样品的XRD工作是使用深圳市莱雷科技发展有限公司Terra便携式XRD测量的,并使用Xpowder解释数据.

3 接触带页岩岩石矿物学特征

ZKY2-1井段中与辉绿岩接触的页岩岩石矿物学特征发生改变,其变化明显(图2).通过野外岩心

观察与编录,按照距辉绿岩由近及远可将嫩江组页岩分为灰白色页岩带、青灰色页岩带、灰黑色页岩带、深灰色页岩带及灰色页岩带5个宏观分带(图1c).通过XRD分析初步确定页岩中的矿物成分及含量(表1),矿物种类主要为石英、长石、粘土矿物、碳酸盐矿物及黄铁矿,而后利用偏光显微镜与扫描电镜分别对每个分带的石英、长石、碳酸盐矿物、黄铁矿及粘土矿物进行观察,确定其矿物形态特征.

3.1 宏观岩石矿物学特征

灰白色页岩带总厚为2.2 m.灰白色页岩具泥质结构,薄页状层理构造,较致密,页理可见但不明显,与上覆辉绿岩呈截然接触,接触面可见缝合线构造,可见少量叶肢介化石,岩石中裂隙较为发育,被大量较厚的方解石脉充填(最宽可达5 mm)(见图2a),见黄铁矿脉(约1 mm)发育于方解石脉周围,呈细条带状或浸染状.青灰色页岩带总厚为1.5 m,具粉砂泥质结构,薄页状层理构造,结构致密;随着远离辉绿岩颜色向下逐渐变深,该段页岩中可见大量叶肢介化石(图2c),其被黄铁矿所浸染,岩石中裂隙较为发育,大多被极细黄铁矿脉(宽约0.5 mm)充填.灰黑色页岩带总厚为12.9 m,以灰黑色炭质页岩为主,污手,粉砂泥质结构,薄页状层理构造,结构较致密,页理中等发育,该此岩段裂隙较为发育并可见裂隙互切,大量的脉状及团块状黄铁矿及少量的方解石脉充填其中(见图2d),含有大

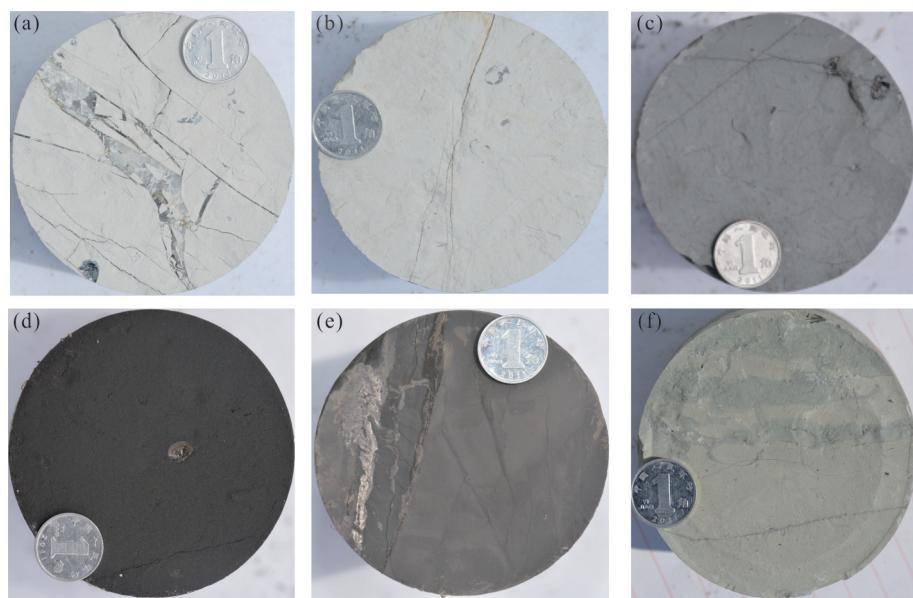


图2 宏观页岩样品

Fig.2 Macroscopic shale samples

a.灰白色页岩,含脉体,ZKY2-1,429.8 m;b.灰白色页岩,含脉体,ZKY2-1,431.8 m;c.青灰色页岩,含叶肢介,ZKY2-1,433.2 m;d.灰黑色页岩,含黄铁矿,ZKY2-1,438.2 m;e.深灰色页岩,ZKY2-1,447.2 m;f.灰色页岩,ZKY2-1,469.5 m

表 1 接触带页岩 XRD 测试结果(%)
Table 1 The content (%) of constituents of contact zone shale by XRD

编号	深度(m)	石英	长石	方解石	白云石	铁白云石	黄铁矿	菱铁矿	粘土矿物	蒙脱石	伊利石	高岭石
ZKY2-1-58	429.7	42.7	20.9	5.3	0	4.8	0	2.8	17.9	10.6	7.3	0
ZKY2-1-60	430.7	52.0	18.1	0	0	3.8	0	1.5	20.3	12.9	7.4	0
ZKY2-1-61	431.1	58.4	15.1	2.7	0	0	0	0	21.0	9.3	11.7	0
ZKY2-1-62	431.4	57.5	18.5	0	0	2.8	0	0	16.6	0	10.2	6.4
灰白色页岩带均值	52.7	18.2	2.0	0	2.9	0	1.1	19.0	8.2	9.2	1.6	
ZKY2-1-64	432.4	54.7	11.6	2.4	0	2.6	0	6.4	18.9	7.1	11.8	0
ZKY2-1-65	432.8	56.2	15.3	2	0	2.6	0	0	19.2	4.7	10.2	4.3
ZKY2-1-66	433.0	58.8	16.4	0	0	0	0	0	21.4	11.3	10.1	0
ZKY2-1-68	433.4	57.1	17.2	0	0	0	0	1.9	20.8	7.7	11.1	0
青灰色页岩带均值	56.7	15.1	1.1	0	1.3	0	2.1	20.1	7.7	10.8	1.1	
ZKY2-1-69	434.2	50.7	15.1	0	0	3.7	3.8	5.8	18.5	8.7	8.8	0
ZKY2-1-70	435.1	55.7	14.1	0	0	2.3	0	2.1	22.5	11.3	11.2	0
ZKY2-1-71	436.2	50.9	14.9	2.8	3.9	0	0	3.9	20.1	0	13.1	7.0
ZKY2-1-77	441.0	49.4	11.7	2.3	2.7	0	0	0	29.0	9.7	12.5	0
灰黑色页岩带均值	51.7	14.0	1.3	1.7	1.5	1.0	3.0	22.5	7.4	11.4	1.8	
ZKY2-1-80	442.8	48.2	12.8	0	2.6	0	0	2.3	30.9	0	12.4	9.3
ZKY2-1-84	444.0	37.7	16.8	4.0	3.4	0	5.0	2.1	26.3	0	12.9	7.2
ZKY2-1-85	445.7	31.5	13.2	3.9	0	3.9	4.2	2.7	36.2	11.6	11.7	6.1
ZKY2-1-90	456.7	23.1	9.1	6.0	4.6	2.9	4.1	3.1	43.1	19.8	11.9	5.7
ZKY2-1-91	458.5	27.6	8.1	4.8	0	4.3	4.1	0	46.1	28.3	12.5	5.3
深灰色页岩带均值	33.6	12.0	3.7	2.1	2.2	3.5	2.0	36.5	11.9	12.3	6.7	
ZKY2-1-92	462.3	26.9	8.3	3.6	0	3	5.5	2.6	46.3	29.8	11.5	5.0
ZKY2-1-98	471.8	25.6	8.2	4.1	0	4.5	5.5	2.2	46.4	28.2	12.1	6.1
ZKY2-1-100	474.8	28.5	9.9	3.8	0	3.4	5.2	0	45.3	27.0	12.0	6.3
灰色页岩带均值	27.0	8.8	3.8	0	3.6	5.4	1.6	46.0	28.3	11.9	5.8	

量的介形虫、叶肢介。深灰色页岩带总厚为 11 m, 泥质结构, 结构中等, 页理极为发育, 页岩中夹有较多较薄的粉砂质页岩、鲕粒灰岩, 并夹有白色石膏薄层(厚为 0.2 mm), 该段页岩中可见大量介形虫, 裂隙发育较少, 见少量方解石充填(图 2e)。灰色页岩带总厚为 19 m, 泥质结构, 结构疏松, 页理最为发育, 夹薄层粉砂岩、细砂岩, 可见有大量的介形虫及叶肢介化石, 裂隙不发育(图 2f)。

3.2 微观岩石矿物学特征

3.2.1 灰白色页岩带 灰白色页岩中石英(Qtz)的平均含量为 52.7%, 重结晶现象明显, 呈不规则状分布, 放大后可见石英呈微晶球状体(图 3a), 周围多分布粘土矿物, 见少量粒径粗大的碎屑石英; 长石(fds)平均含量为 18.2%, 重结晶现象明显, 多生长连接在一起, 部分重结晶在碎屑长石的外围, 放大后可见长石呈微晶自形集合体(图 3b); 碳酸盐矿物的平均含量为 6%, 主要为方解石(Cal)及菱铁矿(Sd), 方解石呈脉体充填于裂隙中, 菱铁矿分布于

方解石脉的周围, 呈片状扩散分布(图 3c); 粘土矿物平均含量为 19%, 主要为伊利石(ill), 多呈絮状分布于石英等碎屑颗粒的孔隙之间(图 3d); 此外, 见少量的接触热变质矿物, 主要有硅灰石(Wi), 呈放射状, 约 1 μm, 分布于石英周围, 其为石英与方解石高温下反应形成的产物, 主要出现在灰白色页岩带中(图 3e); 葵青石(Crd), 呈长条状及板状, 在灰白色页岩带中分布最多(图 3f); 白云母, 呈细小纤维状填充于灰白色页岩带中的碎屑颗粒间。

3.2.2 青灰色页岩带 青灰色页岩中石英平均含量为 56.7%, 常见微晶自形石英, 呈聚集体被碳酸盐胶结(图 4a); 长石平均含量为 15.1%, 重结晶现象减弱, 常见碎屑长石边缘出现断裂破碎(图 4b); 黄铁矿在灰白色页岩中没有发现, 在青灰色页岩中见极少量细粒状黄铁矿交代菱铁矿(图 4c); 碳酸盐矿物的平均含量为 4.5%, 主要为菱铁矿, 常呈嵌晶胶结石英长石等碎屑颗粒(图 4d)。

3.2.3 灰黑色页岩带 灰黑色页岩中石英平均含量

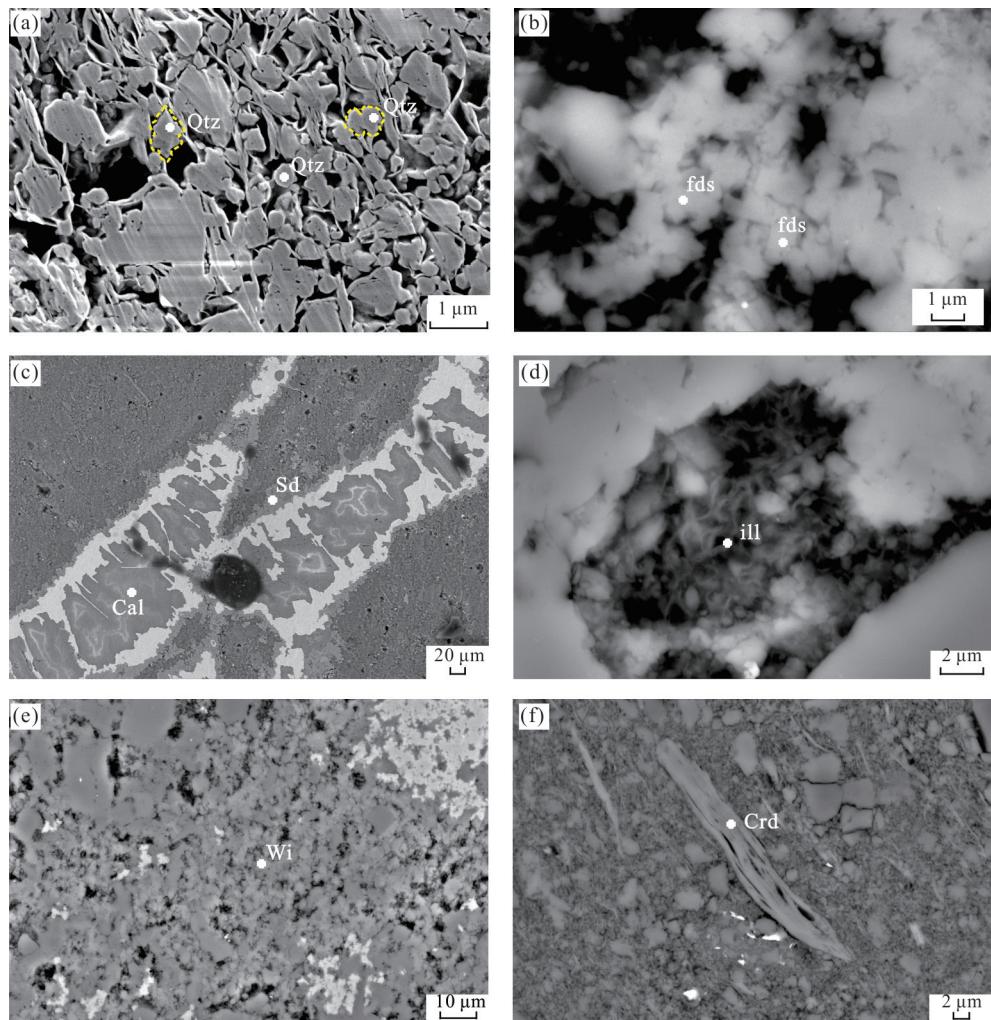


图3 灰白色页岩带矿物特征

Fig.3 Mineral characteristics in gray-white shale zone

a.灰白色页岩的微晶球状石英,部分发生重结晶,429.7 m; b.灰白色页岩中的自形微晶长石集合体,430.7 m;c.灰白色页岩中的方解石脉,其外围分布有菱铁矿,429.7 m;d.灰白色页岩中的絮状伊利石,429.7 m;e.灰白色页岩中的硅灰石,分布于石英周围,429.7 m;f.灰白色页岩中的堇青石,呈条状及板状,430.7 m;a为扫描电镜二次电子图像,其余为扫描电镜背散射图像.Qtz.石英;fds.长石;ill.伊利石;Cal.方解石;Sd.菱铁矿;Crd.堇青石;Wi.硅灰石

约为51.7%,见部分微晶自形石英生长于有机质中(图5a);长石平均含量为14%,碎屑长石破裂现象严重,大多长石见裂纹(图5b);黄铁矿平均含量约为1%,除少量交代菱铁矿外,常见草莓状黄铁矿晶体残留(图5c);碳酸盐矿物平均含量为7.5%,主要为菱铁矿与方解石,形状不规则,且两者出现相互交代现象(图5d)。

3.2.4 深灰色页岩带 深灰色页岩中石英平均含量为33.6%,含量明显减少,主要为陆源碎屑石英,多呈他形且磨圆较好(图6a);长石平均含量为12%,主要为陆源碎屑长石,具有一定磨圆(图6b);黄铁矿平均含量为3.5%,主要为自形立方体黄铁矿,多呈八面体及五角十二面体(图6c);碳酸盐矿物平均含量为

10%,主要为菱铁矿及方解石,菱铁矿多呈单晶自形分布,方解石呈多晶集合体形式存在(图6d)。

3.2.5 灰色页岩带 灰色页岩中石英平均含量为27%,主要为陆源碎屑石英,多呈他形,部分遭受溶蚀(图7a);长石平均含量为8.8%,主要为陆源碎屑长石,多呈他形且部分长石边缘粘土化(图7b);黄铁矿平均含量为5.4%,主要为草莓状黄铁矿及由草莓状向自形立方体黄铁矿转化的中间体形态(图7c),自形黄铁矿相对较少;碳酸盐矿物平均含量为9%,主要为菱铁矿,多呈自形独立分布(图7d);粘土矿物平均含量为46%,主要为蒙脱石(Mnt),含量达28.3%,呈片状顺层分布(图7e);此外,在灰色页岩中见有机质(OM),在压实作用下呈塑性状态(图7f)。

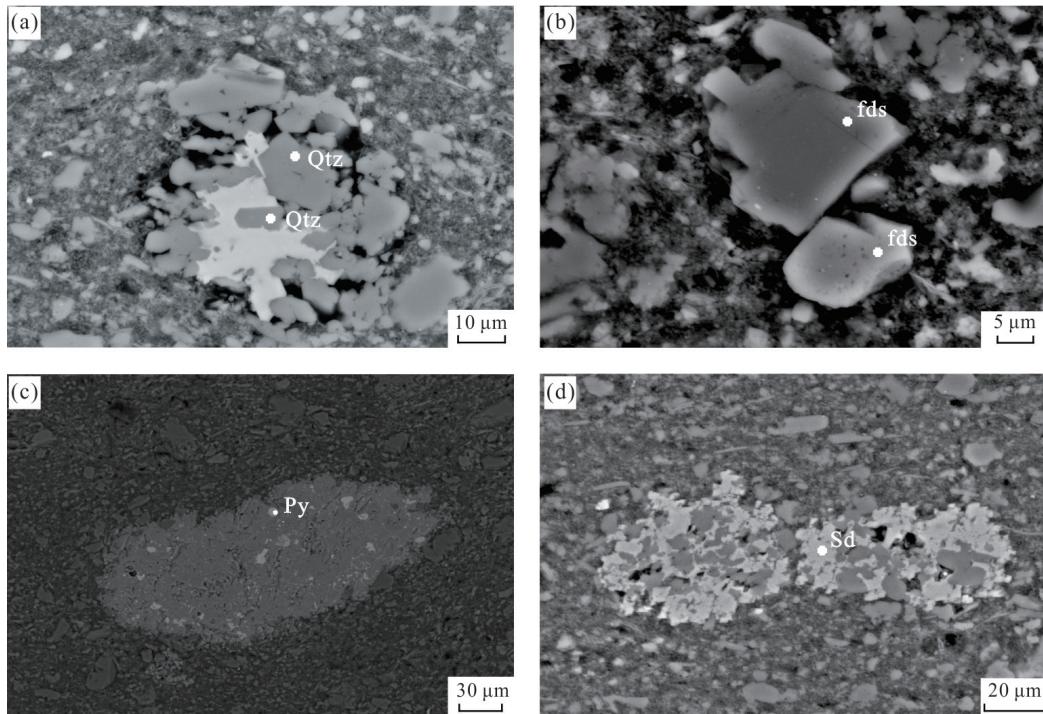


图4 青灰色页岩带矿物特征

Fig.4 Mineral characteristics in blue-gray shale zone

a.青灰色页岩中的自形石英,具良好晶形,432.8 m;b.青灰色页岩中的半自形钾长石,边缘发生破裂,433 m;c.青灰色页岩中的黄铁矿,呈他形粒状交代菱铁矿,433.4 m;d.青灰色页岩中的菱铁矿脉胶结碎屑颗粒,433 m;均为扫描电镜背散射图像.Py.黄铁矿;其他见图3说明

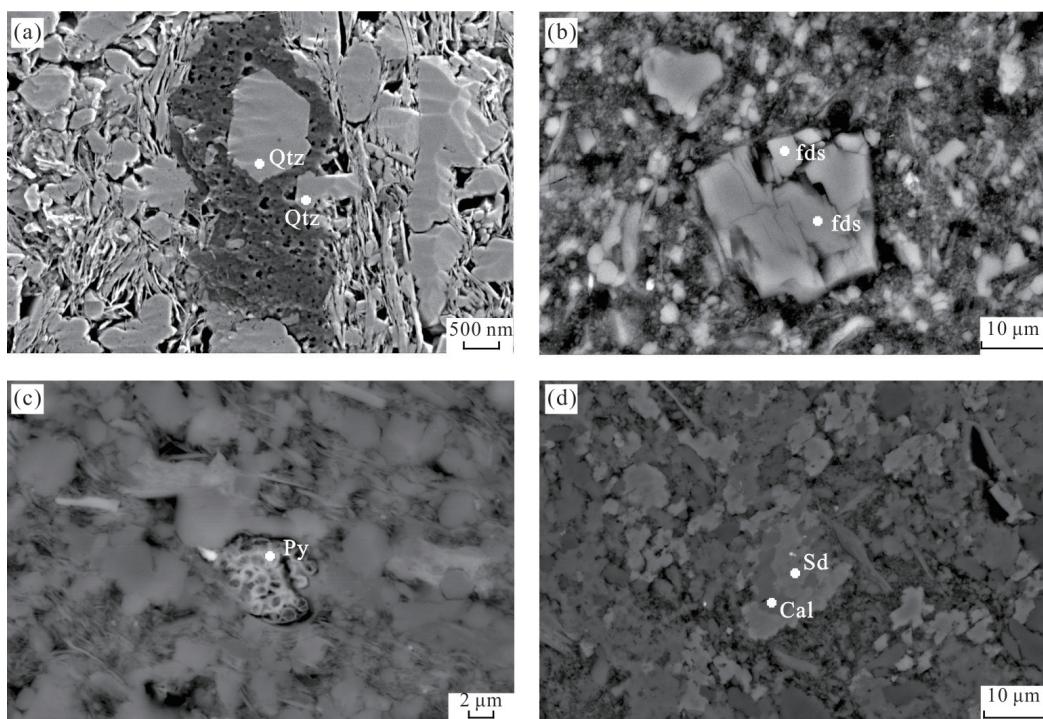


图5 灰黑色页岩带矿物特征

Fig.5 Mineral characteristics in gray-black shale zone

a.灰黑色页岩中生长于有机质中的自形石英,436.2 m;b.灰黑色页岩中的钠长石发生破裂,434.2 m;c.灰黑色页岩中黄铁矿晶体残留,442.2 m;d.灰黑色页岩中的方解石及菱铁矿相互交代,438.1 m;a为扫描电镜二次电子图像,其余均为扫描电镜背散射图像.Py.黄铁矿;其他见图3说明

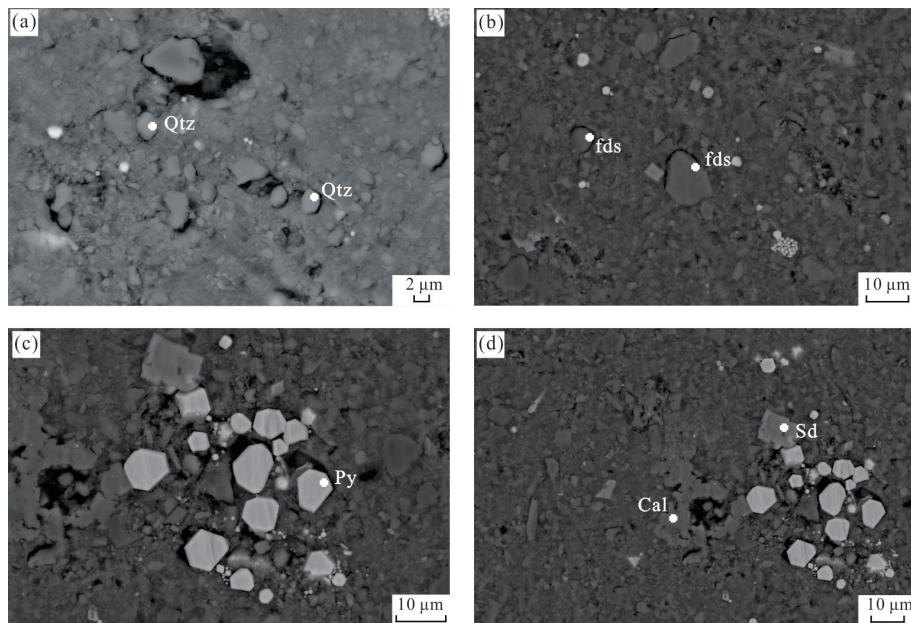


图6 深灰色页岩带矿物特征

Fig.6 Mineral characteristics in dark-gray shale zone

a.深灰色页岩中的他形粒状石英,具一定磨圆,456.7 m;b.深灰色页岩中的他形长石,磨圆较好,456.7 m;c.深灰色页岩中的自形黄铁矿,456.7 m;d.深灰色页岩中的自形菱铁矿及方解石集合体,456.7 m;图中均为扫描电镜背散射图像.Py.黄铁矿;其他见图3说明

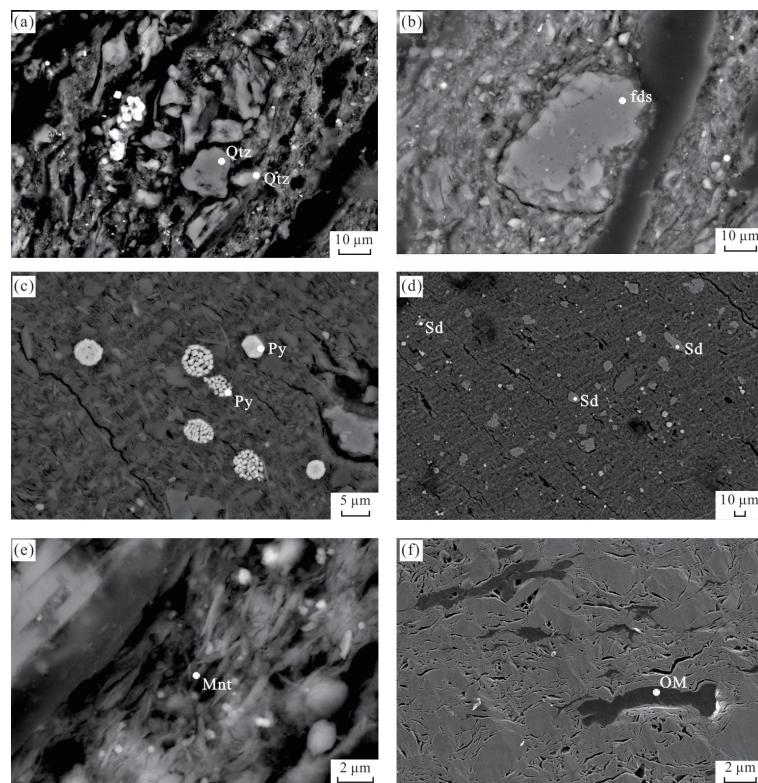


图7 灰色页岩带矿物特征

Fig.7 Mineral characteristics in gray shale zone

a.灰色页岩中的石英,他形,表面有溶孔,471.8 m;b.灰色页岩中的钾长石边缘粘土化,呈他形,474.8 m;c.灰色页岩中的草莓状及由草莓状向自形晶转化的黄铁矿,462.3 m;d.灰色页岩中自形菱铁矿分布,462.3 m;e.灰色页岩中的片状蒙脱石,474.8 m;f.灰色页岩中的有机质,经压实呈塑性,474.8 m;f为扫描电镜二次电子图像,其余均为扫描电镜背散射图像.Py.黄铁矿;Mnt.蒙脱石;OM.有机质;其他见图3说明

4 接触带页岩蚀变分带模式

通过不同分带页岩岩石矿物学特征对比,构建接触带页岩蚀变分带模式。即通过XRD测试结果绘制接触带页岩矿物含量分布图(图8),并结合页岩矿物形态特征,构建接触带页岩矿物学特征分带模式图(图9)。

宏观方面,距辉绿岩侵入体由远及近将嫩江组接触热变质带页岩划分为5个带:灰色页岩带、深灰色页岩带、灰黑色页岩带、青灰色页岩带及灰白色页岩带(图9)。微观方面,含量上,从灰色页岩带到灰白色页岩带,石英含量逐渐增多,平均含量分别为27.0%、33.6%、51.7%、56.7%和52.7%。长石含量逐渐增多,平均含量分别为8.8%、12.0%、14.0%、15.1%和18.2%。碳酸盐矿物含量

先减少后增多,平均含量分别为9.0%、10.0%、7.5%、4.5%和6.0%。黄铁矿含量逐渐减少,平均含量分别为5.4%、3.5%、1.0%、0%和0%。粘土矿物含量逐渐减少,平均含量分别为46.0%、36.5%、22.5%、20.1%和19.0%。形态上,从灰色页岩带到灰白色页岩带,石英由陆源碎屑型的他形石英过渡为自生石英,分别表现为微晶自形石英及微晶球状石英,重结晶现象加剧;长石由他形过渡为半自形—自形,重结晶现象加剧;碳酸盐矿物主要为菱铁矿及方解石,菱铁矿由自形过渡为半自形及胶状,方解石则由方解石聚集体过渡为方解石脉;黄铁矿呈现草莓状→自形立方体→他形粒状的形态组合;粘土矿物由片状蒙脱石过渡为絮状伊利石,变质矿物硅灰石、堇青石及白云母逐渐产生,且越靠近侵入体含量越多。

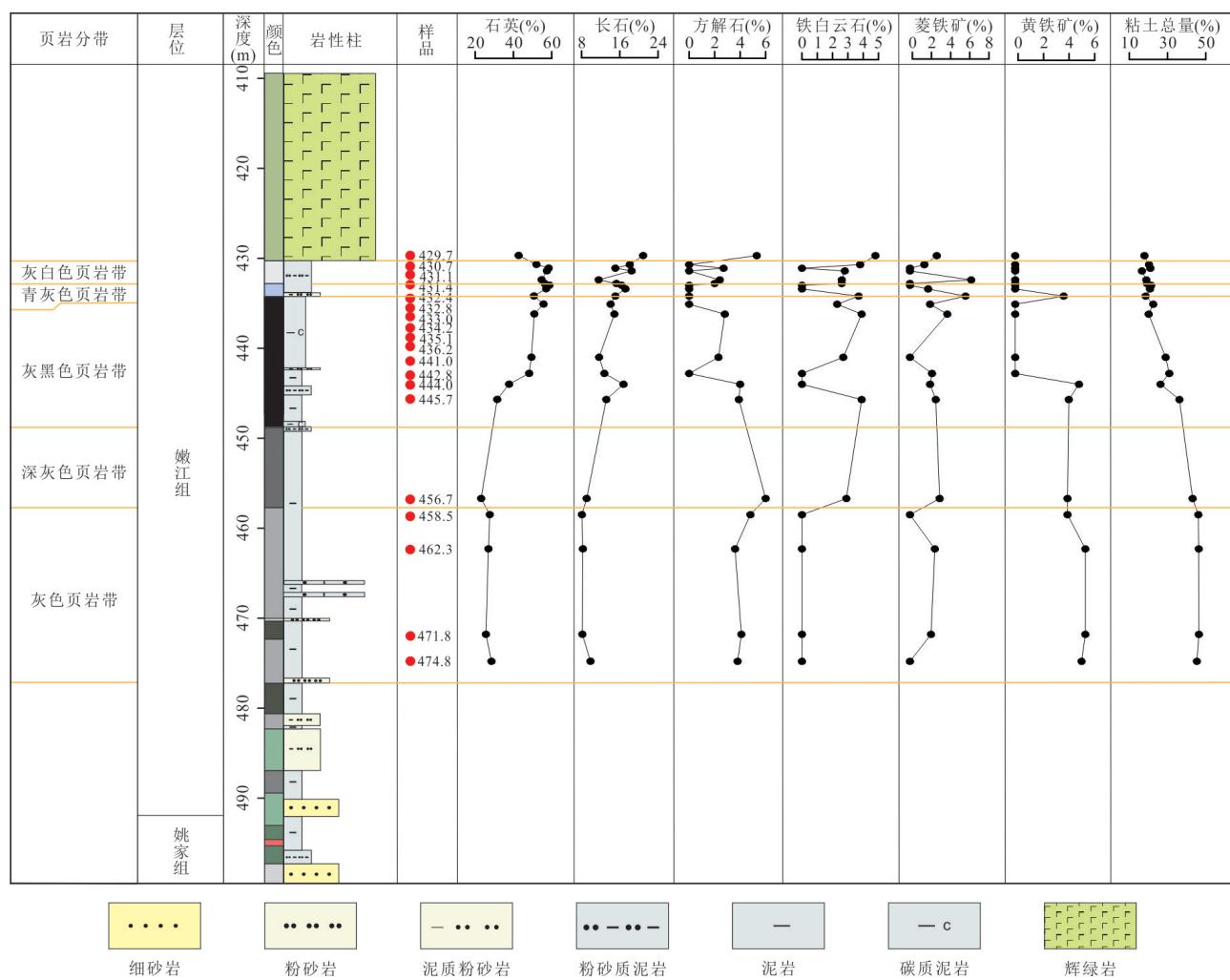


图8 接触带页岩矿物含量分布图(据表1)

Fig.8 Mineral content distribution in contact zone shale (according to Table 1)

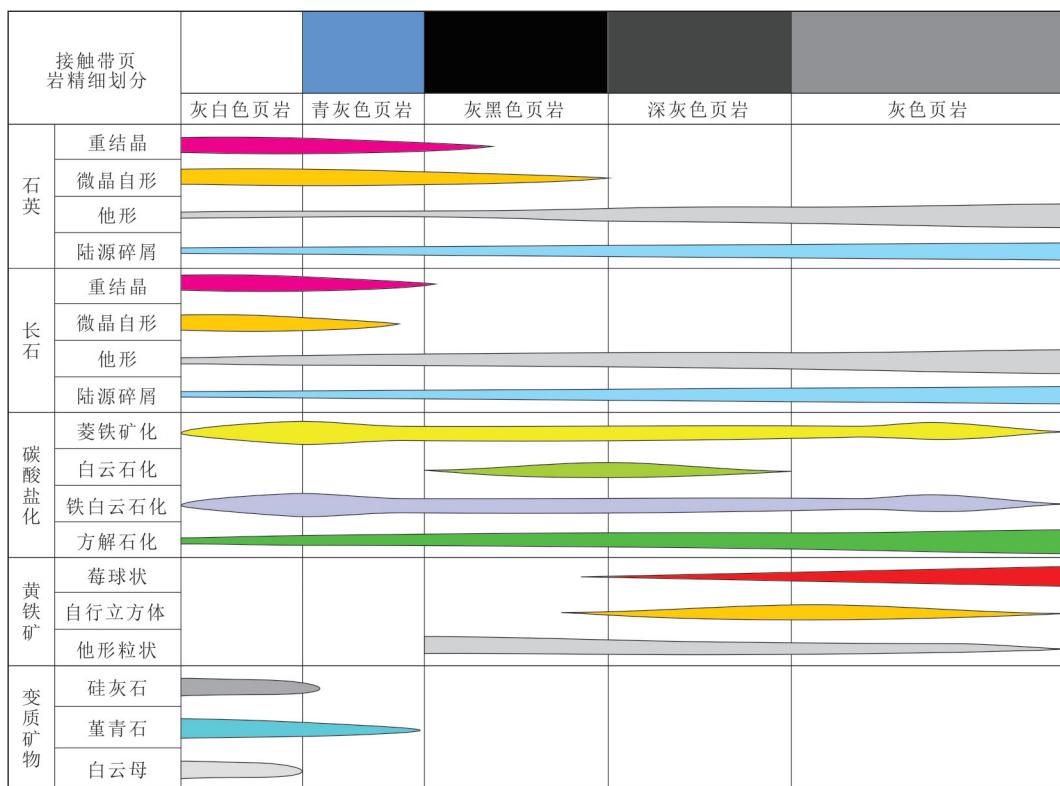


图9 接触带页岩矿物学特征分带模式

Fig.9 Zonal pattern of shale mineralogical characteristics in contact zone

5 探讨

本文从宏观和微观方面对接触带页岩的岩石矿物学特征进行了系统分析,发现不同分带页岩的岩石矿物学特征差异明显且各具特点.鉴于此,以本文实验数据为基础,结合前人研究,对基性岩侵入对页岩岩石矿物学特征的影响机制及地质意义进行探讨.

5.1 岩浆侵入对页岩矿物学特征的影响机制

前人研究显示,与岩浆热流体作用密切相关的自生矿物(燧石、嵌晶状钠长石、黏土矿物、纤维状浊沸石、自生石英和自生长石)集中分布在热流体活动所波及的有限范围内(McKinley *et al.*, 2001).这与距辉绿岩侵入体较近的灰白色页岩带、青灰色页岩带及灰黑色页岩带中自生石英与自生长石大量生成的现象吻合,辉绿岩侵位带来的挥发分提供的硅质及热液流体带来的硅酸盐流体可为自生石英与长石提供物质基础(彭晓蕾, 2006),因此辉绿岩的侵入提供了钾、钠等碱性离子和溶液环境,参与了石英微晶的形成.灰白色页岩中出现的微晶球状体石英则由粘土矿物在高温下脱硅转化而来,证据是镜下观察到微晶球状石英往往被絮状伊利石

包裹,两者空间上联系紧密(图3a).灰黑色页岩中的自生石英生长在有机质中(图5a),这种现象表明了有机质在岩浆侵入形成的高温环境下发生分解,从而为自生石英的形成提供了酸性环境及可容纳空间.

碳酸盐矿物中方解石及菱铁矿在灰白色及青灰色页岩带以脉体形式存在(图3c),是辉绿岩的侵入对页岩产生挤压作用从而形成裂隙,碳酸盐流体沿裂隙侵入后沉淀形成的.随着侵入距离的增加,碳酸盐矿物含量减少,分散残留的菱铁矿及方解石呈胶状胶结碎屑颗粒.在远离侵入体的下部页岩带中,菱铁矿多以自形晶存在,很少胶结碎屑颗粒,可判断出其是沉积—成岩过程中自生形成的,而靠近侵入体的页岩带中没有发现自形菱铁矿则由于碳酸盐矿物不稳定,自形菱铁矿在高温下受热分解.

前人通过研究矿床中的黄铁矿形态及其成因,发现在不同温度环境下形成的黄铁矿产状类型不同(赵凯等, 2013; 蒋柯等, 2020),黄铁矿在灰白色及青灰色页岩带中几乎不发育,是由于侵入体附近原生沉积或成岩过程形成的黄铁矿因温度过高而分解.随着远离侵入体,温度逐渐降低,黄铁矿含量逐渐增多,原生沉积及成岩期形成的草莓状及自形

黄铁矿相继出现(图 7c),且由草莓状向自形立方体转化的黄铁矿的大量出现也标志着高温对黄铁矿的影响显著。

基性岩侵入使不同页岩带中的粘土矿物相互之间发生不同程度的转化。前人的模拟实验发现,随着温度升高,伊蒙混层形态发生明显变化,形态变化趋势为:片状—片状+短丝状—丝片状—絮状(董春梅等,2015)。结合本次实验,在原生灰色页岩带,粘土矿物主要为片状蒙脱石,含少量鳞片状伊利石,随着距离辉绿岩越来越近,在高温作用下,片状蒙脱石逐渐减少,伊利石逐渐增多且由鳞片状逐渐转变为不规则絮状,粘土矿物由有序转变为无序。

5.2 油气地质意义

页岩矿物成分尤其是脆性矿物及塑性矿物对页岩气藏储层物性影响重大,一是脆性矿物含量对泥页岩人工造缝能力影响显著,是泥页岩渗流能力的重要控制因素,脆性矿物的含量往往决定了页岩气储层的脆性和可压裂性(赵迪斐等,2014;赵佩等,2014;张晓明等,2015;孙川翔等,2019;王超等,2019;易婷等,2020);二是塑性矿物的粘土矿物为页岩气吸附的重要场所,吸附气量随粘土矿物含量增加而增加(Ross and Bustin, 2009;陈尚斌等,2011)。已有研究表明页岩中的脆性及塑性矿物受沉积环境、成岩作用、有机质成熟度及后生流体改造等因素制约(Pollastro, 2007;聂海宽等,2012;朱晓军和蔡进功,2012;曹海涛等,2019),然而对岩浆侵入这一影响因素的研究很少,因此,本文将阐明岩浆侵入对页岩脆性及塑性矿物的影响程度及意义。

通过接触带页岩矿物学特征对比发现:(1)基性岩侵入使页岩中脆性矿物丰富,含量增多。根据古生界海相页岩的矿物组成特征,我国学者往往把石英、长石、方解石、白云石作为脆性矿物,本文实验结果表明,灰白色页岩带中脆性矿物含量分布在68.9%~76.2%,平均含量为72.9%;青灰色页岩带中脆性矿物含量分布在68.7%~75.2%,平均含量为72.9%;灰黑色页岩带中脆性矿物含量分布在65.8%~72.5%,平均含量为68.7%;深灰色页岩带中脆性矿物含量分布在40.5%~63.6%,平均含量为51.4%;灰色页岩带中脆性矿物含量分布在37.9%~42.2%,平均含量为39.6%。石英及长石作为重要的脆性矿物,是控制页岩裂缝发育程度的主要内在因素,直接影响页岩气储集空间和渗流通道,在基性岩侵入后接触带页岩中二者含量均发生

显著的升高,进而使页岩储层具有了良好的脆性及可压性,有利于页岩气的开采。(2)塑性矿物含量减少,随着靠近辉绿岩侵入体,塑性矿物,即粘土矿物平均含量分别为46.0%、36.5%、22.5%、20.1%和19.0%,粘土矿物在总量上呈现明显减少趋势,且在侵入体的影响下,占粘土矿物主体的蒙脱石转化为高温下呈稳定状态的伊利石,而前人研究表明,与伊利石相比,蒙脱石具有巨大的比表面和更多的微孔隙空间,更利于页岩气的吸附(李颖莉和蔡进功,2014)。因此,基性岩的侵入使得页岩中的粘土矿物总量减少尤其是大量蒙脱石的转化缺失使页岩气的赋存能力减弱。本文研究表明岩浆侵入会造成脆性矿物的增加及塑性矿物的减少,这一观点的提出丰富页岩油气研究中对脆性矿物、塑性矿物影响因素的认识,为页岩油气勘探和开发提供一定指导。

6 结论

(1)距辉绿岩侵入体由远及近将嫩江组接触热变质带页岩划分为5个带:灰色页岩带、深灰色页岩带、灰黑色页岩带、青灰色页岩带及灰白色页岩带。

(2)靠近侵入体,石英含量增多,平均含量分别为27.0%、33.6%、51.7%、56.7%和52.7%。长石含量增多,平均含量分别为8.8%、12.0%、14.0%、15.1%和18.2%。碳酸盐矿物含量先减少后增多,平均含量分别为9.0%、10.0%、7.5%、4.5%和6.0%。黄铁矿含量减少,平均含量分别为5.4%、3.5%、1.0%、0%和0%。粘土矿物含量减少,平均含量分别为46.0%、36.5%、22.5%、20.1%和19.0%。

(3)靠近侵入体,石英呈现他形→半自形→微晶自形→微晶球状体的形态组合,长石呈现他形→半自形→微晶自形的形态组合,菱铁矿及方解石呈现出自形→半自形→胶状→脉状的形态组合,黄铁矿呈现草莓状→自形立方体→他形粒状的形态组合,粘土矿物由片状蒙脱石过渡为絮状伊利石。

(4)基性岩侵入使页岩脆性矿物含量增加,提高了页岩储层的脆性及可压性,有利于页岩气的开采,同时塑性矿物含量减少使页岩气的赋存能力减弱。

致谢:感谢中国地质大学(武汉)资源学院潘哲君老师、潘思东老师在实验及论文编写过程中的帮助与支持,感谢瀛洲科技(上海)有限公司郭瑷铭在XRD测试及解释过程中的帮助,感谢匿名审稿专家对论文提出的宝贵修改意见!

References

- Bowker, K. A., 2007. Barnett Shale Gas Production, Fort Worth Basin: Issues and Discussion. *AAPG Bulletin*, 91(4):523—533. <https://doi.org/10.1306/06190606018>
- Cao, H. T., Zhan, G. W., Yu, X. Q., et al., 2019. Major Factors Influencing the Productivity of Deep Shale Gas Wells: A Case Study of Yongchuan Block in Southern Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 39(Suppl. 1):118—122(in Chinese with English abstract).
- Chen, J., Xiao, X. M., 2013. Mineral Composition and Brittleness of Three Sets of Paleozoic Organic-Rich Shales in China South Area. *Journal of China Coal Society*, 38(5):822—826(in Chinese with English abstract).
- Chen, S. B., Zhu, Y. M., Wang, H. Y., et al., 2011. Characteristics and Significance of Mineral Compositions of Lower Silurian Longmaxi Formation Shale Gas Reservoir in the Southern Margin of Sichuan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 32(5):775—782(in Chinese with English abstract).
- Dong, C. M., Ma, C. F., Luan, G. Q., et al., 2015. Pyrolysis Simulation Experiment and Diagenesis Evolution Pattern of Shale. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33(5):1053—1061(in Chinese with English abstract).
- Einsele, G., Gieskes, J. M., Curray, J., et al., 1980. Intrusion of Basaltic Sills into Highly Porous Sediments, and Resulting Hydrothermal Activity. *Nature*, 283: 441—445. <https://doi.org/10.1038/283441a0>
- Fernando de Ros, L., 1998. Heterogeneous Generation and Evolution of Diagenetic Quartzarenites in the Silurian-Devonian Furnas Formation of the Paraná Basin, Southern Brazil. *Sedimentary Geology*, 116(1—2): 99—128. [https://doi.org/10.1016/s0037-0738\(97\)00081-x](https://doi.org/10.1016/s0037-0738(97)00081-x)
- Gao, R. Q., Cai, X. Y., 1997. Formation Conditions and Distribution of Oil and Gas Fields in Songliao Basin. Petroleum Industry Press, Beijing(in Chinese).
- Guo, W., Fang, S., Liu, Z. J., et al., 2009. Research on Thermal Evolutionary History during the Period of Quantou-Nenjiang Formation in the South of Songliao Basin. *Journal of Oil and Gas Technology*, 31(3):1—6, 13(in Chinese with English abstract).
- Guo, Y. Y., 2008. Sedimentary System Analysis of Yaojia Formation in Southern Songliao Basin (Dissertation). Jilin University, Changchun(in Chinese with English abstract).
- Hou, D. J., Feng, Z. H., Huang, Q. H., 2003. Geological and Geochemical Evidences of Anoxic Event in the Songliao Basin, China. *Geoscience*, 17(3): 311—317(in Chinese with English abstract).
- Huang, F. T., Huang, Q. H., Chen, C. R., 1998. Rhythm of Geological Events and Interaction of Different Earth Spheres in Mesozoic of the Songliao Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 25(5): 86—89(in Chinese with English abstract).
- Huang, Q. H., Liang, W. L., Ye, D. Q., et al., 2007. The Characteristics of Cretaceous Microbiotas and Formation of Hydrocarbon-Rich Source Rocks in Songliao Basin. *Acta Palaeontologica Sinica*, 46(3):380—386(in Chinese with English abstract).
- Jia, J. L., Liu, Z. J., Bechtel, A., et al., 2014. Major Factors Controlling Formation of Oil Shale in Nenjiang Formation of Songliao Basin. *Earth Science*, 39(2):174—186(in Chinese with English abstract).
- Jiang, K., Zhou, W., Deng, N. E., et al., 2020. Characteristics and Geological Significance of Pyrites in Wufeng and Longmaxi Formation Reservoir Shale in Sichuan Basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 47(1): 50—64(in Chinese with English abstract).
- Jiao, Y. Q., Wu, L. Q., Peng, Y. B., et al., 2015. Sedimentary-Tectonic Setting of the Deposition-Type Uranium Deposits Forming in the Paleo-Asian Tectonic Domain, North China. *Earth Science Frontiers*, 22(1):189—205(in Chinese with English abstract).
- Li, D., Sun, J., He, J. J., 2014. Reservoir Characteristics and Development Model of Mudstone Metamorphic Belts around the Near-Surface Intrusions: A Case Study in Northern Slope of Gaoyou Sag, Jiangsu Province. *Global Geology*, 33(1): 164—170(in Chinese with English abstract).
- Li, H. T., Wu, S. X., Cai, C. F., et al., 2008. Forming Processes of Petroleum-Related Sandstone-Type Uranium Ore: Example from Qianjiadian Uranium Deposit. *Geochimica*, 37(6):523—532(in Chinese with English abstract).
- Li, X., 2016. Impact of Granite Intrusion on Shale Composition and Pore Structure (Dissertation). Nanjing University, Nanjing(in Chinese with English abstract).
- Li, X. L., Liu, S. W., Xu, M., et al., 2015. Measurement and Analysis of Thermal Properties of Mudstones and Shales in the Lower Yangtze Area, South China. *Natural Gas Geoscience*, 26(8):1525—1533(in Chinese with English abstract).
- Li, Y. L., Cai, J. G., 2014. Effect of Smectite Illitization on Shale Gas Occurrence in Argillaceous Source Rocks. *Petroleum Geology & Experiment*, 36(3):352—358(in Chinese with English abstract).
- Li, Y. X., Nie, H. K., Long, P. Y., 2009. Development Characteristics of Organic-Rich Shale and Strategic Selection of Shale Gas Exploration Area in China. *Natural Gas Indus-*

- try, 29(12):115—118, 152—153(in Chinese with English abstract).
- Liu, C., Xie, Q.B., Wang, G.W., et al., 2015. The Influence of Igneous Intrusion to Detrital Reservoir: Advances and Outlook. *Advances in Earth Science*, 30(6):654—667(in Chinese with English abstract).
- Liu, C., Xie, Q.B., Wang, G.W., et al., 2017. Diagenetic and Metamorphic Characteristics and Implications for Hydrocarbon Reservoirs in the Country Rocks Influenced by Magmatic Emplacement:A Case Study from an Outcrop of Diabase Intrusion in the Southern Songliao Basin. *Chinese Journal of Geology*, 52(2): 453—469(in Chinese with English abstract).
- Liu, H.Y., Shen, A.J., Wang, Y.Q., et al., 2003. Study on Sequence Stratigraphy and Genesis Assemblages Forming Oil and Gas from Quantou Fm. to Nenjiang Fm. in Southern Songliao Basin. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 33(4):469—473(in Chinese with English abstract).
- Luan, G.Q., Dong, C.M., Ma, C.F., et al., 2016. Pyrolysis Simulation Experiment Study on Diagenesis and Evolution of Organic-Rich Shale. *Acta Sedimentologica Sinica*, 34(6):1208—1216(in Chinese with English abstract).
- Luo, W.J., Chen, J.Q., 1997. Bidirectional Convergence Hydrothermal Metallogenesis. *Acta Geologica Sinica*, 6 (Suppl.1):47—52(in Chinese with English abstract).
- Luo, Y., He, Z.B., Ma, H.F., et al., 2012. Metallogenic Characteristics of Qianjiadian Sandstone Uranium Deposit in Songliao Basin. *Mineral Deposits*, 31(2):391—400(in Chinese with English abstract).
- Ma, Y.M., Lu, X.C., Zhang, X.F., et al., 2013. A Numerical Simulation of the Heat Transfer in Granite Intrusion-Mudstone Contact Zone and Its Geological Implication: A Case Study from Eastern Guangdong Province, China. *Geological Journal of China Universities*, 19(2): 307—315(in Chinese with English abstract).
- McKinley, J.M., Worden, R.H., Ruffell, A.H., 2001. Contact Diagenesis: The Effect of an Intrusion on Reservoir Quality in the Triassic Sherwood Sandstone Group, Northern Ireland. *Journal of Sedimentary Research*, 71(3): 484—495.
- Milliken, K.L., Esch, W.L., Reed, R.M., et al., 2012. Grain Assemblages and Strong Diagenetic Overprinting in Siliceous Mudrocks, Barnett Shale (Mississippian), Fort Worth Basin, Texas. *AAPG Bulletin*, 96(8):1553—1578. <https://doi.org/10.1306/12011111129>
- Nie, H.K., Zhang, J.C., Bao, S.J., et al., 2012. Shale Gas Accumulation Conditions of the Upper Ordovician-Lower Silurian in Sichuan Basin and Its Periphery. *Oil & Gas Geology*, 33(3):335—345(in Chinese with English abstract).
- Othman, R., Arouri, K.R., Ward, C.R., et al., 2001. Oil Generation by Igneous Intrusions in the Northern Gunnedah Basin, Australia. *Organic Geochemistry*, 32(10): 1219—1232. [https://doi.org/10.1016/s0146-6380\(01\)00089-4](https://doi.org/10.1016/s0146-6380(01)00089-4)
- Pang, Y.Q., Chen, X.L., Fang, X.H., et al., 2010. Discussion on the Interlayer Oxidation and Uranium Metallogenesis in Qianjiadian Uranium Deposit, Songliao Basin. *Uranium Geology*, 26(1):9—16, 23(in Chinese with English abstract).
- Peng, X.L., 2006. Transformation of Sandstone by Magmatic Activity in Petroliferous Basins: A Case Study of the Songliao Basin and Its Peripheral Mesozoic Basins (Dissertation). Jilin University, Changchun(in Chinese with English abstract).
- Pollaastro, R.M., 2007. Total Petroleum System Assessment of Undiscovered Resources in the Giant Barnett Shale Continuous (Unconventional) Gas Accumulation, Fort Worth Basin, Texas. *AAPG Bulletin*, 91(4): 551—578. <https://doi.org/10.1306/06200606007>
- Rong, H., 2012. Fine Zoning Model of Interlayer Oxidation Zone in Qianjiadian Uranium Deposit and Its Constraints on Uranium Mineralization (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan(in Chinese with English abstract).
- Rong, H., Jiao, Y.Q., Wu, L.Q., et al., 2016. Epigenetic Alteration and Its Constraints on Uranium Mineralization from the Qianjiadian Uranium Deposit, Southern Songliao Basin. *Earth Science*, 41(1): 153—166(in Chinese with English abstract).
- Ross, D.J.K., Bustin, R.M., 2009. The Importance of Shale Composition and Pore Structure upon Gas Storage Potential of Shale Gas Reservoirs. *Marine and Petroleum Geology*, 26(6): 916—927. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2008.06.004>
- Shen, A.J., Kang, W.L., Wang, Y.Q., et al., 2006. Exploration of Cretaceous Sequence Strata and Lithologic Strata in the South of Songliao Basin. Petroleum Industry Press, Beijing(in Chinese).
- Sun, C.X., Nie, H.K., Liu, G.X., et al., 2019. Quartz Type and Its Control on Shale Gas Enrichment and Production: A Case Study of the Wufeng-Longmaxi Formations in the Sichuan Basin and Its Surrounding Areas, China. *Earth Science*, 44(11):3692—3704(in Chinese with English abstract).
- Vaclav, S., Jan, S., Ivana, S., et al., 2004. Contact Metamorphism of Silurian Black Shales by a Basalt Sill: Geologi-

- cal Evidence and Thermal Modeling in the Barrandian Basin. *Bulletin of Geosciences*, 79(3): 133—145. https://doi.org/10.3140/bull.geosci.2004.03.133.
- Wang, C., Zhang, B.Q., Shu, Z.G., et al., 2019. Shale Lamination and Its Influence on Shale Reservoir Quality of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Jiaoshiba Area. *Earth Science*, 44(3): 972—982(in Chinese with English abstract).
- Wang, M.Z., Liu, S.B., Ren, Y.J., et al., 2015. Pore Characteristics and Methane Adsorption of Clay Minerals in Shale Gas Reservoir. *Geological Review*, 61(1): 207—216(in Chinese with English abstract).
- Wang, Q.B., Liu, L., Niu, C.M., et al., 2019. The Geological Evidences and Impacts of Deep Thermal Fluid on Lacustrine Carbonate Reservoir in the Arctic Area of the North Part of Bozhong Depression, Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 44(8): 2751—2760(in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Xie, D.L., Xue, C.G., et al., 2010. Influence of Diabase Intrusion on Oil and Gas Reservoir: A Case Study of Fushan Member in the Central and Eastern Part of the North Slope of Gaoyou Sag. *Journal of Petroleum and Natural Gas*, 32(2): 174—177(in Chinese with English abstract).
- Xia, Y.L., Lin, J.R., Li, Z.Y., et al., 2003. Prediction and Evaluation of Sandstone - Type Uranium Deposits in Qianjiadian Sag, Songliao Basin and Study on Uranium Metallogenetic Regularity. *China Nuclear Science and Technology Report*, (3):105—117(in Chinese).
- Yi, T., Zhou, W., Yang, F., et al., 2020. Types and Characteristics of Quartzs in Shale Gas Reservoirs of the Longmaxi Formation, Sichuan Basin, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 40(2): 127—136(in Chinese with English abstract).
- Yin, J.H., Zhang, H., Zan, G.J., et al., 2000. Sedimentation Factors Analysis of Uranium Mineralization of Qianjiadian Depression, Kailu Basin, East Inner Mongolia Autonomous Region. *Journal of Palaeogeography*, 2(4):76—83 (in Chinese with English abstract).
- Yu, W.B., 2009. Study on Mineralization Conditions of Cretaceous Sandstone Type Uranium Deposits in Southern Songliao Basin (Dissertation). Jilin University Changchun (in Chinese with English abstract).
- Yu, Z.C., Liu, L., Sun, X.M., et al., 2012. Evidence of Paleogene Thermal Fluid Activities and Their Impact on Porosity-Permeability of Reservoir in Qikou Sag. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(Suppl.3): 1—13(in Chinese with English abstract).
- Zhai, G.Y., Wang, Y.F., Bao, S.J., et al., 2017. Major Factors Controlling the Accumulation and High Productivity of Marine Shale Gas and Prospect Forecast in Southern China. *Earth Science*, 42(7): 1057—1068(in Chinese with English abstract).
- Zhang, L.Y., Li, Z., Zhu, R.F., 2009. The Formation and Exploitation of Shale Gas. *Natural Gas Industry*, 29(1): 124—128, 148(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Jin, W.J., Wang, J.R., et al., 2016. Influence of Magma Hot Field on Hydrocarbon Accumulation. *Progress in Geophysics*, 31 (4): 1525—1541(in Chinese with English abstract).
- Zhang, X.M., Shi, W.Z., Xu, Q.H., et al., 2015. Reservoir Characteristics and Controlling Factors of Shale Gas in Jiaoshiba Area, Sichuan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 36 (8):926—939, 953(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.H., Zhu, X.M., Wu, X.Z., et al., 2000. Lithofacies and Reservoir Model of Intrusive Rocks and Their Metamorphic Belts. *Petroleum Exploration and Development*, 27(2):22—26(in Chinese with English abstract).
- Zhao, D.F., Xie, D.L., Zang, J.C., et al., 2014. Mineral Compositions of Shale Reservoirs and Related Discussions. *Coal Technology*, 33(4): 92—95(in Chinese with English abstract).
- Zhao, K., Yang, L.Q., Li, P., et al., 2013. Morphology and Chemistry Composition of Pyrite in the Laowangzhai Gold Deposit, Ailaoshan Orogenic Belt, SW China. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11): 3937—3948(in Chinese with English abstract).
- Zhao, P., Li, X.Q., Sun, J., et al., 2014. Study on Mineral Composition and Brittleness Characteristics of Shale Gas Reservoirs from the Lower Paleozoic in the Southern Sichuan Basin. *Geoscience*, 28(2): 396—403(in Chinese with English abstract).
- Zhu, X.J., Cai, J.G., 2012. Progress and Significance of Research on Relation between Specific Surface Area and Organic Matter in Argillaceous Source Rocks. *Oil & Gas Geology*, 33(3): 375—384(in Chinese with English abstract).
- Zou, C.N., Dong, D.Z., Wang, S.J., et al., 2010. Geological Characteristics, Formation Mechanism and Resource Potential of Shale Gas in China. *Petroleum Exploration and Development*, 37(6): 641—653(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

曹海涛,詹国卫,余小群,等,2019.深层页岩气井产能的主要影响因素——以四川盆地南部永川区块为例.天然气

- 工业,39(增刊1):118—122.
- 陈吉,肖贤明,2013.南方古生界3套富有机质页岩矿物组成与脆性分析.煤炭学报,38(5):822—826.
- 陈尚斌,朱炎铭,王红岩,等,2011.四川盆地南缘下志留统龙马溪组页岩气储层矿物成分特征及意义.石油学报,32(5):775—782.
- 董春梅,马存飞,栾国强,等,2015.泥页岩热模拟实验及成岩演化模式.沉积学报,33(5):1053—1061.
- 高瑞祺,蔡希源,1997.松辽盆地油气田形成条件与分布规律.北京:石油工业出版社.
- 郭巍,方石,刘招君,等,2009.松辽盆地南部泉头组-嫩江组热演化史研究.石油天然气学报,31(3):1—6,13.
- 郭莹莹,2008.松辽盆地南部姚家组沉积体系分析(硕士学位论文).长春:吉林大学.
- 侯读杰,冯子辉,黄清华,2003.松辽盆地白垩纪缺氧地质事件的地质地球化学特征.现代地质,17(3):311—317.
- 黄福堂,黄清华,陈春瑞,1998.松辽盆地中生代地质事件节律及圈层耦合.石油勘探与开发,25(5):86—89.
- 黄清华,梁万林,叶得泉,等,2007.松辽盆地白垩纪微体生物群分布特征与富烃源岩层的形成.古生物学报,46(3):380—386.
- 贾建亮,刘招君,Bechtel,A.,等,2014.松辽盆地嫩江组油页岩发育控制因素.地球科学,39(2):174—186.
- 蒋柯,周文,邓乃尔,等,2020.四川盆地五峰组—龙马溪组页岩储层中黄铁矿特征及地质意义.成都理工大学学报(自然科学版),47(1):50—64.
- 焦养泉,吴立群,彭云彪,等,2015.中国北方古亚洲构造域中沉积型铀矿形成发育的沉积——构造背景综合分析.地学前缘,22(1):189—205.
- 李丹,孙建,何娇娇,2014.浅层侵入体泥岩变质带储集特征及发育模式——以江苏高邮凹陷北斜坡侵入体泥岩变质带为例.世界地质,33(1):164—170.
- 李宏涛,吴世祥,蔡春芳,等,2008.油气相关砂岩型铀矿的形成过程:以钱家店铀矿床为例.地球化学,37(6):523—532.
- 李霞,2016.花岗岩侵入对页岩成分和孔隙结构的影响(硕士学位论文).南京:南京大学.
- 李香兰,刘绍文,徐明,等,2015.华南下扬子区泥页岩热物性测试与分析.天然气地球科学,26(8):1525—1533.
- 李颖莉,蔡进功,2014.泥质烃源岩中蒙脱石伊利石化对页岩气赋存的影响.石油实验地质,36(3):352—358.
- 李玉喜,聂海宽,龙鹏宇,2009.我国富含有机质泥页岩发育特点与页岩气战略选区.天然气工业,29(12):115—118,152—153.
- 刘超,谢庆宾,王贵文,等,2015.岩浆侵入作用影响碎屑围岩储层的研究进展与展望.地球科学进展,30(6):654—667.
- 刘超,谢庆宾,王贵文,等,2017.岩浆侵入对围岩储层的成岩及其变质特征的影响及意义——以松辽盆地南部辉绿岩侵入带露头研究为例.地质科学,52(2):453—469.
- 刘鸿友,沈安江,王艳清,等,2003.松辽盆地南部泉头组—嫩江组层序地层与油气藏成因组合.吉林大学学报(地球科学版),33(4):469—473.
- 栾国强,董春梅,马存飞,等,2016.基于热模拟实验的富有机质泥页岩成岩作用及演化特征.沉积学报,34(6):1208—1216.
- 罗文积,陈家清,1997.双向汇聚热液成矿.甘肃地质学报,6(增刊1):47—52.
- 罗毅,何中波,马汉峰,等,2012.松辽盆地钱家店砂岩型铀矿成矿地质特征.矿床地质,31(2):391—400.
- 马野牧,陆现彩,张雪芬,等,2013.花岗岩侵入体—泥质围岩热传输过程的数值模拟及其地质意义:以粤东典型接触带剖面为例.高校地质学报,19(2):307—315.
- 聂海宽,张金川,包书景,等,2012.四川盆地及其周缘上奥陶统下志留统页岩气聚集条件.石油与天然气地质,33(3):335—345.
- 庞雅庆,陈晓林,方锡珩,等,2010.松辽盆地钱家店铀矿床层间氧化与铀成矿作用.铀矿地质,26(1):9—16,23.
- 彭晓蕾,2006.含油气盆地中岩浆活动对砂岩的改造——以松辽盆地及其外围中生代盆地为例(博士学位论文).长春:吉林大学.
- 荣辉,2012.钱家店铀矿床层间氧化带精细分带模型及其对铀成矿的约束(博士学位论文).武汉:中国地质大学.
- 荣辉,焦养泉,吴立群,等,2016.松辽盆地南部钱家店铀矿床后生蚀变作用及其对铀成矿的约束.地球科学,41(1):153—166.
- 沈安江,康伟力,王艳清,等,2006.松辽盆地南部白垩纪层序地层与岩性地层油气藏勘探.北京:石油工业出版社.
- 孙川翔,聂海宽,刘光祥,等,2019.石英矿物类型及其对页岩气富集开采的控制:以四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组为例.地球科学,44(11):3692—3704.
- 王超,张柏桥,舒志国,等,2019.焦石坝地区五峰组—龙马溪组页岩纹层发育特征及其储集意义.地球科学,44(3):972—982.
- 王茂桢,柳少波,任拥军,等,2015.页岩气储层粘土矿物孔隙特征及其甲烷吸附作用.地质论评,61(1):207—216.
- 王清斌,刘立,牛成民,等,2019.渤中凹陷北部陡坡带热液活动及其对湖相碳酸盐岩储层的影响.地球科学,44(8):2751—2760.
- 王颖,谢东霖,薛成刚,2010.辉绿岩侵入作用对油气储层的影响——以高邮凹陷北斜坡中东部地区阜三段为例.石油天然气学报,32(2):174—177.
- 夏毓亮,林锦荣,李子颖,等,2003.松辽盆地钱家店凹陷砂岩型铀矿预测评价和铀成矿规律研究.中国核科技报告,3(3):105—117.
- 易婷,周文,杨璠,等,2020.四川盆地龙马溪组页岩气储层石

- 英类型与特征.矿物学报,40(2):127—136.
- 殷敬红,张辉,昝国军,等,2000.内蒙古东部开鲁盆地钱家店凹陷铀矿成藏沉积因素分析.古地理学报,2(4):76—83.
- 于文斌,2009.松辽盆地南部白垩系砂岩型铀矿成矿条件研究(博士学位论文).长春:吉林大学.
- 于志超,刘立,孙晓明,等,2012.歧口凹陷古近纪热流体活动的证据及其对储层物性的影响.吉林大学学报(地球科学版),42(增刊3):1—13.
- 翟刚毅,王玉芳,包书景,等,2017.我国南方海相页岩气富集高产主控因素及前景预测.地球科学,42(7):1057—1068.
- 张林晔,李政,朱日房,2009.页岩气的形成与开发.天然气工业,29(1):124—128,148.
- 张旗,金维浚,王金荣,等,2016.岩浆热场对油气成藏的影响.地球物理学进展,31(4):1525—1541.
- 张晓明,石万忠,徐清海,等,2015.四川盆地焦石坝地区页岩气储层特征及控制因素.石油学报,36(8):926—939,953.
- 张映红,朱筱敏,吴小洲,等,2000.侵入岩及其外变质带岩相与储集层模型.石油勘探与开发,27(2):22—26.
- 赵迪斐,解德录,臧俊超,等,2014.页岩储层矿物成分及相关讨论.煤炭技术,33(4):92—95.
- 赵凯,杨立强,李坡,等,2013.滇西老王寨金矿床黄铁矿形貌特征与化学组成.岩石学报,29(11):3937—3948.
- 赵佩,李贤庆,孙杰,等,2014.川南地区下古生界页岩气储层矿物组成与脆性特征研究.现代地质,28(2):396—403.
- 朱晓军,蔡进功,2012.泥质烃源岩的比表面与有机质关系研究进展及意义.石油与天然气地质,33(3):375—384.
- 邹才能,董大忠,王社教,等,2010.中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力.石油勘探与开发,37(6):641—653.