

doi:10.3799/dqkx.2012.094

海拉尔盆地乌尔逊—贝尔凹陷下白垩统 火山碎屑岩成岩作用类型及序列

于振锋¹, 程日辉^{1*}, 赵小青², 孙凤贤²

1. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061

2. 大庆钻探测井公司, 黑龙江大庆 163412

摘要: 海拉尔盆地乌尔逊—贝尔凹陷下白垩统发育火山熔岩—正常碎屑沉积岩之间的过渡岩石类型, 其成岩作用类型与正常沉积岩相比具有特殊性。采用显微镜下描述与扫描电镜分析相结合的方法对研究区成岩作用类型进行了研究, 并总结出成岩作用序列。结果显示火山碎屑岩的成岩作用类型包括熔结作用、机械渗滤作用、压实作用、脱玻化作用、重结晶作用、胶结作用、自生矿物转化和溶蚀溶解作用。其中, 熔结作用、脱玻化作用以及凝灰质的溶蚀溶解作用是火山碎屑岩所特有的成岩作用类型。研究区具有成因联系的成岩共生组合主要有4类, 分别是: (1) 微晶石英和微晶方解石; (2) 石英的溶解与结晶; (3) 自生白云母、蒙皂石、伊利石和绿泥石; (4) 沸石与自生长石。成岩序列可以分为熔结作用阶段、机械渗滤作用阶段、脱玻化作用阶段、凝灰质溶蚀溶解作用阶段、粘土矿物混层阶段、自生白云母阶段、沸石胶结阶段、颗粒强烈胶结阶段以及铁白云发育阶段。研究区下白垩统处于早成岩B期至晚成岩B期, 主要为晚成岩A期。

关键词: 海拉尔盆地; 乌尔逊凹陷; 贝尔凹陷; 下白垩统; 火山碎屑岩; 成岩作用; 沉积岩; 地层。

中图分类号: P588.211

文章编号: 1000-2383(2012)04-0851-09

收稿日期: 2012-01-14

Types and Succession of Pyroclastic Rocks Diagenesis in Lower Cretaceous of Wuerxun and Bei'er Depression in Hailaer Basin

YU Zhen-feng¹, CHENG Ri-hui^{1*}, ZHAO Xiao-qing², SUN Feng-xian²

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

2. Daqing Drilling and Exploration Engineering Well Logging Company, Daqing 163412, China

Abstract: A set of rocks between volcanic lava and normal sedimentary clastic rock were developed in Lower Cretaceous of Wuerxun and Bei'er depression in Hailaer basin. Compared with normal sedimentary rocks, their diagenesis types are particular. The methods of description of microscopic sections and scanning electron microscope (sem) are used to research the diagenesis types, and to summarize succession of diagenesis. The results show that types of pyroclastic rocks diagenesis include weldition, mechanical percolation, compaction, devitrification, recrystallization, cementation, transformation of neogenic mineral and dissolution. Weldition, devitrification and dissolution of tuffaceous matter are specific diagenesis types in pyroclastic rocks. There are four typical diagenetic paragenetic associations which have genetic relationships, including (1) microcrystalline quartz and microcrystalline calcite; (2) quartz dissolution and crystallization; (3) authigenic muscovite; smectite; illite and chlorite; (4) zeolite and authigenic feldspar. The order succession of diagenesis is as follows: weldition, mechanical percolation, devitrification, dissolution of tuffaceous matter, claymineral mixed layer, authigenic muscovite, zeolite cementation, particles strong cementation and ankerite. The diagenesis stage of Wuerxun in Lower Cretaceous ranges from early diagenetic B to late diagenetic B. The main stage is late diagenetic A.

Key words: Hailaer basin; Wuerxun depression; Bei'er depression; Lower Cretaceous; pyroclastic rock; diagenesis; sedimentary rocks; stratigraphy.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 40972074); 吉林大学平台基地建设项目(No. 450060326044)。

作者简介: 于振锋(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事石油地质学和测井地质学方面的研究。* 通讯作者: 程日辉, E-mail: chengrh@jlu.edu.cn

乌尔逊凹陷和贝尔凹陷是海拉尔盆地中最有潜力的 2 个凹陷(吴勇等,2006;魏建设等,2008;秦雁群等,2009). 凹陷的充填序列主要为下白垩统沉积地层(张成等,2005;杨婷等,2011). 随着勘探和研究的进行,下白垩统沉积地层已成为乌尔逊—贝尔凹陷主要的勘探层位(侯启军等,2004;刘新颖等,2009;王建功等,2010),是测井解释的重点层位(唐海燕等,2008;张晓峰等,2009). 乌尔逊凹陷和贝尔凹陷具有多物源和近物源的特点. 由于火山物质的参与,使得岩性呈现特殊性,发育了一套火山熔岩—正常沉积岩之间的过渡岩石类型组合. 火山碎屑岩和正常碎屑岩及其成岩作用的不同严重制约了对储层四性的认识,主要表现在:(1)同一种岩性储层分类不同;(2)同一类储层岩性差别较大;(3)同一种岩性对应着不同的测井响应(陶宏根等,2011);(4)不同岩性对应着相同或者相似的测井响应(陶宏根等,2011). 成岩作用是控制储层物性、矿物成分和分布的重要因素,是该区储层物性差异的重要原因(尤丽等,2009). 这些因素对测井响应均有不同程度的影响. 本文主要讨论乌尔逊—贝尔凹陷下白垩统火山碎屑岩的成岩作用及序列,为储层和测井解释研究提供岩石学依据.

1 岩石类型

通过对研究区 31 口井下白垩统取心井段的岩心观察和薄片鉴定,确定了本区下白垩统的岩石类型和丰度(表 1). 主要岩石类型有 5 类:火山熔岩、火山碎屑岩、沉积火山碎屑岩、火山碎屑沉积岩和正常沉积岩. 其中正常沉积岩所占比例最大,为

表 1 海拉尔盆地乌尔逊—贝尔凹陷下白垩统岩石类型及丰度

Table 1 Types and abundances of rocks in Lower Cretaceous of Wuershun-Bei'er depression in Hailaer basin

结构与成分分类	岩石基本类型	丰度(%)
火山熔岩类 (熔岩基质中分布的火山碎屑含量<10%)	安山岩 流纹岩	3.41
火山碎屑岩类 (火山碎屑含量>90%)	凝灰岩	10.17
沉积火山碎屑岩类 (火山碎屑含量在 90%~50%之间)	沉凝灰岩	2.25
火山碎屑沉积岩类 (火山碎屑含量在 10%~50%之间)	凝灰质岩石	28.65
正常沉积岩 (火山碎屑含量<10%)	正常碎屑岩石	55.51

55.51%;其次是火山碎屑沉积岩,比例为 28.65%;火山碎屑岩为 10.17%;沉积火山碎屑岩为 2.25%;火山熔岩为 3.41%.

2 成岩作用类型

2.1 熔结作用

熔结作用是火山碎屑岩特有的成岩作用方式,以熔结火山碎屑岩最为发育. 研究区可以识别出的熔结作用有 3 种类型:热灰熔结、熔浆/熔岩熔结和浆屑熔结(程日辉等,2010). 在后期的蚀变(主要是长石物质的蚀变)或脱玻化作用中热灰常发生不同程度的粘土矿化(图 1-1),熔浆呈现出微弱的光性(图 1-2),塑性的浆屑经过火山喷发作用的撕裂、溅落以及压实作用的压扁拉长,呈现出各种形态(图 1-3).

无论是热灰熔结、熔浆/熔岩熔结还是浆屑熔结,这一过程是在地表或浅埋藏压实作用条件下完成的.

2.2 压实作用与压溶作用

对于火山碎屑岩,压实作用的典型表现是其中的塑性浆屑和玻屑在压力作用下发生定向排列和变形而形成“假流纹构造”(图 1-4). 压溶作用和压实作用是相伴生的,其本质是一种溶解作用,如石英次生加大的硅质来源就包括原石英颗粒压溶作用的产物.

压实作用和压溶作用贯穿于整个成岩作用阶段,压实作用在浅埋藏阶段表现得更加明显,压溶作用主要存在于深埋藏阶段.

2.3 脱玻化作用

玻屑常会发生脱玻化作用形成结晶质. 玻屑经脱玻化后常具有微弱光性,形成霏细结构或微晶长石、石英,外形仍保留玻屑的鸡骨状、弧面棱角状等(图 1-5). 凝灰岩和熔结凝灰岩中浆屑较为常见,脱玻化作用包括了浆屑中的玻屑脱玻化和玻璃质熔岩的脱玻化.

2.4 重结晶作用

重结晶作用是指玻璃物质经过脱玻化作用转变为隐晶质后晶体继续长大的作用(图 1-6). 特点是重结晶矿物的化学成分在变化前与变化后基本保持不变. 研究区表现为流纹质或者酸性的玻璃质经过重结晶作用形成以石英和长石为主的矿物组合. 在时间顺序上要稍晚于脱玻化作用,与脱玻化作用相接,一旦有脱玻化作用的发生,便会发生重结晶

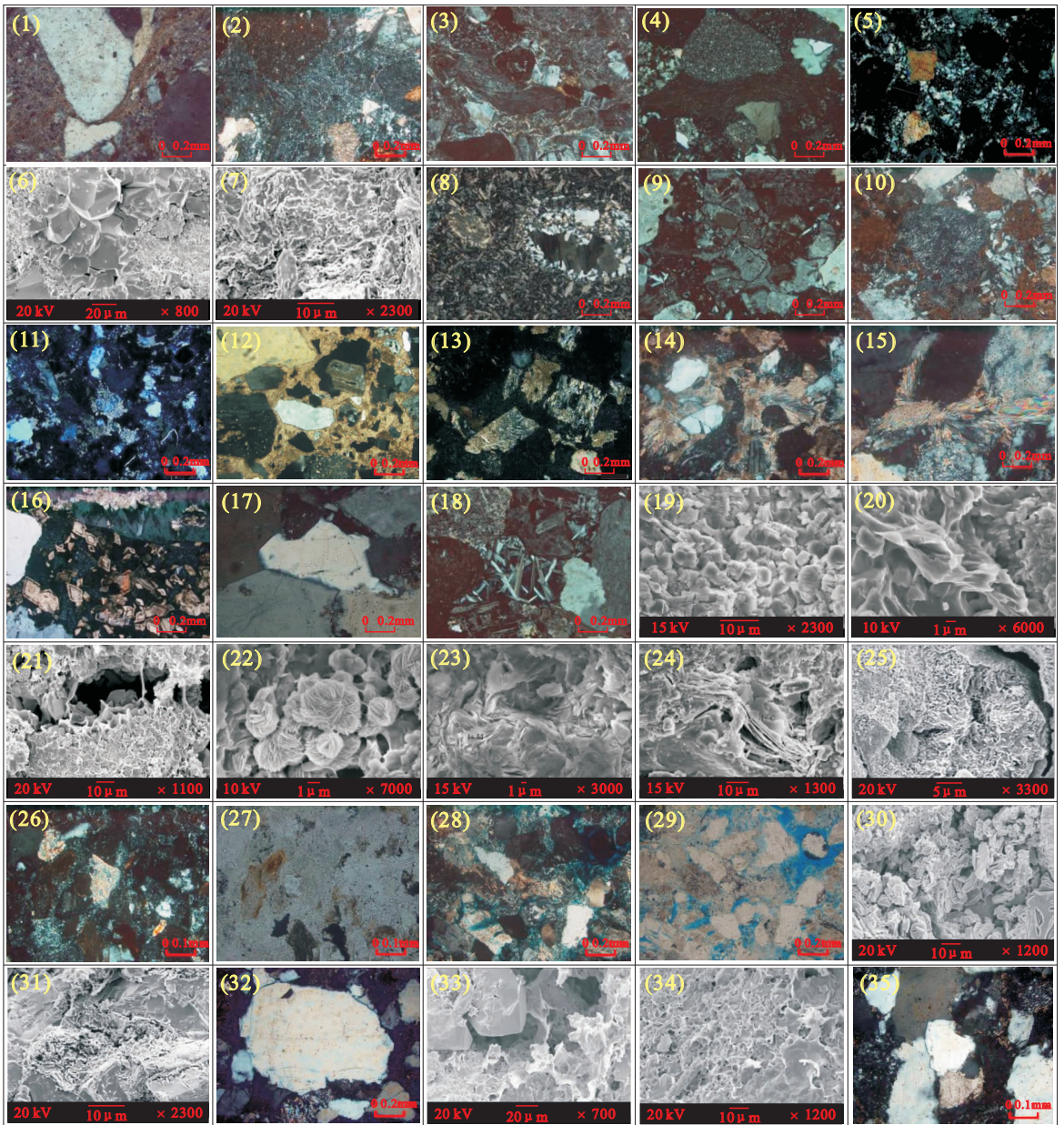


图 1 海拉尔盆地乌尔逊—贝尔凹陷下白垩统火山碎屑岩成岩作用特征

Fig. 1 Diagenesis characteristics chart of pyroclastic rocks in Lower Cretaceous of Wuerxun-Bei'er depression in Hailaer basin

1. 苏 33 井 2 339.25 m, ×10(+) 热灰熔结; 2. 巴 12 井 1 626.51 m, ×10(+) 熔浆熔结; 3. 希 5 井 2 703.64 m, ×10(+) 浆屑熔结; 4. 贝 16 井 1 365.26 m, ×10(+) 假流纹构造; 5. 乌 49 井 2 296.60 m, ×10(+) 玻基脱玻化; 6. 乌 49 井 2 296.60 m, 20 μm 玻璃质重结晶; 7. 乌 46 井 2 019.37 m, 10 μm 帖附状粘土; 8. 霍 12 井 2 575.90 m, ×10(+) 微晶石英包壳; 9. 希 5 井 2 714.79 m, ×10(+) 沸石胶结; 10. 乌 19 井 3 064.80 m, ×10(+) 隐晶方解石; 11. 乌 27 井 1 924.40 m, ×10(+) 显晶方解石; 12. 巴 13 井 1 326.79 m, ×10(+) 连晶方解石; 13. 巴 13 井 1 463.17 m, ×10(+) 块片状钠铝石; 14. 乌 59 井 1 442.77 m, ×10(+) 扇片状钠铝石; 15. 乌 46 井 2 270.50 m, ×10(+) 纤维片钠铝石; 16. 乌 Y 井 2 564.92 m, ×10(+) 白云石; 17. 苏 20 井 2 068.37 m, ×10(+) 硅胶胶结; 18. 希 5 井 2 700.67 m, ×10(+) 钠长石胶结; 19. 贝 16 井 1 492.22 m, 10 μm 孔隙中高岭石; 20. 乌 27 井 1 922.70 m, 1 μm 蒙皂石; 21. 乌 38 井 1 948.07 m, 10 μm 搭桥状伊利石; 22. 贝 16 井 1 343.01 m, 1 μm 绒球状绿泥石; 23. 乌 27 井 1 648.50 m, 1 μm 伊蒙混层; 24. 贝 16 井 1 498.92 m, 10 μm 伊绿混层; 25. 乌 X 井 1 500.99 m, 蒙皂石贴附于颗粒表面; 26. 乌 X 井 1 501.81 m, ×20(+) 凝灰质未发生溶蚀溶解; 27. 乌 X 井 1 501.81 m, ×20(-) 凝灰质未发生溶蚀溶解; 28. 乌 X 井 1 639.30 m, ×10(+) 凝灰质溶蚀形成溶蚀孔; 29. 乌 X 井 1 639.30 m, ×10(-) 凝灰质溶蚀形成溶蚀孔; 30. 乌 X 井 1 642.65 m, 10 μm 自生高岭石呈粒状充填孔隙; 31. 乌 X 井 1 642.65 m, 10 μm 伊蒙混层贴附于颗粒表面; 32. 乌 X 井 1 642.72 m, ×10(+) 三级石英次生加大; 33. 乌 Y 井 1 993.53 m, 20 μm 搭桥状伊利石; 34. 乌 Y 井 1 998.94 m, 10 μm 伊蒙混层贴附于颗粒表面; 35. 乌 Y 井 2 437.24 m, ×20(+) 四级石英次生加大

作用。

2.5 机械渗滤作用

机械渗滤作用是异地搬运而来的粘土矿物由于重力、大气水的向下渗滤作用,在其边缘生长出各种形状的突起(图 1-7)。当两颗粒比较接近时,突起之间相互接触呈搭桥状。这些粘土矿物主要分布于碎屑颗粒与填隙物或者胶结物之间,说明机械渗滤作用发生于强烈压实之前。

2.6 胶结作用

2.6.1 微晶石英

微晶石英集合体主要分布于碎屑颗粒表面,形成微晶石英包壳(图 1-8)。与次生加大石英不同的是,微晶石英包壳所围绕的颗粒不限于碎屑石英,而且微晶石英颗粒通常不具有统一的消光位。微晶石英包壳是火山物质在脱玻化或水解过程中释放出的大量硅质快速沉淀的产物,说明其与凝灰质的脱玻化作用和重结晶作用是同步的。

2.6.2 沸石

研究区沸石主要有浊沸石和方沸石 2 种。浊沸石主要有 2 种成因:(1)由火山玻璃发生水解作用产生。火山玻璃发生水解作用可以产生浊沸石(Siever and Woodford, 1979);(2)压溶进入孔隙水中的斜长石与孔隙水反应形成浊沸石。付国民等(2010)认为高的斜长石含量与碱性富钠的孔隙水可以形成浊沸石。研究区成岩作用阶段长石、凝灰物质的蚀变以及压溶作用提供了足够的 Na^+ 和 SiO_2 , 进入孔隙水中的斜长石(钠长石)与之反应生成浊沸石,形成典型的浊沸石胶结(图 1-9)。通常情况下浊沸石的形成温度在 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,是低级变质作用的标志矿物(Pittman, 1979; 刘宝珺和张锦泉, 1992), 研究区浊沸石的出现并不能作为浅变质相的标志。张明志等(2006)认为本区除了浊沸石之外还存在方沸石,是由火山碎屑蚀变而成。

2.6.3 碳酸盐矿物

研究区钙质交代与钙质胶结普遍发育,主要有 3 种胶结类型:方解石、片钠铝石和白云石。

(1)方解石微晶。方解石胶结主要有 3 种形式:方解石隐晶集合体、方解石显晶微粒和方解石连晶。
①方解石隐晶集合体主要是由方解石交代细小的凝灰质物质形成的(图 1-10),凝灰基质的结构和形态保留较好,如纹理结构、熔结结构和孔隙形态等。这种类型的交代方式主要在含细小凝灰质的岩石中发育。
②方解石显晶微粒主要是方解石交代碎屑颗粒形成的(图 1-11),这种类型的交代方式主要在粗颗粒较发育的岩石类型中发育。另外方解石的隐晶集合体经过重结晶作用可以部分或全部转化为方解石

显晶微粒。
③方解石连晶主要出现在填隙物含量较低的岩石类型中(图 1-12),以正常碎屑砂岩为主。含凝灰质的砂岩中的连晶结构由方解石微晶强烈重结晶形成,主要出现于中埋藏晚期一晚成岩期。

(2)片钠铝石。片钠铝石是研究区所发育的较有特色的交代作用方式之一,其形成可能与无机二氧化碳气体充注有关(刘立等, 2006)。片钠铝石不仅可以交代凝灰质基质,而且还可以交代石英、长石、岩屑、玻屑等碎屑颗粒,这些碎屑颗粒部分仍然保持原有颗粒的形态特征。研究区归纳出的片钠铝石主要有 3 种产状形式:(1)部分或全部交代碎屑长石、石英、岩屑或者玻屑,多呈板状产出(图 1-13);(2)呈放射状、束状、毛发状或者菊花状等形态充填孔隙(图 1-14);(3)呈纤维状集合体形式充填构造裂缝或者晶内、晶间缝状裂隙(图 1-15)。

片钠铝石主要分布于自生石英外围,其生长明显受到自生石英的限制,说明片钠铝石形成时间要晚于自生石英。如果石英次生加大发育,则片钠铝石主要分布于石英次生加大后剩余的孔隙空间,说明片钠铝石的形成要晚于石英的次生加大。

(3)白云石微晶。研究区白云石主要为铁白云石,只在部分地区和局部井段有少量的发育(图 1-16)。其往往交代片钠铝石,说明片钠铝石的形成早于铁白云石。

研究区钙质胶结、交代作用极普遍,贯穿于整个成岩阶段,具有多期次和多阶段的特点。初期表现为方解石交代凝灰质和颗粒形成方解石微晶和小方解石显晶微粒;中期为方解石交代颗粒以及方解石微晶重结晶形成较大的方解石显晶微粒;后期为方解石大量交代、强烈重结晶以及片钠铝石生成,最后是白云石微晶的大量发育,具有极好的菱面体晶形。郑荣才等(2011)通过对川东北地区飞仙关组白云岩成岩作用的系统划分,认为大规模的白云岩化和具极好菱面体晶形的白云岩主要出现于晚成岩阶段,这与本研究区是相似的。

2.6.4 硅质胶结

研究区硅质胶结物的结构有:接触式胶结、结晶粒状结构和次生加大结构。接触式的硅质胶结在本区普遍发育,表现为在颗粒之间的硅质胶结物不具内部结构。结晶粒状结构变现为沿着远离颗粒方向,结晶度逐渐增强,颗粒变大。次生加大边结构普遍发育,有的可以达到 4~5 级(图 1-17)。

2.6.5 长石胶结

研究区长石胶结物的结构有:长石次生加大结构和孔隙交织结构。发育交织结构的

长石胶结物多为钾长石或者钠长石,表现为长石在孔隙中搭成三角格架(图 1-18). 扫描电镜下多见凝灰岩孔隙中充填的自生钾长石和钠长石颗粒.

2.7 自生粘土矿物

研究区自生粘土矿物主要为高岭石、蒙皂石、伊利石和绿泥石.

(1)高岭石. 在成岩期自生的高岭石与碱性长石的蚀变有关,往往呈粒状充填于碎屑间孔隙(图 1-19)和凝灰质溶蚀溶解后的次生孔隙中. 凝灰质溶蚀溶解、碱性长石的蚀变和自生高岭石发育应是同时的.

(2)蒙皂石. 研究区蒙皂石是火山灰在成岩阶段的碱性还原环境中形成的. 蒙皂石呈蜂巢状或者山峦状贴附于颗粒表面(图 1-20),与地表环境风化形成的贴附状粘土矿物呈过渡关系,说明其是由贴附状粘土矿物成岩转变形成. 在蒙皂石之上发育绿泥石和自生微晶石英,说明蒙皂石的形成要早于绿泥石和微晶石英. 随着埋深和温度的增加蒙皂石逐渐向伊利石转化.

(3)伊利石. 伊利石在本区发育极其广泛,多为自生伊利石. 主要发育于贴附状粘土矿物的边部和自生石英微晶的表面. 发育于贴附状粘土矿物边部的伊利石呈丝缕状,说明部分伊利石是由贴附状粘土矿物转变而成;发育于自生石英微晶表面呈搭桥状的自生伊利石(图 1-21)是由凝灰质蚀变形成,其产状说明伊利石的形成时间要晚于自生石英微晶. 少数晶形很好的片状伊利石充填于粒间孔隙中.

(4)绿泥石. 研究区晚成岩阶段绿泥石普遍发育,其是由富含 Fe、Mg 离子的岩屑和矿物粘土化蚀变而来,经重结晶作用变大,这些岩屑和矿物主要为火山碎屑物. 在扫描电镜下绿泥石多呈弯曲叶片状集合体,主要有 2 种产状:(1)在孔隙中形成搭桥,(2)呈绒球状充填孔隙(图 1-22). 此外,在扫描电镜下还可以观察到伊利石/绿泥石混层. 当孔隙中既有绿泥石又有分散状微晶石英时,绿泥石生长于微晶石英之上或包裹微晶石英颗粒,说明绿泥石的形成要晚于微晶石英.

2.8 云母类

研究区云母类主要为绢云母和白云母. 本区绢云母多为斜长石蚀变而来. 另外,在浅埋藏成岩早期,碱性长石发生蚀变作用形成高岭石,随着成岩作用的进行,温度和压力条件增大,高岭石逐渐向绢云母转化.

白云母可以分为碎屑白云母和自生白云母.(1)

碎屑白云母. 其属于原生的白云母,是在沉积物沉积退积阶段随着其他碎屑一起搬运堆积下来的,在成岩作用过程中通常会发生压弯变形等作用;(2)自生白云母. 主要由长石、岩屑和凝灰质蚀变生成绢云母,而后由绢云母发生重结晶作用形成. 也可以由黑云母蚀变和重结晶生成.

随着蚀变作用和成岩作用的增加,自生白云母会逐渐增大. 自生白云母是在成岩作用达到一定阶段后才能产生,因此自生白云母是成岩作用阶段的重要指示矿物.

2.9 溶蚀与溶解作用

研究区发生溶蚀与溶解的物质主要为石英、长石和凝灰质填隙物. 石英的溶解作用主要变现为压溶解,溶解出的硅质在低压区沉淀形成硅质胶结. 长石晶屑的溶蚀和溶解作用非常发育,从粒内局部溶解到完全溶解形成铸模孔. 凝灰质的溶蚀主要有 3 方面的原因:(1)凝灰的脱玻化、重结晶和粘土矿化作用导致凝灰质中的易溶组分被溶解流失;(2)在晚成岩阶段,大规模酸性水溶液导致凝灰质整体变得不稳定并发生溶蚀. 实验证明凝灰质在流通性好的酸性水条件下易于发生溶解作用(Surdam *et al.*, 1989;王建伟等,2005);(3)早期的凝灰质填隙物被钙质交代后由于流体性质的改变,钙质变得不稳定再被溶蚀. 在显微镜下,部分呈球状或椭球状的火山尘除壳层得到保留外,内部已完全被溶解. 包壳由凝灰质脱玻化和重结晶作用形成的微晶石英组成. 这种现象说明溶解作用发生于微晶石英形成之后.

3 成岩共生组合与共生序列

3.1 成岩共生组合

研究区成岩共生组合主要有 4 类:(1)微晶石英和微晶方解石;(2)石英的溶解与结晶;(3)自生白云母、蒙皂石、伊利石和绿泥石;(4)沸石与自生长石.

(1)微晶石英和微晶方解石. 方解石隐晶集合体主要是由方解石交代细小的凝灰质物质形成,发生于沉积物脱离沉积环境成岩之后,比凝灰质的脱玻化和重结晶作用稍晚. 微晶石英包壳是火山物质在脱玻化或水解过程中释放出的大量硅质快速沉淀的产物,与凝灰质的脱玻化和重结晶作用相关,同样比凝灰质的脱玻化和重结晶作用稍晚. 这 2 种成岩作用类型几乎存在于同一成岩阶段.

(2)石英的溶解与结晶. 石英的溶解与沉淀结晶在深埋藏阶段是共生的,可以反映一定的成岩作用

阶段. 研究区石英的溶解包括压实溶解和热溶解, 石英溶解出的大量二氧化硅可以在低压区沉淀结晶, 形成广泛的硅质胶结, 其结果不仅可以发育程度较高的石英次生加大, 而且可以形成广泛的连晶, 堵塞孔隙, 使岩石的密度大大增加.

(3) 自生白云母、蒙皂石、伊利石和绿泥石. 这 3 种粘土矿物的共生是在伊蒙混层(图 1-23)、绿蒙混层和伊绿混层(图 1-24)阶段. 由于伊利石经过重结晶可以转变为白云母, 因此在伊蒙混层阶段的粘土层中有自生白云母的存在. 绿蒙混层和伊蒙混层出现的成岩作用阶段相同, 如果富含铁镁离子则转化为绿蒙混层. 伊绿混层出现的阶段要稍晚于伊蒙混层和绿蒙混层. 粘土矿物混层阶段与温压条件有关, 并与有机质成熟度有一定的相关性, 因此粘土矿物混层的共生关系可以反映成岩作用的强度和阶段.

(4) 浊沸石与自生长石. 通常而言, 浊沸石是低级变质作用的标志矿物, 但是对于火山碎屑岩, 其在浅埋藏阶段就已经发育了, 这与岩石中富含凝灰质有关(邱隆伟等, 2000). 研究区沸石在整个成岩作用阶段均存在, 大规模的发育浊沸石是在成岩作用的中后期, 这与长石质物质的蚀变和溶解有关. 成岩作用形成的浊沸石是碱性孔隙水与长石或者火山碎屑相互作用的产物. 这个阶段长石也发生了大规模的溶解和再沉淀作用.

3.2 成岩共生序列

上述研究表明研究区的成岩共生序列为:(1)熔结作用形成于地表;(2)机械渗滤作用形成于近地表, 机械压实之前, 发育原生贴附状粘土矿物;(3)脱玻化和重结晶作用. 脱玻化作用仅开始于地表并主要在浅埋过程中发生, 蚀变形成粘土矿物以蒙皂石为主;重结晶作用与脱玻化作用共生但稍晚, 方解石微晶开始出现;在凝灰质脱玻化和重结晶之后形成自生石英微晶;(4)在酸性条件下凝灰质发生溶蚀和溶解作用, 蒙皂石向高岭石转变, 同时碱性长石也开始蚀变为高岭石, 方解石显晶微粒开始出现;(5)高岭石向蒙皂石、伊利石和绿泥石转化, 形成伊蒙混层和绿蒙混层;(6)伊利石和绿泥石含量增加, 同时伊利石重结晶形成自生白云母, 长石和石英的溶解作用增强, 石英次生加大边(3 级以上)和长石胶结发育;(7)绿泥石向伊利石转化, 沸石开始大量出现;(8)出现方解石连晶结构, 石英次生加大达到 5 级, 片钠铝石发育;(9)铁白云石开始出现. 根据上述自生矿物形成和成岩组合类型发生的先后关系, 将火山碎屑岩的成岩共生序列归纳为图 2.

成岩作用方式	埋藏深度									
	浅					深				
熔结作用	■	■	■	■	■					
机械渗滤作用		■	■	■	■					
脱玻化作用			■	■	■					
重结晶作用			■	■	■					
方解石微晶			■	■	■					
自生石英微晶			■	■	■					
溶蚀溶解作用				■	■					
自生高岭石				■	■					
方解石显晶微粒				■	■	■	■	■	■	■
伊蒙混层						■	■	■	■	■
绿蒙混层						■	■	■	■	■
自生白云母								■	■	■
石英次生加大								■	■	■
长石胶结								■	■	■
伊绿混层								■	■	■
沸石胶结								■	■	■
片钠铝石									■	■
连晶结构									■	■
铁白云石										■

图 2 海拉尔盆地乌尔逊—贝尔凹陷下白垩统火山碎屑岩成岩共生序列

Fig. 2 Paragenetic succession of pyroclastic rocks diagenesis in Lower Cretaceous of Wuerxun-Bei'er depression in Hailaer basin

4 成岩阶段划分

根据乌尔逊—贝尔凹陷的镜质体反射率(R_o)、有机质成熟度、有机质最高裂解温度以及矿物共生组合认为, 研究区下白垩统为早成岩 B 期到晚成岩 B 期, 主要为晚成岩 A 期(表 2). 早成岩 B 期以乌 X 井 1 496~1 504 m 为例, R_o 在 0.46%~0.48% 之间, 最高裂解温度为 417 °C 左右, 有机质半成熟, 粘土矿物以蒙皂石为主(图 3a), 呈贴附状分布于颗粒表面(图 1-25). 凝灰质未发生溶蚀溶解作用(图 1-26, 1-27), 方解石微晶和石英微晶共生.

晚成岩期 A 早期以乌 X 井 1 638~1 643 m 为例, R_o 在 0.56%~0.57% 之间, 最高裂解温度在 436~440 °C 之间, 有机质成熟. 该阶段以发生凝灰质的溶蚀溶解形成次生孔隙为特征(图 1-28, 1-29). 粘土矿物以自生高岭石和伊蒙混层为主(图 3b), 自生高岭石呈粒状充填于孔隙中(图 1-30), 伊蒙混层贴附于颗粒表面(图 1-31). 显晶方解石大量发育, 石英次生加大为 2~3 级(图 1-32).

晚成岩期 A 中期以乌 Y 井 1 994~1 999 m 为例, R_o 在 0.86%~0.87% 之间, 最高裂解温度在 434~442 °C 之间, 有机质成熟. 粘土矿物以伊利石和伊蒙混层为主(图 3c), 伊利石呈搭桥状分布于孔隙中(图 1-33), 伊蒙混层贴附于颗粒表面(图 1-34). 自生白云母、硅质胶结和长石胶结广泛

表 2 海拉尔盆地乌尔逊—贝尔凹陷下白垩统成岩阶段划分及特征

Table 2 The division and characteristics of diagenetic stage in Lower Cretaceous of Wuerxun-Bei'er depression in Hailaer basin

埋藏成岩期	深度范围(m)	主要层位	有机质			自生粘土矿物	胶结物		备注
			成熟度	$R_o(\%)$	最高裂解温度($^{\circ}C$)		钙质	硅质	
早成岩 B 期	1 000~1 600	大磨拐河组	半成熟	0.35~0.50	<435	蒙皂石	泥晶	2 级	贴附状粘土矿物
晚成岩 A 早期	1 400~2 000	南二段 大一段				高岭石	亮晶	2~3 级	凝灰质溶 蚀溶解
晚成岩 A 中期	1 700~2 600	南一段 南二段	成熟	0.50~1.30	435~460	混层粘土矿物	亮晶—片 钠铝石	3~4 级	长石胶结
晚成岩 A 晚期	2 300~3 000	南一段 铜钵庙组				伊利石和 绿泥石	片钠铝石— 亮晶	4~5 级	沸石胶结
晚成岩 B 期	2 500~	铜钵庙组	高成熟	1.30~2.00	440~480	伊利石	铁白云石	>5 级	裂隙发育

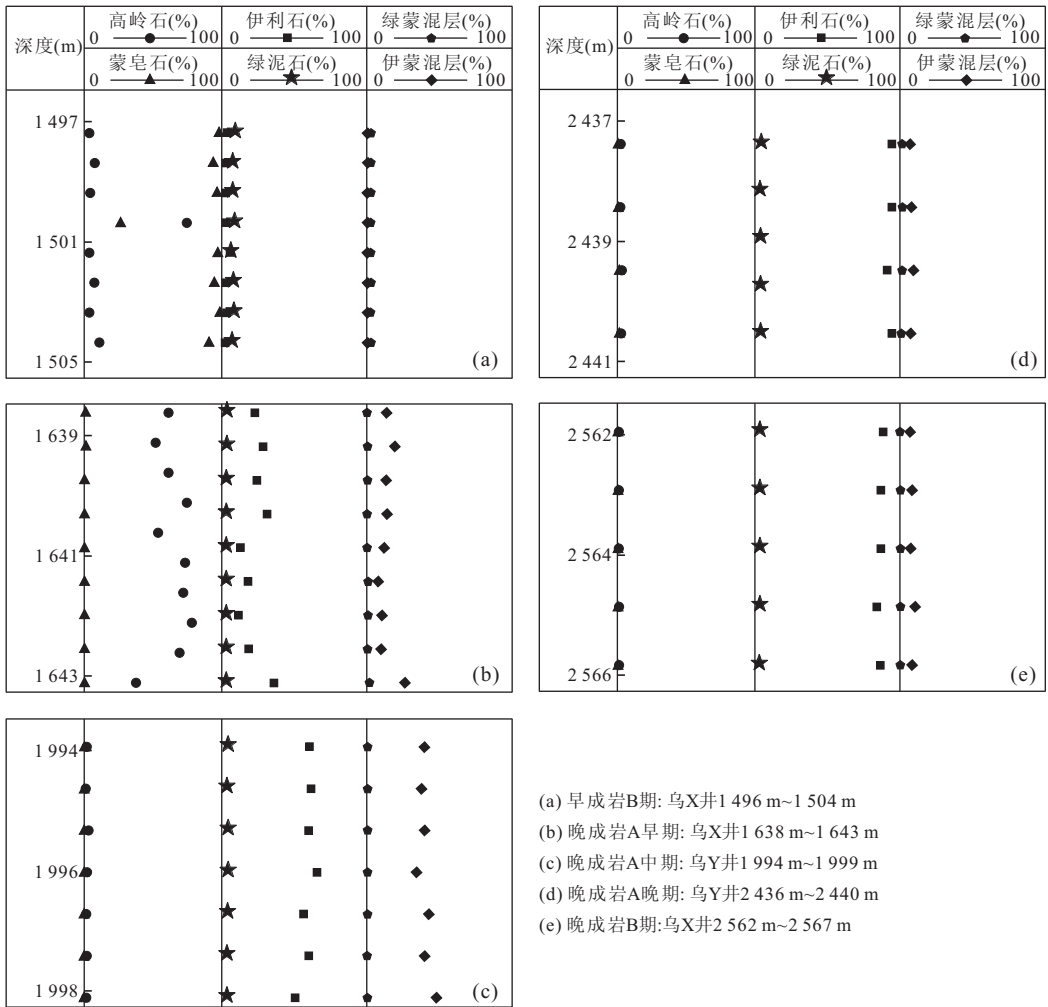


图 3 海拉尔盆地乌尔逊—贝尔凹陷下白垩统各成岩作用阶段粘土矿物相对含量

Fig. 3 The relative content of clay mineral in each diagenetic stage in Lower Cretaceous of Wuerxun-Bei'er depression in Hailaer basin

发育,石英次生加大为 3~4 级. 片钠铝石开始出现, 钙质胶结以片钠铝石和亮晶方解石为主.

晚成岩期 A 晚期以乌 Y 井 2 436~2 440 m 为例, R_o 在 1.01%~1.02% 之间, 最高裂解温度在 440~444 $^{\circ}C$ 之间, 有机质成熟. 粘土矿物以伊利石

为主(图 3d), 呈搭桥状. 片钠铝石和连晶方解石广泛发育, 浊沸石胶结也大量出现, 石英次生加大达 4~5 级(图 1-35).

晚成岩期 B 期以乌 X 井 2 562~2 567 m 为例, R_o 在 1.32%~1.34% 之间, 最高裂解温度在 445 $^{\circ}C$

左右,有机质高度成熟.该阶段最突出的特征是铁白云石的大量出现(图 1-16),石英次生加大,和钙质胶结一样都达 5 级以上.粘土矿物以伊利石为主(图 3e),呈搭桥状.

5 结论

(1)海拉尔盆地乌尔逊—贝尔凹陷发育火山熔岩—正常碎屑沉积岩的过渡岩石类型.

(2)研究区火山碎屑岩成岩作用类型包括:熔结作用、机械渗滤作用、压实作用、脱玻化作用、重结晶作用、胶结作用、自生矿物转化和溶蚀溶解作用.

(3)研究区具有成因联系的成岩共生组合主要有 4 类:①微晶石英与微晶方解石;②石英的溶解与结晶;③自生白云母、蒙皂石、伊利石和绿泥石;④沸石与自生长石.

(4)研究区成岩共生序列可以分为 9 个阶段:熔结作用阶段、机械渗滤作用阶段、脱玻化作用阶段(包括重结晶作用和自生微晶石英形成)、凝灰质溶蚀溶解作用阶段、粘土矿物混层发育阶段、自生白云母阶段、沸石大量发育阶段、颗粒强烈胶结阶段以及铁白云石发育阶段.

(5)研究区下白垩统处于早成岩 B 期至晚成岩 B 期,主要为晚成岩 A 期.

References

Cheng, R. H., Shen, Y. J., Yan, J. B., et al., 2010. Diagenesis of volcanoclastic rocks in Hailaer basin. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (1): 47—54 (in Chinese with English abstract).

Fu, G. M., Dong, M. C., Zhang, Z. S., et al., 2010. Formation process and distribution of laumontite in Yanchang 3 reservoir of Fuxian exploration area in North Shaanxi Province and the controls of the high quality reservoirs. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(1): 107—114 (in Chinese with English abstract).

Hou, Q. J., Feng, Z. H., Huo, Q. L., 2004. Oil migration model and entrapment epoch of north Wuerxun depression in Hailaer basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(4): 397—403 (in Chinese with English abstract).

Liu, B. J., Zhang, J. Q., 1992. Sedimentary lithification. Science Press, Beijing, 65—92 (in Chinese).

Liu, L., Gao, Y. Q., Qu, X. Y., et al., 2006. Petrology and carbon-oxygen isotope of inorganic CO₂ gas reservoir in

Wuerxun depression, Hailaer basin. *Acta Petrologica Sinica*, 22(8): 2229—2236 (in Chinese with English abstract).

Liu, X. Y., Deng, H. W., Di, Y. X., et al., 2009. High quality source rocks of Nantun Formation in Wuerxun depression, the Hailaer basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 31(1): 68—73 (in Chinese with English abstract).

Pittman, E. D., 1979. Recent advances in sandstone diagenesis. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 7: 39—62.

Qiu, L. W., Jiang, Z. X., Xi, Q. F., 2000. Diagenesis and pore evolution of lower E₃ volcanic rocks in Oulituozhi region. *Oil & Gas Geology*, 21(2): 139—147 (in Chinese with English abstract).

Qin, Y. Q., Deng, H. W., Ding, H. S., 2009. Characteristic, geologic meaning and forming mechanisms of the structural accommodation zones in Wuerxun-Bei'er depression. *Geoscience*, 23(5): 872—879 (in Chinese with English abstract).

Siever, R., Woodford, N., 1979. Dissolution kinetics and the weathering of mafic minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43 (5): 717—724. doi:10.1016/0016-7037(79)90255-2

Surdam, R. C., Crossey, L. J., Sven Hagen, E., et al., 1989. Organic-inorganic and sandstone diagenesis. *AAPG Bulletin*, 73(1): 1—23.

Tang, H. Y., Mo, X. W., Tang, X., et al., 2008. The study on computing porosity of the tuffaceous sands reservoir of Wuerxun area. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 38 (Suppl.): 121—127 (in Chinese with English abstract).

Tao, H. G., Cheng, R. H., Zhao, X. Q., et al., 2011. Well logging response to the volcanoclastic rocks of Hailaer basin and application. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(2): 534—544 (in Chinese with English abstract).

Wang, J. G., Duan, S. F., Wang, T. Q., et al., 2010. Geophysical response characteristics and exploration trend for buried-hill reservoir in Bei'er depression. *Oil Geophysical Prospecting*, 45(5): 731—736 (in Chinese with English abstract).

Wang, J. W., Bao, Z. D., Chen, M. J., et al., 2005. Differentiation of sandstones' tuff fillings and its effect on porosity: an example from the Paleozoic sandstones in north-western ordos. *Chinese Journal of Geology*, 40 (3): 429—438 (in Chinese with English abstract).

Wei, J. S., Pang, X. Q., Lu, J. C., et al., 2008. Distribution patterns of oil and gas and their major controlling fac-

- tors in Wuerxun and Bei'er sags. *Natural Gas Industry*, 28(9): 24—27 (in Chinese with English abstract).
- Wu, H. Y., Li, Z. S., Feng, Z. H., et al., 2006. Analysis on structural features and reservoir-forming process of Wuerxun and Bei'er sags in Hailaer basin. *Acta Petrolei Sinica*, 27(Suppl.): 1—6 (in Chinese with English abstract).
- Yang, T., Li, Z. K., Zhang, L., et al., 2011. Sequence stratigraphic characteristic of the Nantun Formation in the western area of Bei'er depression, Hailaer basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(3): 629—638 (in Chinese with English abstract).
- You, L., Li, C. B., Liu, L., et al., 2009. Relationship of sandstone diagenesis and relatively high porosity areas in Nantun and Tongbomiao Formation: a case from the southern of Wuerxun depression in Hailaer basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39(5): 781—788 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C., Li, C. B., Chu, M. J., et al., 2005. Analysis on characteristics and controls of high-frequency sequences of Lower Cretaceous series in Wuerxun depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(4): 657—663 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, M. Z., Sun, X. D., Shen, G. Z., et al., 2006. Characteristics and significance of corrensite and alleverdite in Hailaer basin. *Acta Petrolei Sinica*, 12(Suppl.): 80—85 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. F., Pan, B. Z., Fan, X. M., et al., 2009. Computational method of saturation of the tuffaceous sandstones reservoir of Nantun Group in Hailaer basin. *Well Logging Technology*, 33(4): 345—349 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, R. C., Dang, L. R., Wen, H. G., et al., 2011. Diagenesis characteristics and system for dolostone in Feixianguan Formation of Northeast Sichuan. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(4): 659—669 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 程日辉, 沈艳杰, 颜景波, 等, 2010. 海拉尔盆地火山碎屑岩的成岩作用. *岩石学报*, 26(1): 47—54.
- 付国民, 董满仓, 张志升, 等, 2010. 浊沸石形成与分布及其对优质储层的控制作用: 以陕北富县探区延长组长3油层为例. *地球科学—中国地质大学学报*, 35(1): 107—114.
- 侯启军, 冯子辉, 霍秋立, 2004. 海拉尔盆地乌尔逊凹陷石油运移模式与成藏期. *地球科学—中国地质大学学报*, 29(4): 397—403.
- 刘宝瑞, 张锦泉, 1992. 沉积成岩作用. 北京: 科学出版社, 65—92.
- 刘立, 高玉巧, 曲希玉, 等, 2006. 海拉尔盆地乌尔逊凹陷无机CO₂气储层的岩石学与碳氧同位素特征. *岩石学报*, 22(8): 2229—2236.
- 刘新颖, 邓宏文, 邸永香, 等, 2009. 海拉尔盆地乌尔逊凹陷南屯组优质烃源岩发育特征. *石油实验地质*, 31(1): 68—73.
- 邱隆伟, 姜在兴, 席庆福, 2000. 欧利坨子地区沙三下亚段火山岩成岩作用及孔隙演化. *石油与天然气地质*, 21(2): 139—147.
- 秦雁群, 邓宏文, 丁寒生, 2009. 乌尔逊—贝尔凹陷构造调节带特征、成因机制及其地质意义. *现代地质*, 23(5): 872—879.
- 唐海燕, 莫修文, 唐馨, 等, 2008. 乌尔逊地区凝灰质砂岩储集层孔隙度计算方法研究. *吉林大学学报(地球科学版)*, 38(增刊): 121—127.
- 陶宏根, 程日辉, 赵小青, 等, 2011. 海拉尔盆地火山碎屑岩的测井响应与应用. *地球物理学报*, 54(2): 534—544.
- 王建功, 段书府, 王天琦, 等, 2010. 贝尔凹陷潜山储层的地球物理响应特征及勘探方向. *石油地球物理勘探*, 45(5): 731—736.
- 王健伟, 鲍志东, 陈孟晋, 等, 2005. 砂岩中的凝灰质填隙物分异特征及其对油气储集空间影响——以鄂尔多斯盆地西北部二叠系为例. *地质科学*, 40(3): 429—438.
- 魏建设, 庞雄奇, 卢进才, 等, 2008. 乌尔逊—贝尔凹陷油气分布规律及其主控因素. *天然气工业*, 28(9): 24—27.
- 吴河勇, 李子顺, 冯子辉, 等, 2006. 海拉尔盆地乌尔逊—贝尔凹陷构造特征与油气成藏过程分析. *石油学报*, 27(增刊): 1—6.
- 杨婷, 李振奎, 张雷, 等, 2011. 海拉尔盆地贝尔凹陷贝西地区南屯组层序地层特征. *吉林大学学报(地球科学版)*, 41(3): 629—638.
- 尤丽, 李春柏, 刘立, 等, 2009. 铜钵庙—南屯组砂岩成岩作用与相对高孔隙带的关系——以海拉尔盆地乌尔逊凹陷南部为例. *吉林大学学报(地球科学版)*, 39(5): 781—788.
- 张成, 李春柏, 楚美娟, 等, 2005. 乌尔逊凹陷下白垩统高频层序特征及其控制因素分析. *沉积学报*, 23(4): 657—663.
- 张明志, 孙先达, 沈光正, 等, 2006. 海拉尔盆地柯绿泥石和钠板石特征及地质意义. *石油学报*, 12(增刊): 80—85.
- 张晓峰, 潘保芝, 范晓敏, 等, 2009. 海拉尔盆地南屯组凝灰质砂岩储层含水饱和度计算方法. *测井技术*, 33(4): 345—349.
- 郑荣才, 党录瑞, 文华国, 等, 2011. 川东北地区飞仙关组白云岩成岩作用与系统划分. *地球科学—中国地质大学学报*, 36(4): 659—669.