

海拉尔盆地贝尔凹陷火山碎屑岩自生碳酸盐矿物分布及对储层物性的影响

董林森^{1,2}, 刘立¹, 朱德丰³, 桂丽黎¹, 于淼¹

(1. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061; 2. 国家海洋局第一海洋研究所 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061; 3. 中国石油天然气集团公司大庆油田有限责任公司 勘探开发研究院, 黑龙江 大庆 163712)

摘要: 为了查明火山碎屑岩中自生碳酸盐矿物的分布特征及对储层物性的影响, 以海拉尔盆地贝尔凹陷火山碎屑岩为研究对象, 调查火山碎屑岩中自生碳酸盐矿物的类型, 并通过统计 50 余口探井的碳酸盐含量及储层物性数据, 探讨其分布特征及对储层物性的影响。结果表明: 海拉尔盆地贝尔凹陷火山碎屑岩中自生碳酸盐矿物主要为方解石和白云石, 其次为菱铁矿、片钠铝石和铁白云石; 纵向上随着埋藏深度增加出现两个碳酸盐含量高值带, 分别出现在 1 500~1 900 m 和 2 200~2 700 m 深度, 前者主要为以胶结作用为主的连生方解石和显晶方解石及菱铁矿, 后者主要为以交代作用为主的晚期方解石、白云石、铁白云石和片钠铝石; 湖底扇等分选较差的沉积相为碳酸盐矿物发育的有利相带, 扇-辫状河三角洲相为次有利相带; 靠近德尔布干深大断裂的井碳酸盐含量要高于远离该断裂的井, 且在该断裂附近的德 2、德 6 和德 8 等井中见片钠铝石自生矿物, 这主要因为断层是 CO₂ 逸散的通道, 断层处的富 CO₂ 流体能够与围岩反应生成碳酸盐矿物; 熔结凝灰岩和凝灰岩中的碳酸盐矿物含量要高于沉凝灰岩、凝灰质砂岩及普通砂岩, 这主要因为火山岩及火山碎屑物质中金属离子含量高, 易于释放, 从而结合 CO₃²⁻ 形成碳酸盐矿物; 贝尔凹陷内储层孔隙度和渗透率等参数与碳酸盐含量呈负相关关系, 说明碳酸盐含量对储层物性主要起破坏作用。

关键词: 火山碎屑岩; 自生碳酸盐矿物; 分布特征; 深大断裂; 储层物性; 贝尔凹陷; 海拉尔盆地

中图分类号: P618.13; TE122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2011)03-0253-08

Distribution and Impact on Reservoir Properties of Authigenic Carbonate Minerals in Pyroclastic Rocks of Beier Depression, Hailaer Basin

DONG Lin-sen^{1,2}, LIU Li¹, ZHU De-feng³, GUI Li-li¹, YU Miao¹

(1. School of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China; 2. Key Laboratory of State Oceanic Administration for Marine Sedimentology and Environmental Geology, First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, Shandong, China; 3. Institute of Exploration and Development Research, Daqing Oilfield Limited Company, China National Petroleum Corporation, Daqing 163712, Heilongjiang, China)

Abstract: In order to verify the distribution and impact on reservoir properties of authigenic carbonate minerals in pyroclastic rocks, pyroclastic rocks in Beier Depression of Hailaer Basin were taken as an example; the type of authigenic carbonate minerals were investigated; the distribution and impact on reservoir properties were discussed according to the statistic of carbonate content and reservoir properties for more than 50 wells. The results showed that authigenic carbonate minerals in pyroclastic rocks of Beier Depression, Hailaer Basin were mainly calcite and dolomite, followed by siderite, dawsonite and ankerite; there were two high-value zones of carbonate content vertically, in 1 500-1 900 m and 2 200-2 700 m respectively, and the former mainly contained intergrowth calcite cements, granular calcite cements and siderite, the latter mainly contained late calcite, dolomite, ankerite and dawsonite; the most favorable facies belts for the development of carbonate cements was sublacustrine fan facies,

收稿日期: 2010-10-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(40972075); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20090061120043); 吉林大学研究生创新研究计划项目(20101062); 吉林大学种子基金项目(40870421)

作者简介: 董林森(1983-), 女, 山东潍坊人, 理学博士, 从事储层地质学研究。E-mail: jilindonglinsen@yahoo.com.cn

followed by fan-braided fluvial river deltas facies; the carbonate content in wells close Deerbugan deep fault was higher than that in wells away from it, and there were dawsonites in wells De2, De6 and De8 near the fault, mainly because the fault was the channel for CO₂ dispersion and CO₂-rich fluid could react with the surrounding rocks and then the carbonate minerals formed; the carbonate contents in ignimbrite and tuff were higher than that in sedimentary tuff, tuffaceous sandstone and common sandstone, mainly because the contents of metal ions in pyroclastic material were high, and the ions were easy to release, which combined with carbonate ions to form carbonate minerals; the porosity and permeability in Beier Depression were negatively correlated with the content of carbonate.

Key words: pyroclastic rock; authigenic carbonate mineral; distribution characteristic; deep fault; reservoir property; Beier Depression; Hailaer Basin

0 引言

近年来随着油气勘探技术的发展,火山碎屑岩储层已成为油气勘探的新领域,国内外在火山碎屑岩中发现油气藏的盆地包括海拉尔盆地、塔木察格盆地、酒泉盆地、鄂尔多斯盆地和准噶尔盆地西北缘等^[1-6],其中在海拉尔盆地和塔木察格盆地火山碎屑岩中发现有较多的碳酸盐胶结物^[2-3,7-9]。碳酸盐胶结是成岩过程中非常重要的胶结作用^[10],对成岩过程中储层孔隙度的破坏已被国内外广泛报道^[11-14]。碳酸盐胶结物对储层物性的影响比同体积的石英次生加大及自生石英胶结物的影响大^[15],因此开展自生碳酸盐矿物的时空分布及储层物性研究,对于储层评价和油气勘探具有重要意义。笔者以海拉尔盆地贝尔凹陷铜钵庙—南屯组火山碎屑岩为研究对象,对自生碳酸盐矿物的类型、时空展布及对储层物性的影响进行了系统研究。

1 地质背景

海拉尔盆地是叠置于华北板块与西西伯利亚板块之间的蒙古—大兴安岭碰撞造山带^[16]之上的中生代陆相沉积盆地,与蒙古国的塔木察格盆地实质上是一个盆地(图 1a),是形成于晚侏罗纪—白垩纪盆地系的一部分^[17-18]。贝尔凹陷位于海拉尔盆地东南部,夹持于嵯岗隆起与巴彦山隆起之间,是盆地内最为开阔的一个凹陷,是典型的东断西超的箕状凹陷^[19],由侏罗纪、白垩纪和新生代的碎屑沉积及火山岩和火山碎屑岩组成^[18,20],其充填序列以下白垩统沉积地层为主,包括铜钵庙组、南屯组、大磨拐河组和伊敏组(图 1b),其中铜钵庙组和南屯组储层岩石类型以火山碎屑岩为主(图 1b)。

2 贝尔凹陷自生碳酸盐矿物类型

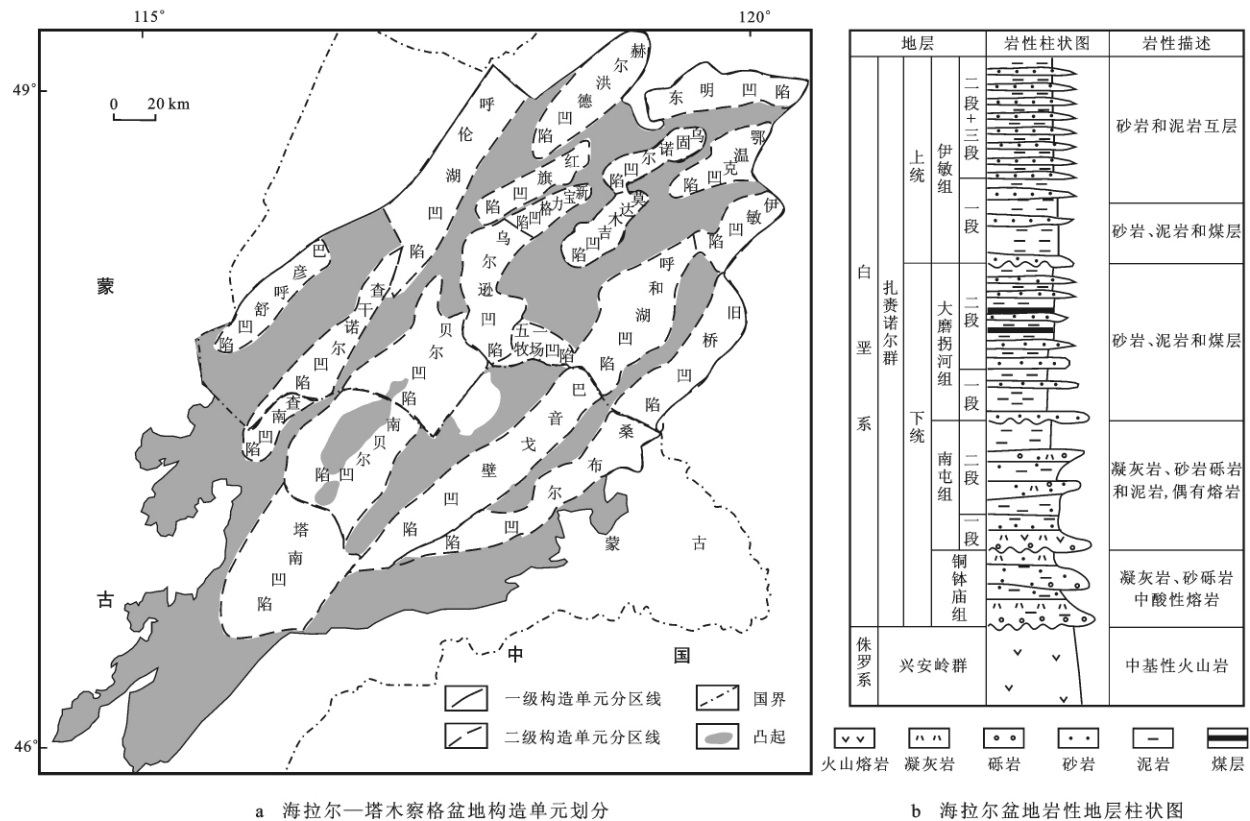
贝尔凹陷铜钵庙组和南屯组储层岩石类型主要

为熔结凝灰岩、凝灰岩、沉凝灰岩、凝灰质砂岩和砂岩;这些岩石类型中含有较丰富的碳酸盐矿物,包括方解石、白云石、片钠铝石、铁方解石和铁白云石等。方解石在本区较为常见,在熔结凝灰岩、凝灰岩、沉凝灰岩、凝灰质砂岩及砂岩中均有发育,表现形式为隐晶、显晶、连生及方解石脉(图 2a),其中隐晶方解石多为交代凝灰质物质形成,显晶方解石多以充填孔隙和交代长石岩屑等颗粒形式产出(图 2b),见方解石沿黑云母 001 解理缝充填(图 2c),连生方解石以充填孔隙为主,偶见交代长石、石英等颗粒,质量分数高达 25%。在凝灰质砂岩中见大量菱铁矿充填孔隙(图 2d),并形成包壳,包覆程度为一周,包壳厚度约 0.04 mm,单个晶体大小约 0.02 mm,体积分数约 7%,见菱铁矿生长在石英次生加大与碎屑石英之间(图 2e)。在凝灰岩、沉凝灰岩及凝灰质砂岩中均见有大量白云石,晶形较好,晶体大小为 0.04~0.18 mm,体积分数高达 18%,多交代凝灰质矿物及长石晶屑和长石碎屑、岩屑及钠长石等自生矿物(图 2f)。在沉凝灰岩中见片钠铝石(图 2g),片钠铝石多呈放射状,体积分数为 4%~8%,以充填孔隙为主,铸体薄片下发现孔隙充填片钠铝石边部及内部多被溶蚀成为剩余粒间孔及粒内溶孔,并见有片钠铝石被溶蚀成搭架状(图 2h)。另在沉凝灰岩中发现有片钠铝石的同时,见铁白云石交代片钠铝石(图 2g),含量相对较低。

3 碳酸盐含量的分布特征

3.1 碳酸盐含量在纵向上的分布

在纵向剖面上出现了两个碳酸盐含量高值带,分别出现在 1 500~1 900 m 和 2 200~2 700 m 深度(图 3)。前者主要为早成岩期形成的胶结物,多充填孔隙,矿物类型主要为连生方解石和显晶方解石,另外含少量菱铁矿,菱铁矿在次生石英加大之前形成,被认为是成岩早期形成的;后者主要为晚期成



注:据文献[9,21]。

图 1 海拉尔—塔木察格盆地构造单元划分和海拉尔盆地岩性地层柱状图

Fig. 1 Division of Tectonic Units in Hailar-Tamtsag Basin and Histogram of Lithostratigraphy in Hailaer Basin

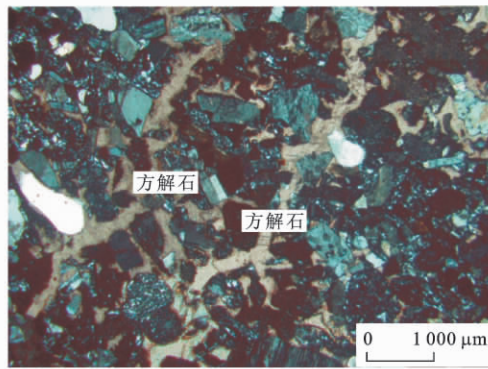
岩作用形成的碳酸盐矿物,矿物类型包括晚期方解石、白云石、铁白云石和片钠铝石。晚期方解石主要为交代长石、石英、岩屑及凝灰质物质等,以显晶和微晶形式存在。 Mg^{2+} 进入沉积物的方解石晶格中形成白云石,铁白云石有可能是在埋藏成岩过程中随着温度的升高,交代岩屑、方解石或者铁方解石形成的^[11,22]。白云石和铁白云石通常出现在方解石沉淀之后较晚的埋藏成岩阶段^[3,22-27],沉淀环境温度较高。如刘怀波等对美国俄克拉荷马州南哈桑气田的研究认为,含铁白云石形成于 $100\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ (埋深 $2\ 800\sim 3\ 200\text{ m}$),铁白云石形成于 $120\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ (埋深 $3\ 200\sim 3\ 500\text{ m}$)^[23]。片钠铝石一般在高 CO_2 分压条件下形成^[28],形成于成岩晚期^[3,22,26-27]。

3.2 碳酸盐含量与沉积相的关系

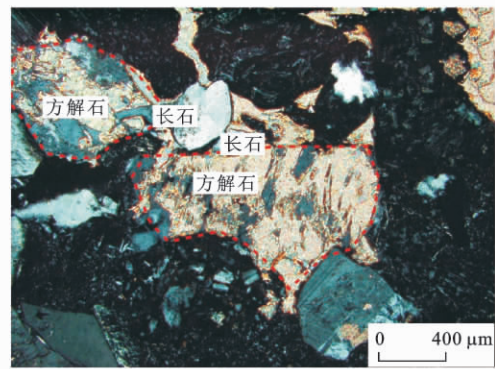
凝灰岩、凝灰质砂岩和砂岩主要发育在湖底扇、扇三角洲平原、扇三角洲前缘、滨浅湖相和浅湖—半浅湖相沉积相中。铜钵庙组发育扇三角洲平原、扇—辫状河三角洲前缘、滨浅湖相、浅湖—半深湖相,扇三角洲平原相碳酸盐平均质量分数最高,约为 7.07% ,其余 3 种沉积相碳酸盐平均质量分数分别

为 5.15% 、 3.6% 、 5.79% (图 4);南屯组一段发育湖底扇相、扇—辫状河三角洲平原相、扇—辫状河三角洲前缘相、滨浅湖相、浅湖—半深湖相,湖底扇相碳酸盐质量分数较高,约为 8.24% ,其余分别为 5.24% 、 2.85% 、 4.15% 、 3.23% (图 4);南屯组二段主要发育扇—辫状河三角洲平原相、扇—辫状河三角洲前缘相、浅湖—半深湖相,3 种沉积相碳酸盐平均质量分数相近,分别为 2.84% 、 3.54% 、 3.61% (图 4)。

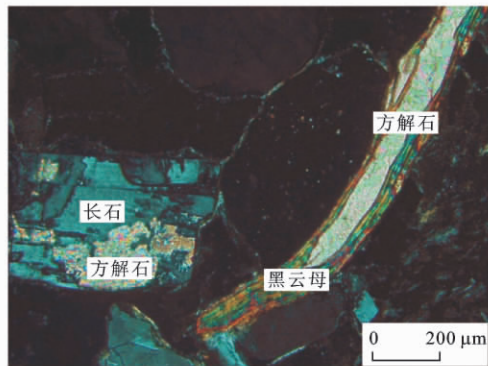
从以上可以看出,湖底扇相碳酸盐含量较高,其次为扇—辫状河三角洲平原相,扇—辫状河三角洲前缘相、滨浅湖相、浅湖—半深湖相 3 种沉积相中碳酸盐含量相近。湖底扇相被湖相泥岩包裹,泥岩中的金属离子易随流体运移到湖底扇相砂岩中,形成大量的碳酸盐矿物。扇—辫状河三角洲平原相岩石粒度较大,储层物性相对较好,流体流动性好,金属离子易于结合 CO_3^{2-} 形成碳酸盐矿物,此外储层空间大,为碳酸盐矿物的沉淀提供空间。而扇—辫状河三角洲前缘相和湖相岩石类型主要为粉砂岩和泥岩,流体的流动性差,且储层空间小,不利于碳酸盐矿物的生成。例如张永旺等对东营凹陷全区不同粒度砂岩中平均碳酸盐含量对比分析发现,粒度在中砂岩



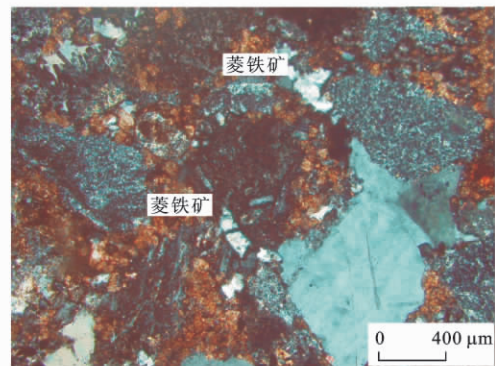
a 方解石脉穿切颗粒, 贝41-1井, 2 643.04 m, 正交偏光



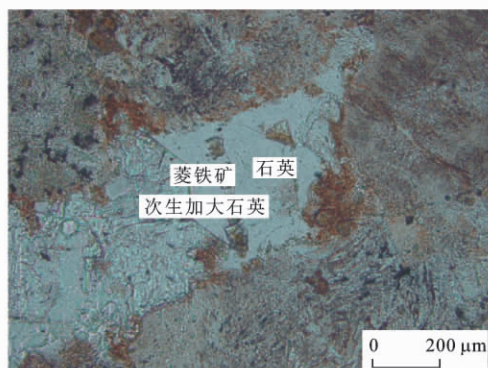
b 方解石交代长石, 长石呈港湾状、孤岛状, 希3井, 2 416.89 m, 正交偏光



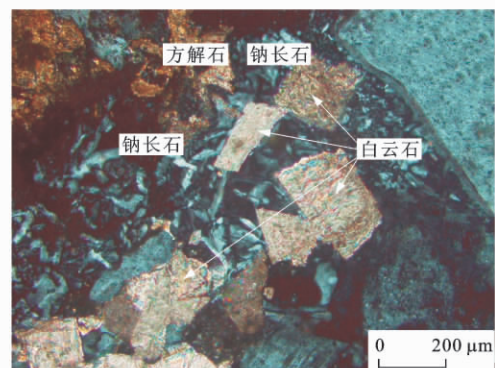
c 方解石沿黑云母001解理缝充填, 贝54井, 2 352.18 m, 正交偏光



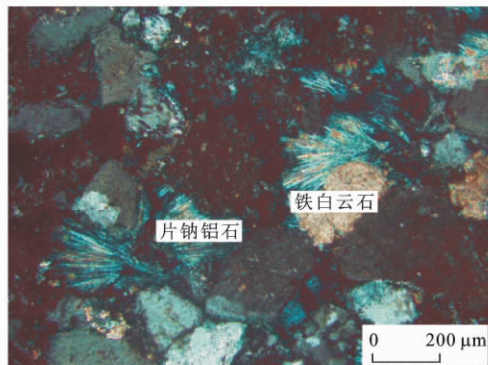
d 菱铁矿充填孔隙, 贝71井, 2 979.38 m, 正交偏光



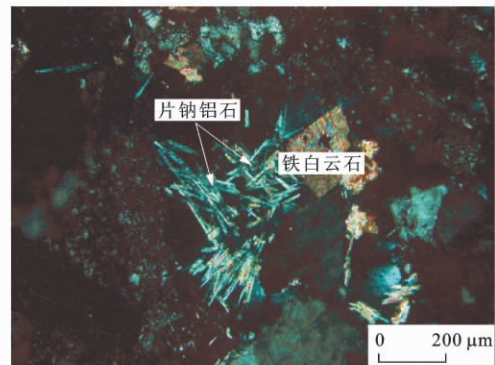
e 菱铁矿生长在石英次生加大与碎屑石英之间, 贝71井, 2 979.38 m, 单偏光



f 白云石交代钠长石, 希47-47井, 2 625.2 m, 正交偏光



g 放射状片钠铝石充填孔隙, 铁白云石交代片钠铝石, 贝50井, 2 415.72 m, 正交偏光



h 片钠铝石被溶蚀成搭架状, 铁白云石交代被强烈溶蚀后的片钠铝石, 贝50井, 2 959.9 m, 正交偏光

图 2 自生碳酸盐矿物显微照片

Fig. 2 Micrographs of Authigenic Carbonate Minerals

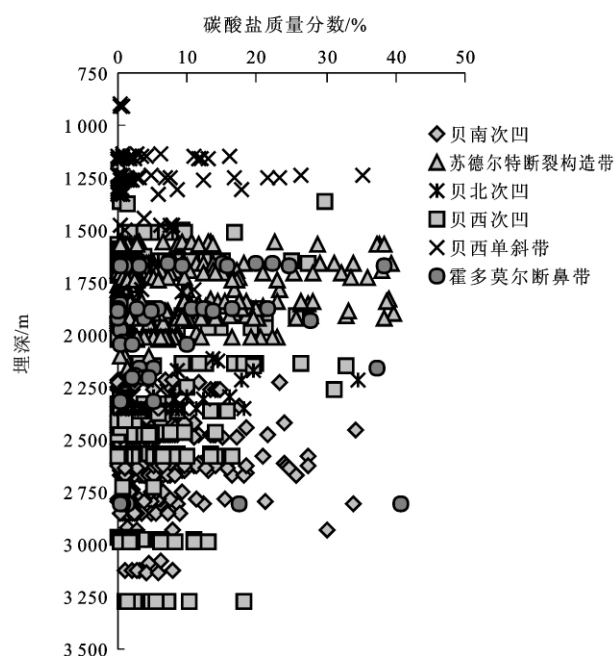


图3 碳酸盐含量在纵向上的分布

Fig. 3 Distribution of Carbonate Content in Length Direction

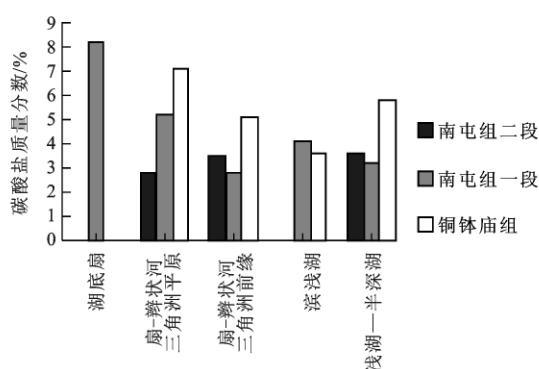


图4 不同沉积相的平均碳酸盐含量对比

Fig. 4 Contrasting Pattern of Mean Carbonate Contents in Different Sedimentary Facies

以上的砂层中碳酸盐的平均含量随粒度的增大而增大;而细粉砂岩至粉砂岩粒度中,碳酸盐平均含量与粒度的关系不明显,但总体仍然表现为粒度粗的砂层中含量高^[29]。

3.3 碳酸盐含量与深大断裂的关系

德尔布干深大断裂附近探井的碳酸盐平均质量分数多大于3%(图5),其中贝32、贝34、贝40、贝42及德3井的平均碳酸盐质量分数分别为11.74%、15.22%、11.82%、10.55%及13.8%,均大于10%;贝28、贝30、贝38及德4井平均碳酸盐质量分数分别为5.24%、6.87%、6.04%及7.28%,均大于5%;贝59、贝71及德1井的平均碳酸盐质量分数分别为3.91%、3.2%、4.92%,均大于3%,在断裂附近只

有少数几口井的平均碳酸盐含量较低,如霍5和贝26井的平均碳酸盐质量分数分别为0.98%和1.15%。远离德尔布干深大断裂的井平均碳酸盐质量分数多小于3%,例如贝302、贝D4、贝27、贝35、希1、希3、希4、希6及希8等井;另有几口远离断裂的井平均碳酸盐含量较高,如希10和贝D5井。此外,贝尔凹陷靠近德尔布干深大断裂的德2、德6和德8井有片钠铝石生成,由于片钠铝石是CO₂运移、聚集和逸散的特征矿物^[30],说明该断裂附近曾有大量CO₂存在;CO₂沿断裂发生逸散,断层处的富CO₂流体能够与围岩反应生成碳酸盐矿物^[31],因此深大断裂附近碳酸盐含量较高。类似的地质实例如美国亚利桑那州的Springerville St Johns气田一断层附近250 km²的区域均见有石灰华,另见少量的片钠铝石和高岭石沉淀^[31]。

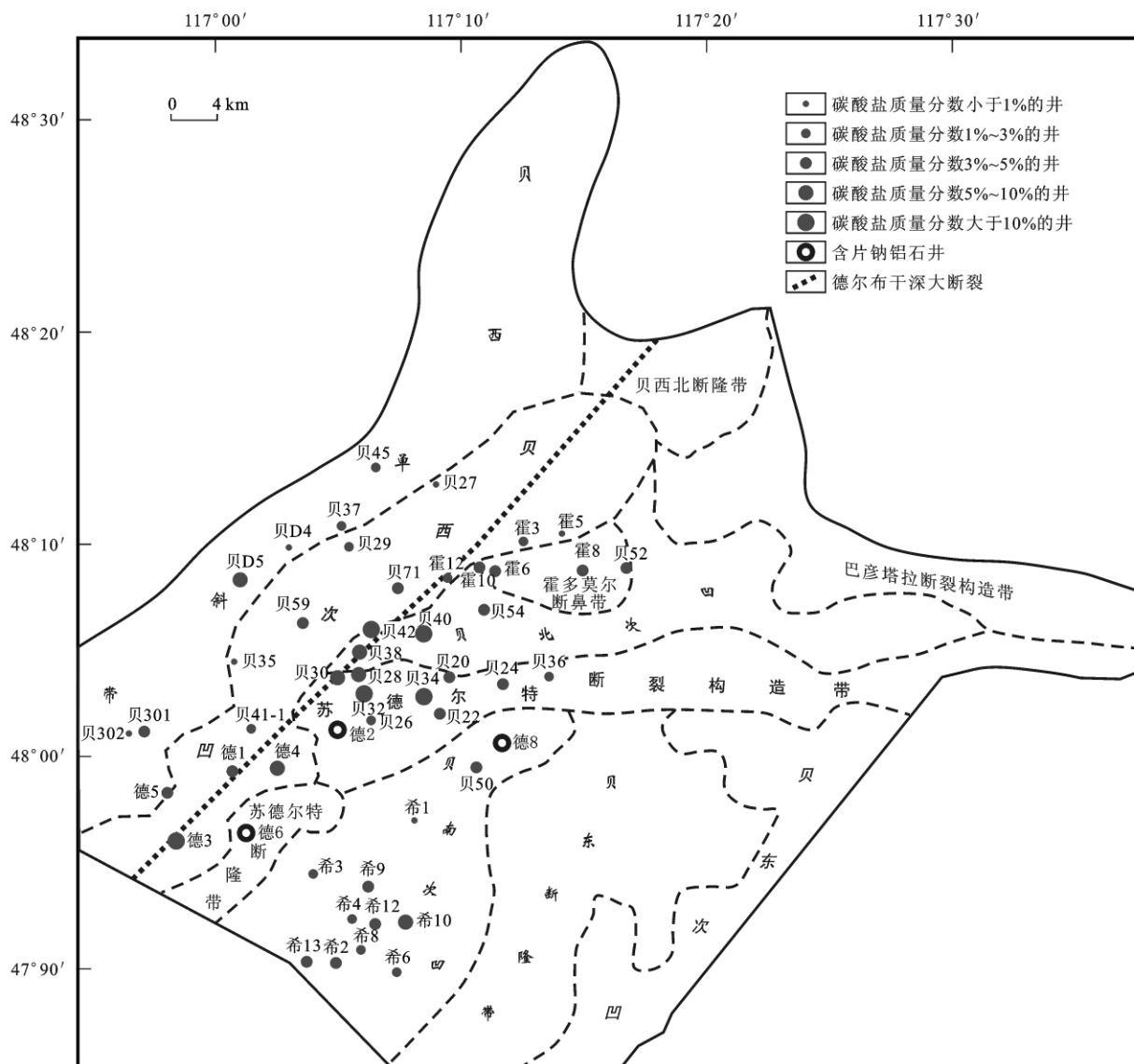
3.4 碳酸盐含量与岩石类型之间的关系

贝尔凹陷铜钵庙组—南屯组的767个凝灰岩、熔结凝灰岩、砂岩、凝灰质砂岩和沉凝灰岩的碳酸盐含量统计结果表明(图6):凝灰岩和熔结凝灰岩的碳酸盐质量分数(分别为5.54%和4.46%)均高于沉凝灰岩、凝灰质砂岩和砂岩(依次为2.72%、2.95%、3.83%)。

一般而言,样品中碳酸盐含量与自生碳酸盐矿物的含量成正比。火山碎屑岩和陆源碎屑岩常见的自生碳酸盐矿物有方解石、白云石、菱铁矿等,这些碳酸盐矿物的含量主要取决于阳离子含量,火山碎屑岩是火山爆发所产生的同期火山碎屑物质经空气或水介质的搬运、堆积、固结而形成的岩石,其中凝灰岩具有类似于同类火成岩的化学成分^[32]。

火山岩和火山碎屑岩中金属离子含量高。在火山岩中,金属元素含量高的岩石类型主要为超基性岩和基性岩。这两类岩石中金属元素主要赋存在橄榄石、辉石、基性斜长石及角闪石中;而橄榄石、玄武玻璃、钙长石、蛇纹石、透辉石和角闪石等矿物都能为碳酸盐化提供金属离子^[33-36]。火山碎屑岩中基性和中性火山岩岩屑以及相应成分的隐晶质岩屑和长石、黑云母及角闪石等晶屑中,这些元素均能为碳酸盐矿物的形成提供金属离子^[3,37]。

火山岩和火山碎屑岩中金属离子容易释放,且易于形成碳酸盐矿物。其中关于玄武岩中金属离子易于析出和一些通过热液改造或风化使得玄武岩碳酸盐化的报道屡见不鲜^[38-41]。王建伟等的凝灰质溶蚀实验显示凝灰质填隙物在酸性条件下溶蚀作用极为明显^[5,42]。镜下鉴定发现,贝尔凹陷火山碎屑岩



注:构造单元图及井位据文献[43];断裂位置据文献[44]。

图 5 碳酸盐含量与深大断裂的关系

Fig. 5 Relationship Between Carbonate Content and Deep Fault

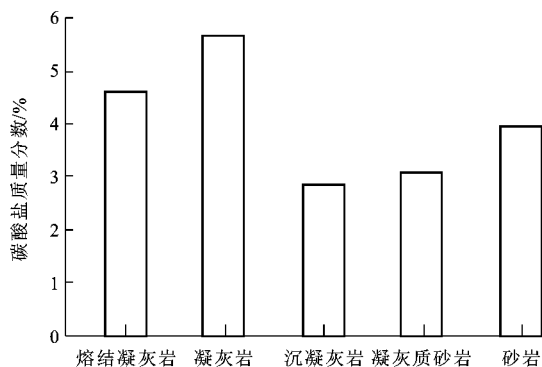


图 6 不同岩石类型中平均碳酸盐含量对比

Fig. 6 Contrasting Pattern of Mean Carbonate Contents in Different Types of Rocks

中凝灰质填隙物多发生脱玻化作用,主要表现为玻

璃质脱玻化和黏土矿化,这就能为碳酸盐矿物的形成提供金属离子。火山碎屑岩易于碳酸盐化,例如蒙古国塔木察格盆地塔南凹陷火山碎屑岩中片钠铝石、铁方解石和铁白云石的质量分数达 30%^[3]。

综上所述,凝灰岩和熔结凝灰岩的碳酸盐质量分数高于沉凝灰岩、凝灰质砂岩和砂岩,这主要是因为火山岩及火山碎屑物质中金属离子质量分数高且易于析出,从而结合 CO_3^{2-} 形成碳酸盐矿物。

4 碳酸盐含量对储层物性的影响

从图 7 可以看出,碳酸盐含量与孔隙度以及渗透率呈负相关关系,说明碳酸盐含量对孔隙度和渗透率主要起破坏作用。当碳酸盐质量分数低于 5% 时,火

山碎屑岩的孔隙度基本维持在 10% 以上,渗透率大于 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;当碳酸盐质量分数超过 5% 以后,储层物性变差,孔隙度大多只有 5%,渗透率一般小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

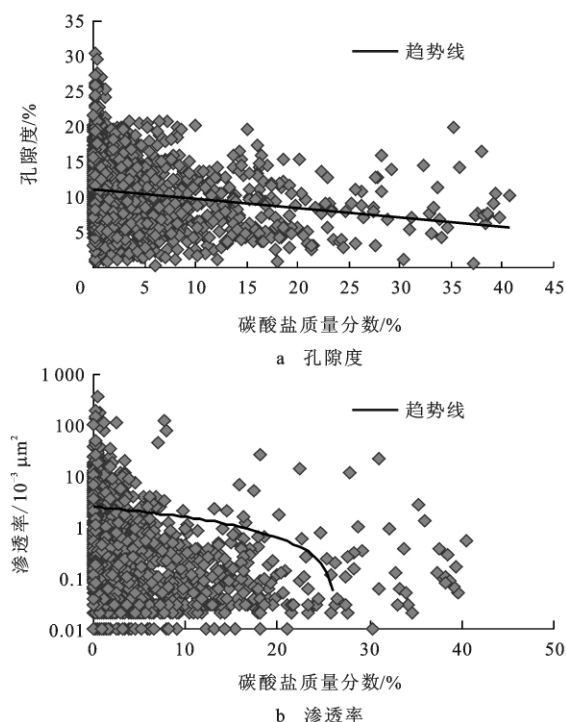


图7 碳酸盐含量与储层物性的关系

Fig. 7 Relationship Between Carbonate Contents and Reservoir Properties

5 结语

(1)海拉尔盆地贝尔凹陷火山碎屑岩中发育大量的自生碳酸盐矿物,主要为方解石和白云石,其次为菱铁矿、片钠铝石、铁白云石。

(2)纵向上随着埋藏深度增加出现两个碳酸盐含量高值带,分别出现在 1 500~1 900 m 和 2 200~2 700 m 深度,前者主要为以胶结作用为主的连生方解石和显晶方解石及菱铁矿,后者主要为以交代作用为主的晚期方解石、白云石、铁白云石和片钠铝石。湖底扇等分选较差的沉积相为碳酸盐矿物发育的有利相带,扇-辫状河三角洲相是次有利相带。靠近德尔布干深大断裂的井碳酸盐含量要高于远离该断裂的井,且在该断裂附近德 2、德 6 和德 8 等井中见片钠铝石胶结物,这主要因为断层是 CO_2 逸散的通道,断层处的富 CO_2 流体能够与围岩反应生成碳酸盐矿物。熔结凝灰岩和凝灰岩中的碳酸盐矿物含量要高于沉凝灰岩、凝灰质砂岩及普通砂岩,这主要是因为火山岩及火山碎屑岩中金属离子易于释放,

从而结合 CO_3^{2-} 形成碳酸盐矿物。

(3)贝尔凹陷内储集层孔隙度和渗透率与碳酸盐含量成负相关关系,碳酸盐胶结物对储层物性主要起破坏作用。当碳酸盐质量分数低于 5% 时,火山碎屑岩的孔隙度基本维持在 10% 以上,渗透率大于 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;当碳酸盐质量分数超过 5% 以后,储层物性变差,孔隙度大多只有 5%,渗透率一般小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

参考文献:

- [1] 冯志强,任延广,张晓东,等.海拉尔盆地油气分布规律及下步勘探方向[J].石油地质,2004,9(4):19-22.
- [2] 刘立,曲希玉,董林森,等.东北及邻区中生代盆地片钠铝石的分布、产状及其油气地质意义[J].吉林大学学报:地球科学版,2009,39(1):1-8.
- [3] 董林森,刘立,张革,等.火山碎屑岩对 CO_2 的矿物捕获能力[J].沉积学报,2010,28(3):572-578.
- [4] 李军,王德发,范洪军.甘肃酒泉盆地青西油田裂缝特征及成因分析[J].现代地质,2007,21(4):691-696.
- [5] 王建伟,鲍志东,陈孟晋,等.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[J].地质科学,2005,40(3):429-438.
- [6] 吴运强,常秋生,蒋宜勤,等.气孔状火山碎屑岩储集层成因特征及油气勘探意义[J].新疆石油地质,2006,27(4):166-168.
- [7] 王海燕,刘立,高玉巧,等.海拉尔盆地贝尔凹陷南屯组火山碎屑岩成岩作用的讨论[J].世界地质,2005,24(3):219-224.
- [8] 孙彦达,张民志.海拉尔盆地碳钠铝石特征及其地质意义[J].石油实验地质,2006,28(5):504-506.
- [9] 程日辉,沈艳杰,颜景波,等.海拉尔盆地火山碎屑岩的成岩作用[J].岩石学报,2010,26(1):47-54.
- [10] Pettijohn F J, Potter P E, Siever R. Sand and Sandstone[M]. 2nd Edition. New York: Springer, 1987.
- [11] Morad S. Carbonate Cementation in Sandstones: Distribution Patterns and Geochemical Evolution[C]// Morad S. Carbonate Cementation in Sandstones. Boston: Wiley-Blackwell, 1998: 1-26.
- [12] 罗静兰,郭德运,尹鹏,等.蟠龙探区 2 砂岩储层物性的控制因素[J].西北大学学报:自然科学版,2003,33(6):723-728.
- [13] 朱如凯,郭宏莉,高志勇,等.塔里木盆地北部地区古近系—白垩系储层质量影响因素探讨[J].地质论评,2007,53(5):624-630.
- [14] 王卓卓,梁江平,李国会,等.成岩作用对储层物性的影响及与沉积环境的关系——以鄂尔多斯盆地劳山地区为例[J].天然气地球科学,2008,19(2):171-177.
- [15] Cade C A, Evans I J, Bryant S L. Analysis of Permeability Controls: a New Approach[J]. Clay Minerals, 1994, 29: 491-501.
- [16] 吴根耀.白垩纪:中国及邻区板块构造演化的一个重要变换期[J].中国地质,2006,33(1):64-77.
- [17] Graham S A, Hendrix M S, Johnson C L, et al. Sedimentary

- Record and Tectonic Implications of Mesozoic Rifting in Southeast Mongolia[J]. *GSA Bulletin*, 2001, 113(12): 1560-1579.
- [18] Meng Q R, Hu J M, Jin J Q, et al. Tectonics of the Late Mesozoic Wide Extensional Basin System in the China-Mongolia Border Region[J]. *Basin Research*, 2003, 15(3): 397-415.
- [19] 刘振彪, 陈守田, 张 财, 等. 贝尔凹陷的形成机制及其油气分布规律[J]. *石油地球物理勘探*, 1999, 34(增): 109-112.
- [20] Roger N, McLean D, Bate R H, et al. Mongolia, Tamtsag Basin, Evidence for Widespread, High Quality, Mature Lower Cretaceous Source Rock[J]. *AAPG Bulletin*, 2000, 84(9): 1469.
- [21] 伍 英, 陈均亮, 张 莹. 海拉尔—塔木察格盆地构造带与油气关系[J]. *大庆石油学院学报*, 2009, 33(3): 31-35.
- [22] Worden R H. Dawsonite Cement in the Triassic Lam Formation, Shabwa Basin, Yemen; a Natural Analogue for a Potential Mineral Product of Subsurface CO₂ Storage for Greenhouse Gas Reduction[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23(1): 61-77.
- [23] 刘怀波, 吴智勇, Blatt H, 等. 俄克拉荷马州南哈桑气田斯普罗砂岩的成岩作用和孔隙演化[J]. *江汉石油学院学报*, 1995, 17(2): 1-9.
- [24] 马艳萍, 刘 立. 大港滩海区第三系湖相混积岩的成因与成岩作用特征[J]. *沉积学报*, 2003, 21(4): 607-613.
- [25] 常兴浩, 张枝焕, 李艳霞, 等. 黄骀坳陷三马地区中深层储层孔隙发育及主控因素分析[J]. *地球学报*, 2005, 26(1): 75-82.
- [26] 刘 立, 高玉巧, 曲希玉, 等. 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[J]. *岩石学报*, 2006, 22(8): 2229-2236.
- [27] 董林森, 刘 立, 曲希玉, 等. 松辽盆地南部红岗油田青山口组片钠铝石的结晶特征及成因探讨[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2009, 39(6): 1031-1041.
- [28] Ryzhenko B N. Genesis of Dawsonite Mineralization; Thermodynamic Analysis and Alternatives[J]. *Geochemistry International*, 2006, 44(8): 835-840.
- [29] 张永旺, 曾溅辉, 高 霞, 等. 东营凹陷古近系储层碳酸盐胶结物分布特征及主控因素[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2009, 39(1): 16-22.
- [30] 高玉巧, 刘 立, 曲希玉. 片钠铝石的成因及其对 CO₂ 天然气运聚的指示意义[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(10): 1083-1088.
- [31] May F. Alteration of Wall Rocks by CO₂-rich Water Ascending in Fault Zones: Natural Analogues for Reactions Induced by CO₂ Migrating Along Faults in Siliciclastic Reservoir and Cap Rocks[J]. *Oil and Gas Science and Technology*, 2005, 60(1): 19-32.
- [32] Pettijohn F J, John F. *Sedimentary Rocks*[M]. New York: Harper and Row, 1975.
- [33] Golubev S V, Pokrovsky O S, Schott J. Experimental Determination of the Effect of Dissolved CO₂ on the Dissolution Kinetics of Mg and Ca Silicates at 25 °C[J]. *Chemical Geology*, 2005, 217(3/4): 227-238.
- [34] Flaathen T K, Gislason S R, Oelkers E H, et al. Chemical Evolution of the Mt. Hekla, Iceland, Groundwaters; a Natural Analogue for CO₂ Sequestration in Basaltic Rocks[J]. *Applied Geochemistry*, 2009, 24(3): 463-474.
- [35] Oelkers E H, Cole D R. Carbon Dioxide Sequestration; a Solution to a Global Problem[J]. *Elements*, 2008, 4(5): 305-310.
- [36] Koljonen T, Siikavirta H, Zevenhoven R, et al. CO₂ Capture, Storage and Reuse Potential in Finland[J]. *Energy*, 2004, 29(9/10): 1521-1527.
- [37] 董林森, 刘 立, 曲希玉, 等. CO₂ 矿物捕获能力的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2010, 25(9): 941-949.
- [38] Schaefer H T, McGrail B P. Dissolution of Columbia River Basalt Under Mildly Acidic Conditions as a Function of Temperature; Experimental Results Relevant to the Geological Sequestration of Carbon Dioxide[J]. *Applied Geochemistry*, 2009, 24(5): 980-987.
- [39] Gudmundsson B T, Arnórsson S. Geochemical Monitoring of the Krafla and Námafjall Geothermal Areas, N-Iceland[J]. *Geothermics*, 2002, 31(2): 195-243.
- [40] Gislason S R, Arnórsson S, Armannsson H. Chemical Weathering of Basalt in Southwest Iceland; Effects of Runoff, Age of Rocks and Vegetative/glacial Cover[J]. *American Journal of Science*, 1996, 296: 837-907.
- [41] Dessert C, Dupré B, Gaillardet J, et al. Basalt Weathering Laws and the Impact of Basalt Weathering on the Global Carbon Cycle[J]. *Chemical Geology*, 2003, 202(3/4): 257-273.
- [42] 张凡芹, 王伟锋, 王建伟, 等. 苏里格庙地区凝灰质溶蚀作用及其对煤成气储层的影响[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2006, 36(3): 365-369.
- [43] 雷燕平, 林畅松, 刘景彦, 等. 贝尔凹陷下白垩统构造对沉积充填和砂体分布的控制[J]. *石油天然气学报*, 2008, 30(2): 25-29.
- [44] 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚, 等. 从全球看中国大地构造: 中国及邻区大地构造图简要说明[M]. 北京: 地质出版社, 1999.