准噶尔盆地西北缘 LQ 区石炭系火山岩风化壳储层分带性及勘探方向

史乐*，李婷，杜引鱼，童坤，马鹏

中国石油新疆油田分公司采油二厂，新疆 克拉玛依 834000

* 通信作者，E-mail：shile6@petrochina.com.cn

2024-01-16 收稿；2024-06-03 修回；2024-12-05 接受

基金项目：国家科技重大专项(2017E-0401)

中图分类号：P618.13　　文章编号：2096-8523(2025)03-0082-12　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240018

摘　要：准噶尔盆地西北缘 LQ 区发育大型火山岩风化壳油气藏，与其他地区火山岩风化壳油气藏不同的是，该风化壳储层垂向上具有多层性和较强的非均质性，平面上具有明显的分带性。目前对该火山岩风化壳储层的垂向和横向分带性及有利储层的分布规律认识不清，阻碍了该区进一步的火山岩油气勘探，因此需对这种独特的火山岩风化壳储层深入分析。以测井、钻井、岩性、野外地质剖面等资料为依据，分析了火山岩风化壳形成过程、垂向和横向分带性以及有利勘探方向等。研究结果表明：研究区石炭系火山岩风化壳古潜山演化可划分为裂隙式火山岩初始喷发阶段、火山喷发间歇阶段、火山再次活动阶段、石炭系火山顶部风化壳形成阶段 4 个阶段。火山岩风化壳储层主要形成于火山喷发间歇性，而风化物质则为喷发期形成的火山岩以及与火山岩相关的沉积岩，多期次火山喷发与风化形成了火山岩内部多层风化壳。每一期的风化壳自下而上均可划分出基岩层、裂缝层、砂化层、沉积层等，其中裂缝层和砂化层储层物性较好，是主要的油气储集层。平面上，风化壳划分为溶蚀台地、溶蚀斜坡、溶蚀洼地等，其中溶蚀斜坡裂缝和溶孔最发育，是最有利的勘探目标区。溶蚀洼地胶结作用严重，储层物性最差。研究结果可为火山岩油气勘探提供重要指导和启示。

关键词：准噶尔盆地西北缘；风化壳分带性；砂化层；风化裂缝带；溶蚀斜坡；火山岩风化壳储层

1887 年美国加利福尼亚州 San Joaquin 盆地发现了世界首例火山岩气藏，随后，火山岩作为一种特殊油气藏储层成为众多地质学家研究的热点，俄罗斯、墨西哥、阿塞拜疆、中国等国家也相继发现了多处火山岩油气藏[1-6]。火山岩风化壳是火山岩主要的储层，为了详细刻画火山岩储层特征，前人对风化壳的分带性做了详细研究。胡志伟等[7]将黄山和青岛等地的火山岩风化壳自下而上划分为基岩带、裂缝带、碎裂带、砂质带和黏土带等；李建平等[8]将火山岩的风化壳划分为基岩带、裂缝带、砾质风化带、砂质风化带等；王幼麟[9]将三峡地区的火山岩风化壳划分为完全风化带、强风化带、弱风化带和微风化带等；王明臣等[10]将火山岩风化带划分为基岩带、裂缝带、砂砾岩风化带、土壤带等。这些研究表明不同地区的火山岩风化壳均具有明显的垂向分带性。近年来，研究区火山岩油气藏的勘探和开发的经验表明，火山岩风化壳不仅具有垂向分带性，横向上也具有明显的分带性。准噶尔盆地西北缘 LQ 区广泛发育石炭系火山岩[2-5]，该区火山岩风化壳储层与我国其他地区的火山岩储层具有一定的差异性[11-13]。研究区火山岩不仅发育火山岩顶部风化壳，在火山岩内部还发育多个风化壳，每个风化壳具有明显的分带性[14-15]。研究区石炭系风化壳的试油试采结果表明风化壳储层横向上具有明显的分区特征，但目

著录信息：史乐，李婷，杜引鱼，等. 准噶尔盆地西北缘 LQ 区石炭系火山岩风化壳储层分带性及勘探方向［J］. 地质科技通报，2025，44(3)：82-93.
SHI Le，LI Ting，DU Yinyu，et al. Zonality and exploration direction of Carboniferous volcanic weathering crust reservoirs in the LQ area，northwest margin of the Junggar Basin［J］. Bulletin of Geological Science and Technology，2025，44(3)：82-93.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

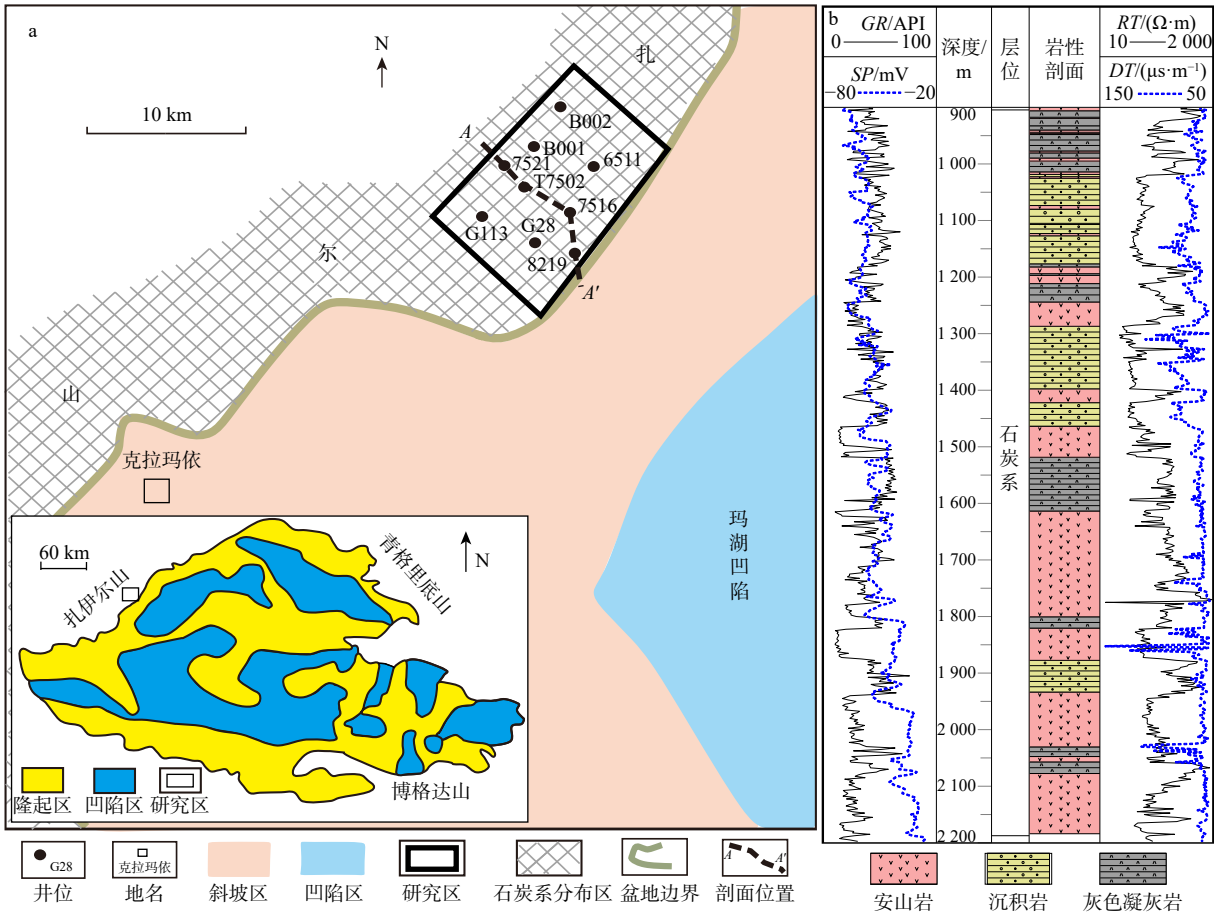
前针对这种横向分带性以及垂、横向分带联动性的研究较薄弱。为了明确研究区及周缘火山岩风化壳勘探方向，需要深入分析风化壳储层垂、横向分带性。本次研究依据扎实的地球物理、分析测试和典型的野外地质剖面等资料，开展了火山岩喷发期次、古潜山风化壳演化阶段等方面的研究，总结了研究火山岩古潜山风化壳储层垂向和横向的分带性，并分析了风化壳有利勘探方向。

1 区域地质概况

克拉玛依油田 LQ 区位于克拉玛依市东北 30 km，构造上位于准噶尔盆地西部隆起克百断裂带中段[16-17]（图 1）。LQ 区自下而上发育石炭系，三叠系克拉玛依组、白碱滩组，侏罗系八道湾组、三工河组、西山窑组、头屯河组、齐古组和白垩系[18]。LQ 区的地层分为上、下 2 部分：上部为中生界的三叠系、侏罗系和白垩系等，岩性为碎屑岩；下部为石炭系，主要为一套火山岩及其风化物形成的沉积岩，而区内二叠系剥蚀殆尽[19-20]。由于准噶尔盆地西北缘前寒武系基底埋藏较深，资料较少，因此，对该基底的认识存在较大争议，部分学者认为其为前寒武系结晶基底，部分学者认为其属洋壳和岛弧的拼合体，也有学者认为其属结晶基底和拼贴基底的双重基底[21-22]。准噶尔盆地西北缘在古生代时期属于中亚海槽的西准噶尔洋部分。泥盆纪沉积期，由于陆块的俯冲消减，西准噶尔洋规模快速减小，且在石炭纪末消亡。在准噶尔洋盆减小期，准噶尔盆地西北缘构造活动较强，火山喷发频繁，因此，准噶尔盆地西北缘分布大规模的岩浆岩[23]。二叠纪盆地进入伸展阶段，准噶尔盆地西北缘多为陆相沉积环境，主要为河流相、湖泊相和三角洲相沉积。

2 火山岩岩性特征

石炭系火山岩岩性包括安山岩、凝灰岩和沉积岩 3 类主要岩性。安山岩属于中性熔岩，主要分布在研究区西部和中部，如 G28、G27、7519、7511 等



a. 研究区位置图；b. 石炭系 G28 井岩性柱状图。*GR*. 自然伽马；*SP*. 自然电位；*RT*. 深探测电阻率；*DT*. 声波时差；下同

图 1 研究区位置及地层划分

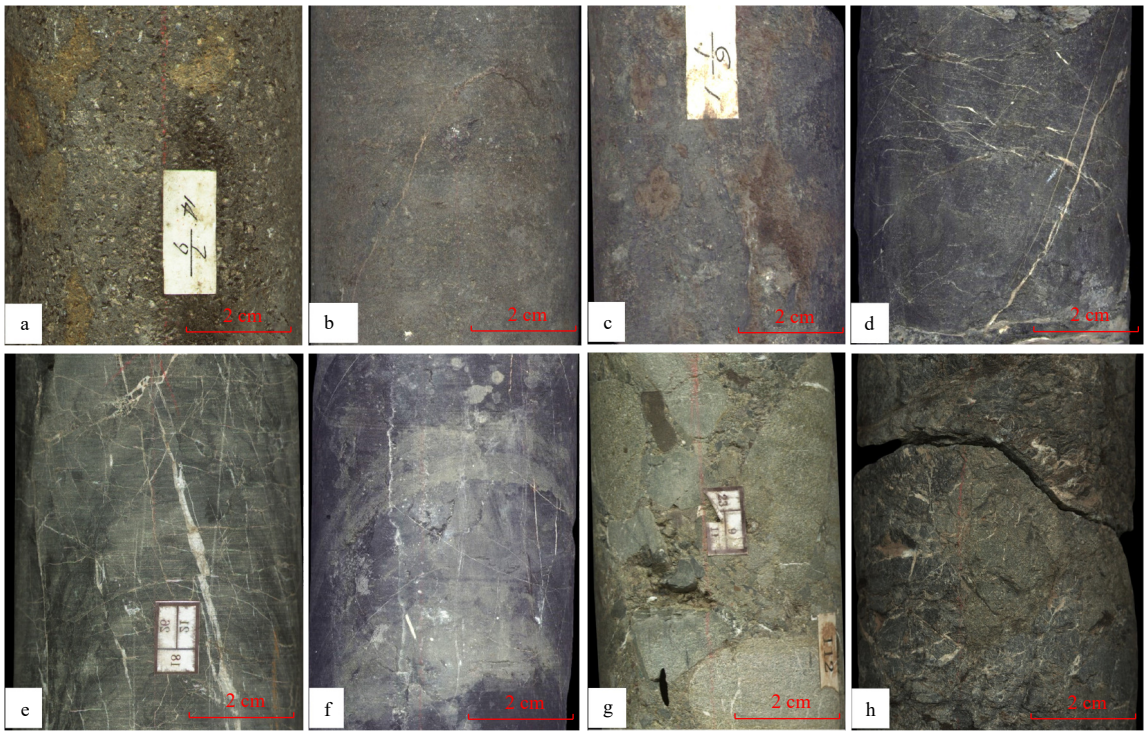
Fig. 1 Location and stratigraphic division of the study area

井。岩石颜色呈灰色、灰黑色、褐色和褐红色，多具斑状结构、气孔和杏仁构造(图 2a ~ c)。斑晶主要为斜长石，少量角闪石，斑晶体积分数多为 10%；凝灰岩广泛分布在研究区西部，颜色多为灰黑色、灰绿色(图 2d ~ f)，具沉凝灰结构。凝灰岩主要成分为晶屑、岩屑和泥质胶结物，还有少量火山角砾，火山角砾多为安山岩，体积分数在 1% ~ 10% 之间，呈次棱角状；沉积岩主要为砾岩、凝灰质砂岩、凝灰质泥岩等，主要分布在研究区西部。砾岩砾径较大，平均砾径 8 cm，分选性较差，砾石成分为岩浆岩，砾石间充填砂泥质等杂基(图 2g)，垂向韵律多呈正韵律。凝灰质砂岩颜色多为灰绿色、灰白色(图 2h)，碎屑主要成分为石英、长石和火山碎屑，石英和长石含量较高，多呈次棱角状。

3　石炭系火山机构及分布

研究区石炭系火山岩相划分为爆发相、溢流相、火山沉积岩相 3 种岩相类型。爆发相是由于岩浆在上涌过程中对围岩产生巨大压力，从而导致爆炸，形成各种粒级不同的火山碎屑堆积物[24-27]。研究区爆发相主要产物为凝灰岩，分布在研究区中部和西部，常与安山岩和砂砾岩等沉积岩互层(图 3)。溢流相形成于火山强烈的爆发之后，熔浆沿着火山通道溢出火山口，并在沿地表流动过程中逐渐冷凝固结[28-31]。研究区溢流相产物以安山岩为主，呈 NNE 向分布在研究区中部和东南部(图 4)，厚度巨大。该区域与 NNE 向展布的克乌断裂带重合，故该火山带为裂隙式喷发。火山沉积岩主要分布在研究区西部，多为地表水流携带的火山碎屑在地势低洼汇水区域的沉积。垂向上，火山岩的岩性组合特征具有一定的差异，根据岩性组合变化火山岩可划分为 3 个喷发期次，自下而上命名为 1 期、2 期和 3 期。期次界面在地震资料中均为中–强振幅、高连续性、中低频反射结构。钻井资料中，期次界面下部为沉积岩或火山岩风化壳，界面之上为火山岩，每个喷发期次岩性均表现为火山岩和沉积岩或火山岩风化壳的组合(图 3)。通过岩心和地震资料分析表明，每一期火山岩喷发都可进一步划分为火山喷发阶段和喷发间歇阶段，喷发阶段岩性以安山岩和凝灰岩等火山岩为主；间歇阶段主要发生火山物质的风化、侵蚀作用、搬运和沉积作用，形成火山岩风化壳和沉积岩，岩性为凝灰质砂砾岩、火山岩原地风化物等。

研究区油气藏主要分布在喷发间歇阶段形成的风化壳中。前人[11-12]对火山岩风化壳古潜山研究较多，但研究多集中在古潜山顶部的风化壳，而对火



a. G27 井，1 148.66 m，灰色安山岩；b. G28 井，1 230 m，灰黑色安山岩；c. G28 井，1 266.82 m，暗褐色安山岩；d. 6511 井，430.6 m，深灰色块状凝灰岩；e. B001 井，1 280.67 m，灰色块状凝灰岩；f. 6511 井，489.32 m，含砂凝灰岩；g. B001 井，1 439.8 m，砾岩；h. G113 井，1 222.11 m，灰色凝灰质砂岩

图 2　准噶尔盆地西北缘 LQ 区石炭系火山岩岩性特征

Fig. 2　Lithological characteristics of Carboniferous volcanic rocks in the LQ area, northwest margin of the Junggar Basin

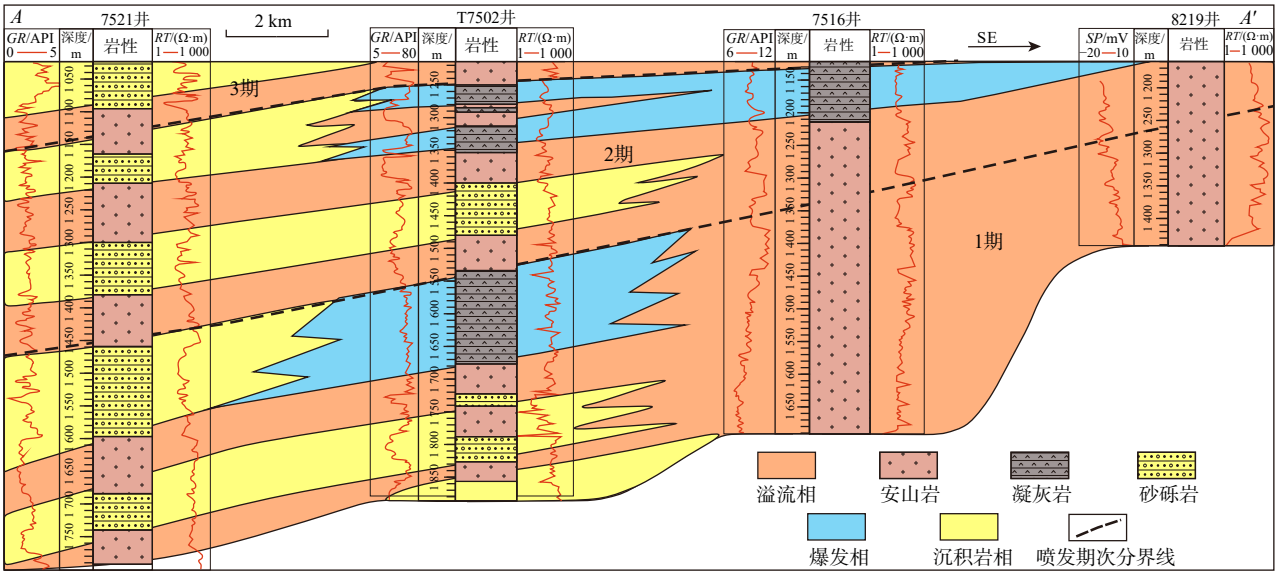


图 3　准噶尔盆地西北缘 LQ 区石炭系火山岩系岩相对比（剖面位置详见图 1 中剖面 *A*–*A*′）

Fig. 3　Lithofacies comparison of Carboniferous volcanic rock series in the LQ area, northwest margin of the Junggar Basin

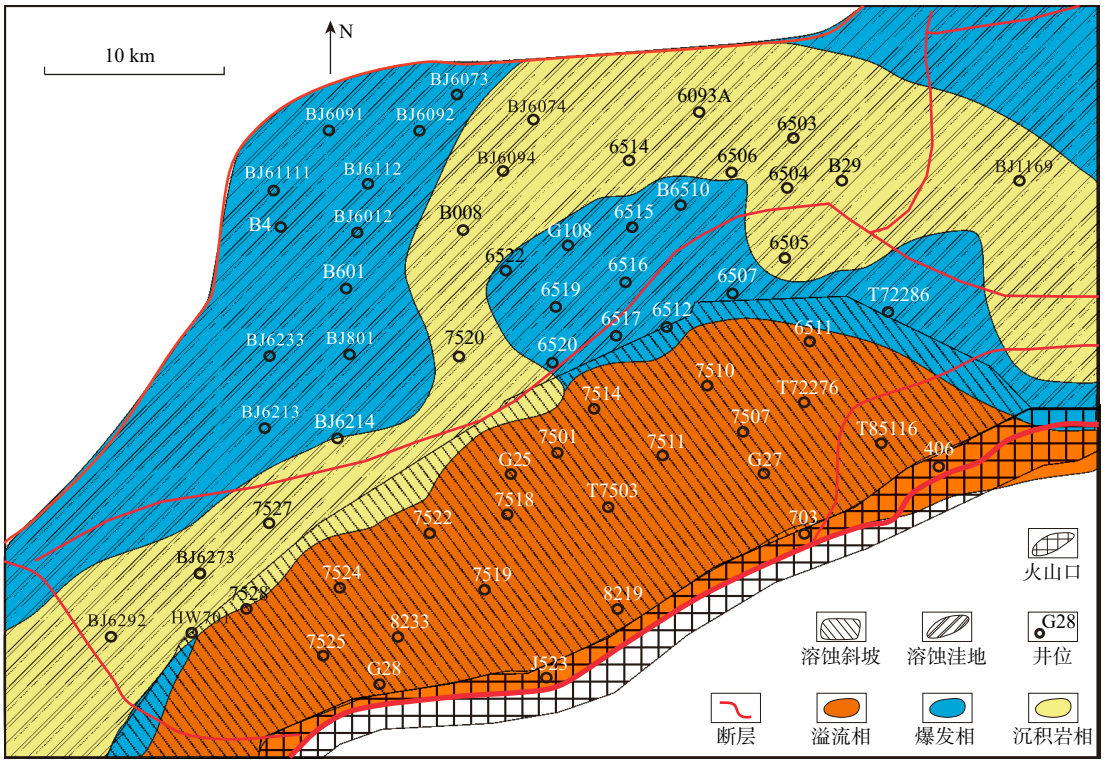


图 4　准噶尔盆地西北缘 LQ 区石炭系火山机构分布特征

Fig. 4　Distribution characteristics of Carboniferous volcanic structures in the LQ area, northwest margin of the Junggar Basin

山岩内部风化壳研究较少。研究区不仅发育火山岩顶部风化壳，还发育若干层火山岩内部风化壳，而且内部风化壳油气产量较大。火山岩内部风化壳与火山间歇性喷发具有密切关系，根据火山岩风化壳岩性、分布特征以及与火山岩垂向分布关系，将研究区石炭系火山岩古潜山风化壳演化划分为Ⅰ～Ⅳ4 个阶段。

4　LQ 区火山风化壳演化阶段划分

阶段Ⅰ（图 5a）：裂隙式火山初始喷发阶段。该阶段首先发生火山爆发，产生大量的火山灰，在火山停止爆发后，岩浆从火山口向构造低部位溢流。火山灰向远离火山口的区域飘散，并发生沉积作用，形成凝灰岩。阶段Ⅱ（图 5b）：火山喷发间歇阶段。受

到大气降水作用影响火山喷发物开始风化，并发生侵蚀作用。风化和侵蚀作用形成的风化物通过地表径流的搬运，在地势低洼的汇水区沉积(研究区西部和西北部)。阶段Ⅲ(图 5c)：火山再次活动阶段。火山爆发阶段火山口喷出大量的火山灰。在火山停止喷发后，岩浆从火山口两侧的斜坡溢流，岩浆覆盖在下伏的风化层之上，综合来看，这类火山活动共有 3 次。阶段Ⅳ(图 5d)：石炭系火山顶部风化壳形成阶段。该阶段发生在火山活动彻底停止后。石炭系火山岩形成后，由于哈萨克斯坦板块的挤压作用，准噶尔盆地西北缘发生大规模的逆冲推覆和构造抬升。其后，石炭系顶部火山岩开始风化侵蚀，并在斜坡区形成侵蚀沟谷，在地势低洼区形成扇三角洲沉积(图 5b, d)，并由此形成石炭系顶部风化壳。

5　火山岩风化壳分带性及储层特征

根据野外地质剖面和钻井资料，分析喷发间歇阶段形成的火山岩风化壳分带性。

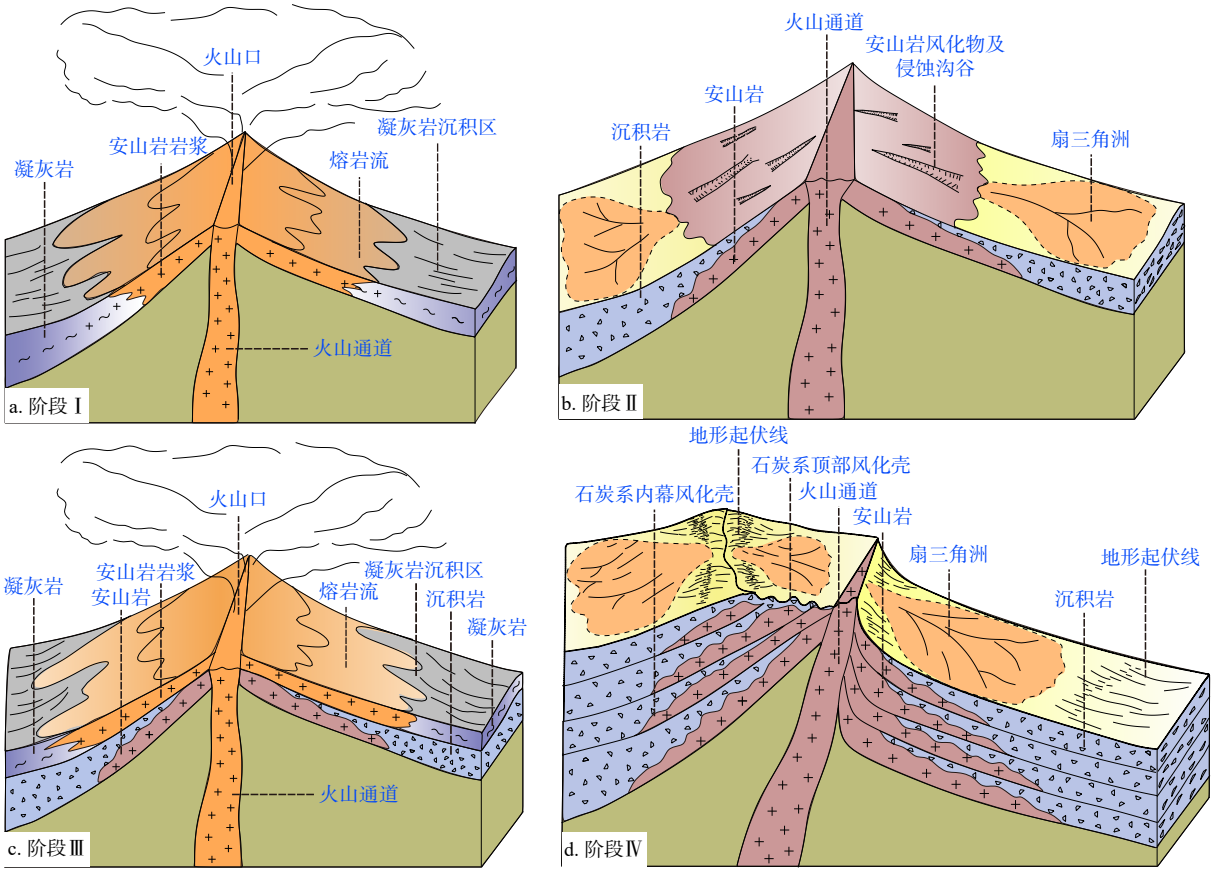
5.1　火山岩风化壳野外地质剖面中垂向分带性

通过对吐孜阿克内沟采石场剖面的仔细观察和实测，揭示了一个完整的火山岩风化壳。吐孜阿克内沟位于克拉玛依市西北方向，直线距离约 10 km，该风化壳可见范围内垂向上可分为 3 层：

(1)*沉积层*　位于风化壳的最上部，主要由无分选的砂砾石组成，厚度不等，是原地火山岩强烈的物理风化及化学风化、破碎，残留在原地或经极短距离搬运的砂、泥、砾的混杂堆积物，顶部常有厚度不等的土壤植被层；本研究将土壤层与下伏的泥质砂砾层合并称之为沉积层。

(2)*砂化层*　可定义为位于沉积–土壤层之下的火山岩(原岩)，在化学风化作用下，原岩软化，易溶矿物的水解及酸化作用形成黏土，稳定的石英矿物残留其中，但仍残留有原岩的粒状颗粒结构及原有的构造痕迹，颗粒间没有发生任何的位移，保留了原岩的产出状态。但由于原岩的水化膨胀，原有裂缝有的消失。随着深度的增加，原岩固结程度也相应增加，逐渐向风化裂缝带过渡。不易风化的石英颗粒是矿砂开采的主要原料。

(3)*裂缝层*　位于砂化层之下。火山岩中的裂缝非常发育，主要是由岩浆冷凝收缩、后期构造应力作用以及风化作用而形成。随着埋藏的深度增加，



a. 裂隙式火山岩初始喷发阶段；b. 火山喷发间歇阶段；c. 火山再次活动阶段；d. 石炭系火山顶部风化壳形成阶段

图 5　准噶尔盆地西北缘 LQ 区石炭系火山演化阶段划分

Fig. 5　Classification of Carboniferous volcanic evolution stages in the LQ area, northwest margin of the Junggar Basin

火山岩的化学风化作用减弱，岩石固结程度增加，垂直渗透的大气淡水将继续沿着已有的裂缝流动，导致沿裂缝系统的溶蚀及加宽，裂缝密集段将导致原岩破碎、碎裂缝中更小的碎块及被水解出来的黏土矿物所充填，形成所谓的碎裂带或砂砾化带；但从上往下风化溶蚀加宽现象逐渐变弱，碎裂程度减弱，往下逐渐过渡至正常的火山岩（基岩）。根据裂缝的发育程度，裂缝层进一步划分为风化裂缝带和内部裂缝带（图 6）。受到风化作用影响，风化裂缝带裂缝的发育程度明显大于内部裂缝带。

对吐孜阿克内沟火山岩风化壳实测表明，沉积层厚度 0 ~ 20 m，砂化层厚度为 32 m，风化裂缝带仅出露部分，厚度为 16.7 m。但通过其他地质露头的观察发现，沉积层和砂化层的厚度分布也不稳定，在山头部位往往厚度较大，在山间厚度变小，甚至尖灭，这主要是因为后期山间地面流水的冲刷、侵蚀而成。前人[32-34]对火山岩风化壳划分方案较多，但是对砂化作用的定义、认识不统一，出现了砂质带（亚带）、砾质带（亚带）等的划分方案。按前述对砂化层的定义，砂化作用就是原岩（火山岩）原地软化、水解、酸化的过程，导致原岩疏松、易溶矿物黏土化。从这个风化作用原理及定义来看，前人[32-34]提出的砂化砾质层、砾质亚带、碎裂带均应划归为风化裂缝带，它和裂缝系统属于同一成因，只是裂缝层顶部风化作用更强烈而已。为此，本次研究遵循将今论古的法则，考虑到风化壳不同部位的风化机理及所形成的孔隙类型特点，建立起了本区火山岩风化壳的 3 层完整模式（图 6）。在这个模式中，把上覆原地物理风化的残积层、发生极短距离运移的坡积层，以及顶部长期风化的黏土植被层称之为沉积层；该层之下已软化、砂化的称为砂化层；砂化层之下就是未软化、但裂缝发育的原岩，由于这种裂缝明显受到后期大气淡水的淋滤、溶蚀等影响，所以被冠以风化裂缝带的名称（图 6）。

5.2 单井剖面中风化壳垂向分带性

根据钻井和测井资料也可以分析风化壳分带特征。6511 井钻穿了整个风化壳，且取心资料齐全。根据测井和岩心资料，将风化壳划分为砂化层、裂缝层和基岩层，其中裂缝层又可进一步划分为风化裂缝带和内部裂缝带（图 7）。

砂化层岩心以紫红色、棕红色似砂岩状安山岩风化物为主，风化物呈块状，发育多组裂缝，裂缝多数未充填，部分岩心发育多组裂缝呈碎裂状。砂化层具有较高的伽马值、较低的深电阻率值以及较低的岩石密度（图 7）。

风化裂缝带位于砂化层之下，裂缝发育。该带岩性为深灰色块状凝灰岩、安山岩，部分岩心由于裂缝较发育而呈破碎状（图 7）。测井曲线中该带具有高伽马、高深电阻率、中密度、高声波时差的特点（图 7）。岩心中的裂缝多未全充填–半充填，裂缝的密度约为 14 条/m，该带的厚度也是整个风化壳中最大的（30.2 m）。根据测井曲线可以分析认为，风化裂缝带上部的孔渗性明显好于下部。由于地表温差较大且浅部地层受地表水溶蚀作用影响较大，因此，距离地表越近越有利于风化裂缝的形成。

内部裂缝带位于风化裂缝带之下，裂缝不发育。其岩性为深灰色、灰黑色凝灰岩、安山岩，具有较高的深电阻率值和较低的伽马值（图 7）。该带在风化壳中厚度较小（5.3 m），且物性较差。

由以上分析可知，风化壳物性由下至上逐渐变好，裂缝的密度也逐渐增大。另外，大量的溶蚀孔隙也主要分布在风化壳的砂化层和风化裂缝带。结合

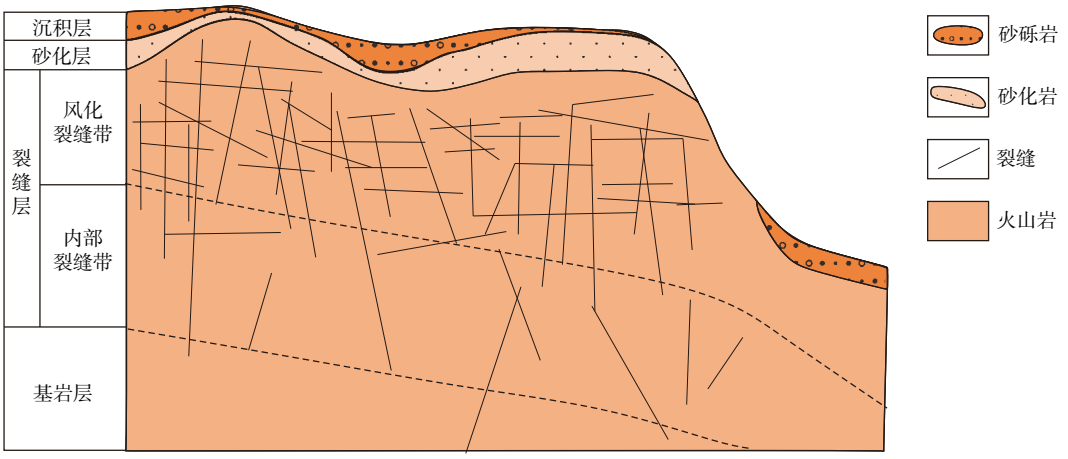


图 6　本研究提出的火山岩风化壳垂向分带模式

Fig. 6　Proposed vertical zonation model of volcanic weathering crust in the study

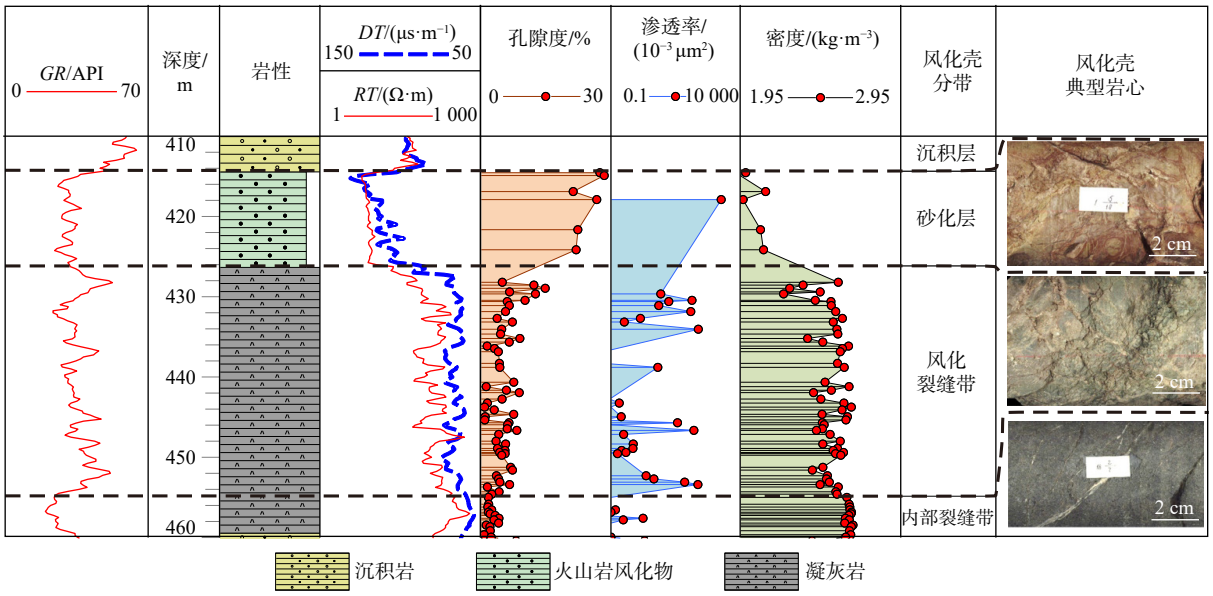


图 7　LQ 区 6511 井石炭系火山岩风化壳单井划分方案

Fig. 7　Single well division scheme of Carboniferous volcanic weathering crust in Well 6511, LQ area

油气生产情况分析可知，LQ 区约 65% 的油气分布在风化壳砂化层和风化裂缝带中。总体上，风化裂缝带的裂缝发育程度大于内部裂缝带，风化裂缝带的识别主要依据自然伽马、电阻率和声波时差。裂缝较发育的层段常具有较高的自然伽马值、较低的电阻率值和较高的声波时差值。而砂化层具有较低的自然伽马值、较低的电阻率值和最高的声波时差值，这也是单井划分风化壳的主要依据。

5.3　火山岩风化壳储层横向分带性

火山岩古潜山风化壳是一个完整的溶蚀–胶结系统[35-38]。根据风化壳储层物性和火山机构划分，火山岩风化壳横向上划分为溶蚀台地、溶蚀斜坡、溶蚀洼地等(图 8)。研究区火山口和火山通道分布在 LQ 区东部克乌断裂带一线，该区域是构造高点，为溶蚀台地。该区溶蚀–胶结作用并存，物性较差。岩心观察表明，该区岩心多为半充填–未充填，平均孔

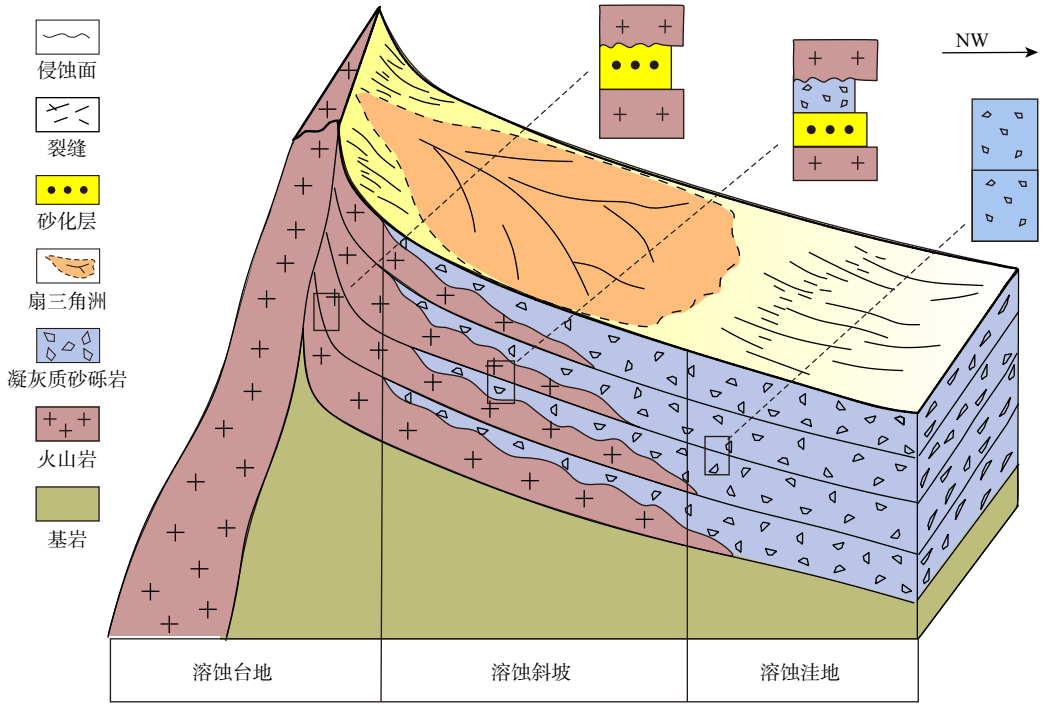


图 8　LQ 区石炭系火山岩风化壳平面分带模式

Fig. 8　Horizontal zonation model of Carboniferous volcanic weathering crust of in the LQ area

隙度为 9.4%，平均渗透率为 2.6×10^{-3} μm^2。自火山口向西过渡为溶蚀斜坡，分布在 LQ 中部和西部，该区火山岩溶蚀作用较强，裂缝充填程度较低(图 8)。岩心中裂缝倾角统计表明，裂缝倾角 30° ~ 70°，属高角度裂缝(图 9)，利于油气垂向运移。该区平均孔隙度为 12.5%，平均渗透率为 27.6×10^{-3} μm^2。溶蚀洼地分布在 LQ 区西部(图 8)，该区火山岩或沉积岩裂缝充填程度高，多为全充填。该区平均孔隙度最低，为 3.1%，平均渗透率为 0.74×10^{-3} μm^2。实际油田试油和生产证实了这种火山岩溶蚀体系划分的合理性。LQ 区中部(溶蚀斜坡)为火山岩油气藏的主要生产区，油气资源丰富，产量高；LQ 区东部(溶蚀台地)是油田火山岩油藏的次要生产区，产量仅次于 LQ 中部；LQ 区西部(溶蚀洼地)油气显示差，产量较低(图 10)。

5.4 火山岩风化壳垂向与横向分带联动机理

横向上不同溶蚀区带的风化壳垂向发育程度存在一定的差异。溶蚀台地位于高部位，常缺少砂砾岩等沉积层(图 8)，部分井中甚至缺少砂化层，仅发育裂缝层和基岩层。溶蚀斜坡常保存完整的火山岩风化壳，可以识别出沉积层、砂化层、裂缝层等，部分井缺失沉积层，但沉积层的总体厚度向溶蚀斜坡变厚。溶蚀洼地属火山岩风化物和凝灰岩的沉积区，风化作用微弱，风化壳缺失砂化层，但沉积层厚度巨大。研究区火山岩喷发自下而上呈现出逐渐减弱的趋势，火山岩的厚度减薄，但火山岩风化侵蚀作用增强(风化时长增加)，溶蚀斜坡和溶蚀台地砂化层的厚度增加，甚至部分井由于火山岩厚度较薄而完全砂化，因此缺少裂缝层。溶蚀洼地厚度逐渐增大，至火山喷发结束，该区沉积岩厚度达到最大。

6 火山岩风化壳储层有利勘探方向

前已述及，研究区火山岩储层物性的优劣决定于裂缝发育程度和裂缝充填程度[39-40]。研究区位于哈萨克斯坦板块与准噶尔板块交会碰撞的断裂带上，印支期发生左旋走滑，因此，研究区石炭系火山岩自形成之后一直受到构造应力的改造，并产生大量的断层及伴生裂缝。受到构造挤压作用影响，研究区石炭系地层不断隆升，并接受长期的强烈的风化侵蚀作用(石炭系上部缺失二叠系以及三叠系下部地层)，形成古潜山风化壳。对于这种古潜山风化壳油气藏，寻找未充填–半充填的裂缝带是预测有利目标区的重要内容。前面分析表明，火山口两侧的溶蚀斜坡是地层流体流动性最强的区域，是溶蚀最发育的区带，是裂缝充填最弱的区块，同时也是风化壳储层累计厚度最大的区域，因此，溶蚀斜坡是最有利的勘探目标区(图 10)。

7 结　论

(1)LQ 区石炭系火山岩风化壳演化划分为 4 个阶段，分别为裂隙式火山岩初始喷发阶段、火山喷发间歇阶段、火山再次活动阶段以及石炭系火山顶部风化壳形成阶段，风化壳多形成于火山喷发间歇阶段。

(2)野外剖面、测井、岩心资料分析表明，研究区火山岩风化壳具有多层性，每一个风化壳可划分出沉积层、砂化层 、裂缝层等，油气多富集在砂化层和裂缝层。

(3)LQ 区火山口分布在 LQ 区东部克乌断裂带一线，为裂隙式喷发，火山口两侧为溶蚀斜坡。

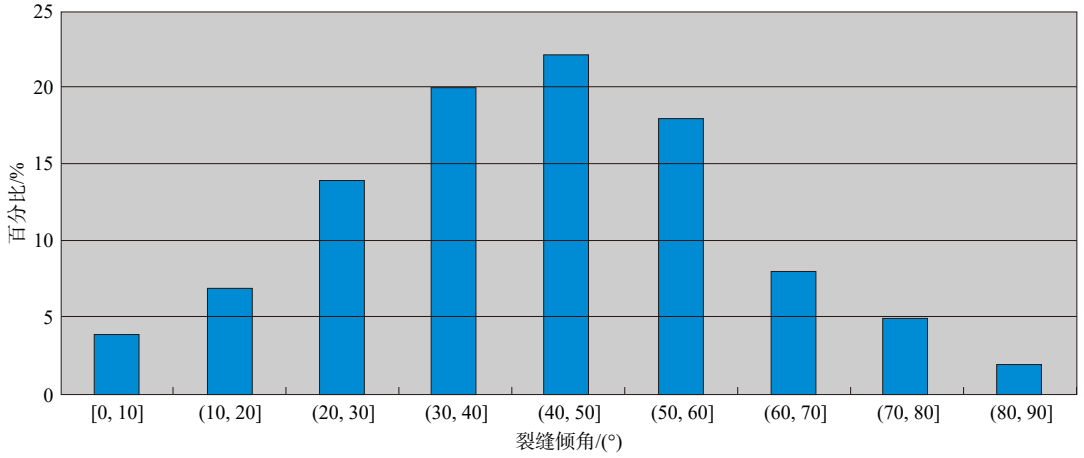


图 9　研究区火山岩裂缝倾角直方图

Fig. 9　Histogram of volcanic fracture dip angles of in the study area

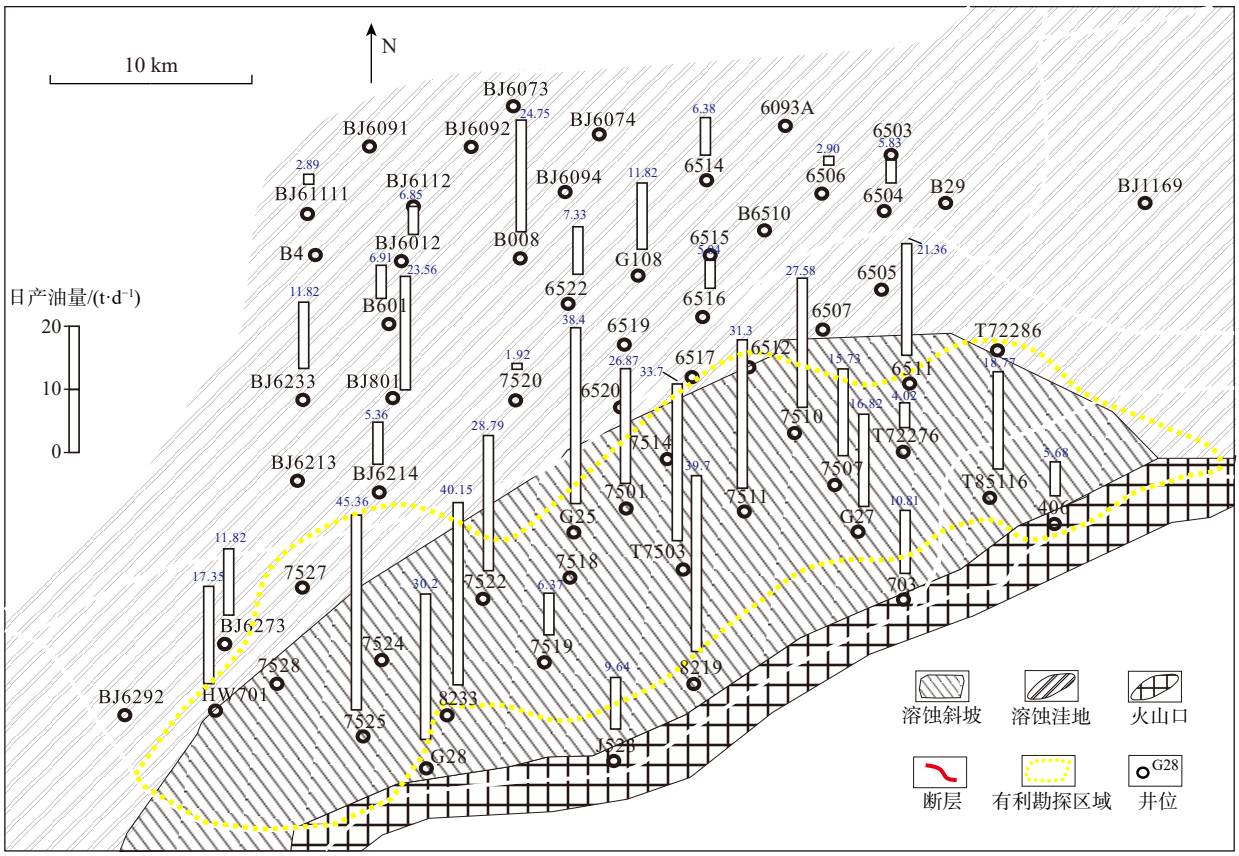


图 10　LQ 区溶蚀斜坡与溶蚀洼地试油结果及有利勘探区域分布图

Fig. 10　Test oil results in the dissolution slope and dissolution depression areas and distribution map of favorable exploration zones in the LQ area

(4)LQ 区石炭系火山岩溶蚀体系划分完全可以借鉴碳酸盐岩溶蚀体系划分方案，即划分出溶蚀台地、溶蚀斜坡和溶蚀洼地。溶蚀斜坡孔渗性最好，这主要得益于该区溶蚀作用较强，胶结作用较弱，溶蚀洼地物性最差，胶结作用最强。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] 韩慧妹，孟凡超，王千军，等. 低程度风化火山岩风化壳结构划分与主控因素：以准噶尔盆地西缘车排子凸起石炭系火山岩为例 [J]. 西安石油大学学报(自然科学版)，2024，39(2)：1-11.
HAN H M, MENG F C, WANG Q J, et al. Structure division and main controlling factors of weathered crust of low-degree weathered volcanic rocks: A case study of Carboniferous volcanic rocks in Chepaizi uplift on western margin of Junggar Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2024, 39(2): 1-11. (in Chinese with English abstract)

[2] 金帅，蒋有录，苏圣民，等. 长岭断陷龙凤山地区断裂与火石岭组火山岩油气运聚关系 [J]. 地质科技通报，2023，42(2)：137-145.
JIN S, JIANG Y L, SU S M, et al. Relationship between faults and hydrocarbon migration and accumulation in Huoshiling Formation volcanic rocks in Longfengshan area, Changling Fault Depression[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(2): 137-145. (in Chinese with English abstract)

[3] 范存辉，吴强，邓玉森，等. 火山岩风化壳储层特征及分布规律：以准噶尔西北缘中拐凸起石炭系火山岩为例 [J]. 现代地质，2017，31(5)：1046-1058.
FAN C H, WU Q, DENG Y S, et al. Reservoir characteristics and distribution rule of weathering volcanic crust: A case study of the Carboniferous volcanic rock in Zhongguai uplift, NW Junggar Basin[J]. Geoscience, 2017, 31(5): 1046-1058. (in Chinese with English abstract)

[4] 陈萍，张玲，王惠民. 准噶尔盆地油气储量增长趋势与潜力分析 [J]. 石油实验地质，2015，37(1)：124-128.
CHEN P, ZHANG L, WANG H M. Reserves growth trend and potential analysis of Junggar Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(1): 124-128. (in Chinese with English abstract)

[5] 丁心鲁. 准噶尔盆地东部石炭纪火山岩断裂及裂缝构造特征研究 [D]. 西安：西北大学，2012.
DING X L. The researchment of the characteristics of the Carboniferous volcanic fracture and crack structure in eastern Junggar Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2012. (in Chinese with English abstract)

[6] 杜金虎，匡立春，梁世君，等. 新疆北部石炭系火山岩油气勘探 [M]. 北京：石油工业出版社，2010.

DU J H, KUANG L C, LIANG S J, et al. Volcanic hydrocarbon exploration of Carboniferous formation in northern Xinjiang[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.（in Chinese）

[7] 胡志伟, 徐长贵, 杨波, 等. 渤海海域蓬莱 9-1 油田花岗岩潜山储层成因机制及石油地质意义 [J]. 石油学报, 2017, 38(3): 274-285.
HU Z W, XU C G, YANG B, et al. Reservoir forming mechanism of Penglai 9-1 granite buried-hills and its oil geology significance in Bohai Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(3): 274-285.（in Chinese with English abstract）

[8] 李建平, 周心怀, 王清斌. 表生喀斯特作用对蓬莱花岗岩潜山油田风化壳储层发育的控制作用 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2014, 41(5): 556-566.
LI J P, ZHOU X H, WANG Q B. Control of epigenic karstification over weathering crust reservoir development of Penglai granite buried hill oilfield, Bohai Bay Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2014, 41(5): 556-566.（in Chinese with English abstract）

[9] 王幼麟. 三峡工程基岩风化壳利用的微观研究 [J]. 长江科学院院报, 1992, 9(增刊 1): 65-71.
WANG Y L. A microscopic study on use of weathered crust of bed rock of the Three Gorges Project[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1992, 9(S1): 65-71.（in Chinese with English abstract）

[10] 王明臣, 官大勇, 刘朋波, 等. 渤海蓬莱 9-1 油藏花岗岩储层特征与成储化条件分析 [J]. 地质科技情报, 2016, 35(6): 83-89.
WANG M C, GUAN D Y, LIU P B, et al. Characteristics and formation conditions of the Penglai 9-1 granite oil reservoir in Bohai Gulf Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(6): 83-89.（in Chinese with English abstract）

[11] WANG Y, YANG R C, SONG M S, et al. Characteristics, controls and geological models of hydrocarbon accumulation in the Carboniferous volcanic reservoirs of the Chunfeng oilfield, Junggar Basin, northwestern China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 94: 65-79.

[12] 陈春勇. 准噶尔盆地西泉地区石炭系火山岩型油藏形成及分布 [J]. 沉积学报, 2019, 37(1): 212-223.
CHEN C Y. The formation and distribution of volcanic reservoirs in the Xiquan area of Junggar Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(1): 212-223.（in Chinese with English abstract）

[13] 陈薇, 司学强, 智凤琴, 等. 三塘湖盆地卡拉岗组火山岩储层成岩作用 [J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2013, 35(4): 35-42.
CHEN W, SI X Q, ZHI F Q, et al. Diagenesis of volcanic rock reservoir in Kalagang Formation of Carboniferous, Santanghu Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2013, 35(4): 35-42.（in Chinese with English abstract）

[14] 崔鑫, 李江海, 王运增, 等. 海拉尔盆地苏德尔特构造带基底裂缝特征及控制因素 [J]. 地质论评, 2016, 62(5): 1257-1270.
CUI X, LI J H, WANG Y Z, et al. Characteristic and control factors of fracture development in the basement of Sudeerte structural belt, Hailar Basin[J]. Geological Review, 2016, 62(5): 1257-1270.（in Chinese with English abstract）

[15] 代静静. 西泉地区石炭系安山岩、火山角砾岩储集空间特征及成岩演化 [D]. 西安: 西北大学, 2018: 52-57.
DAI J J. Research on reservoir characteristics and diagenetic evolution of Carboniferous andesite and volcanic breccia in Xi'quan area, Junggar Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2018: 52-57.（in Chinese with English abstract）

[16] 唐勇, 郭文建, 王霞田, 等. 玛湖凹陷砾岩大油区勘探新突破及启示 [J]. 新疆石油地质, 2019, 40(2): 127-137.
TANG Y, GUO W J, WANG X T, et al. A new breakthrough in exploration of large conglomerate oil province in Mahu Sag and its implications[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(2): 127-137.（in Chinese with English abstract）

[17] SUN J, LIU Z, ZHANG S, et al. Large-scale removal of lithosphere underneath the North China Craton in the Early Cretaceous: Geochemical constraints from volcanic lavas in the Bohai Bay Basin[J]. Lithos, 2017, 292: 69-80.

[18] 雷德文, 陈刚强, 刘海磊, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷大油(气)区形成条件与勘探方向研究 [J]. 地质学报, 2017, 91(7): 1604-1619.
LEI D W, CHEN G Q, LIU H L, et al. Study on the forming conditions and exploration fields of the Mahu giant oil(gas) province, Junggar Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(7): 1604-1619.（in Chinese with English abstract）

[19] 尤新才, 晏奇, 李梦瑶, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷南部风城组火山岩油藏特征与聚集模式 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(5): 131-145.
YOU X C, YAN Q, LI M Y, et al. Characteristics and accumulation mode of volcanic rock reservoir of the Fengcheng Formation in the southern of Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(5): 131-145.

[20] 肖丽华, 施立冬, 王建伟, 等. 火山岩储层质量预测方法探讨: 以松辽盆地徐家围子断陷为例 [J]. 地质科学, 2014, 49(4): 1287-1301.
XIAO L H, SHI L D, WANG J W, et al. Study on volcanic reservoir quality prediction: A case study of Xujiaweizi fault depression, Songliao Basin[J]. Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica), 2014, 49(4): 1287-1301.（in Chinese with English abstract）

[21] 陈建平, 王绪龙, 邓春萍, 等. 准噶尔盆地油气源、油气分布与油气系统 [J]. 地质学报, 2016, 90(3): 421-450.
CHEN J P, WANG X L, DENG C P, et al. Oil and gas source, occurrence and petroleum system in the Junggar Basin, Northwest China[J]. Acta Geological Sinica, 2016, 90(3): 421-450.（in Chinese with English abstract）

[22] 夏世威, 马强, 黄传炎, 等. 准噶尔盆地东部吉木萨尔–吉南凹陷构造演化及原型盆地恢复 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(3): 170-179.
XIA S W, MA Q, HUANG C Y, et al. Tectonic evolution and prototype basin reconstruction in the Jimsar and Jinan depressions, eastern Junggar Basin[J]. Bulletin of Geological and Technology, 2024, 43(3): 170-179.（in Chinese with English abstract）

[23] 支东明. 玛湖凹陷百口泉组准连续型高效油藏的发现与成藏机制 [J]. 新疆石油地质, 2016, 37(4): 373-382.
ZHI D M. Discovery and hydrocarbon accumulation mechanism of quasi-continuous high-efficiency reservoirs of Baikouquan Formation in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology,

2016, 37(4): 373-382. (in Chinese with English abstract)

[24] 代诗华, 罗兴平, 王军, 等. 火山岩储集层测井响应与解释方法 [J]. 新疆石油地质, 1998, 19(6): 465-469.
DAI S H, LUO X P, WANG J, et al. Log response and interpretation of velcanic rock reservoir[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1998, 19(6): 465-469. (in Chinese with English abstract)

[25] 邓西里, 宋新民, 李顺明, 等. 准噶尔盆地中拐凸起东斜坡带火山岩储层岩相特征及主控因素 [J]. 现代地质, 2015, 29(6): 1387-1397.
DENG X L, SONG X M, LI S M, et al. Lithological facies characteristics and predominant factors of volcanic reservoirs in eastern slope belt of Zhongguai uplift, Junggar Basin[J]. Geoscience, 2015, 29(6): 1387-1397. (in Chinese with English abstract)

[26] WANG P, CHEN S M. Cretaceous volcanic reservoirs and their exploration in the Songliao Basin, Northeast China[J]. AAPG Bulletin, 2015, 99(3): 499-523.

[27] 杜洋, 罗明高, 李青, 等. 北三台地区火山岩储层特征及成藏模式研究 [J]. 天然气勘探与开发, 2011, 34(1): 9-12.
DU Y, LUO M G, LI Q, et al. Reservoir characteristics and reservoir-forming mode of volcanic rock in Beishantai area[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2011, 34(1): 9-12. (in Chinese with English abstract)

[28] 杜洋, 罗明高, 李青, 等. 北三台地区火山岩储层特征 [J]. 特种油气藏, 2010, 17(5): 48-50.
DU Y, LUO M G, LI Q, et al. Characteristics of volcanic reservoirs in the Beisantai area[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2010, 17(5): 48-50. (in Chinese with English abstract)

[29] 范存辉. 准噶尔西北缘中拐凸起石炭系火山岩储层综合研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2015: 72-88.
FAN C H. The comprehensive research on Carboniferous volcanic rock reservoir of Zhongguai uplift in northwestern margin of Junggar Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015: 72-88. (in Chinese with English abstract)

[30] 范光旭, 朱卡, 汪莉彬, 等. 西泉地区石炭系内幕型火山岩储集层特征及成藏模式 [J]. 新疆石油地质, 2018, 39(4): 401-408.
FAN G X, ZHU K, WANG L B, et al. Characteristics and hydrocarbon accumulation models of Carboniferous inside-type volcanic reservoir in Xiquan area, Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018, 39(4): 401-408. (in Chinese with English abstract)

[31] 冯玉辉, 于小健, 黄玉龙, 等. 辽河盆地新生界火山喷发旋回和期次及其油气地质意义 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(5): 50-57.
FENG Y H, YU X J, HUANG Y L, et al. Eruption cycles and stages of Cenozoic volcanic rocks and their significance to hydrocarbon accumulations in Liaohe Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(5): 50-57. (in Chinese with English abstract)

[32] 冯子辉, 印长海, 齐景顺, 等. 大型火山岩气田成藏控制因素研究: 以松辽盆地庆深气田为例 [J]. 岩石学报, 2010, 26(1): 21-32.
FENG Z H, YIN C H, QI J S, et al. Main factors controlling hydrocarbon accumulation in large volcanic gas fields: A case study of the Qingshen gas field in the Songliao Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(1): 21-32. (in Chinese with English abstract)

[33] 高兴军, 闫林辉, 田昌炳, 等. 长岭气田营城组火山岩储层特征及分类评价 [J]. 天然气地球科学, 2014, 25(12): 1951-1961.
GAO X J, YAN L H, TIAN C B, et al. Characteristics and classification evaluation of volcanic rock reservoir in Yingcheng Formation of Changling gasfield[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(12): 1951-1961. (in Chinese with English abstract)

[34] 高有峰, 刘万洙, 纪学雁, 等. 松辽盆地营城组火山岩成岩作用类型特征及其对储层物性的影响 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(6): 1251-1258.
GAO Y F, LIU W Z, JI X Y, et al. Characteristics of diagenesis types of volcanic rocks in the Yingcheng Formation of the Songliao Basin and their impact on reservoir properties[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2007, 37(6): 1251-1258. (in Chinese with English abstract)

[35] 宫清顺, 黄革萍, 孟祥超, 等. 三塘湖盆地火山岩岩性识别方法 [J]. 中国石油勘探, 2012, 17(3): 37-41.
GONG Q S, HUANG G P, MENG X C, et al. Methods for lithology discrimination of volcanics in Santanghu Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2012, 17(3): 37-41. (in Chinese with English abstract)

[36] 郭永峰, 罗静兰, 刘化清, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷中新生代火成岩储层特征 [J]. 特种油气藏, 2012, 19(4): 33-36.
GUO Y F, LUO J L, LIU H Q, et al. Characteristics of the Mesozoic-Cenozoic igneous reservoirs in the Qikou Depression of Bohai Bay Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(4): 33-36. (in Chinese with English abstract)

[37] 郝彬. 火山旋回划分方案对比及在储层预测中的意义 [J]. 特种油气藏, 2014, 21(2): 70-74.
HAO B. Comparison of volcanic cycle division programs and its significance for reservoir prediction[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(2): 70-74. (in Chinese with English abstract)

[38] 何贤英, 刘勇, 许学龙, 等. 西泉地区石炭系火山岩储层主控因素及有利储层预测 [J]. 岩性油气藏, 2017, 29(3): 42-51.
HE X Y, LIU Y, XU X L, et al. Controlling factors of Carboniferous volcanic reservoirs and favorable reservoir prediction in Xiquan area, Junggar Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(3): 42-51. (in Chinese with English abstract)

[39] 邹才能, 侯连华, 陶士振, 等. 新疆北部石炭系大型火山岩风化体结构与地层油气成藏机制 [J]. 中国科学(地球科学), 2011, 41(11): 1613-1626.
ZOU C N, HOU L H, TAO S Z, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism and structure of large-scale volcanic weathering crust of the Carboniferous in northern Xinjiang, China[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2011, 41(11): 1613-1626. (in Chinese with English abstract)

[40] 汪勇, 杨少春, 樊爱萍, 等. 准噶尔盆地PX地区石炭系火山岩储层储量参数研究 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(3): 31-41.
WANG Y, YANG S C, FAN A P, et al. Reserves parameters of Carboniferous volcanic rock reservoirs in PX Block, Jungger Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(3): 31-41. (in Chinese with English abstract)

Summary for “准噶尔盆地西北缘 LQ 区石炭系火山岩风化壳储层分带性及勘探方向”

Zonality and exploration direction of Carboniferous volcanic weathering crust reservoirs in the LQ area, northwest margin of the Junggar Basin

SHI Le*，LI Ting，DU Yinyu，TONG Kun，MA Peng

The Second Oil Production Plant, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay Xinjiang 834000, China

* Corresponding author， E-mail：shile6@petrochina.com.cn

Abstract：In the LQ area of the northwest margin of the Junggar Basin, large-scale volcanic weathering crust oil and gas reservoirs have developed. Unlike volcanic weathering crust reservoirs in other regions, this particular reservoir is characterized by multiple vertical layers and strong heterogeneity, with distinct zonation on the horizontal plane. [**Objective**] The vertical and horizontal zonation of this volcanic weathering crust reservoir and the distribution patterns of favorable reservoirs remain unclear, hindering further exploration of volcanic oil and gas in the area. Therefore, an in-depth analysis of this unique volcanic weathering crust reservoir is necessary. [**Methods**] This study analyzes the formation process of the weathered volcanic crust, its vertical and horizontal zonation, and favorable exploration directions, based on data from well logging, drilling, lithology, and field geological profiles. [**Results**] The evolution of the Carboniferous volcanic weathering crust in the study area can be divided into four stages: The initial fissure-type volcanic eruption stage, the intermittent volcanic eruption stage, the renewed volcanic activity stage, and the weathering crust formation stage at the top of the Carboniferous volcanic layer. The volcanic weathering crust reservoir primarily formed during the intermittent volcanic eruption stages, with weathering materials consisting of volcanic rocks from the eruption periods and sedimentary rocks associated with volcanic activity. Multiple volcanic eruption and weathering episodes resulted in the formation of multilayered weathering crusts within the volcanic rocks. Each weathering crust episode can be divided, from bottom to top, into a bedrock layer, a fracture layer, a sandy layer, and a sedimentary layer. Among these, the fracture and sandy layers exhibit better reservoir properties and are the main oil and gas reservoirs. Horizontally, the weathering crust is divided into a dissolution platform area, dissolution slope area, and dissolution depression area. The dissolution slope area, where fractures and dissolution pores are most developed, represents the most favorable exploration target. In contrast, the dissolution depression area experiences severe cementation, resulting in the poorest reservoir properties. [**Conclusion**] The research results can provide important guidance and insights for the exploration of volcanic oil and gas.

Key words: the northwest margin of the Junggar Basin；weathering crust wind band；sanding layer；weathered fracture zones；dissolution slope area；volcanic werahering crust reservoir

Received：2024-01-16；Revised：2024-06-03；Accepted：2024-12-05

doi：10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240018