

准噶尔盆地车排子地区石炭系顶部风化壳结构及其控藏作用

宋明水¹,赵乐强²,吴春文²,秦峰²,曾治平²

(1. 中国石化胜利油田分公司,山东 东营 257015; 2. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院西部分院,山东 东营 257015)

摘要:基于实钻资料与地质综合研究,系统分析了准噶尔盆地车排子地区石炭系顶部风化壳结构地质特征及其发育主控因素,总结了风化壳结构发育模式与控藏作用。研究认为,车排子地区石炭系顶部风化壳垂向上具层状结构,自上而下依次为风化粘土层、水解层、淋滤层。风化壳结构形成主要受控于原岩岩性、间断时间和古地形三大因素。风化粘土层和水解层起着封盖、遮挡作用,分布较广的淋滤层具有较好的储集性能,利于油气横向输导。在有水解层或风化粘土层条件下,形成“毯砂”“壳”双输导模式;反之,则油气上窜或下灌,形成单一输导体。在其控制下,该区石炭系顶部风化壳发育壳内、毯砂前缘和复合岩性3种油气藏分布类型。

关键词:风化壳结构;不整合;油气成藏;火山岩;石炭系;车排子地区;准噶尔盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Structure and reservoir-controlling of top Carboniferous weathering crust in Chepaizi area, Junggar Basin

Song Mingshui¹, Zhao Leqiang², Wu Chunwen², Qin Feng², Zeng Zhiping²

(1. Shengli Oilfield Branch, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China;

2. West Branch of Research Institute of Exploration and Development, Shengli Oilfield Branch, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China)

Abstract: Based on drilling data and integrated geological research, structural characteristics and main controlling factors of the weathering crust on top Carboniferous in Chepaizi area of the Junggar Basin were systematically analyzed. The development model of weathering crust structure and its reservoir-controlling was summarized. Results show that the weathering crust features in vertically layered structure, consisting of weathered clay layer, hydrolysis layer and weathering leached layer in top-down order. The weathered clay layer is thin and has limited areal distribution and poor physical property. The hydrolysis layer is thicker and has poor physical property but wide distribution in most areas. The weathering leached layer is very thick and has better physical property and extensive distribute in the whole area. The structure of the weathering crust is mainly controlled by facies of mother rocks, hiatus time and paleotopography. The weathered clay and hydrolysis layer serve as cap rocks for petroleum reservoir, while the weathering leached layer has favorable physical property and thus can serve as lateral migration pathway on top of the Carboniferous. Under the condition of the hydrolysis layer or weathered clay layer, double migration path model can be built which includes carpet sand and weathering crust. Otherwise, there would be one migration path with oil and gas channeling or irrigating. Under the control of weathering crust structure, there developed three types of reservoirs including weathered crust, carpet tip and composite lithology in the Carboniferous.

Key words: weathering crust structure, unconformity, oil/gas accumulation, volcanic rock, Carboniferous, Chepaizi area, Junggar Basin

风化壳结构及其控藏作用一直是地质研究中的热点和难点。国内外学者对此开展了大量研究,特别是在风化壳的结构特征、发育模式及其控藏作用等方面

取得了一系列重要进展^[1-16],对风化壳油气勘探起到了重要推动作用。以往研究多集中在碳酸盐岩类型上^[2-5,8-10]。近些年,火山岩、变质岩和碎屑岩风化壳

收稿日期:2015-03-01;修订日期:2016-01-02。

第一作者简介:宋明水(1964—),男,博士、教授级高级工程师,油田勘探与管理。E-mail:songmingshui.slof@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05002-002);中石化股份公司项目(P14066)。

也开始被广泛关注^[11-16],但认识程度上却明显低得多。

对火山岩风化壳的研究主要集中在风化作用对岩石物性改造作用^[11-13],包括火山岩风化壳结构模式和结构识别标志等。准噶尔盆地西北缘车排子地区石炭系出露时间长、岩性复杂,通过对实钻资料分析研究,结合该区风化壳油藏特征,对开展该区石炭系风化壳结构模式进行了划分方法研究。

风化壳对油气运聚具有双重作用,既可做为运移通道,又可起到封堵作用,主要与其结构、岩性密切相关^[1,3-5,7,14-16]。火山岩风化壳的结构与成藏关系较弱主要是因为对风化壳结构的研究与其成因上还存在众多分歧^[11-13],加之不同火山岩性对风化壳结构的控制作用,使风化壳与成藏作用之间关系更加复杂。风化壳对油气运移聚集早期认为具有重要的作用^[1,3,4],随着研究的深入发现风化壳对油气运移聚集既有作用又有一定的局限性^[5,7,16]。这些研究多针对碳酸盐岩、碎屑岩和变质岩,对火山岩风化壳控藏作用研究相对较少。火山岩风化壳及其控藏作用目前有一些关键问题尚未很好解决或有待进一步深化认识,如火山岩风化壳结构特征、岩相组成复杂区风化壳结构发育模式及其控藏作用等,这些问题的解决对于指导相应火山岩地层的油气勘探具有重要意义。车排子地区近几年在石炭系顶部风化壳勘探获得重要发现,探明与控制石油地质储量约 1.2×10^8 t,展现出该层系良好的勘探前景。本文通过对该区石炭系顶部风化壳结构地质特征研究,在剖析风化壳形成主控因素的基础上,总结其发育模式,探究其控藏作用。

1 地质概况

车排子凸起区位于准噶尔盆地西部隆起,其西面和北面邻近扎伊尔山,南面为四棵树凹陷,向东以红车断裂带与昌吉凹陷相接。西部隆起为石炭纪末期开始发育的继承性古隆起,直到侏罗纪受区域性伸展作用的影响,部分古老断裂带复活,局部有冲积扇与河流沉积。早白垩世准噶尔盆地稳定沉降,车排子部分地区接受沉积。古近纪—更新世盆地西缘处于压扭构造环境,沉降中心向西迁移,车排子地区大范围接受沉积^[17-18]。石炭系原岩主要为玄武岩、安山岩、流纹岩、凝灰岩和泥岩,地层经历了长期暴露,为风化壳的形成提供了条件。

2 风化壳结构地质特征

车排子地区石炭系遭受长期风化剥蚀,其顶部风

化壳广泛发育。从该区数十口井的钻井、录井、测井和岩心资料分析来看,其石炭系顶部风化壳垂向上具层状结构,“三分法”更为适用^[12],自上而下依次为风化粘土层、水解层、淋滤层。本文主要从岩石学、矿物学、元素变化及物性上对每一层结构进行剖析。

2.1 风化粘土层

风化粘土层位于石炭系顶部风化壳最上部,在不整合面以下,是在物理风化的基础上,在生物化学风化作用改造下形成的细粒残积物^[10-11]。该区风化粘土层主要为红色、紫红色、灰绿色泥岩(图1a),矿物完全蚀变,以高岭石、伊利石等粘土矿物为主,厚度为0~20 m。风化粘土层富含高岭石等粘土矿物,在其后的压实作用等成岩作用下易形成致密粘土岩,孔隙和裂缝发育程度差,孔隙度和渗透率都极低。车排子地区风化粘土层孔隙度最大为2.22%,平均为0.1%,渗透率普遍小于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

在表生作用环境下火山岩中不同矿物的析出程度和速度不同^[19-21]。风化粘土层中地球化学元素中Fe、Al、Ti等难迁移元素一般相对富集,Ca、Mg、K、Na等易迁移元素明显减少。如排60井石炭系顶部风化粘土层中Al、Fe、Ti等元素的氧化物含量分别为27%、19%和1.9%,而Ca元素的含量基本为0(图2)。性质不同的风化粘土层之间,元素富集或贫化存在一些差异。红色和紫红色泥岩中Mn和Fe富集程度一般要高于铝土质泥岩,而Al的富集程度则相反。岩石风化程度常用化学蚀变指数(CIA)来刻画^[22]。当岩石未发生风化时,CIA值一般低于50,当完全风化时,CIA值接近100。根据排60等井石炭系顶部岩心样品的分析,该区风化粘土层CIA值均在85以上,反映了其风化程度高。

风化粘土层测井曲线相对于原岩和半风化岩石表现为“两低三高”特征:即低电阻、低密度、高自然伽马、高声波时差、高中子值(图2)。

2.2 水解层

水解层是火山岩强蚀变后的产物,以火山岩细小颗粒和泥岩为主。岩石常呈紫红色、灰绿色、杂色(图1b—d),粘土化程度达50%~80%,岩石因强氧化和蚀变作用,岩石破碎,常呈角砾状构造(图1e),网状缝发育(图1f),岩石密度相对较小,厚度8~92 m。岩石总体氧化性强,蚀变为赤褐铁矿(图1g),长石发生粘土化,斜长石见绢云母化(图1h),暗色矿物发生绿泥石化(图1b—d)、帘泥石化(图1i)等。水解层CIA值均在主要为55~90,反映了原岩总体风化程度较高。

该地区石炭系水解层裂缝、孔隙发育,但由于位于

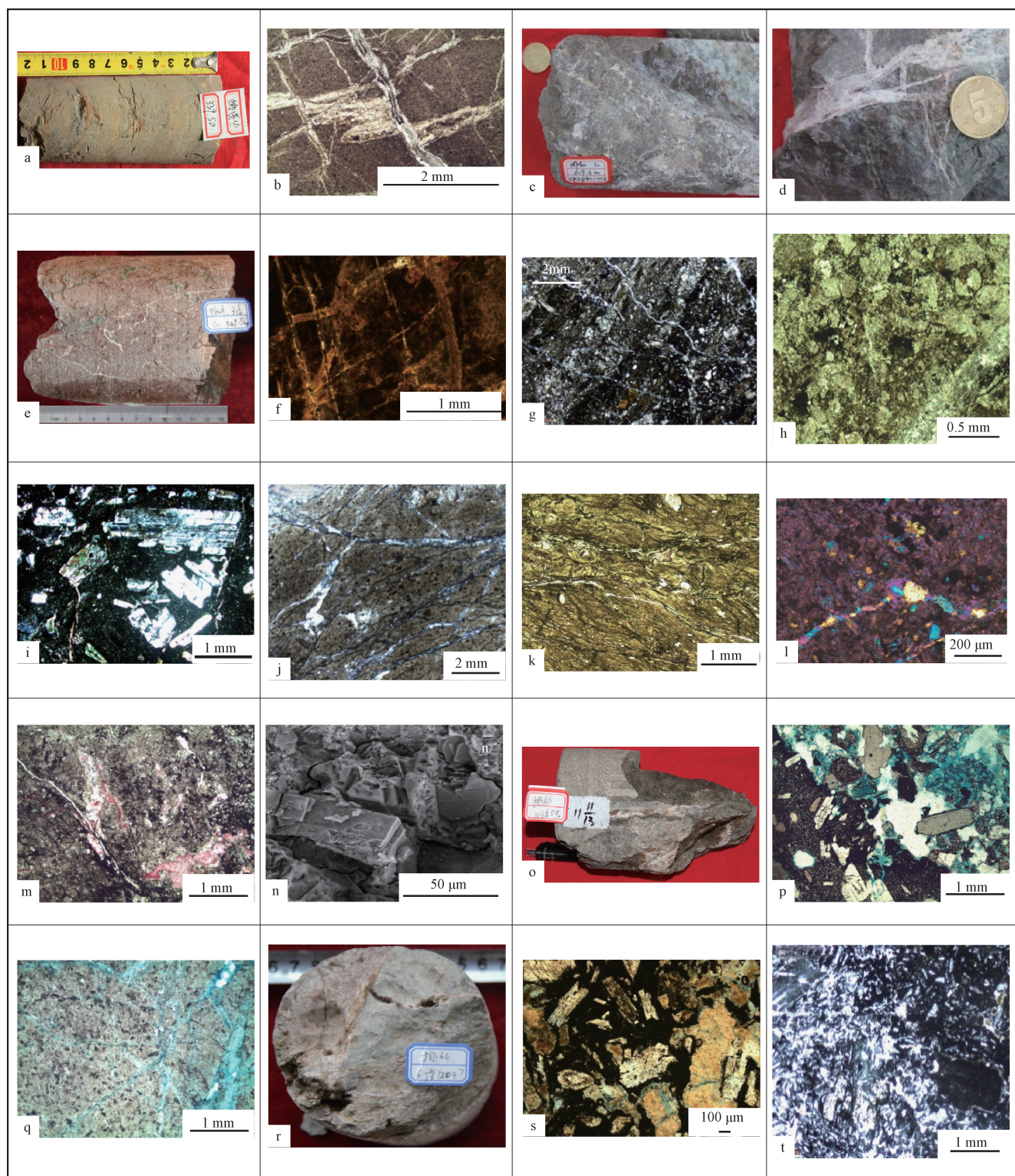


图1 准噶尔盆地车排子地区石炭系风化壳岩石学特征

Fig. 1 Petrological characteristics of the Carboniferous weathering crust in Chepaizi area, Junggar Basin

- a. 风化粘土层,排浅4井,埋深339.5 m;b. 裂缝方解石,泥质、氧化铁充填,排浅4井,埋深332.6 m;c. 角砾状沉凝灰岩,排60井,埋深619.50 m;d. 晶屑凝灰岩,排60井,埋深622.40 m;e. 安山岩,排66井,埋深949.96 m;f. 沉凝灰岩,单偏光,排60井,埋深619.50 m;g. 角砾状凝灰岩,单偏光,赤褐铁矿化,排60井,埋深619.25 m;h. 长石绢云母化、高岭土化,单偏光,排60井,埋深620.9 m;i. 角闪石帘泥石化,正交偏光,排66井,埋深950.8 m;j. 风化网状缝,泥质铁质充填,正交偏光,排60井,埋深618.5 m;k. 网状裂缝发育,主要为柱纤状方解石充填,另见亮晶方解石和鳞片状泥质充填,单偏光,排60井,埋深621.40 m;l. 凝灰岩,充填残余裂缝,正交偏光,排60井,埋深618.0 m;m. 凝灰岩,溶蚀孔隙,单偏光,排60井,埋深619.5 m;n. 杏仁玄武岩,长石溶蚀,排661井,埋深1 057.8 m;o. 安山岩,排666井,埋深1 066.59 m;p. 安山岩,杏仁被方解石和绿泥石等充填,正交偏光,排66井,埋深1 033.76 m;q. 溶蚀、微裂缝,单偏光,排60井,埋深766.5 m;r. 角砾岩,溶蚀孔洞,排66井,埋深1 204.7 m;s. 安山岩,晶体微裂缝,排661井,埋深1 119 m;t. 安山岩,暗色矿物溶蚀,正交偏光,排661井,埋深1 119.8 m

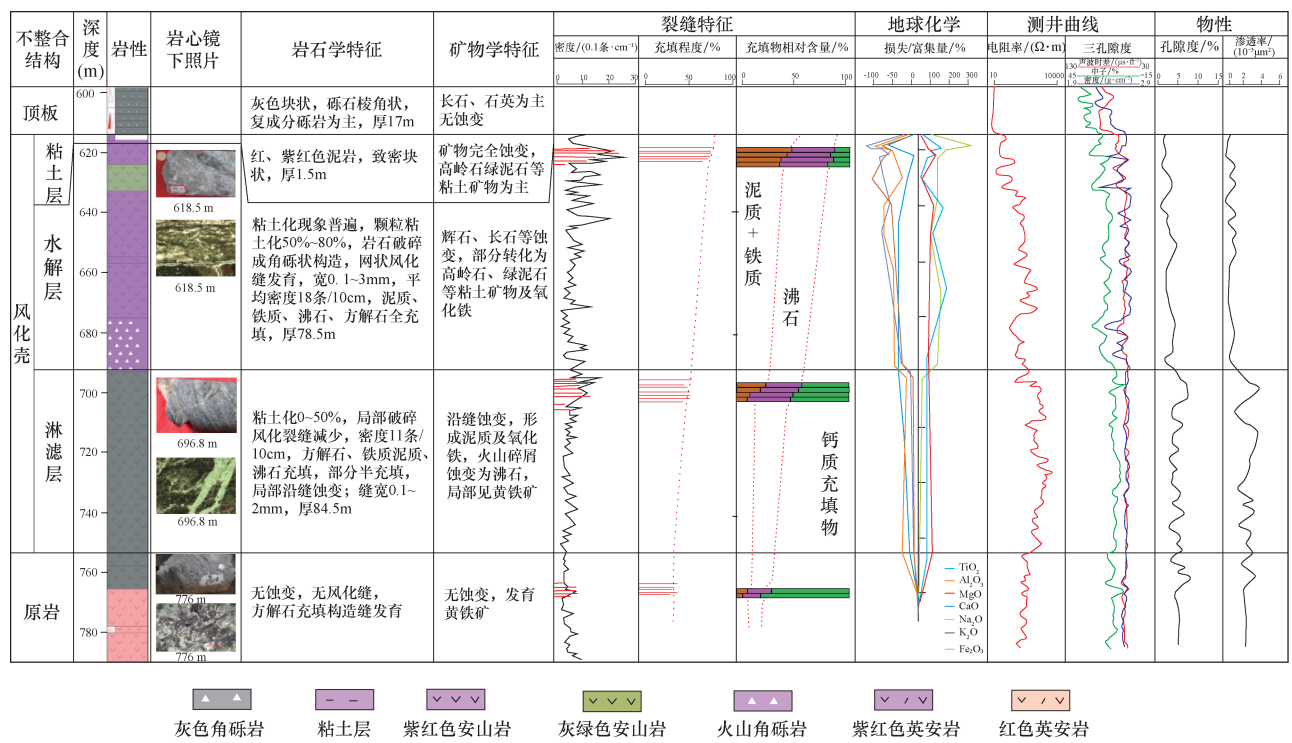


图 2 准噶尔盆地车排子地区排 60 井石炭系顶部风化壳结构特征
Fig. 2 Characteristics of the weathering crust structure in Well Pai-60 on the top of the Carboniferous in Chepaizi area, Junggar Basin

顶部或距顶面较近,孔隙和裂缝容易被上覆较细的沉积充填形成顶部填积层,裂缝充填程度高(图 2)。缝间充填风化形成的泥质和细粒岩石(图 1j),风化剥蚀深埋后又发生化学充填(图 1k,l),化学充填比例相对于风化粘土层更高(图 2),后期溶蚀作用较弱。其他类型的孔隙也有发育,局部半风化角砾岩见粒间充填残余孔隙(图 1m),另见暗色矿物溶孔和长石溶蚀孔(图 1n)。由于孔隙和裂缝小、连续性差,物性总体较差。该地区水解层孔隙度最大为 5.88%,平均为 3.56%,最大渗透率为 $0.36 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均渗透率为 $0.012 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

水解层岩石蚀变程度高,被充填的次生孔隙和裂缝非常发育。相对于淋滤层,其岩石组合测井特征表现为声波时差和中子大、密度小,中子测井孔隙度相对于密度测井孔隙度增大,电阻率值较低(图 2)。

2.3 淋滤层

淋滤层是火山岩较弱蚀变后的产物,以火山岩碎块为主。岩石较致密,呈灰-深灰色(图 1o),风化作用较弱,粘土化仅 20%~50%,局部破碎,厚度为 20~225 m。岩性主要为安山岩、安山玄武岩、凝灰岩、玄武岩、英安岩,泥岩淋滤层不太发育。岩石总体氧化程度较弱,长石主要发生粘土化,斜长石见绢云母化,暗色矿物蚀变为绿泥石和形成溶孔。安山玄武岩、玄武岩见气孔和杏仁构造,杏仁为方解石和绿泥石等充填(图 1p)。

淋滤层由于流体系统互连通,离子迁移较快,流体溶蚀性较强,风化作用影响较弱且交代充填作用较弱,导致该结构层渗透性最好。淋滤层裂缝发育略少于水解层,但充填程度较低,充填物以化学物充填为主(图 2),其中,半充填缝更易发生溶蚀(图 1q,r)。同时,其他类型的孔隙也较为发育,包括晶体收缩产生的晶体缝(图 1s)、火山角砾岩粒间充填残余孔隙、玄武岩气孔充填残余孔隙,溶蚀及杏仁收缩孔缝。另外,还存在暗色矿物溶孔、长石溶蚀孔(图 1t)。研究区淋滤层有效储层孔隙度主要为 10%~18.5%,溶蚀孔发育区孔隙度可达 20%以上,平均孔隙度为 8.27%,有效储层渗透率分布在 $(0.1 \sim 500) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 3)。物性受岩性、岩相影响明显,物性从好到差依次为:安山岩、玄武岩、凝灰岩、英安岩。

风化壳淋滤层物性好于水解层的主要原因在于其孔隙发育及结构、裂缝充填物以及次生改造作用不同。水解层孔隙类型以风化淋滤残余孔隙、溶蚀孔隙为主,淋滤层以次生溶蚀孔、裂缝为主。风化壳水解层网状裂缝发育,主要为方解石、泥质铁质和沸石充填,充填程度高,溶蚀孔洞发育少,而风化壳淋滤层裂缝主要为方解石充填,少量半充填缝,溶蚀孔洞较发育。

淋滤层测井特征相对于水解层、风化粘土层声波时差和中子相对较小、密度较大,电阻率值较高,相对于原岩声波时差、中子相对较大、密度较小,电阻率值较低(图 2)。

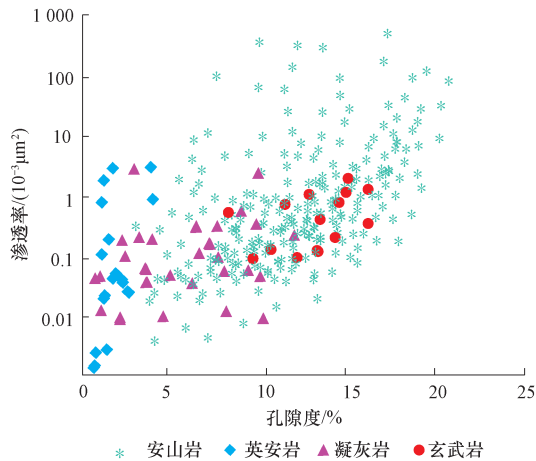


图3 准噶尔盆地车排子地区石炭系孔隙度-渗透率交会图

Fig. 3 Porosity vs. permeability in the Carboniferous in Chepaizi area, Junggar Basin

3 风化壳结构形成主控因素及发育模式

车排子地区石炭系顶部风化壳结构空间发育与原岩岩性、间断时间和古地形三大因素关系密切。在多种因素共同作用下,形成了现风化壳。

3.1 风化壳结构形成主控因素

3.1.1 原岩岩性

原岩的矿物成分、可溶组分的含量都影响风化粘土层发育程度和风化岩石规模^[13]。火山岩中不稳定矿物含量多,易蚀变,在暴露至地表并经历了较深的风化作用下,达到成土阶段,顶部易于形成风化粘土层,往深部由于风化作用减弱,形成水解层、淋滤层。

火山岩在风化过程中易于形成风化裂缝,因此火山岩风化壳厚度远大于碎屑岩风化壳厚度。通过对车排子地区几十口井石炭系风化壳的统计,在古坡度一定的条件下不同岩性风化壳厚度差异较大,厚度

从大到小依次为:安山岩、英安岩、凝灰岩、泥岩(图4)。这表明在风化过程中,火山岩易于泥岩风化,偏基性岩石易于偏酸性岩石,这与偏基性岩石含有更多的易风化矿物有关。由于泥岩与凝灰岩本身就是颗粒细小的偏泥质物质,是最易形成风化粘土层,而风化粘土为细粒物质,极易堵塞微裂缝、微孔隙,阻碍风化作用进一步进行,因此泥岩与凝灰岩易于形成风化粘土层,但厚度较薄。因此,不同岩性的粘土化程度:泥岩>凝灰岩>安山岩>英安岩。

3.1.2 间断时间

地层沉积间断时间越长,风化程度就越高,岩层被改造的深度越大,风化壳厚度往往就会越大,越有利于形成风化粘土层。玄武岩等火山岩风化形成粘土层时间需要几十万年以上的漫长过程^[23],且风化时间越长,形成的风化粘土层就越厚。形成几百米厚的火山岩风化壳一般需要36 Ma以上^[11,13],车排子地区石炭系风化时间达100 Ma以上,该地区形成了巨厚的风化壳。该区石炭系间断时间差异最大达100 Ma以上,在其他条件一致的情况下,风化壳厚度也表现出风化时间越长发育厚度越大的特征。

3.1.3 古地形

古地形的高低、平缓、起伏对风化壳发育都有影响^[13,24]。通过对研究区钻遇石炭系井的统计,风化壳、水解层厚度与古坡度具有明显关系(图4)。古坡度角度小于4.5°时,风化壳厚度和水解层厚度随古坡度增大而增大。当古坡度角度大于4.5°时,风化壳厚度和水解层厚度随古坡度增大而减小。火山岩风化粘土层在各类岩性中都能发育,其主要发育区的古坡度主要为2°~3.5°,这显示在地形较缓的部位易于保留风化粘土层,而地形较陡的部位一般只发育半风化岩石。

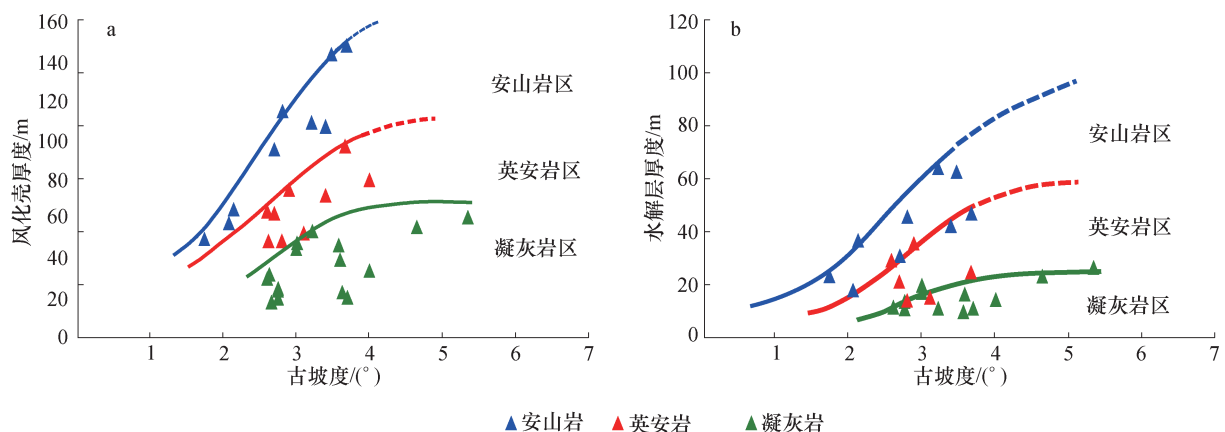


图4 准噶尔盆地车排子地区风化壳(a)、水解层(b)发育厚度与古坡度关系

Fig. 4 Thickness of the weathering crust(a), hydrolysis layer(b) vs. ancient slope in Chepaizi area, Junggar Basin

3.2 风化壳结构发育模式

综合主控因素对不整合结构影响,并结合实钻资料建立了车排子地区石炭系风化壳结构发育模式(图5)。在斜坡带,物理风化作用较强,水流较强,形成的碎屑物难以原地保存。因此,风化粘土层不发育,水解层和淋滤层较为发育。在地势较低的较缓地带,植被发育,生物风化、化学风化作用较强,风化形成的细碎屑物易于原地保存,易于形成风化粘土层。同时,水解层发育较厚,发育完整风化壳结构,即发育有风化粘土层、水解层和淋滤层。在低洼处,由于沉积物较多,水位较高,物理风化作用、溶蚀较弱,风化壳厚度较薄,风化壳结构发育完整。在高部位,一般地下水位较低,物理风化作用强,侵蚀作用强烈,形成的细碎屑较难原地保留,难以形成风化粘土层和水解层;同时,在高部位受到较强的大气淡水淋滤、溶蚀作用,火山岩中的杏仁体更容易发生溶蚀,大气淡水沿断层、裂隙向下渗流,溶蚀现象发育,所以淋滤层特别发育,断层附近淋滤层更为发育。

该区石炭系风化壳平面分布上具有东厚西薄特点(图6)。东部地区坡度较大,岩性主要为安山岩,较易于风化。西部地势较缓,岩性以凝灰岩为主且以中酸性为主,较难风化。淋滤层在全区普遍发育且厚度大,水解层多数地区发育且厚度较大,风化粘土层分布地区局限且厚度薄。

4 控藏作用

该区石炭系顶部风化壳结构发育特征控藏作用主要表现有以下3个方面。

1) 风化粘土层、水解层起到封盖或遮挡作用
通过对风化粘土层和水解层测量、计算,风化粘土

层和水解层的突破压力高达 3.5 MPa。结合该区油气密度,对应最小封堵油气高度在 1 300 m 左右,实际油藏高度一般在 500 m 以内,主要集中在 100 ~ 200 m 内。实测盖层封堵能力远大于实际油藏的油柱高度,可以有效封堵油藏,形成圈闭盖层。从实钻资料看,该区石炭系油藏主要发现区风化粘土层、水解层均无油气显示,至淋滤层才有油气显示,证实了风化粘土层、水解带可以封盖油气,控制油气藏类型及分布。在有风化粘土层和水解带时,可以形成风化壳内幕型油藏(图7a,b),反之,可以形成毯缘型和复合岩性型油藏(图7c)。

2) 淋滤层成为大型风化壳储集体

长期的风化淋滤作用,使风化壳孔隙与裂缝大量产生,孔隙度增大可以达到 10% 以上。巨厚的风化壳再次深埋成岩,其物性在整个过程中会发生较大变化,这种变化主要取决于原岩先期风化程度与后期再成岩作用等两大因素^[25]。目前储层物性是上述作用后的最终结果。其中,原岩先期风化程度是前提,后期再成岩作用是关键。构造作用也会明显改善储层的渗透能力。车排子地区经历了多期构造活动,断层、裂缝比较发育,由于淋滤层粘土化程度相对较低、脆性好,裂缝发育且能较好地保存,再加上后期溶蚀作用,形成大量的裂缝-溶蚀型储集空间,极大地改善了储层物性。巨厚的风化壳淋滤层成为该区大型的储集体。

3) 淋滤层大幅提高了石炭系顶部油气横向输导能力

该区石炭系顶部淋滤层普遍发育,厚度数十米到数百米,其渗透性较好,横向连通,与石炭系顶板砂体、断层构成良好的油气输导体系。在有水解层或风化粘土层条件下,侏罗系、新近系沙湾组底部毯砂^[26]与风化壳淋滤层对接时,油气可以运移至淋滤层,并在淋滤层内运移聚集(图7a)。毯砂与风化壳粘土层、水解层

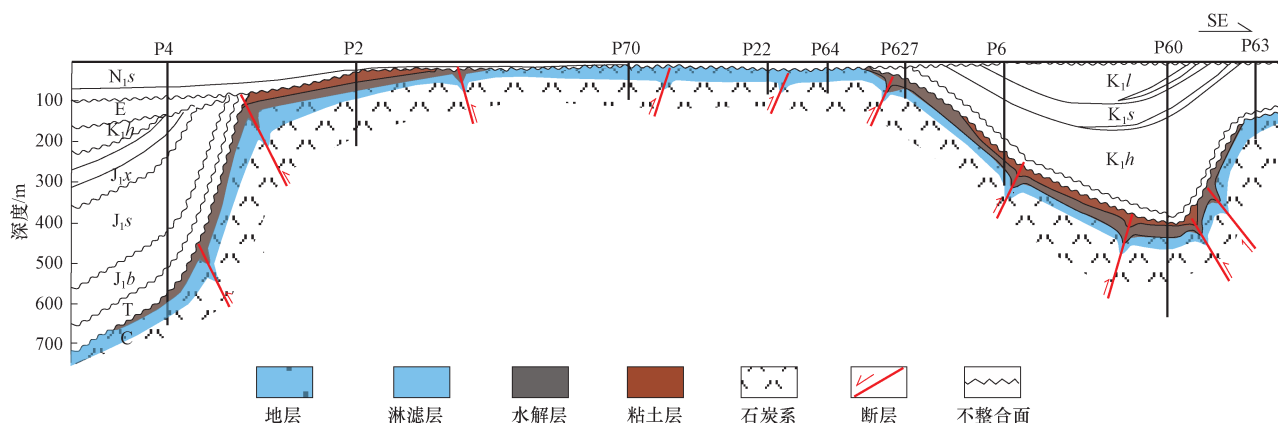
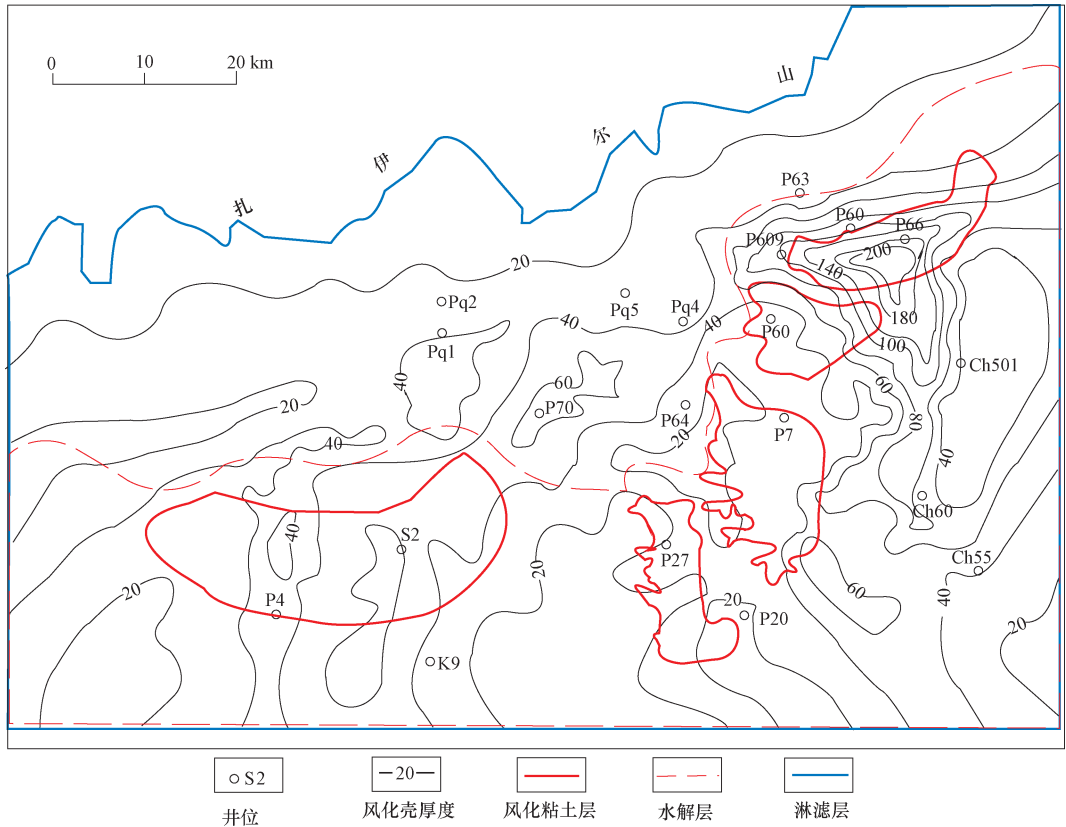


图5 准噶尔盆地车排子地区石炭系风化壳结构发育模式

Fig. 5 Development model of the Carboniferous weathering crust structure in Chepaizi area, Junggar Basin

C. 石炭系; T. 三叠系; J₁b. 侏罗系八道湾组; J₁s. 侏罗系三工河组; J₁x. 侏罗系西山窑组; K₁h. 白垩系呼图壁河组; K₁s. 白垩系胜金口组; K₁l. 白垩系连木沁组; E. 古近系; N₁s. 新近系沙湾组



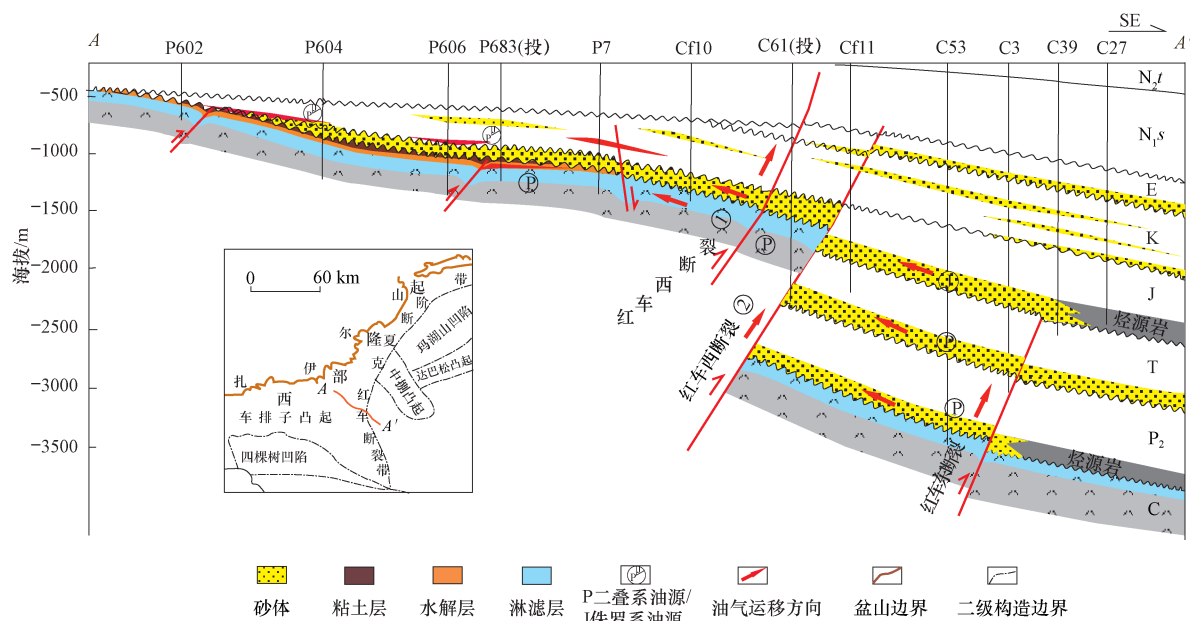


图8 准噶尔盆地西部车排子地区油气运移剖面

Fig. 8 Oil and gas migration profile in Chepaizi area, western Junggar Basin

C. 石炭系; P₂. 下二叠统; T. 三叠系; J. 侏罗系; K. 白垩系; E. 古近系; N_{1s}. 新近系沙湾组; N_{2t}. 新近系塔西河组

风化粘土层和水解层物性差,淋滤层物性较好。

2) 风化壳结构空间展布受原岩岩性(岩相)、间断时间及古地形等3大主控因素控制。风化粘土层零星分布,水解层较风化粘土层范围大,局部连片,淋滤层广泛发育,形成石炭系顶部大规模风化壳储层。

3) 石炭系顶部风化壳结构层中广泛发育的淋滤层具有良好的横向连通性,利于油气横向输导,局部发育的风化粘土层及分布较广的水解层具有遮挡或封盖作用。石炭系顶部风化壳淋滤层与其顶板毯砂、断层组成油气输导体系,使该地区具备了良好的油气输导条件,利于形成大型的油气田。

参考文献

- [1] 潘钟祥. 不整合对于油气运移聚集的重要性[J]. 石油学报, 1983, 4(4): 1-10.
PAN Zhongxiang. Significance of unconformity to petroleum migration and accumulation[J]. Acta Petrolei Sinica, 1983, 4(4): 1-10.
- [2] Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance[J]. Geology, 1995, 23: 921-924.
- [3] 张克银, 艾华国, 吴亚军. 碳酸盐岩顶部不整合面结构层及控油意义[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(5): 16-19.
Zhang Keyin, Ai Huaguo, Wu Yajun. Characteristics and oil-controlling significance of unconformity structure layer on top of carbonate rock[J]. Petroleum Exploration and Development, 1996, 23(5): 16-19.
- [4] Hopkins J C. Characterization of reservoir lithologies with in subunconformity pools: Pekisko Formation, Medicine River Field, Alberta, Canada[J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(11): 1855-1870.
- [5] 陈建平, 查明, 柳广弟, 等. 准噶尔盆地西北缘斜坡区不整合面在油气成藏中的作用[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2000, 24(4): 75-78.
Chen Jianping, Zha Ming, Liu Guangdi, et al. Importance of unconformity in oil and gas accumulation in the north western slope of Junggar basin[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2000, 24(4): 75-78.
- [6] Jason R P, Michael A V. Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks[J]. Chemical Geology, 2003, 202(3-4): 397-416.
- [7] 宋国奇, 卓勤功, 孙莉. 济阳坳陷第三系不整合油气藏运聚成藏模式[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(6): 716-720.
Song Guoqi, Zhuo Qingong, Sun Li. Hydrocarbon migration and accumulation patterns in the Tertiary unconformity of the Jiyang depression[J]. Oil and Gas Geology, 2008, 29(6): 716-720.
- [8] 李荣西, 胡瑞忠, 方维萱. 胜利油气区奥陶系顶部风化壳有机包裹体初步研究及其意义[J]. 地质科学, 2005, 40(1): 120-124.
Li Rong-xi, Hu Ruizhong, Fang Weixuan. A preliminary study on organic inclusions of Ordovician weathering crust in Shengli oil field and its significance[J]. Chinese Journal of Geology, 2005, 40(1): 120-124.
- [9] 陈新军, 蔡希源, 纪友亮, 等. 塔中奥陶系大型不整合面与风化壳岩溶发育[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(8): 1122-1127.
Chen Xinjun, Cai Xiyuan, Ji Youliang, et al. Relationship between large scale unconformity surface and weathering crust karst of Ordovician in Tazhong[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, 35(8): 1122-1127.
- [10] 张克银, 艾华国, 吴亚军. 碳酸盐岩顶部不整合面结构层及控油意义[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(5): 16-19.
Zhang Keyin, Ai Huaguo, Wu Yajun. Characteristics and oil-controlling significance of unconformity structure layer on top of carbonate rock[J]. Petroleum Exploration and Development, 1996, 23(5): 16-19.

- 16-19.
- [11] 张年富,曹耀华,况军,等. 准噶尔盆地腹部石炭系火山岩风化壳模式[J]. 新疆石油地质,1998,19(6):450-453.
Zhang Nianfu, Cao Yaohua, Kuang Jun, et al. Weathering crust model of Carboniferous volcanic rock in hinterland of Junggar basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1998, 19(6): 450-453.
- [12] 刘俊田. 三塘湖盆地牛东地区石炭系卡拉岗组火山岩风化壳模式与识别[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(1): 57-62.
Liu Juntian. Weathering crust model and recognition of carboniferous Kalagang Formation(C₂k) volcanic rocks in Niudong Block, Santanghu Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(1): 57-62.
- [13] 侯连华,罗霞,王京红,等. 火山岩风化壳及油气地质意义——以新疆北部石炭系火山岩风化壳为例[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(3): 257-265.
Hou Lianhua, Luo Xia, Wang Jinghong, et al. Weathered volcanic crust and its petroleum geologic significance: A case study of the Carboniferous volcanic crust in northern Xinjiang[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(3): 257-265.
- [14] 张吉光. 海拉尔盆地不整合的形成及其油气地质意义[J]. 大庆石油地质与开发, 2002, 21(5): 8-10.
Zhang Jiguang. The formation of unconformity and its oil/gas geological significance in Hailar Basin[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2002, 21(5): 8-10.
- [15] 吴孔友,邹才能,查明,等. 不整合结构对地层油气藏形成的控制作用研究[J]. 大地构造与成矿学, 2012, 36(4): 518-524.
Wu Kongyou, Zou Caineng, Zha Ming, et al. Controls of unconformity on the formation of stratigraphic reservoirs[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2012, 36(4): 518-524.
- [16] 赵乐强,张金亮,宋国奇,等. 济阳拗陷前第三系顶部风化壳结构发育特征及对油气成藏的影响[J]. 地质学报, 2009, 83(4): 570-578.
Zhao Leqiang, Zhang Jinliang, Song Guoqi, et al. Structure characteristics of weathered crust at the top of pre-Tertiary in the Jiyang Depression and its influence on reservoir formation[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2009, 83(4): 570-578.
- [17] 何登发,翟光明,况军,等. 准噶尔盆地古隆起的分布与基本特征[J]. 地质科学, 2005, 40(2): 248-261.
He Dengfa, Zhai Guangming, Kuang Jun, et al. Distribution and tectonic features of paleo-uplifts in the Junggar Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2005, 40(2): 248-261.
- [18] 吴孔友,查明,王绪龙,等. 准噶尔盆地构造演化与动力学背景再认识[J]. 地球学报, 2005, 26(3): 217-222.
Wu Kongyou, Zha Ming, Wang Xulong, et al. Further researches on the tectonic evolution and dynamic setting of the Junggar Basin[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2005, 26(3): 217-222.
- [19] Furnes H, Muehlenbachs K, Tumyr O, et al. Biogenic alteration of volcanic glass from the Troodos ophiolite, Cyprus[J]. Journal of the Geological Society, 2001, 158(1): 75-84.
- [20] Figlia M G, Bellanca A, Neri R, et al. Chemical weathering of volcanic rocks at the island of Pantelleria, Italy: Information from soil and soil solution investigations[J]. Chemical Geology, 2007, 246(1): 1-18.
- [21] 王志兵,徐则民. 头寨滑坡玄武岩腐岩的岩石化学和矿物学特征[J]. 矿物学报, 2008, 28(4): 447-453.
Wang Zhibing, Xu Zemin. Petrochemistry and mineralogy of basalt saprolite in Touzhai landslide[J]. Acta Mineralogical Sinica, 2008, 28(4): 447-453.
- [22] H. W. Nesbitt G. M. Young. Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. Nature, 1982, 279: 715-717.
- [23] 冯锦江,胡碧茹. 琼北第四纪玄武岩化学风化速率的初步研究[J]. 地质科学, 1992, 增刊(12): 295-301.
Feng Jinjiang, Hu Biru. A preliminary study of rates of chemical weathering of Quaternary basalts in Hainan island[J]. Scientia Geologica Sinica, 1992, Suppl. (12): 295-301.
- [24] 赵乐强,张金亮,宋国奇,等. 义和庄凸起东区前第三系顶部风化壳结构发育模式及对油气运聚的影响[J]. 沉积学报, 2008, 26(3): 435-444.
Zhao Leqiang, Zhang Jinliang, Song Guoqi, et al. Structure model of weathered crust on the top of pre-Tertiary and its influence on petroleum migration and accumulation in east part of Yihezhuang Uplift[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(3): 435-444.
- [25] 侯连华,邹才能,刘磊,等. 新疆北部石炭系火山岩风化壳油气地质条件[J]. 石油学报, 2012, 33(4): 533-540.
Hou Lianhua, Zou Caineng, Liu Lei, et al. Geologic essential elements for hydrocarbon accumulation within Carboniferous volcanic weathered crusts in northern Xinjiang, China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(4): 533-540.
- [26] 张善文,林会喜,沈扬. 准噶尔盆地车排子凸起新近系“网毯式”成藏机制剖析及其对盆地油气勘探的启示[J]. 地质论评, 2013, 59(3): 489-500.
Zhang Shanwen, Lin Huixi, Shen Yang. Analysis on meshwork—carpet pool-forming mechanism of Chepaizi Uplift and enlightenment on petroleum exploration of Junggar Basin[J]. Geological review, 2013, 59(3): 489-500.

(编辑 张玉银)