

# 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

赵乐强<sup>1,2)</sup>, 张金亮<sup>1)</sup>, 宋国奇<sup>2)</sup>, 隋风贵<sup>2)</sup>, 王学军<sup>2)</sup>, 向立宏<sup>2)</sup>

1) 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东青岛, 266100;

2) 中国石化胜利油田分公司地质科学研究院, 山东东营, 257015

**内容提要:** 基于地质综合研究, 系统分析了济阳拗陷前第三系顶部风化壳结构地质特征, 深入剖析了其形成主控因素, 总结了风化壳结构发育模式, 探讨了风化壳结构对油气成藏的影响。研究认为, 济阳拗陷前第三系顶部风化壳中, 风化粘土层厚度薄, 分布地区局限, 物性差; 半风化岩石全区发育, 岩石类型多样, 除部分半风化碳酸盐岩、火成岩、变质岩等顶部存在一层致密“硬壳”外, 物性多得到改善。风化壳结构形成受控于原岩岩性、间断时间、古气候、古地形、上覆层沉积环境等5大因素; 多种因素共同作用, 决定了风化壳结构空间发育; 风化粘土层、半风化岩石顶部“硬壳”对油气起遮挡、封盖作用, 顶部无“硬壳”的半风化岩石则可大大提高前第三系岩层的储集性能和不同层系之间的横向连通性。

**关键词:** 前第三系; 风化壳; 油气成藏; 济阳拗陷

风化壳及其与油气成藏的关系一直是地质研究中的热点和难点。国内外许多学者对此开展了大量研究, 特别是在风化壳的结构特征、成因及其控藏作用等方面取得了一系列重要进展(潘钟祥, 1983; Saller et al., 1994; Fedo et al., 1995; 张克银等, 1996; Hopkins, 1999; 李丕龙等, 2003; Jason et al., 2003; 张建林, 2004; 李荣西等, 2005)。以往研究多集中在碳酸盐岩、变质岩、火成岩等岩石类型上; 近些年, 碎屑岩风化壳也开始被广泛关注(吴孔友等, 2003a, 2003b; 付广等, 2005; 曹剑等, 2006; 李平平等, 2006; 隋风贵等, 2006; 谢寅符等, 2006; 高长海等, 2008), 但相比于前者, 认识程度上却明显低的多。关于风化壳及其与油气成藏关系, 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, 如碎屑岩风化壳结构特征、岩相组成复杂区风化壳结构发育模式及对油气成藏的影响等, 这些问题的解决对于指导陆相盆地油气勘探具有重要意义。多年来济阳拗陷勘探不断有新的发现, 相继探明了多个与前第三系顶部风化壳密切相关的前第三系潜山油藏、第三系地层超覆油藏。前人曾对这些油藏的成藏规律进行过研究, 也注意到不整合面或风化壳对

于油气成藏起了重要作用(李丕龙等, 2003; 潘元林等, 2003), 但较深入的分析尚未开展。本文试图从济阳拗陷前第三系顶部风化壳结构特征研究入手, 通过深入剖析风化壳形成主控因素及分布规律, 进而探讨风化壳结构对油气成藏的影响。

## 1 地质概况

济阳拗陷属渤海湾盆地的一个次级构造单元, 具多凸多凹、凸凹相间排列的构造格局(胜利油田石油地质志编写组, 1993)。各凹陷一般呈北陡南缓的箕状形态。济阳拗陷前第三系包含的地层有太古宇泰山群、下古生界寒武系和奥陶系、上古生界石炭系和二叠系、中生界侏罗系和白垩系, 第三系包含的地层有古近系和新近系。前第三系与第三系之间呈区域角度不整合接触。由凹陷内部到边缘, 第三系逐层超覆于前第三系之上, 直至覆盖全区。从前第三系地质图来看(图1), 太古宇泰山群主要出露于埕宁隆起区和陈家庄凸起等处, 寒武系、奥陶系、石炭系和二叠系等分布在各凹陷西部边缘和南斜坡地带, 中生界几乎遍及全区。济阳拗陷在前第三系与第三系之间不整合附近先后发现了太古宇、寒武系、

注: 本文为中国石化股份有限公司“济阳拗陷第三系不整合油气藏形成与分布规律”项目(编号 P06012)资助的成果。

收稿日期: 2008-03-05; 改回日期: 2008-10-30; 责任编辑: 周健。

作者简介: 赵乐强, 男, 1972年生。高级工程师, 博士研究生, 主要从事沉积学与石油地质学研究。通讯地址: 257015, 山东省东营市胜利油田地质科学研究院勘探综合室; 电话: 0546-8715227; Email: zlq0322@163.com。



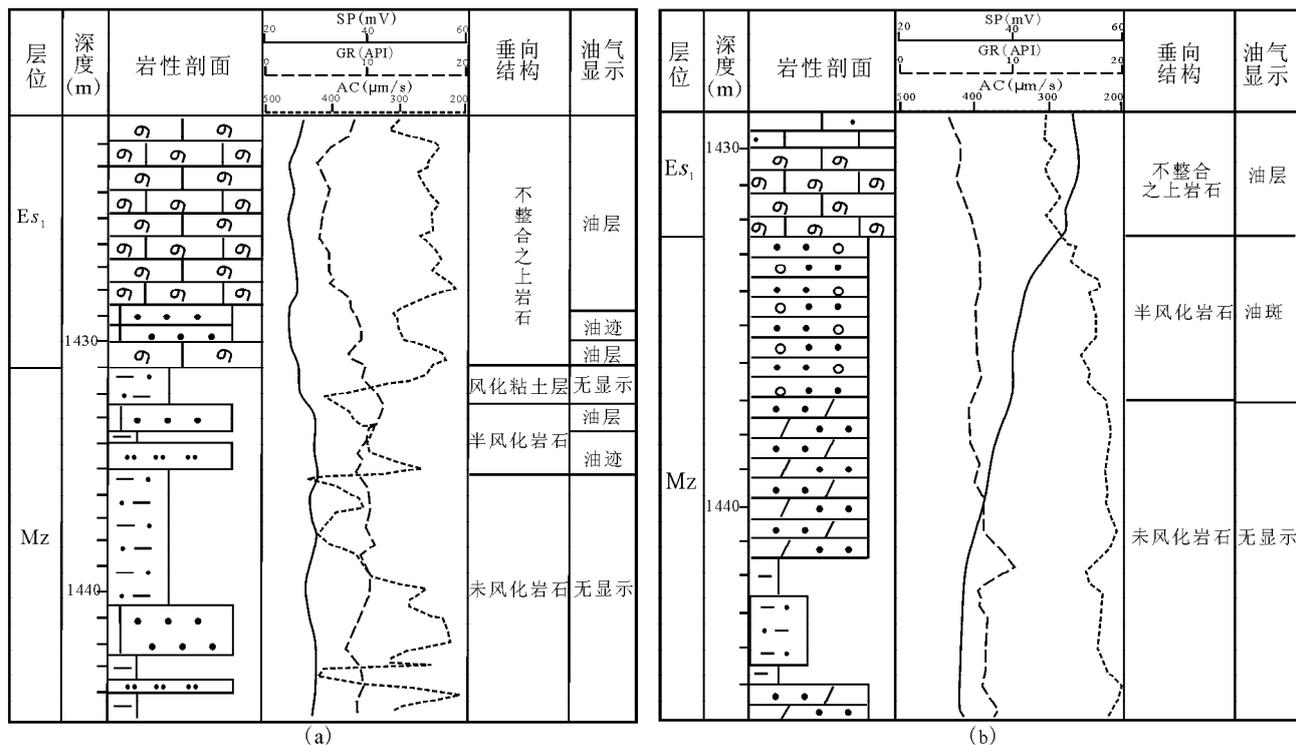


图2 济阳拗陷前第三系顶部风化壳结构示意图

Fig. 2 Weathered crust structure at the top of Pre-Tertiary in the Jiyang depression

(a)—沾北2井;(b)—沾北4井

(a)—Well Zhanbei 2;(b)—well Zhanbei 4

岩、铝土质泥岩等不同岩性之间有一定差异,前者CIA值在90~95之间,后者CIA值一般大于95,这种差异进一步体现出同为风化粘土层,其所处风化成土阶段也有所不同。

电测曲线特征上,与同一口井风化壳之下未风化泥岩相比,风化粘土层的GR曲线值一般略低,AC曲线值则偏高,SP曲线值基本一致(图2)。

## 2.2 半风化岩石

根据Budell(1957)提出的“双面”理论,风化壳有2个活动的面:一个是暴露于大气下腐泥土顶部的冲刷面;另一个是埋藏于腐岩底部,与未风化基岩接触的埋藏面,称为风化前锋或初生面(李德文等,2002)。半风化岩石底界面即对应风化前锋或初生面。按照这种界面划分,半风化岩石包含多种岩石类型,既有碎屑岩,也有碳酸盐岩,还有火成岩和变质岩。不同类型岩石,各有其特点。

(1)半风化碎屑岩:半风化碎屑岩厚度较小,一般仅3~10 m。主要由半风化砂质岩、半风化泥岩等组成,在剖面上常表现为砂泥岩互层(图2)。砂质岩(含粉砂岩、砂岩、砾岩)受到风化作用主要会发生两方面的变化,一是长石、云母、部分岩屑、钙质胶

结物等不稳定物质发生蚀变或被淋滤形成次生溶孔;二是在抬升至地表附近时产生网状微破裂缝及后期溶蚀缝(图3c)。因此,前第三系顶部半风化砂质岩多具有裂缝—孔隙双重储集空间类型;与原岩相比,物性往往会有不同程度的改善。根据部分井的统计,在岩石类型基本相同的条件下,半风化砂质岩孔隙度平均可增加4%~10%,渗透率增加 $6 \times 10^{-3} \sim 175 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (表1)。电测曲线特征表现为,AC曲线呈微小锯齿状,具有向数值减小方向变化的趋势,曲线值一般大于其下的未风化砂质岩(图2)。半风化泥岩同其他岩石一样,抬升至地表附近时也会形成许多网状微裂缝,物性可得到一定程度改善。在压实不太强烈的情况下,半风化泥岩往往具有一定输导性能。如沾北1井1408.8~1409.8 m处,为半风化泥岩,厚度约1 m,测井解释孔隙度15%,渗透率 $8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,岩芯微裂缝发育,缝中见较多油迹,表明该段半风化泥岩曾经进行过油气输导(图3d)。但半风化泥岩塑性较强,随着后期地层埋深加大,微裂缝逐渐闭合,物性再次变差,其输导能力会逐渐降低直至消失(付广等,2005)。半风化泥岩与风化粘土层相比,可从4个方面来进行区

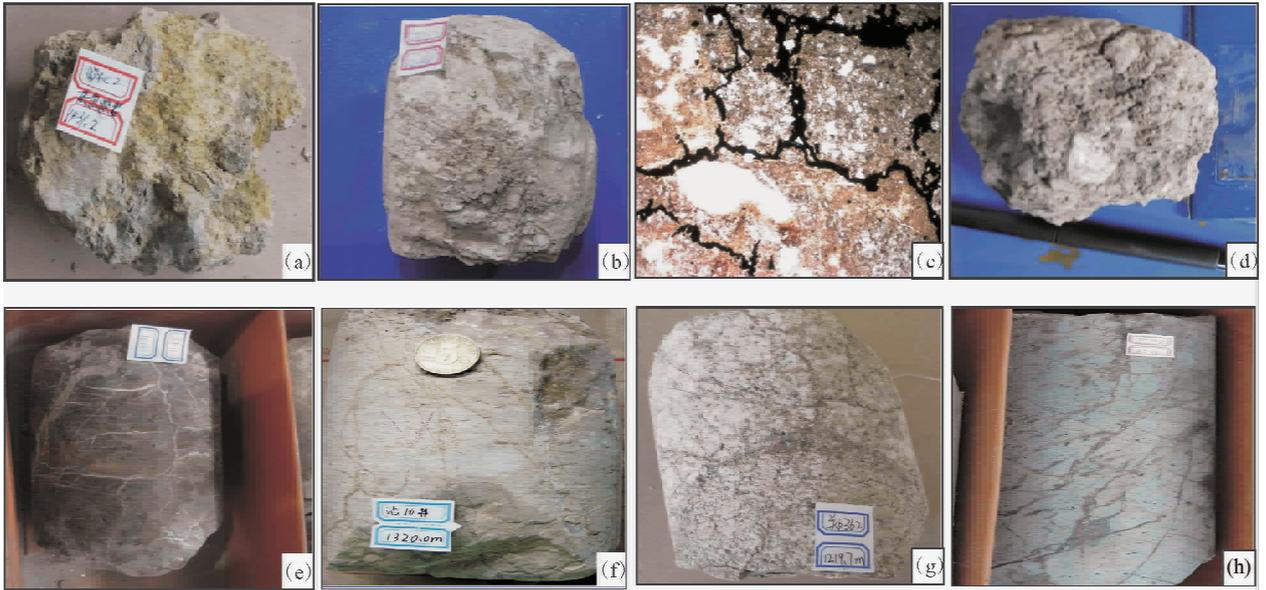


图 3 济阳拗陷前第三系顶部风化壳中部分风化粘土层、半风化岩石照片

Fig. 3 Photographs showing a part of weathered clay layer and semi-weathered rock at the top of Pre-Tertiary in the Jiyang depression

(a)—中生界风化壳顶部风化粘土层,杂色泥岩,沾北 2 井,1431.2 m,岩芯;(b)—石炭系—二叠系风化壳顶部风化粘土层,铝土质泥岩,罗 22 井,1430.7 m,岩芯;(c)—中生界半风化粉砂岩,微裂缝发育,缝中见油迹,沾北 2 井,1433.6 m,薄片,单偏光,5×5;(d)—石炭系—二叠系半风化泥岩,裂缝发育,缝中见油迹,沾北 1 井,1409 m,岩芯;(e)—奥陶系半风化灰岩,网状裂缝发育,部分裂缝被钙质充填,通古 11 井,1814.0 m,岩芯;(f)—奥陶系半风化灰岩顶部致密“硬壳”,裂缝被泥质、钙质充填,沾 10 井,1320.0 m,岩芯;(g)—太古宇半风化片麻岩,网状裂缝发育,部分裂缝被钙质充填,郑 362 井,1219.7 m,岩芯;(h)—中生界半风化安山岩,网状裂缝发育,裂缝附近粘土化现象明显,桩 120 井,3310.0 m,岩芯

(a)—Weathered clay laye at the top of Mesozoic weathered crust, versicolor mudstone, well Zhanbei 2, 1431.2 m, core; (b)—weathered clay laye at the top of Carboniferous—Permian weathered crust, bauxitic mudstone, well Luo22, 1430.7 m, core; (c)—semi-weathered siltstone in Mesozoic, abundance of tiny-fracture in which oil trace having been found, well Zhanbei 2, 1433.6 m, thin section, 5×5; (d)—semi-weathered mudstone in Carboniferous—Permian, abundance of tiny-fracture in which oil trace found, well Zhanbei 1, 1409 m, core; (e)—semi-weathered limestone in Ordovician, bundance of network-fracture which having been partially filled by calcium, well Tonggu 11, 1814.0 m, core; (f)—compact “crust” at the top of semi-weathered limestone in Ordovician, fracture filled by clay and calcium, well Zhan 10, 1320.0 m, core; (g)—semi-weathered gneiss in Archean, bundance of network-fracture which having been partially filled by calcium, well Zheng 362, 1219.7 m, core; (h)—semi-weathered andesite in Mesozoic, bundance of network-fracture near which argillation being obvious, well Zhuang 120, 3310.0 m, core

表 1 济阳拗陷前第三系顶部部分半风化、未风化砂质岩物性统计表

Table 1 The porosity and permeability of a part of semi-weathered and none-weathered sandstone at the top of Pre-Tertiary in Jiyang depression

井号	层位	风化壳顶面埋深(m)	剖面结构岩性	井段(m)	孔隙度均值(%)	渗透率均值( $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )
沾北 1	Mz	1408.8	半风化粉细砂岩	1410~1412	20	40
			未风化粉细砂岩	1413~1417	10	10
沾北 4	Mz	1432.5	半风化含砾砂岩	1432.5~1437	20	28
			未风化砂岩	1437~1441.5	11	5
沾 41	C-P	2114	半风化砂岩	2114~2118.5	25	200
			未风化砂岩	2118.5~2130	15	25
沾 192	C-P	1330	半风化含砾砂岩	1334~1338	13	7.6
			未风化含砾砂岩	1338~1345	9	1.1
义东 38	C-P	2948	半风化中砂岩	2948~2957	16	59.1
			未风化中砂岩	2957~2967	10	15

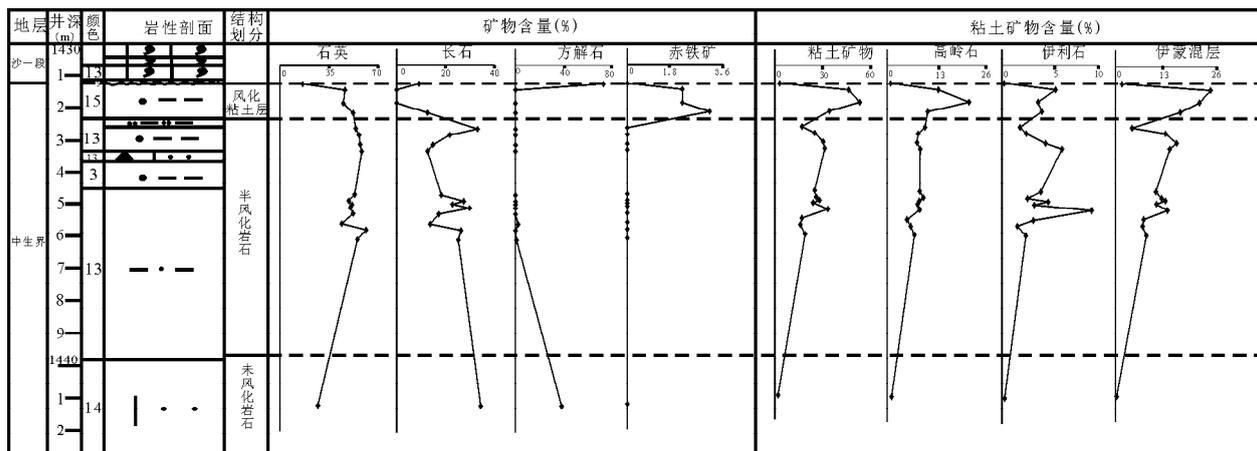


图4 沾北2井中生界顶部风化壳矿物含量纵向变化

Fig. 4 The content of mineral in weathered crust section at the top of Mesozoic, well Zhanbei 2

别,一是前者一般有较明显沉积构造,并常见网状风化裂缝,后者几乎没有;二是前者的长石、方解石等不稳定矿物含量一般要高于后者;三是两者虽均具有富 Al、Fe、Ti,贫 Ca、Mg 等特点,但在富集或淋失率上前者总体不如后者明显,特别是风化粘土层中 Ca 元素几乎损失殆尽,而半风化泥岩中往往仍有一定含量;四是前者的化学蚀变指数(CIA)一般在 50~90 之间,而后者多大于 90。

(2)半风化碳酸盐岩:岩性以灰岩、白云岩为主,厚度一般几十米至上百米。半风化岩石中裂缝、溶洞、溶孔发育,为主要的储集空间类型。从岩芯观察来看,裂缝成杂乱的网格状,裂缝宽度可达 5~10 cm (图 3e)。大气降水进入裂缝对岩石进行溶蚀,所形成的溶孔(洞)多沿裂缝呈串珠状分布,孔径一般几至几十毫米,最大 9×13 cm(李丕龙等,2003)。由上往下缝(洞)减少。在局部地区,靠近半风化岩石顶部的风化裂缝往往被方解石、红色泥质等完全充填,形成一层厚约 2~13 m 的致密“硬壳”(图 3f)。致密“硬壳”物性很差,孔隙度一般 1%~5%,渗透率极低。

(3)半风化变质岩:岩性主要为二长片麻岩、黑云二长片麻岩,厚度几米至几十米。靠近不整合面的半风化岩石网格状裂缝发育,以微细裂缝为主,缝长一般 5~10 cm,缝宽 1~3 mm,裂缝密度 50~60 条/m(图 3g)。岩石中长石、黑云母等矿物多发生不同程度的高岭石、绿泥石化,或溶蚀成粒内孔。部分裂缝、溶洞(孔)被泥质、方解石等充填。当缝(洞、孔)充填严重时,会形成一层厚约 1~7 m 的致密“硬壳”。在缝(洞、孔)未被明显充填的情况下,半风化岩石物性较好。如王庄地区郑 35 井前震旦系半风化片麻岩,不整合面附近的孔隙度可达 21%、渗透率

$57 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ; 随与不整合面距离的增加,岩石中网格裂缝发育程度减少,长石、黑云母等矿物粘土化程度减弱,物性明显变差。

(4)半风化火成岩:岩性主要为玄武岩、安山岩,厚度一般几米至十几米。此类岩石的半风化网格状裂缝宽度一般小于 5 mm。岩石风化形成许多次生孔隙,但孔径较小,直径多小于 3 mm。部分裂缝、孔隙等被泥质、方解石充填。由于岩石中含有较多辉石、角闪石、黑云母、中基性斜长石等不稳定矿物,在风化过程中易发生绿泥石化和高岭石化。不稳定矿物的粘土化现象在靠近不整合面处及裂缝附近最为明显(图 3h)。

### 3 风化壳结构形成主控因素及发育模式

济阳拗陷前第三系顶部风化壳结构形成与原岩岩性、间断时间、古地形、古气候、上覆层沉积环境等因素密切相关。多种因素共同作用,决定了风化壳结构的空发育。

#### 3.1 风化壳结构形成主控因素

(1)原岩岩性:岩性是风化壳形成的基础。岩性不同,风化壳结构会有较大差异。碳酸盐岩具有易溶蚀、性脆等特点。暴露至地表时,会在浅层形成许多风化裂缝。在无断层影响区,风化裂缝一般分布在地表下 50~80 m 范围内(李丕龙等,2003)。形成的裂缝为后期大气降水对岩层的溶蚀提供了有利条件。随着大气降水的淋滤作用,易溶的碳酸盐矿物不断流失,形成大量溶洞(孔、缝)。由于酸不溶物含量极低,形成 1 m 厚的风化粘土层需要消耗原岩十几米甚至几十米(冯志刚等,2003)。溶蚀后留下的

残余物质体积远小于原岩体积,而近地表被溶蚀作用拓宽的裂隙可以不断吸纳地表的风化碎屑物,导致表层“土壤丢失”(李德文等,2001)。碎屑岩与之相比却有较大不同。由于碎屑岩在风化过程中易溶蚀成分少,残余组分含量很高,一般风化壳的形成过程为等体积变化甚至有体积膨胀的趋势(李德文等,2001)。碎屑岩在暴露至地表时,尽管也会在浅层形成许多风化裂隙,但规模远不如碳酸盐岩。由于裂隙很小,形成的风化粘土层很难发生向下漏失。而变质岩和火成岩致密且多不易溶蚀,其风化裂隙、溶孔(洞)的总体发育程度弱于碳酸盐岩而强于碎屑岩,因此,风化粘土层的形成与保存也基本上介于两者之间。这使得该区已发现的风化粘土层主要发育于石炭系一二叠系、中生界的碎屑岩风化壳中(图1);寒武系—奥陶系碳酸盐岩风化壳中风化粘土层少见,但半风化岩石厚度较大,并且在一定范围内半风化岩石顶部经常被风化细碎屑物充填而形成致密“硬壳”;火成岩、变质岩风化壳中风化粘土层均不发育,半风化岩石厚度相对于碳酸盐岩也小得多。

(2) 间断时间:从某种意义上说,只要岩石发生风化,就会伴随半风化岩石的形成,且间断时间越长,半风化岩石厚度往往就会越大。但风化粘土层是否发育却需要一定的时间。一般认为,具有风化粘土层的风化壳其形成需要数十万年以上的漫长过程(杜恒俭等,1978)。当然在特定物质(细粒松散层)、特定气候(潮湿)等条件下,风化粘土层形成的时间会变短。如赵景波等(2001)通过对中国黄土中风化壳的研究发现,黄土中古土壤发育过程仅50~100 ka左右就已转变成为厚3~6 m的风化壳。按照地层发育状况,济阳拗陷在沉积第三系之前,至少间断了十几个百万年以上(李丕龙等,2003;潘元林等,2003)。就时间而言,形成风化粘土层应该并不成问题,只是时间长短可能会对风化粘土层特征有一定影响。例如,该区发现的风化粘土层中,杂色泥岩多位于中生界风化壳顶部,而铝土质泥岩则主要发育于石炭系一二叠系风化壳顶部,反映出风化时间长短对风化成土阶段的影响。初步推测一个重要原因可能是中生界靠近洼陷,暴露时间相对较短,尚未进入风化成土最终阶段,就已沉积了古近系,阻止了风化作用的继续;而石炭系一二叠系靠近凸起高部位,暴露时间较长,风化作用相对更彻底。

(3) 古气候:关于气候对风化壳形成的影响,前人曾做过大量研究(吴孔友等,2003b;姜在兴,2003)。普遍认为,对于同一种岩石而言,潮湿气候

相对于干旱气候条件,风化粘土层更有利于发育。济阳拗陷古近纪—新近纪期间,总体经历了干旱—潮湿—干旱气候变化(潘元林等,2003)。从各洼陷至斜坡再到凸起,第三系对前第三系层层超覆,意味着不同构造部位前第三系风化所经历的气候条件会有较大差异。洼陷部位前第三系暴露期间主要为干旱气候,风化壳中的风化粘土层不太发育,半风化岩石厚度也不大;斜坡部位前第三系暴露早期主要为干旱气候,晚期则主要为潮湿气候,这种气候条件总体上有利于风化粘土层的发育,但由于风化粘土层的存在,在一定程度上抑制了下伏地层的风化淋滤作用,使得半风化岩石厚度并不大;凸起部位前第三系暴露期间经历了相对比较完整的干旱—潮湿—干旱气候变化,该气候条件下形成的风化粘土层往往经历较为复杂的变化,由于所处构造部位较高,后期随着气候趋向干旱,植被大幅度减少,颗粒粒度很细的风化粘土层容易遭受侵蚀而变薄甚至缺失,而半风化岩石受淋滤作用明显,厚度较大。

(4) 古地形:古地形对风化壳发育的影响,主要来自三方面。首先是古地形的高低。地形高,地下水位则相对低,物理风化作用明显,同时侵蚀作用也相对强烈。因此,风化作用形成的一些细碎屑较难保留在原地,风化粘土层难以形成。其次是古地形的陡缓。一般来说,较陡的地形由于水流相对较强,植被较少,其风化作用偏向物理风化,风化下来的碎屑物质也很难保存;而较缓的地形土壤容易保存,植被发育,化学风化作用、生物风化作用相对较强,风化形成的一些细碎屑物质也容易残留在原地(李叔达,1983)。因此,在地形较缓的部位更易形成风化粘土层,而地形较陡的部位一般只发育半风化岩石。第三是古地形的起伏。在地形起伏较大的地区易形成沟谷,而山区沟谷中水流一般下切侵蚀强烈。因此在沟谷存在的部位,基本不发育风化粘土层;或即使曾经有,也多被侵蚀,只留下厚度不大的半风化岩石。如义和庄凸起北坡义古34井区存在一近南北向、宽约3 km、深约50 m的古冲沟,其周围存在风化粘土层,而古冲沟处却不发育(图5)。

(5) 上覆层沉积环境:上覆层不同沉积环境反映着不同的水动力条件,而水动力的强弱直接关系到下伏层风化壳的最终发育状态。一般地,当上覆层沉积环境为河道或其他水动力较强的环境时,其下伏层风化壳往往会遭受明显的侵蚀;而当上覆层沉积环境水动力较弱时,其下伏层风化壳侵蚀程度则不明显。就水动力强弱对下伏层侵蚀程度而言,各

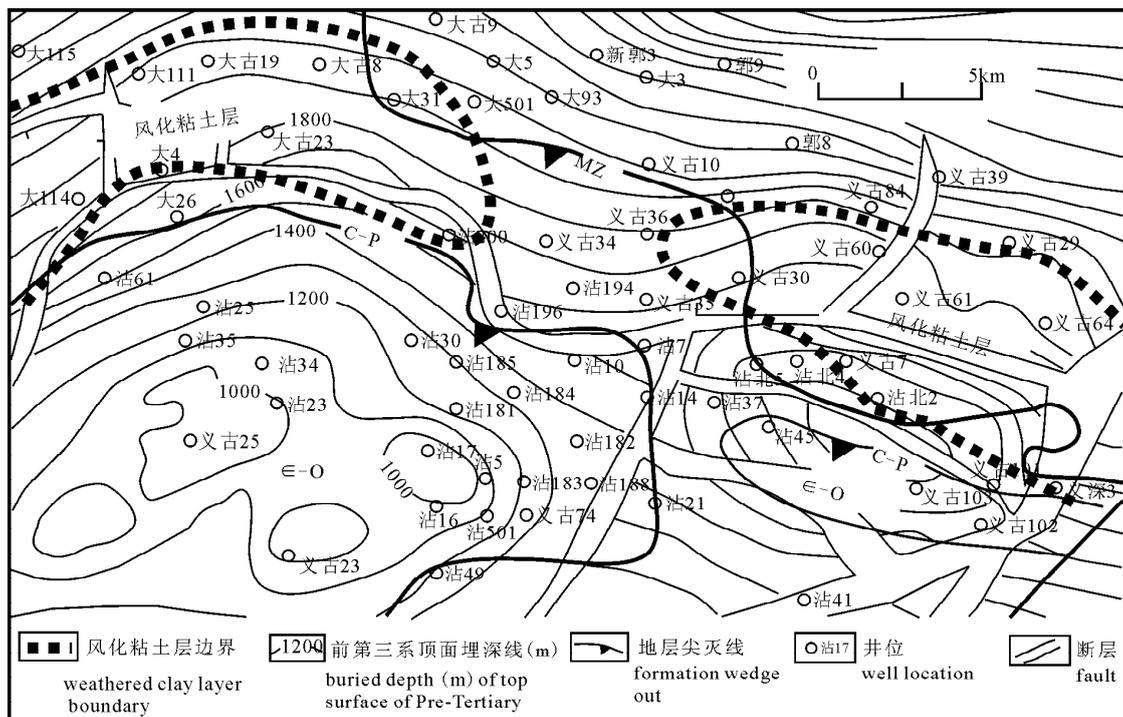


图5 济阳拗陷和庄凸起前第三系顶部风化粘土层分布

Fig. 5 The distribution of weathered clay layer at the top of Pre-Tertiary in the Yihezhuang convex of the Jiyang depression

种主要岩相顺序依次为:冲积相砂、砾岩>湖相砂、生物灰岩>冲积相泥岩>湖相泥岩。因此,分析一个地区风化壳发育状况时,在充分考虑风化壳形成机制基础上,一定还要注意研究上覆层沉积相。如王庄地区郑362、郑363、郑606等3口井中的前第三系风化壳,风化壳中均缺少风化粘土层,不整合面上下地层、原岩岩性、风化壳结构等基本一致,但由于上覆层岩相差别较大,反映出上覆层沉积时水动力强弱对下伏层的侵蚀程度不同,使得半风化岩石特点差异明显(表2)。

### 3.2 风化壳结构发育模式

风化壳结构的最终发育状况实质上是多种主控因素共同作用的结果。综合上述因素分析,建立起了济阳拗陷前第三系顶部风化壳结构空间发育模式(图6)。在凸起部位,前第三系主要为太古宇的片麻岩、寒武系—奥陶系的碳酸盐岩,上覆层多为新近系的河流相砂、砾岩,在这样的条件下,风化粘土层很

难发育,但半风化岩石厚度却往往较大。在斜坡中上部,前第三系主要为石炭系—二叠系的碎屑岩,局部有寒武系—奥陶系的碳酸盐岩,上覆层多为古近纪中晚期地层的滨浅湖沉积,在古地形相对比较平缓且无古冲沟的地区,非常有利于风化粘土层的发育。但由于风化粘土层的存在往往会一定程度上抑制其下地层的风化作用强度,因而半风化岩石厚度较凸起部位要小的多。在斜坡下部和洼陷部位,前第三系主要为石炭系—二叠系的碎屑岩、中生界的碎屑岩及少量火成岩,上覆层主要为古近纪早期地层,由于风化时间相对较短、气候偏干旱,前第三系岩石风化程度较弱,此区风化粘土层不太发育,同时半风化岩石厚度也不大。

## 4 对油气成藏的影响

前第三系顶部风化壳结构发育特征对油气成藏产生着三方面的重要影响。

表2 济阳拗陷王庄地区部分井前第三系风化壳特点

Table 2 The characteristics of weathered crust at the top of Pre-Tertiary in the Wangzhuang area of the Jiyang depression

井号	不整合面上下地层	上覆层岩相	原岩岩性	半风化岩石特点	风化壳被侵蚀程度
郑362	Es <sub>1</sub> /Anz	滨浅湖泥岩	片麻岩	疏松	弱
郑606	Es <sub>1</sub> /Anz	滨浅湖砂岩	片麻岩	较疏松	中等
郑363	Es <sub>1</sub> /Anz	冲积相细砾岩	片麻岩	致密	强烈

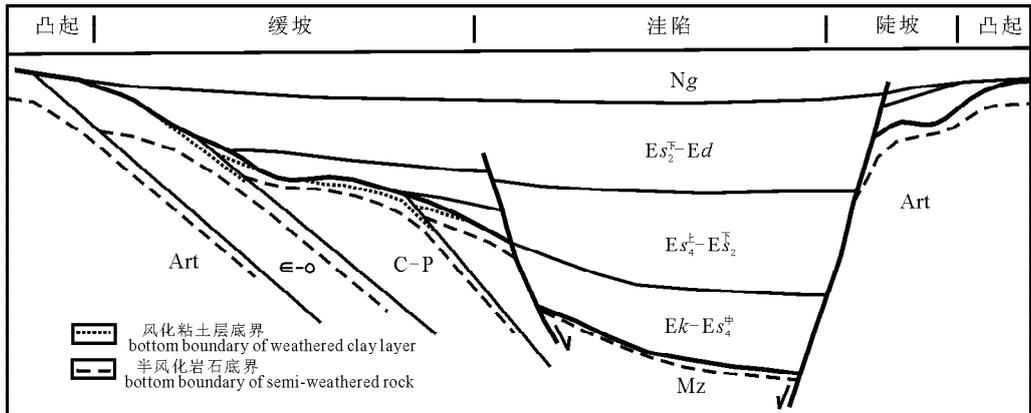


图 6 济阳拗陷前第三系顶部风化壳结构空间发育模式图

Fig. 6 The spatial development model of the weathered crust structure at the top of Pre-Tertiary in the Jiyang depression

一是低孔、低渗的风化粘土层、半风化岩石顶部“硬壳”等对油气运移起到遮挡或封盖作用。在风化粘土层、“硬壳”发育的地区,其上下地层油气运聚相对独立。如义和庄凸起沾北 2 井区,前第三系风化壳顶部发育厚约 1.0~2.5 m 的风化粘土层,其上为古近系地层超覆油藏,其下为前第三系不整合遮挡油藏,上下油藏无同一油水界面,风化粘土层未见油气显示(图 2a、图 3a)。表明风化粘土层对油气起了很好的遮挡作用,使得上下油气并没有连通,形成相互独立的油藏。而在风化粘土层、“硬壳”不发育的地区,前第三系半风化岩石渗透层可与上覆第三系渗透层在许多部位对接,使前第三系顶部形成“天窗”。前第三系的油气可通过“天窗”上窜至埋藏较浅的第三系,进一步运聚成藏。

二是无“硬壳”的半风化岩石多成为良好储层。半风化岩石与原岩相比,物性多得到明显改善。既使对于一些原岩物性很差的变质岩、火成岩及部分碳酸盐岩等,其半风化岩石由于具有较好储集效能,也会成为优质储层。当盖层及侧向遮挡条件具备时,则成为有利的聚油场所。如义和庄、乐安等地区的奥陶系半风化灰岩、王庄地区的太古宇半风化片麻岩等,厚度一般十几米至上百米,裂缝、溶洞(孔)段发育,成为主要的油气储集空间,多对应着油气高产层位。

三是不整合面之下不同层系、不同岩性的半风化岩石可连为一体,构成一个横向连通的“半风化岩石连通带”。“半风化岩石连通带”的存在可大大提高前第三系顶部不同地层之间的横向输导性能,使油气侧向长距离穿层运移成为可能。对于圈源距离较远的一些盆缘地层型油藏(田),如乐安油田、林樊家油田、陈家庄油田、太平油田等,“半风化岩石连通

带”则是其油气输导体系中不可或缺的组成部分。

## 5 结论

(1) 济阳拗陷前第三系顶部形成了广泛发育、结构层特征明显的风化壳。其中,风化粘土层厚度较小,以杂色泥岩、铝土质泥岩为主,具低孔、低渗。半风化岩石厚度变化范围大,岩石类型复杂多样,物性一般较好;但在局部范围内其顶部往往有一层致密“硬壳”,物性差。

(2) 前第三系顶部风化壳结构形成受控于原岩岩性、间断时间、古气候、古地形、上覆层沉积环境等 5 大因素;多种因素共同作用,决定了不整合结构空间发育状况。风化粘土层主要发育在斜坡上地形相对平缓处,下伏地层多为碎屑岩;半风化岩石在全区广泛存在,由凸起顶部到斜坡,厚度总体上有着减小的趋势。

(3) 风化壳结构发育特征对油气成藏产生着重要影响。风化粘土层、半风化岩石顶部“硬壳”对油气起遮挡、封盖作用,在两者发育的地区,可将上下地层分隔成为两个相对独立的油气运聚系统;在两者不发育的地区,风化壳渗透层可与上覆第三系的渗透层对接,形成前第三系油气上窜的“天窗”。无“硬壳”的半风化岩石多具有较好储集效能,经常会成为优质储层。不整合面之下不同层系的半风化岩石则易构成一个横向连通的“半风化岩石连通带”,利于油气进行侧向长距离穿层运移。

## 参 考 文 献

- 曹剑,胡文暄,张义杰,等. 2006. 准噶尔盆地油气沿不整合运移的主控因素分析. 沉积学报, 24(3): 399~405.  
杜恒俭,曹伯勋,陈华慧. 1978. 地貌学与第四纪地质学. 北京:地质出版社

- 版社,80~84.
- 冯志刚,王世杰,刘秀明,等. 2003. 碳酸盐岩风化壳母岩的不均一性: 来自粒度分析的证据. 成都理工大学学报(自然科学版),30(6): 635~643.
- 付广,段海凤,孟庆芬. 2005. 不整合及输导油气特征. 大庆石油地质与开发,24(1):13~16.
- 高长海,查明. 2008. 不整合运移通道类型及输导油气特征. 地质学报,82(8):1113~1120.
- 姜在兴. 2003. 沉积学. 北京:石油工业出版社,7~15.
- 李德文,崔之久,刘耕年,等. 2001. 岩溶风化壳形成演化及其循环意义. 中国岩溶,20(3):183~188.
- 李德文,崔之久,刘耕年. 2002. 风化壳研究的现状与展望. 地球学报,23(3):283~288.
- 李景阳,梁凤,朱立军. 2005. 两种典型碳酸盐岩红土风化剖面的物理化学特征. 中国岩溶,24(1):28~34.
- 李丕龙,张善文,王永诗,等. 2003. 多样性潜山成因、成藏与勘探——以济阳坳陷为例. 北京:石油工业出版社,30~120.
- 李平平,邹华耀,郝芳. 2006. 准噶尔盆地腹部侏罗系顶部风化壳的发育机制及其油气成藏效应. 沉积学报,24(6):889~895.
- 李荣西,胡瑞忠,方维萱. 2005. 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. 地质科学,40(1):120~124.
- 李叔达. 1983. 动力地质学原理. 北京:地质出版社,146~148.
- 潘元林,张善文,肖焕钦,等. 2003. 济阳断陷盆地隐蔽油气藏勘探. 北京:石油工业出版社,28~32.
- 潘钟祥. 1983. 不整合对于油气运移聚集的重要性. 石油学报,4(4):1~10.
- 胜利油田石油地质志编写组. 1993. 中国石油地质志(卷六). 北京:石油工业出版社,18~83.
- 隋风贵,赵乐强. 2006. 济阳坳陷不整合结构类型及控藏作用. 大地构造与成矿,30(2):162~166.
- 吴孔友,查明,洪梅. 2003a. 准噶尔盆地不整合结构的地球物理响应及油气成藏意义. 石油实验地质,25(4):328~332.
- 吴孔友,查明,洪梅. 2003b. 准噶尔盆地不整合结构模式及半风化岩石的再成岩作用. 大地构造与成矿学,27(3):270~276.
- 谢寅符,李洪奇,孙中春. 2006. 准噶尔盆地石南地区侏罗系—白垩系间风化壳的发现及其地层学意义. 地质论评,52(1):137~144.
- 张建林. 2004. 地层风化壳对油气运移和封堵的作用. 油气地质与采收率,12(2):26~29.
- 张克银,艾华国,吴亚军. 1996. 碳酸盐岩顶部不整合面结构层及控油意义. 石油勘探与开发,23(5):16~19.
- 赵景波,黄春长,岳应利. 2001. 中国黄土中的风化壳研究. 沉积学报,19(1):90~95.
- Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23: 921~924.
- Hopkins J C. 1999. Characterization of reservoir lithologies with in subunconformity pools: Pekisko Formation, Medicine River Field, Alberta, Canada. *AAPG Bulletin*, 83(11):1855~1870.
- Jason R P, Michael A V. 2003. Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks. *Chemical Geology*,202(3~4):397~416.
- Saller A H, Budd D A, Harris P M. 1994. Unconformite sand porosity development carbonate strata: ideas from a Hedberg Conference. *AAPG Bulletin*,78(6):857~872.

## Structure Characteristics of Weathered Crust at the Top of Pre-Tertiary in the Jiyang Depression and Its Influence on Reservoir Formation

ZHAO Leqiang<sup>1,2)</sup>, ZHANG Jinliang<sup>1)</sup>, SONG Guoqi<sup>2)</sup>,  
SUI Fenggui<sup>2)</sup>, WANG Xuejun<sup>2)</sup>, XIANG Lihong<sup>2)</sup>

1) College of Marine Geoscience, Ocean University of China, Qingdao, Shandong, 266100;

2) Geological Scientific Research Institute, Shengli Oilfield Company of SINOPEC, Dongying, Shandong, 257015

### Abstract

Based on integrated study, the paper discussed the structural characteristics of the weathered crust on top of Pre-Tertiary in the Jiyang depression. Key factors controlling its formation, structural model of the weathered crust and its influence on the reservoir formation were also discussed. The research showed that weathered clay layer in the studied weathered crust is thin with limited distribution, suggesting a poor reservoir property; while semi-weathered rock of various lithologies extensively developed in the whole area, except for the tight "crust" on the top of semi-weathered carbonate stone, reservoir property was improved obviously. Structure of weathered crust is controlled by lithofacies, paleoclimate, weathering time, paleotopography, and sedimentary environment of the overlying strata. All these factors determine spatial distribution of the structure of weathered crust. The weathered clay layer and "crust" on the top of semi-weathered rock serves as caprock for petroleum reservoir, while semi-weathered rock without "crust" can improve reservoir property of Tertiary system and serve as lateral migration path between different strata.

**Key words:** Pre-Tertiary; weathered crust structure; reservoir formation; Jiyang depression

