

文章编号: 1000-0550(2008)03-0435-10

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^①

赵乐强^{1,2} 张金亮¹ 宋国奇² 隋风贵² 王学军² 向立宏² 卓勤功²

(1 中国海洋大学海洋地球科学学院 山东青岛 266109)

(2 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司地质科学研究院 山东东营 257015)

摘要 基于地质综合研究,系统分析了济阳拗陷义和庄凸起东部地区前第三系顶部风化壳结构特征,深入剖析了其形成主控因素,建立了该区风化壳结构发育模式,并探讨了风化壳结构对油气运聚的影响。研究认为,义和庄凸起东区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顶部存在一层致密“硬壳”外,物性多得到明显改善。风化壳结构形成受控于岩相、气候、时间、古地形、构造、后期保存程度等 6 大因素;多种因素相互耦合,决定了风化壳结构的发育;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 风化壳结构 发育模式 油气运聚 义和庄凸起

第一作者简介 赵乐强 男 1972 年出生 高级工程师 博士研究生 沉积学与石油地质学 E-mail: zll@spj.com

中图分类号 P512.2 TE122.1 文献标识码 A

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^[1~9]。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^[10~16],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尤其具有重要意义。济阳拗陷义和庄地区多年来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。前人曾对该区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的运聚起了重要作用^[9,17~19],但较深入的分析尚未开展。本文试图从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,建立起风化壳结构空间发育模式,在此基础上,进一步探讨风化壳结构发育状况对油气运聚的影响。

1 地质概况

义和庄凸起位于渤海湾盆地济阳拗陷西北部,是一个分隔车镇凹陷与沾化凹陷的大型正向构造单元(图 1)。凸起南为义南断层,东为义东断层,分别与邵家洼陷、四扣洼陷相隔;北、西为相对宽缓的斜坡。

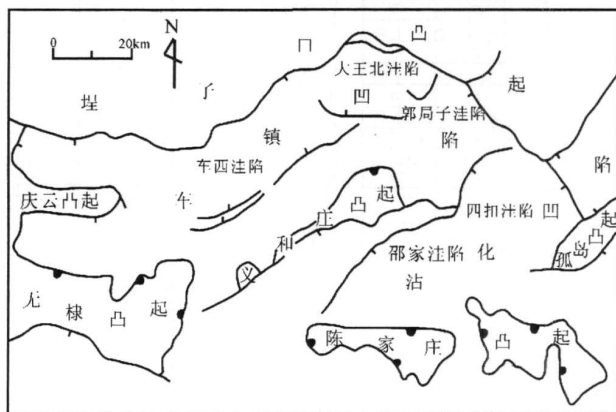


图 1 义和庄凸起及研究区位置示意图

(据参考文献[18]编辑)

Fig. 1 Location of Yihezhuang uplift and the study area
(After Zhang Jiazheng 2003).

①中国石油化工股份有限公司重大科技攻关课题“济阳拗陷第三系不整合油气藏形成与分布规律”(R6012)资助。

收稿日期: 2007-08-18 收修修改稿日期: 2007-10-10

义和庄凸起具有典型的“双元地质结构”^[18]。前第三系顶面总体呈南高、北低，西高、东低的构造形态，由于长期遭受风化、剥蚀，顶面具凸凹不平，沟梁相间的古地貌特征。从南向北依次出露寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系、中生界，各层系均为北倾。古近系及新近系馆陶组下段由低到高逐层超覆、尖灭，新近系馆陶组上段及以上地层覆盖全区。义和庄凸起东部地区先后发现了寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系、中生界、古近系、新近系等多套含油层系。其中，寒武系、奥陶系主要碳酸盐岩，发育潜山风化壳油藏与潜山内幕油藏；石炭系、二叠系、中生界岩石类型主要为碎屑岩，局部夹有火成岩等特殊类型岩石，发育地层不整合遮挡油藏；古近系、新近系以碎屑岩为主，发育地层超覆、构造及岩性油藏。

2 风化壳结构基本特征

一个理想的风化壳垂向结构，由上往下依次为风化粘土层、半风化岩石^[20]。义和庄凸起在沉积第三系之前，前第三系曾遭受了长期的风化剥蚀，其顶部风化壳广泛发育。从该区近百口井的钻井、录井、测井、岩心资料分析来看，风化壳结构中有时会缺失风化粘土层，而只发育半风化岩石（图 2）。

2.1 风化粘土层

风化粘土层也称古土壤，位于风化壳最上部，是在物理风化的基础上，生物化学风化作用改造下形成的细粒残积物^[12]。该区风化粘土层厚度不大，一般 0~3 m 位于部分碎屑岩风化壳顶部。岩石类型为块状杂色泥岩、灰白色铝土质泥岩，部分泥岩中含石英质细砾。原岩结构几乎完全遭破坏，无沉积构造（图 3 a）。岩石物性较差，测井解释孔隙度 5%~12%，渗透率 $1 \times 10^{-3} \sim 7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

矿物成分以粘土矿物、石英为主，两者含量近 90%，基本不含长石（图 4）。粘土矿物中以高岭石和伊—蒙混层为主，次为伊利石和绿泥石，说明风化过程复杂，化学风化、物理风化等都起过重要作用。

地球化学元素中 Al、Fe、Mn、T 等难迁移元素相对富集；Ca、Mg、K 等易迁移元素明显缺乏，特别是 Ca 元素，几乎全部损失。但不同性质风化粘土层中各种元素之间的富集或贫化程度有一定差异。如杂色泥岩中 Fe、Mn 富集程度相对要高于铝土质泥岩，而 Al 的富集程度则相反。根据风化成土过程阶段划分^[21-22]，推测杂色泥岩尚处于早期富硅铝脱钙镁过程阶段—中期富锰铁过程阶段，而铝土质泥岩则处于晚期富铝脱硅过程阶段。

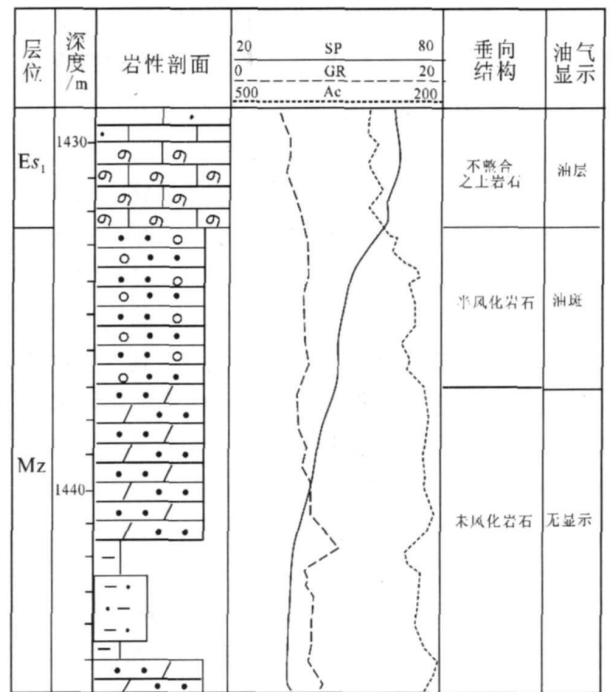
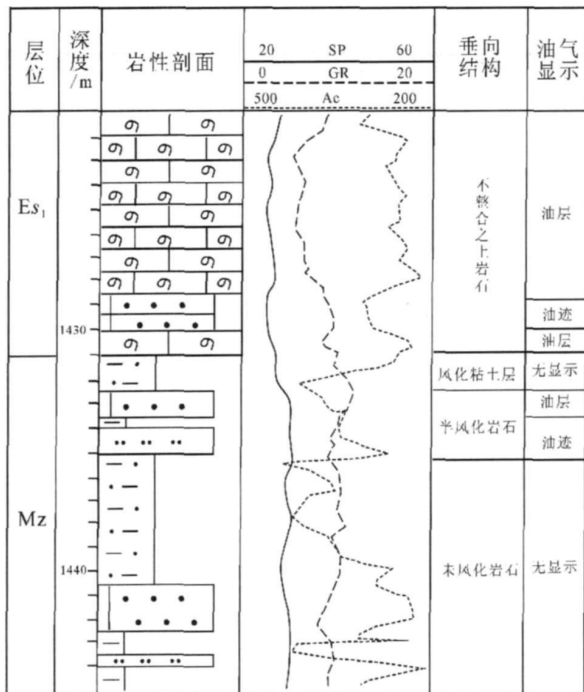


图 2 义和庄凸起东区前第三系顶部风化壳结构示意图（a 沾北 2 井，b 沾北 4 井）

化学蚀变指数 (CIA) 是用来刻画岩石风化程度的一个重要指标 (Nesbitt 1982), 其计算式: $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)] \times 100$ 。一般地, 当岩石未发生风化时, CIA 值低于 50; 当完全风化时, CIA 值为 100。根据沾北 2 井等部分岩心样品的分析, 该区风化粘土层 CIA 值均在 75 以上, 反映了原岩总体风化程度较高。但杂色泥岩、铝土质泥岩等不同岩性之间有一定差异, 前者 CIA 值在 75~85 之间, 后者 CIA 值一般大于 85。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 Budel (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^[23]。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, 既有碳酸盐岩, 也有碎屑岩, 还有火成岩。不同类型岩石, 各有其特点。

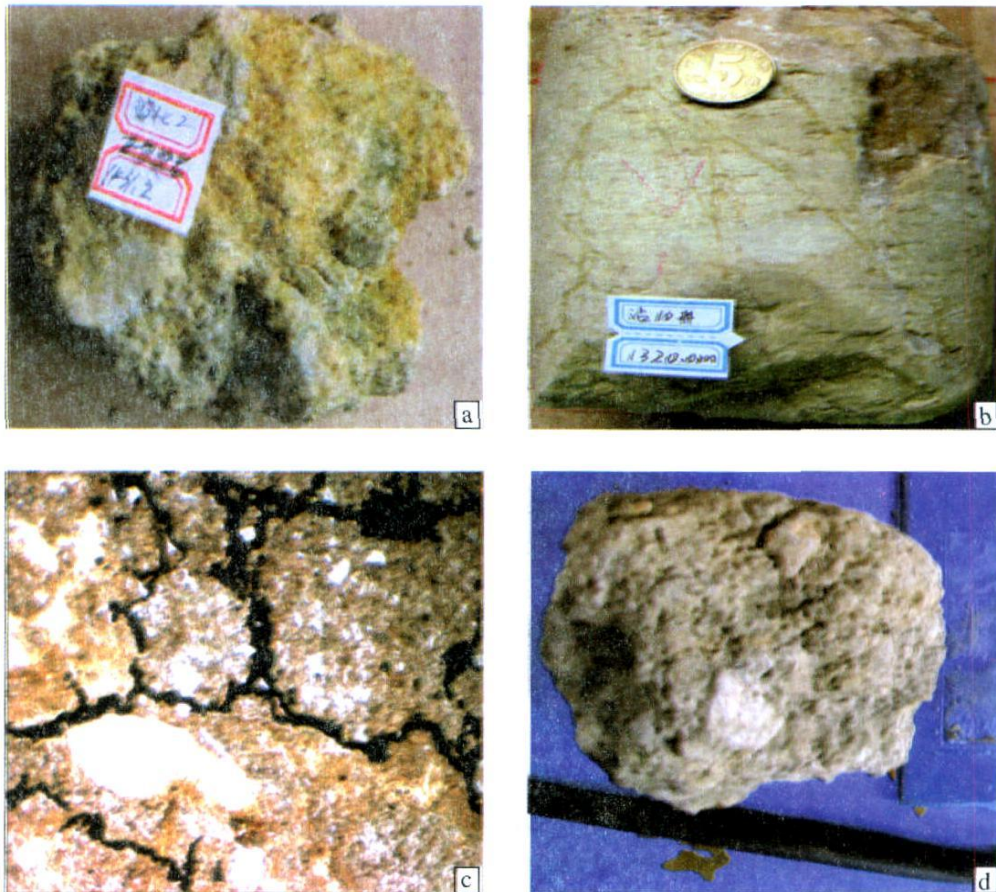


图 3 义和庄凸起东区前第三系顶部风化壳中部分风化粘土层、半风化岩石照片

(a) 中生界风化壳顶部风化粘土层, 杂色泥岩, 沾北 2 井, 1 431.2 m 岩心; (b) 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, 1 320.0 m 岩心; (c) 中生界半风化粉砂岩, 微裂缝发育, 缝中见油迹, 沾北 2 井, 1 433.6 m 薄片, 单偏光, 5×10; (d) 石炭系一二叠系半风化泥岩, 裂缝发育, 缝中见油迹, 沾北 1 井, 1 409 m 岩心。)

Fig 3 Photographs showing a part of weathered clay layer and semi-weathered rock at the top of Pre-Tertiary in the east of Yihetzhuang uplift

(a) weathered clay layer at the top of Mesozoic weathered crust varicolored mudstone Well Zhanbei 2 1 431.2 m core
 (b) compact crust at the top of semi-weathered limestone in Ordovician fracture filled by clay and calcium Well Zhan 10 1320.0 m core
 (c) semi-weathered siltstone in Mesozoic abundance of tiny fracture in which oil trace having been found Well Zhanbei 2 1 433.6 m thin section 5×10
 (d) semi-weathered mudstone in Carboniferous and Permian abundance of tiny fracture in which oil trace having been found Well Zhanbei 1 1 409 m core.

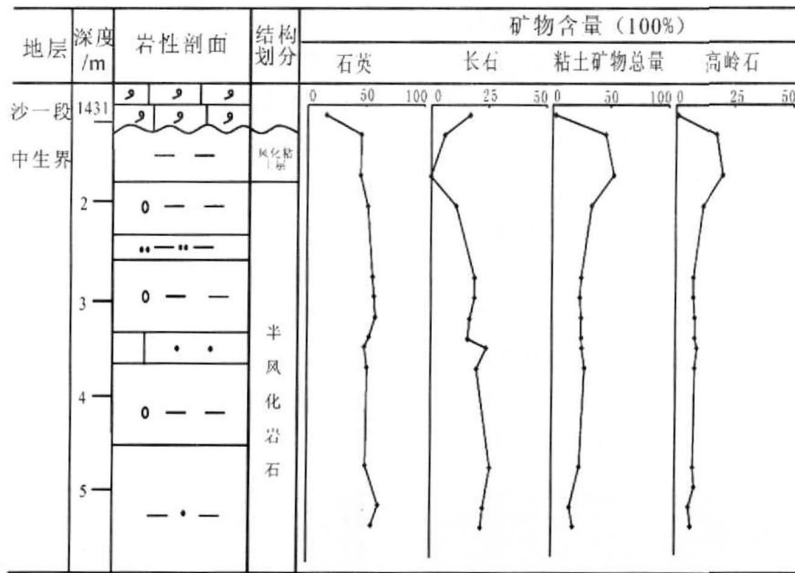


图 4 沾北 2 井中生界顶部风化壳矿物含量纵向变化图

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

①半风化碳酸盐岩

岩性以灰岩、白云岩为主。岩石厚度一般在几十米至上百米。半风化岩石中裂缝、溶洞、溶孔发育，为主要的储集空间类型。从岩心观察来看，裂缝成杂乱的网格状，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泥质或钙质充填，形成一层厚约 2~13 m 的致密“硬壳”（图 3 b）。致密“硬壳”物性很差，孔隙度一般 1%~5%，渗透率极低。电测曲线特征表现为，AC 曲线呈锯齿状，起伏跳跃较大，总体有向数值减小方向变化的趋势；当“硬壳”存在时，其对应的 AC 曲线值低，反映岩石致密声波传播速度快。

②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，一是长石颗粒、钙质胶结物及部分岩屑等易溶物质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 3 c）。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 $4 \times 10^{-3} \sim 175 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ （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）。

表 1 义和庄凸起东区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 non-weathered sandstone at the top of Pre-Tertiary in the east of Yiheshuang uplift

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 / $10^{-3} \mu\text{m}^2$
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	G-P	2114	半风化砂岩	2114~2118.5	25	200
			未风化砂岩	2118.5~2130	15	25
沾 192	G-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	G-P	2948	半风化中砂岩	2948~2957	16	59.1
			未风化中砂岩	2957~2967	10	15

半风化泥岩同其它岩石一样, 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 1 408.8 ~ 1 409.8 m 处, 为半风化泥岩, 厚度约 1 m, 测井解释孔隙度 15%, 渗透率 $8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 岩心微裂缝发育, 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 3 d)。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^[19]。半风化泥岩与风化粘土层相比, 可从四个方面来进行区别, 一是前者一般有较明显的沉积构造, 并经常见网状风化裂缝, 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 Mn 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的 Ca 元素几乎损失殆尽, 而半风化岩石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 ~ 75 之间, 而后者多大于 75。

③ 半风化火成岩

岩性主要为安山岩, 厚度较小, 一般夹于前第三系碎屑岩地层中, 仅在局部地区发育。此类岩石具有不易溶蚀, 坚硬易碎的特点。在暴露至地表时, 受构造作用与上覆地层卸载的双重影响, 易形成许多张性裂缝。大气降水进入裂缝对岩石进行溶蚀, 在裂缝处发生矿物的蚀变, 并形成部分次生孔隙, 但孔隙较小, 直径一般小于 3 mm, 连通性较差。部分裂缝被方解石充填, 裂缝周围高岭石、绿泥石化现象明显。

3 风化壳结构形成主控因素及发育模式

义和庄凸起东区前第三系顶部风化壳结构的形成与特定的岩相、气候、时间、古地形、构造活动、后期保存程度等因素密切相关。多种因素相互耦合, 决定了该区风化壳结构空间发育。

3.1 风化壳结构形成主控因素

① 岩相

岩相是风化壳形成的基础。岩相类型不同, 风化壳结构会有较大差异。例如, 对于碳酸盐岩, 此类岩石具有易溶蚀、性脆等特点。在暴露至地表时, 会在浅层形成许多风化裂缝。在无早期裂缝、断层影响区, 风化裂缝一般分布在地表下 50 ~ 80 m 范围内^[9]。形成的裂缝为后期大气降水对岩层溶蚀的提供了有

利条件。随着大气降水的淋滤作用, 很容易发生“侧向溶蚀”和“垂向溶蚀”, 易溶的碳酸盐矿物不断流失, 形成大量的溶洞 (孔、缝)。由于酸不溶物含量极低, 在风化过程中会伴随着巨大的体积缩小变化, 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^[24]。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节理或裂隙可以不断吸纳地表的风化碎屑物, 导致表层“土壤丢失”^[25]。对于碎屑岩, 情况有较大不同。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^[24], 碎屑岩形成风化粘土层相对更容易。碎屑岩在暴露至地表时, 尽管也会在浅层形成许多风化裂缝, 但规模远不如碳酸盐岩。在风化过程中多发育溶孔, 而裂隙很小, 形成的风化粘土层很难发生因向下渗漏而造成的“土壤丢失”。因此, 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 5), 而寒武系—奥陶系碳酸盐岩风化壳中风化粘土层少见, 多只存在半风化岩石, 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”。

② 气候

气候主要是通过影响风化作用的类型来影响风化壳的形成。一般地, 潮湿气候条件下, 以化学风化为主; 干旱气候条件下, 则以物理风化为主^[22]。整个古近纪期间, 气候先后经历了干旱→潮湿→干旱的变化^[26]。但气候的这种变化并不是对凸起所有部位的影响是对等的。根据岩相古地理分析^[26], 义和庄凸起上部在古近系沉积期间一直处于风化剥蚀状态, 因此在气候上先后经历了完整的干旱→潮湿→干旱的变化, 相对应的风化作用经历了以物理风化为主→化学风化为主→物理风化为主的变化过程。凸起斜坡上部, 古近系的 E_3 已有了一定规模沉积, 这阻碍了前第三系的继续风化, 其风化过程经历的气候变化为干旱→潮湿, 相应的风化作用为以物理风化为主→以化学风化为主; 凸起斜坡下部, 古近系的 E_3 已发生沉积, 之后的气候变化很难再对前第三系的风化产生影响。由于 E_3 之前基本为干旱—半干旱气候, 因此其风化作用以物理风化为主。凸起不同部位风化过程所经历的气候变化, 对风化壳发育产生重要影响。风化粘土层主要是生物化学风化作用为主的产物^[13]。在义和庄凸起未发育古近系的顶部, 可能曾经有风化粘土层的形成, 但由于后期的物理风化、剥

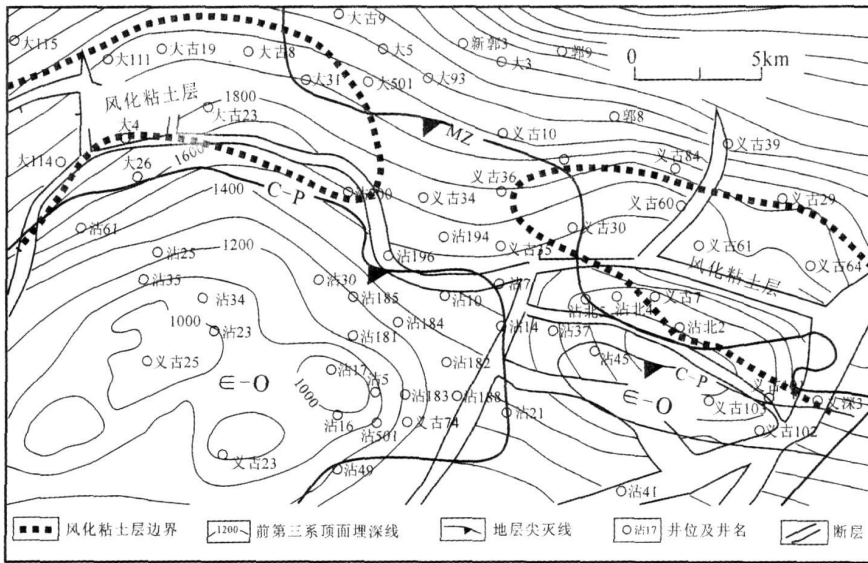


图 5 义和庄凸起东区前第三系顶部风化粘土层分布

Fig. 5 The distribution of weathered clay layer at the top of Pre-Tertiary in the east of Yizhuang uplift

蚀而没有保存下来;在凸起斜坡上部,特别是现今仍有古近系 E₃分布的地区,前第三系停止风化前的气候潮湿,有利于风化粘土层的发育;而在凸起斜坡下部,前第三系风化时气候比较干旱,一般不太利于风化粘土层的形成。

③ 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,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^[27]。事实似乎并不全然。如赵景波等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 5~10 万年左右就已转变成厚度在 3~6 m 的风化壳^[28]。当然如此短的时间能形成风化壳,是在特定物质(细粒松散层)、特定气候(潮湿)前提下实现的。但这至少表明,当其它条件有利时,风化粘土层形成所需要的时间会缩短。按照地层发育状况,义和庄凸起在沉积第三系之前,至少间断了十几个百万年以上^[9,26]。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,杂色泥岩多位于凸起较低部位,而铝土质泥岩则主要发育于凸起较高部位,反映出凸起不同部位所处的风化成土阶段有一定差异。初步推测一个重要原因可能是凸起低部位由于位置低,暴露时间相对较短,尚未进入完全风化成土阶段,就已沉积了古近系,阻止了风化作用的继续;而靠近凸起

高部位,暴露时间较长,风化作用相对更彻底。

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。义和庄凸起自新近纪以来构造相对稳定,根据馆下段地层厚度能大致判断出新近系开始沉积时的古地形高差。从馆下段地层厚度来看,凸起斜坡低部位地层厚度最大约 800 m 若再考虑地层的压实,表明新近系沉积初期前第三系古地形高低落差至少在 800 m 以上。如此高的落差,必然会对风化与剥蚀产生重要影响。正如前面所述,地形越高,在上覆地层沉积前暴露时间越长,风化程度就越强烈。另外,地形越高,地下水位相对低,物理风化作用越明显,同时侵蚀作用也相对较强烈。因此,较高的地形,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^[20]。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。如沾 10—沾 194—义古 34—

线, 存在一近南北向、宽约 3 km 深约 50 m 的古冲沟, 在古冲沟处不发育风化粘土层 (图 5)。

⑤ 构造活动

构造活动直接结果有两个, 一是造成地形变化, 二是产生许多构造裂缝。其中, 由构造活动造成地形变化进而影响风化壳的发育, 已归到古地形因素中, 不再重述。这里关注的是后者。构造裂缝的发育会大大加快下伏地层的淋滤、溶蚀, 对于碳酸盐岩潜山尤为明显。如凸起东部断至寒武系—奥陶系的各断层附近, 灰岩潜山溶蚀和裂缝均较发育, 多为中强岩溶; 而远离断层的部位, 其溶蚀程度要差一些, 一般均在潜山顶部几十米或百米以内出现溶蚀现象, 但溶蚀段一般不是太长^[29]。

⑥ 后期保存程度

后期保存程度直接关系到风化壳的最终发育状态。它与上覆层沉积时对下伏地层的侵蚀程度密切相关。当侵蚀明显时, 风化壳保存程度低; 反之, 则保存程度高。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, 一定还要注意研究其后期保存程度, 尤其是上覆层的沉积相。一般地, 当上覆层沉积环境为古河道或其它水动力较强的环境时, 其下伏层的风化壳往往会遭受侵蚀, 风化粘土层一般不发育, 半风化岩石也变薄。

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, 建立起了义和庄凸起前第三系顶部风化壳结构空间发育模式 (图 6)。在凸起上部, 前第三系为寒武系—奥陶系的碳酸盐岩, 上覆层多为新近系 Ng 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。在凸起斜坡中部, 前第三系主要

为石炭—二叠系的碎屑岩, 局部有寒武系—奥陶系的碳酸盐岩, 上覆层主要为古近系 E₃ 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上部要小的多。在凸起斜坡下部, 前第三系主要为中生界的碎屑岩, 上覆层主要为古近系 E₃ 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, 致使此区风化粘土层不太发育, 同时半风化岩石厚度也不大。

4 对油气运聚的影响

义和庄凸起东区西高东低、南高北低的古地形, 为油气自东向西运移提供了有利背景。来自四扣洼陷的油气, 一部分穿过义东断层进入该区与烃源岩体对接的前第三系, 并继续运移、聚集; 另一部分沿断层面进行垂向运移, 再沿第三系横向运移, 聚集在第三系地层圈闭中^[9 17-19]。

笔者认为, 前第三系顶部风化壳的垂向结构及空间发育状况对义和庄凸起东区的油气运聚产生着重要影响。

一是低孔、低渗的风化粘土层、半风化岩石顶部“硬壳”等对油气运移起到了遮挡或封盖作用。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 E₃ 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 2 a 图 3 a)。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。在风化粘土层、“硬壳”不发育的地区, 前第三系

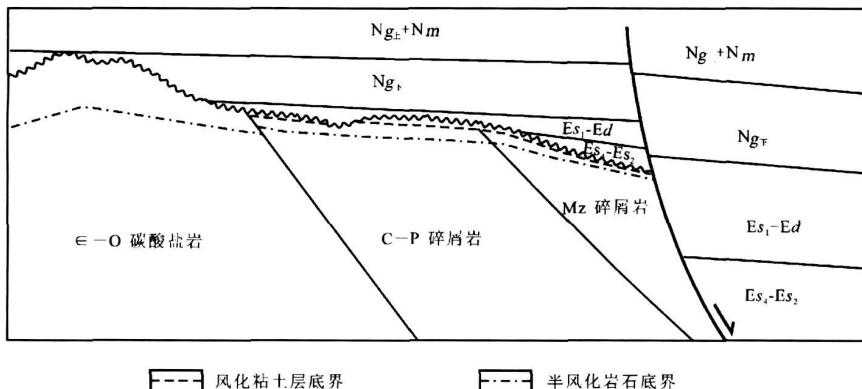


图 6 义和庄凸起东区前第三系顶部风化壳结构空间发育模式图

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。

二是半风化岩石改善了岩层物性,使前第三系顶部不同层位构成了一个优质的、横向连通的“半风化岩石储集带”,提高了不同层系的横向连通性。尽管不同岩性的半风化岩石在物性上有一定差异,但这对该储集带的整体效能影响并不大。“半风化岩石储集带”的存在对油气的运聚起到了两方面作用:一是大大提高了不同地层横向输导性能,使油气侧向长距离并穿层运移成为可能;二是明显改善了地层储集效能,在盖层及侧向遮挡条件具备时,可成为有利的聚油场所。如义古 103 奥陶系灰岩潜山,风化壳厚度过百米,发育多处较大裂缝、溶洞(孔)段,这些井段为主要的油气储集空间,往往对应着油气高产层位。

5 结论

(1) 济阳拗陷义和庄凸起东区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,为低孔、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岩相、气候、时间、古地形、构造活动、后期保存程度等 6 大因素;多种因素相互耦合,决定了不整合结构的发育状况。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 C—P M 的碎屑岩;半风化岩石在全区普遍发育,由凸起顶部到斜坡,厚度总体上有着减小的趋势。

(3) 风化壳结构发育状况对油气运聚产生着重要影响。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”。半风化岩石使前第三系顶部各层位构成了一个优质的、横向连通的“半风化岩石储集带”,可大大提高原岩的储集空间或侧向输导性能。

致谢 编辑与评审专家对本文初稿提出了许多中肯的意见和修改建议,在此深表感谢!

参考文献 (References)

- 潘钟祥. 不整合对于油气运聚聚集的重要性 [J]. 石油学报, 1983 4 (4): 1-10 [Pan Zhongxiang. Significance of unconformity to Petroleum migration and accumulation [J]. Acta Petroleologica Sinica 1983 4(4): 1-10]
- Jason R Price, Michael A Velbel. Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic Parent rocks [J]. Chemical Geology 2003 202 (3-4): 397-416
- Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. Unraveling the effects of porosity metasomatism in sedimentary rocks and paleosols with implications for paleoweathering conditions and provenance [J]. Geology 1995 23: 921-924
- Salter A H, Budd D A, Harris P M. Unconformity sand porosity development carbonate stratigraphic ideas from a Hedberg Conference [J]. AARG Bulletin 1994 78(6): 857-872
- Hopkins J C. Characterization of reservoir lithologies with in situ unconformity pools, Pekisko Formation, Medicine River Field, Alberta, Canada [J]. AARG Bulletin 1999 83(11): 1855-1870
- 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 Huaqun, 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]
- 张建林. 地层风化壳对油气运移和封堵的作用 [J]. 油气地质与采收率, 2004 12(2): 26-29 [Zhang Jianlin. The function of stratigraphic unconformity to the oil gas migration and seal [J]. Oil & Gas Recovery Technology 2004 12(2): 26-29]
- 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 Rongxi, Hu Ruizhong, Fang Weixuan. A preliminary study on organic inclusions of Ordovician weathering crust in Shengli oilfield and its significance [J]. Chinese Journal of Geology 2005 40(1): 120-124]
- 李丕龙, 张善文, 王永诗, 等. 多样性潜山成因、成藏与勘探——以济阳拗陷为例 [M]. 北京: 石油工业出版社, [Li Pilon, Zhang Shanwen, Wang Yongshi, et al. Origin, Pool Forming and Exploration of Diverse Buried Hill: an Example From Jiyang Depression [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003 30-120]
- 曹剑, 胡文暄, 张义杰, 等. 准噶尔盆地油气沿不整合运移的主控因素分析 [J]. 沉积学报, 2006 24 (3): 399-405 [Cao Jian, Hu Wenxuan, Zhang Yijie, et al. The main factor controlling petroleum migration along unconformity in the Junggar Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica 2006 24(3): 399-405]
- 李平平, 邹华耀, 郝芳. 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 [J]. 沉积学报, 2006 24 (6): 889-895 [Li Pingping, Zou Huayao, Hao Fang. Formation mechanism and effect on petroleum accumulation of the weathering crust top of Jurassic in the hinterland of Junggar Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica 2006 24(6): 889-895]
- 吴孔友, 查明, 洪梅. 准噶尔盆地不整合结构模式及半风化岩石的再成岩作用 [J]. 大地构造与成矿学, 2003 27 (3): 270-276 [Wu

- Kongyong Cha Ming Hong Mei. Structural models of unconformity and recurrent diagenesis of semi-weathering rock in Junggar Basin [J.]. *Geotectonica et Metallogenia* 2003 27(3): 270-276
- 13 吴孔友, 查明, 洪梅. 准噶尔盆地不整合结构的地球物理响应及油气成藏意义 [J.]. *石油实验地质*, 2003 25(4): 328-332 [Wu Kongyou, Zha Ming, Hong Mei. Relationship of reservoir formation with unconformities and their geophysical response in the Junggar Basin [J.]. *Petroleum Geology & Experiment* 2003 25(4): 328-332]
- 14 谢寅符, 李洪奇, 孙中春. 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 [J.]. *地质论评*, 2006 52(1): 137-144 [Xie Yinfu, Li Hongqi, Sun Zhongchun. Discovery of a weathering crust between Jurassic and Cretaceous and its stratigraphic significance in the Shinan area of the Junggar Basin [J.]. *Geological Review* 2006 52(1): 137-144]
- 15 隋风贵, 赵乐强. 济阳拗陷不整合结构类型及控藏作用 [J.]. *大地构造与成矿*, 2006 30(2): 162-166 [Sui Fenggui, Zhao Leqiang. The unconformity configuration type and its reservoir forming control in Jiyang Depression [J.]. *Geotectonica et Metallogenia* 2006 30(2): 162-166]
- 16 付广, 段海凤, 孟庆芬. 不整合及输导油气特征 [J.]. *大庆石油地质与开发*, 2005 24(1): 13-16 [Fu Guang, Duan Haifeng, Meng Qingfen. Unconformity and transport hydrocarbon characteristics [J.]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing* 2005 24(1): 13-16]
- 17 王广利, 朱日房, 陈致林, 等. 义和庄凸起及其北部斜坡带油气运聚研究 [J.]. *油气地质与采收率*, 2001 8(4): 12-14 [Wang Guangli, Zhu Rifang, Chen Zhilin, et al. Oil-gas migration and accumulation of Yhezhuang arch and its northern slope belt [J.]. *Oil & Gas Recovery Technology* 2001 8(4): 12-14]
- 18 张家震, 王永诗, 王学军. 渤海湾盆地义和庄凸起北坡成藏特征与油藏分布规律 [J.]. *石油实验地质*, 2003 25(4): 363-365 [Zhang Jiazhen, Wang Yongshi, Wang Xuejun. Formation and distribution of hydrocarbon reservoirs in the northern slope of the Yhezhuang arch, the Bohaiwan Basin [J.]. *Petroleum Geology & Experiment* 2003 25(4): 363-365]
- 19 石砥石. 济阳拗陷太平油田网毯式油气成藏体系研究 [J.]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2005 32(6): 592-596 [Shi Dishishi. Study of the meshwork carpet type oil and gas accumulation system in the Taiping oil field, Jiyang Depression [J.]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science of Technology Edition)*, 2005 32(6): 592-596]
- 20 李叔达主编. 动力地质学原理 [M.]. 北京: 地质出版社, 1983: 146-148 [Li Shuda. Principle of Dynamical Geology [M.]. Beijing: Geological Publishing House, 1983: 146-148]
- 21 李景阳, 梁风, 朱立军. 两种典型碳酸盐岩红土风化剖面的物理化学特征 [J.]. *中国岩溶*, 2005 24(1): 28-34 [Li Jingyang, Liang Feng, Zhu Lijun. Physical and chemical properties of two typical weathered profiles of carbonate rocks [J.]. *Carsologica Sinica* 2005 24(1): 28-34]
- 22 姜在兴主编. 沉积学 [M.]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 7-15 [Jiang Zaixing. Sedimentology [M.]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 7-15]
- 23 李德文, 崔之久, 刘耕年. 风化壳研究的现状与展望 [J.]. *地球学报*, 2002 23(3): 283-288 [Li Dewen, Cui Zhiou, Liu Gengnian. Present situation and prospects of researches on weathering crust [J.]. *Acta Geoscientica Sinica* 2002 23(3): 283-288]
- 24 冯志刚, 王世杰, 刘秀明, 等. 碳酸盐岩风化壳母岩的不均一性: 来自粒度分析的证据 [J.]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2003 30(6): 635-643 [Feng Zhigang, Wang Shijie, Liu Xiuming, et al. The heterogeneity of the basement carbonate rocks developing weathering crust: the evidence from grain size analysis [J.]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science of Technology Edition)*, 2003 30(6): 635-643]
- 25 李德文, 崔之久, 刘耕年, 等. 岩溶风化壳形成演化及其循环意义 [J.]. *中国岩溶*, 2001 20(3): 183-188 [Li Dewen, Cui Zhiou, Liu Gengnian. Formation and evolution of karst weathering crust on limestone and its cyclic significance [J.]. *Carsologica Sinica* 2001 20(3): 183-188]
- 26 潘元林, 张善文, 肖焕钦, 等. 济阳断陷盆地隐蔽油气藏勘探 [M.]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 28-32 [Pan Yuanlin, Zhang Shanwen, Xiao Huanqin, et al. The Exploration on Subtle Reservoir in Jiyang Depression [M.]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 28-32]
- 27 杜恒俭, 曹伯勋, 陈华慧. 地貌学与第四纪地质学 [M.]. 北京: 地质出版社, 1978: 80-84 [Du Hengjian, Cao Boxun, Chen Huahui. Geomorphology and Quaternary Period Geology [M.]. Beijing: Geological Publishing House, 1978: 80-84]
- 28 赵景波, 黄春长, 岳应利. 中国黄土中的风化壳研究 [J.]. *沉积学报*, 2001 19(1): 90-95 [Zhao Jingbo, Huang Chunchang, Yue Yingli. Residual in mass of China [J.]. *Acta Sedimentologica Sinica* 2001 19(1): 90-95]
- 29 王永诗, 徐国盛, 胡远来. 济阳拗陷义和庄古潜山溶蚀、裂缝发育带灰色遗传识别 [J.]. *成都理工学院学报*, 2002 29(2): 174-180 [Wang Yongshi, Xu Guosheng, Hu Yuanlai. Gray heredity identification of upgrowth zones with solution and fissures of Yhezhuang Paleozoic buried hills in Jiyang Depression [J.]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science of Technology Edition)*, 2002 29(2): 174-180]

Structure Model of Weathered Crust on the Top of Pre-Tertiary and Its Influence on Petroleum Migration and Accumulation in East Part of Yihetzhuang Uplift

ZHAO Le-qiang² ZHANG Jin-liang SONG Guo-qí SUI Feng-guǐ
WANG Xue-juǎ XIANG Li-hong ZHUO Qin-gong

(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 analyzed characteristics of the structure of weathered crust on the top of Pre-Tertiary in the east part of Yihetzhuang uplift of Jiyang depression. Key factors controlling its formation were analyzed. A structure model of weathered crust was established, and its influence on petroleum migration and accumulation was discussed. Results show that weathered clay layer in the studied weathered crust is thin with limited distribution, and reservoir property is poor, while semi-weathered rock of various lithologies extensively developed in the whole area, except for the tight "hard crust" on the top of semi-weathered carbonate stone, reservoir property was improved obviously. Structure of weathered crust was controlled by lithofacies, paleoclimate, weathering time, paleotopography, tectonic structure, and later stage preservation. Reciprocal coupling of these factors determines spatial distribution of the structure of weathered crust. The weathered clay layer and "hard crust" on the top of semi-weathered rock serves as caprock for petroleum reservoir, while semi-weathered rock without "hard crust" can improve reservoir property of Tertiary system and serve as lateral migration path between different strata.

Key words Pre-Tertiary weathered crust structure, development model, petroleum migration and accumulation, Yihetzhuang uplift