

古风化壳孔隙与裂缝发育特征及其油气地质意义

李晓燕^{1,2}, 蒋有录¹, 陈涛^{1,2}

(1. 中国石油大学 地球资源与信息学院, 山东 东营 257061;

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 257001)

摘要: 通过总结前人研究结果, 利用数据整理、薄片观察等方法对古风化壳中孔隙和裂缝的发育规律进行了分析, 并探讨了古风化壳结构的油气地质意义。研究表明, 发育完全的古风化壳具有风化黏土层和半风化岩石的分层结构; 半风化岩石中部孔隙和裂缝较发育, 向上向下规模逐渐减小, 至风化黏土层大孔隙和裂缝不发育。通过实例汇总认为, 影响半风化岩石孔缝系统发育程度的主要因素包括风化基岩的岩性、风化的时间和强度、风化壳形成时期的剥蚀厚度和古风化壳的埋藏深度以及裂缝孔隙的充填特征。风化黏土层岩性致密, 对油气的保存具有建设性作用; 半风化岩层中部的孔缝连通体, 既为油气运移的良好通道, 也可作为油气聚集的有效储层。

关键词: 古风化壳; 孔隙; 裂缝; 封盖层; 运移通道

中图分类号: P618. 13; TE122 文献标志码: A 文章编号: 1672-6561(2010)01-0060-05

Characteristics and Petroleum Geological Significance of Pores and Fissures Developed in the Paleo Weathered Crust

LI Xiao-yan^{1,2}, JIANG You-lu¹, CHEN Tao^{1,2}

(1. School of Geo-resources and Information, China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong, China;

2. Geological Scientific Research Institute, Shengli Oilfield Company, China Petroleum and Chemical Corporation, Dongying 257001, Shandong, China)

Abstract The characteristics of the pores and fissures developed in the paleo weathered crust are analyzed by means of summarizing the achievement of the formers' research, sorting data and observing thin section, and the petroleum geological significance of its structure is discussed. The result shows that the developed paleo weathered crust is quantizing structure, which includes weathered clay layer and semi-weathered rock; the middle pores and fissures of the sapropelic rock are intermediately developed, the upper and lower gradually decreases, and there is no development in big pore and fissures of weathered clay layer. According to the example analysis, it is summarized that the main factors affecting the development of pores in semi-weathered include lithology of weathered bedrock, weathering duration and intensity, the denuding thickness and the buried depth during the formation period of the weathered crust, and the filling characteristics of the pores and fissures. The compaction of lithology weathered clay layer could play a constructive role in keeping oil and gas; the pore connectivity in the middle part of the semi-weathered rock is excellent migration pathway and effective reservoir for oil and gas.

Key words: paleo weathered crust; pores; fissures; capping layer; migration pathway

0 引言

20 世纪 50 年代, Levorsen^[1] 就指出, 不整合面上下发现众多油气藏的实例表明其与油气运移有

着密切的关系。潘钟祥^[2] 也结合典型油藏实例, 总结了不整合面附近油气富集的 5 种因素。近年来, 中国学者^[3-7] 进一步加强了对不整合及其与油气运移关系的研究。研究表明, 不整合面之下的古风化

收稿日期: 2009-04-11

基金项目: 中国石油化工股份有限公司重大科技攻关项目(P06012)

作者简介: 李晓燕(1976-), 女, 山东平度人, 工学博士研究生, 从事油气成藏机理与分布规律研究。E-mail: upclxy@y.ahoo.cn

壳因长期受到风化侵蚀,半风化岩石中孔隙和裂缝较为发育,孔隙度和渗透率都会增高,为油气运移和储存提供了有利条件。另外经历了成土作用的风化壳在顶部会发育风化黏土层,发育良好、厚度较大的古土壤层(风化黏土层)对油气的保存具有建设性作用^[8-9]。因此古风化壳结构及其孔隙裂缝发育特征的研究对于不整合油气藏的勘探实践具有重要意义。

1 古风化壳结构

古风化壳前期经历了具有阶段性的风化作用,后期经历了沉积压实等成岩作用,使其在剖面上表现出明显的分层特征,因而不整合不仅是一个简单的“面”,更是一个“体”,其本身具有较独特的微观结构^[10]。通常认为,风化壳具有垂向分带的结构,其成分和厚度因地而异,主要与岩性、气候、地形和风化作用的时间等因素有关^[11]。古风化壳一般包括上部的风化黏土层和下部的半风化岩石(图1),但在搬运侵蚀作用较强的地区,风化黏土层往往会缺失。发育完全的古风化壳经历了较深的风化作用,已达到成土阶段,而且剥蚀搬运作用较弱,使形成的风化黏土层能够保留或是短距离迁移后沉积下来,在其后的成岩作用下形成黏土岩。由于该黏土岩是风化成因的,富含黏土矿物且岩性致密,因此对油气的运移和保存具有封盖作用。不同的构造部位风化黏土层和半风化岩石的发育特征不同,断陷盆地内一般由盆地边缘向盆地内斜坡风化黏土层逐渐增厚,在隆起或凸起的顶部等高部位风化黏土层有可能缺失,半风化岩层厚度从构造高部位向凹陷方向逐渐变薄^[5,12-15]。

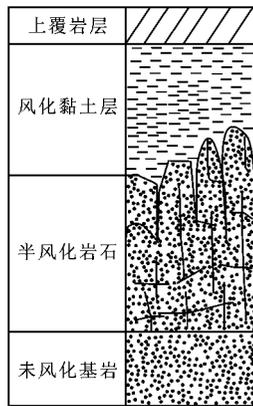


图1 古风化壳结构模式
Fig. 1 Mode Chart of the Paleo Weathered Crust Structure

2 裂缝及孔隙发育特征

2.1 裂缝及孔隙类型

古风化壳中的裂缝主要有风化成因裂缝和卸荷裂缝。风化成因裂缝产状多不规则,可与岩层面垂直、平行或斜交^[16],最初的物理风化作用就可以

使岩石发生破裂形成裂缝系统,风化岩石被埋藏之后,地下水的渗滤作用会深化裂缝的发育程度;卸荷裂缝是因上覆地层被剥蚀造成卸荷而形成,裂缝面大多平行不整合面,延伸长,张开性随深度增加而减弱^[4]。

古风化壳中的孔隙主要有生物孔隙和溶蚀孔隙。生物孔隙是由于近地表处生物活动而形成的大量孔隙,一般风化壳中的生物孔隙在距地表小于50 cm 的深度范围内相对发育频繁且规模较大,一般都被成土矿物或铁锰氧化物充填^[16];溶蚀孔隙是由于地下水的溶蚀作用产生的孔隙,矿物与水接触产生溶解反应时,其反应产物除方解石(CaCO_3)、石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)或硬石膏(CaSO_4)等矿物的溶解组分外,还有新生成的一种或多种矿物或非晶质固体物质,由于这些新生的矿物或称次生矿物与原始矿物组成的不同,他们的分子量、密度等物理化学性质也不同,其所占据的体积空间将发生变化,从而产生了溶蚀孔隙^[17]。

2.2 裂缝及孔隙发育特征

风化壳中裂缝与孔隙的发育规模在垂向上具有明显变化。Ehlen^[18]采用节理间距作为衡量标准对花岗岩风化壳裂缝的发育情况进行的研究表明,由未风化岩石到半风化岩石再到风化黏土层,节理间距先是逐渐减小后又逐渐增大,其转折点位于半风化岩层内部,至风化黏土层中节理极少(图2^[18]),说明在风化壳下部,风化蚀变是主要的作用方式,使裂缝随蚀变作用增强而逐渐密集;而在风化壳上部,风化成土是主要的作用方式,裂缝随着风化黏土层的发育逐渐减少。

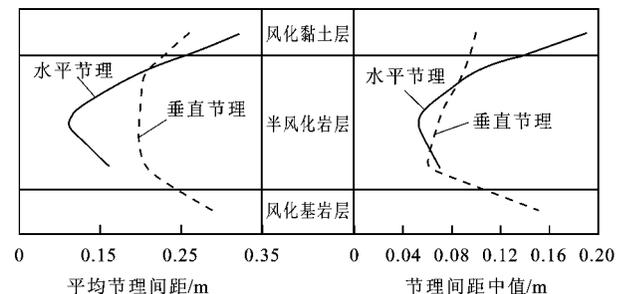


图2 东亚地区风化花岗岩节理间距变化

Fig. 2 Change Map of Joint Spacing in Weathered Granite in East Asia Areas

据 Rahardjo 等^[19]研究,新加坡地区 Bukit Timah花岗岩质风化壳由风化基面至半风化岩石中部大于1 μm 的孔隙累积体积分数与大于0.01 μm

的孔隙累积体积分数差别不大,说明其中 1 ~ 0.01 μm 的孔隙几乎不发育,而由风化基面至风化黏土层中虽然孔隙的累计体积分数较大,但 1 ~ 0.01 μm 的小孔隙和微孔隙占有很大比例(图 3^[19]),这些微孔隙很难形成有效的储集空间,也难以成为油气运移的通道。另外,根据陈建平等^[20]对准噶尔盆地环玛地区火山岩风化壳的研究,顶部残积土带孔隙度较小,为 3.19%,随深度增加孔隙度逐渐增大,至角块带(半风化岩层)中部为 24.75%,再向下逐渐减小。以上数据资料表明,风化壳上由风化基面向上,孔隙逐渐发育,至半风化岩石中部的孔隙度较大,且以大孔隙为主,由半风化岩石到风化黏土层,孔隙的规模变小,逐渐以微孔隙为主。

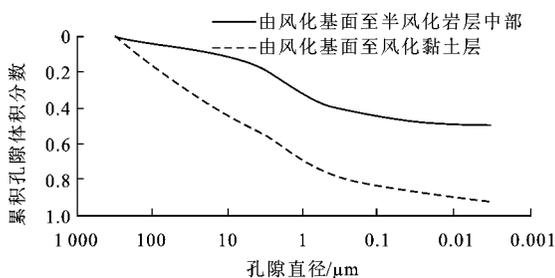


图 3 新加坡 Bukit Timah 花岗岩风化壳累积孔隙体积分数与孔隙直径关系

Fig. 3 Relation Between Cumulative Percent of Pore Volume and Pore Size of Bukit Timah Granite Weathered Crust in Singapore

古风化壳一般在经受了前期风化作用之后,再次深埋又遭受了大气水和地层水的溶蚀作用,半风化岩石顶部的孔隙和裂缝容易被上覆较细的沉积物充填形成顶部填积层,淋滤带中部由于流体系统相互连通,离子迁移较快,流体溶蚀性较强,风化作用影响也较强且交代充填作用较弱,导致该区带渗透性最好,至半风化岩层下部流体作用较弱,成岩离子浓度较大,易沉淀且风化作用影响较弱,由此引起半风化岩层下部渗透性较差。因此,古风化壳中也是半风化岩石中部裂缝孔隙最发育。

3 影响裂缝及孔隙发育的因素

3.1 风化基岩岩性

由于不同矿物的抗风化能力不同,岩性对古风化壳中裂缝和孔隙的发育具有重要影响。岩层经受风化作用时,碳酸盐岩最容易被改造,接下来是变质岩、火成岩和石英砂岩,泥质岩被风化改造的程度最小^[21-22]。

不同岩性中裂缝、孔隙发育的规模和类型不同,根据 McKay 等^[16]对美国田纳西州东部风化壳的研究,砂质半风化岩石中次生孔隙与裂缝皆很发育,与岩层平行的裂缝延伸较长,且比垂直于岩层的裂缝密集;碳酸盐岩风化层中裂缝延伸较短且不如砂质岩中密集;碳酸盐岩半风化层中的孔隙以生物孔隙为主,数量多、规模大且可塑性强,而砂质岩半风化层中生物孔隙较少,主要沿裂缝面层面分布^[16],火山岩孔隙类型以晶间溶孔、充填物溶孔最为发育,裂隙发育,渗透性较好^[20]。

3.2 风化时间和程度

一般来说,风化时间越长,岩层被改造的深度越大,例如中国济阳拗陷桩西地区印支期形成的中、古生界不整合,沉积间断约 190 Ma,风化深度达到 900 m,溶洞高于 4 m;草桥地区下古生界奥陶系与馆陶组不整合,沉积间断只有约 30 Ma,风化深度只有 200 m^[21],孔隙系统相对不发育。

风化时间越长,风化程度越大,形成的孔隙-裂缝规模也越大。根据 Rahardjo 等^[19]对新加坡地区 Bukit Timah 花岗岩质风化壳和 Jurong 沉积岩风化壳的研究,距离地表越近,风化等级越高,累积孔隙体积分数越大。根据 Little^[22]对风化壳风化级别的划分方案(未风化、微风化、中度风化、高度风化、完全风化、土壤层),新加坡两个取样剖面的风化程度是不同的,Bukit Timah 花岗岩质风化壳取样剖面上,距离海平面 20 m 深度处已达到完全风化级别,而 Jurong 沉积岩风化壳取样剖面上,距离海平面 0 ~ 5 m 范围内仍未达到完全风化(图 4^[19])。由此看出,Bukit Timah 花岗岩质风化壳取样剖面比 Jurong 沉积岩风化壳取样剖面风化程度高,而两者累积孔隙体积分数也有显著差异,Bukit Timah 花岗

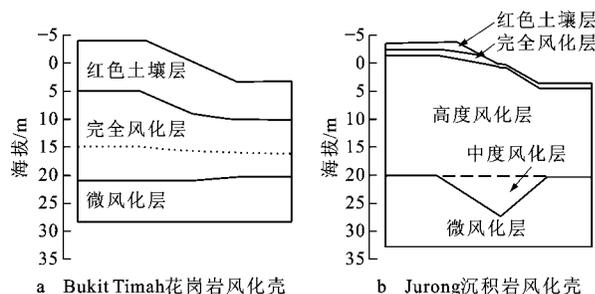


图 4 新加坡 Bukit Timah 花岗岩风化壳与 Jurong 沉积岩风化壳取样剖面

Fig. 4 Sampling Profiles of Bukit Timah Granite Weathered Crust and Jurong Weathered Sedimentary Rock in Singapore

岩质风化壳取样剖面具有更高的累计孔隙体积分数, 最大接近 100%, Jurong 沉积岩风化壳取样剖面的累计孔隙体积分数则小于 20% (图 5^[19]), 反映了风化程度对孔隙发育的控制作用。

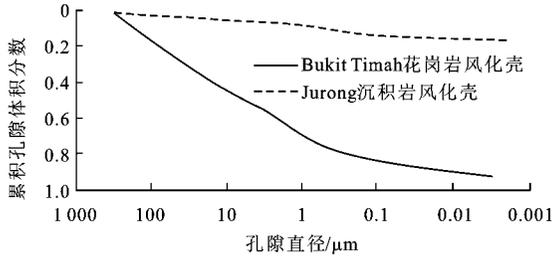


图 5 新加坡 Bukit Timah 花岗岩与 Jurong 沉积岩风化壳累积孔隙体积分数分布

Fig 5 Cumulative Percent of Pore Volume Chart of Bukit Timah Granite Weathered Crust and Jurong Weathered Sedimentary Rock in Singapore

3.3 剥蚀厚度及古风化壳埋藏深度

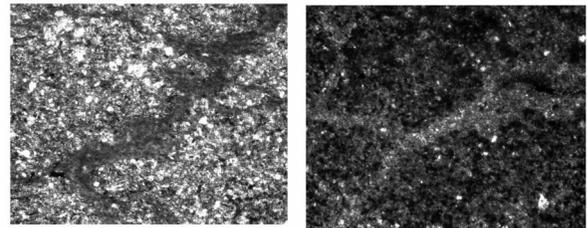
在剥蚀厚度大的地区, 卸荷较多, 卸荷裂缝较发育, 且张开程度好, 这些裂缝主要是平行或斜交不整合面的裂缝。其后发生构造沉降, 地层被再次深埋, 随着埋藏深度的增加, 上覆沉积载荷重量逐渐增加, 与不整合面斜交或平行的裂缝面在上覆沉积载荷的压力作用下逐渐紧闭, 使裂缝发育和裂缝-孔隙的连通状况变差^[9]。

风化壳不同的埋藏深度, 也会使风化壳地层经历不同的成岩作用, 从而具有不同的孔渗特征。例如埕东凸起北坡中、古生界与东营组之间的不整合, 虽然风化壳地层经历了几千万年的风化剥蚀, 但由于目前埋深较大 (1 860 m 左右), 从岩石上看, 上部泥岩与下部石英砂岩经成岩作用已连接在一起, 孔缝系统不发育; 而在滨南洼陷北部的单加寺地区馆陶组与沙三段之间的不整合, 虽然风化壳经历的风化剥蚀时间较短, 但埋深仅在 1 200 m 左右, 地层交切不明显, 下部古风化壳岩石胶结疏松, 为半成岩状态, 孔隙度和渗透率均较高^[23]。

3.4 裂缝充填特征

古风化壳中的裂缝在成岩演化过程中经历了地下水的改造, 首先地壳下降使其重新位于潜水面以下, 地下水纵横向的溶滤作用使裂缝和孔隙更加发育, 并使其迅速充填, 在岩石成分不均匀、硬而脆的地层中, 裂缝张开性好, 充填物以砂粒和岩屑为主; 在成分均匀、泥质较多的细粒软岩石中裂缝往往被泥质充填。充填了粉砂等较粗物质的裂缝连

通性仍然较好, 而泥质的充填则会降低裂缝的渗透性。中国东部济阳拗陷第三系和前第三系之间的前第三系不整合半风化岩石中发现有大量网状裂缝被泥质和铁质充填 (图 6), 一定程度上降低了孔隙连通体的发育程度。



a 泥质充填($\times 5$) b 铁质充填($\times 5$)

图 6 济阳拗陷罗 22 井中生界古风化壳泥质充填与铁质充填裂缝

Fig. 6 Mud and Ferruginous Filling in Mesozoic Paleozoic Weathered Crust of the Well Luo 22, Jiyang Depression

4 古风化壳结构的油气地质意义

从油气成藏的角度看, 古风化壳结构中孔隙、裂缝的发育规律对地层不整合油藏的形成与分布具有重要意义, 主要表现在风化黏土层的封闭能力和半风化岩层作为油气运移通道的孔、渗性能两个方面^[9]。

风化黏土层富含高岭石等黏土矿物, 孔隙、裂缝发育程度低, 在其后的压实等成岩作用下易形成致密的黏土岩, 孔隙度和渗透率都极低, 相应的排替压力也大, 易成为优质盖层。影响其封闭能力的主要因素是厚度, 例如美国粉河盆地超过 120 m 厚的古风化黏土层有效地封闭了其下的超压油层, 而古风化黏土层之上为常压油层^[24]。但在中国济阳拗陷义和庄凸起区, 虽然前第三系古风化壳结构发育完整, 包括风化黏土层和半风化岩石, 而且根据笔者利用声波时差法计算的沾北 2 井风化黏土层与其下半风化碎屑岩的排替压力, 风化黏土层的排替压力为 25 ~ 40 MPa, 半风化碎屑岩的排替压力一般小于 20 MPa, 说明风化黏土层对半风化碎屑岩中的油气有一定的封盖能力, 但该区风化黏土层厚度仅为 1 ~ 3 m, 且受风化、侵蚀、搬运等各种作用的影响, 风化黏土层的空间分布很难保持连续性。另外, 断层的发育也容易将厚度较小的风化黏土层错开, 因此结合前人的研究成果, 义和庄凸起前第三系古风化壳的风化黏土层只是作为泥质分隔层, 与上覆古近系泥质岩一起形成复合型盖层,

对下部油藏起封盖作用^[25-27]。

油气在储层中运移的动力主要是浮力、与运移方向一致的水动力,阻力主要是毛细管阻力、与运移方向相反的水动力、与孔喉间的摩擦力、与颗粒分子间的吸附力以及油间的内摩擦力,只有在阻力最小的高孔渗通道中,油气才有可能流动^[28]。古风化壳地层遭受了长时间的风化淋滤作用,半风化岩石层孔渗条件得到了显著改善,孔隙与裂缝大量产生,非常有利于油气的运移^[29-31]。例如义和庄凸起前第三系半风化岩石内垂直裂缝与水平裂缝皆很发育,虽然顶部裂缝多被充填,但中部由于较强的淋滤作用孔渗性较好,平均孔隙度为 6.4%~21.35%,渗透率为 $(0.32 \sim 325) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。其良好的孔渗条件既为油气的运移提供了通道,也可以成为油气聚集的有效储层。在义和庄凸起主体,油气正是沿义南、义东等断裂带纵向运移,过断面后沿前第三系古风化壳的孔缝连通带继续运移至有效的圈闭形成了地层不整合油藏^[26],该区古风化壳结构中半风化岩石层对油气成藏起主要作用。

5 结语

(1)发育完整的风化壳结构包括上部的风化黏土层和下部的半风化岩石层,由风化基面向上至半风化岩石中部,孔隙与裂缝发育程度增高,再向上至风化黏土层累积孔隙体积增大,但大孔隙和裂缝基本不发育;地层沉降埋后的古风化壳中,半风化岩层顶部由于上覆黏土矿物等细粒物质的充填使孔隙与裂缝的连通性变差,中部本身较为发育的孔缝系统在流体溶蚀作用下连通性更好,下部由于风化作用和流体溶蚀作用均较差,孔隙和裂缝发育程度较低。

(2)影响古风化壳孔隙裂缝发育规模的因素主要有风化基岩的岩性、风化时间和风化程度、风化过程中地层的剥蚀厚度和风化壳埋藏深度以及裂缝孔隙的充填特征。不同岩性中裂缝、孔隙发育规模和类型不同,风化时间越长,风化程度越大,形成的孔隙-裂缝规模也越大;剥蚀厚度越大,风化壳中裂缝越发育,古风化壳埋藏深度越大,孔缝系统连通情况越差;充填了粉砂等较粗物质的裂缝连通性仍然较好,而泥质的充填则会降低裂缝的渗透性。

(3)古风化壳结构对油气成藏具有重要意义,风化黏土层大孔隙、裂缝不发育,在其后的压实等

成岩作用下易形成致密的黏土岩,可作为优质盖层或与上覆泥岩一起形成复合型盖层;半风化岩石中部的孔缝连通体既是油气运移的良好通道,也可作为有效储层聚集油气。

参考文献:

- [1] Levorsen A I. Relation of Oil and Gas Pools to Unconformities in the Mid-continent Region[C] //Wrather W E, Lahee F H. Problems of Petroleum Geology. London: American Association of Petroleum Geologists, 1934: 761-784.
- [2] 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.
- [3] 曾濞辉, 王洪玉. 输导层和岩性圈闭中石油运移和聚集模拟实验研究[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1999, 24(2): 193-196.
- [4] 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.
- [5] 常波涛. 陆相盆地中不整合体系与油气的不均一性运移[J]. 石油学报, 2006, 27(5): 19-23.
- [6] 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.
- [7] 陈艳鹏, 刘震, 李鹤永, 等. 柴西南区古近系层序地层特征及岩性圈闭发育模式[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2007, 22(4): 17-21.
- [8] 尹微, 陈昭年, 许浩, 等. 不整合类型及其油气地质意义[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(2): 239-241.
- [9] 郝芳, 邹华耀, 方勇. 隐蔽油气藏研究的难点和前沿[J]. 地学前缘, 2005, 12(4): 481-488.
- [10] 吴孔友, 查明, 柳广弟. 准噶尔盆地二叠系不整合面及其油气运聚特征[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(2): 53-57.
- [11] 刘克奇, 蔡忠贤, 张淑贞, 等. 塔中地区奥陶系碳酸盐岩不整合带的结构[J]. 地球科学与环境学报, 2006, 28(2): 41-44.
- [12] 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.
- [13] 曲江秀, 查明, 田辉, 等. 准噶尔盆地北三台地区不整合与油气成藏[J]. 新疆石油地质, 2003, 24(5): 386-388.
- [14] 宋永东, 戴俊生, 吴孔友. 准噶尔盆地西北缘乌夏断裂带构造特征与油气成藏模式[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2009, 24(3): 17-20.
- [15] 史建南, 邹华耀. 准噶尔盆地车排子凸起隐蔽油气藏成藏机理[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2009, 24(2): 26-30.
- [16] McKay L D, Driese S G, Smith K H, et al. Hydrogeology and Pedology of Saprolite Formed from Sedimentary Rock, Eastern Tennessee, USA[J]. Geoderma, 2005, 126(1/2): 27-45.
- [17] 李汶国, 张晓鹏, 钟玉梅. 长石砂岩次生溶孔的形成机理[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 220-223.
- [18] Ehlen J. Fracture Characteristics in Weathered Granites[J]. Geomorphology, 1999, 31(1/4): 29-45.

(下转第 88 页)

- [37] Huang C C, Zhao S C, Pang J L, et al. Climatic Aridity and the Relocations of the Zhou Culture in the Southern Loess Plateau of China[J]. *Climatic Change*, 2003, 61(3): 361-378.
- [38] Huang C C, Jia Y F, Pang J L, et al. Holocene Colluviation and Its Implications for Tracing Human-induced Soil Erosion and Redeposition on the Piedmont Loess Lands of the Qinling Mountains, Northern China[J]. *Geoderma*, 2006, 136(3/4): 838-851.
- [39] Dahl S O, Nesje A. Holocene Glacier Fluctuations at Hardangerjokulen, Central-southern Norway: a High-resolution Composite Chronology from Lacustrine and Terrestrial Deposits[J]. *The Holocene*, 1994, 4(3): 269-277.
- [40] Gasse F. Diatom-inferred Salinity and Carbonate Oxygen Isotopes in Holocene Waterbodies of the Western Sahara and Sahel(Africa)[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, 21(7): 737-767.
- [41] Aziz H W, Lamy F, Pätzold J. A Pronounced Dry Event Recorded Around 4.2 ka in Brine Sediments from the Northern Red Sea[J]. *Quaternary Research*, 2006, 66(3): 432-441.
- [42] Booth R K, Jackson S T, Forman S L, et al. A Severe Centennial-scale Drought in Midcontinental North America 4 200 Years Ago and Apparent Global Linkages[J]. *The Holocene*, 2005, 15(3): 321-328.
- [43] 黄春长. 渭河流域 3 100 年前资源退化与人地关系演变[J]. *地理科学*, 2001, 21(1): 30-35.
- [44] 姚檀栋, 杨志红, 皇翠兰, 等. 近 2 ka 来高分辨的连续气候环境变化记录——古里雅冰芯近 2 ka 记录初步研究[J]. *科学通报*, 1996, 41(12): 1103-1106.
- [45] 姚檀栋. 古里雅冰芯近 2000 年来气候环境变化记录[J]. *第四纪研究*, 1997, 17(1): 52-61.
- [46] Booth R K, Notaro M, Jackson S T, et al. Widespread Drought Episodes in the Western Great Lakes Region During the Past 2 000 Years: Geographic Extent and Potential Mechanisms[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 242(3/4): 415-427.
- [47] Lamb H H. The Early Medieval Warm Epoch and Its Sequel[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1965, 1: 13-37.
- [48] 竺可桢. 中国近五千年来气候变迁的初步研究[J]. *考古学报*, 1972(1): 15-38.
- [49] 张德二. 我国“中世纪温暖期”气候的初步推断[J]. *第四纪研究*, 1993, 13(1): 7-15.
- [50] 吴宏岐, 党安荣. 隋唐时期气候冷暖特征与气候波动[J]. *第四纪研究*, 1998, 18(1): 31-38.
- [51] 陕西省地方志编纂委员会. 陕西省志第十三卷: 水利志[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1999.
- [52] 赵景波, 顾静, 邵天杰. 唐代渭河流域与泾河流域涝灾研究[J]. *自然灾害学报*, 2009, 18(2): 50-55.
- [53] 王绍武. 小冰期气候的研究[J]. *第四纪研究*, 1995, 15(3): 202-212.
- [54] 王苏民, 刘健, 周静. 我国小冰期盛期的气候环境[J]. *湖泊科学*, 2003, 15(4): 369-376.
- [55] 王会昌. 2 000 年来中国北方游牧民族南迁与气候变化[J]. *地理科学*, 1996, 16(3): 274-279.
- [56] 王川, 杜继稳, 杜川利, 等. 530 年来陕北气候变化与东部地区关系分析[J]. *西北大学学报: 自然科学版*, 2004, 34(2): 238-241.
- [57] 邢福来. 统万城遗址考古发掘的新收获[J]. *中国历史地理理论丛*, 2003, 18(专辑): 89-94.

(上接第 64 页)

- [19] Rahardjo H, Aung K K, Leong E C, et al. Characteristics of Residual Soils in Singapore as Formed by Weathering[J]. *Engineering Geology*, 2004, 73(1/2): 157-169.
- [20] 陈建平, 查明. 准噶尔盆地环玛湖凹陷二叠系不整合特征及其在油气运移中的意义[J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(4): 29-31.
- [21] 张建林. 地层不整合对油气运移和封堵的作用[J]. *油气地质与采收率*, 2005, 12(2): 26-29.
- [22] Little A L. The Engineering Classification of Residual Tropical Soils[C] // Committee of Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City: International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 1969: 1-10.
- [23] 郝志伟, 苏朝光, 张营革, 等. 前第三系不整合在油气成藏中的作用[J]. *西部探矿工程*, 2006(5): 61-63.
- [24] Jiao Z S, Surdam R C. Stratigraphic/diagenetic Pressure Seals in the Muddy Sandstone, Powder River Basin, Wyoming[C] // Ortoleva P J. Basin Compartments and Seals. London: American Association of Petroleum Geologists, 1994: 297-312.
- [25] 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.
- [26] 张家震, 王学军, 毕彩芹, 等. 义和庄凸起北坡油藏分布规律[J]. *新疆石油学院学报*, 2003, 15(3): 31-34.
- [27] 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, 2003.
- [28] 李明诚. 石油和天然气运移、聚集的特征[J]. *地球物理学进展*, 1994, 9(1): 120-124.
- [29] 韩会平, 武春英, 蒋继辉, 等. 大路沟地区三叠系延长组长 6 储层特征及影响因素[J]. *地球科学与环境学报*, 2008, 30(2): 149-155.
- [30] 旷理雄, 郭建华, 童小兰, 等. 准噶尔盆地南缘东段油气成藏条件及成藏模式[J]. *地球科学与环境学报*, 2007, 29(1): 34-40.
- [31] 谢宗奎, 李生德, 车明, 等. 柴达木盆地侏罗系油气成藏模式与油气聚集规律[J]. *地球科学与环境学报*, 2007, 29(2): 166-169.