

风化粘土层一半风化岩石型不整合的 矿物学、地球化学特征

李晓燕, 蒋有录, 陈 涛

中国石油大学地球资源与信息学院, 山东东营 257061

摘要: 不整合是构造运动和海(湖)平面升降的产物, 其风化粘土层可作为油藏的良好封盖层, 半风化岩石孔缝系统可作为油气运移通道, 也可作为油气聚集提供良好储层。深入分析不整合结构在矿物含量变化、元素及其氧化物含量变化方面的微观特征是划分不整合结构的基础, 对不整合油气藏的勘探实践具有重要意义。不整合结构可划分为风化粘土层一半风化岩石型、半风化岩石型和沉积间断型。通过济阳拗陷义和庄凸起前第三系风化粘土层一半风化岩石型不整合结构矿物与元素变化的实测数据, 结合典型地区风化壳的矿物、元素分析结果, 分析了风化粘土层一半风化岩石型不整合结构的矿物学、常量元素地球化学特征。其矿物学特征主要表现为长石、云母等原生矿物的蚀变和高岭石、伊利石及蒙脱石等次生粘土矿物的明显增多, 粘土矿物在风化粘土层中部或风化粘土层下部一半风化岩石上部较为富集; 其常量元素地球化学特征表现为 Ca、Na 元素含量迅速减少, 在风化粘土层下部与半风化岩石上部通常具有 Fe、Al 元素的富集带, K、Mg 元素的变化由于交代作用等因素而变得复杂。

关键词: 不整合结构; 粘土矿物; 常量元素; 封盖层; 运移通道。

中图分类号: P591; P618

文章编号: 1000-2383(2009)03-0428-07

收稿日期: 2009-01-21

Mineralogical and Geochemical Characteristics of Unconformity Structure with Weathered Clay and Sapropelic Rock

LI Xiao-yan, JIANG You-lu, CHEN Tao

College of Geo-Resources and Information, China University of Petroleum, Dongying 257061, China

Abstract: The unconformity is formed due to the tectonic movement and the eustatic sea level change. The unconformity structure is very important for the pool forming. If the weathered clay is thick enough, it can become good capping layer. The pores, fissures and their connecting systems in the sapropelic rock provide good migrating channel and accumulating place for oil. Studying the mineralogical and geochemical characteristics of unconformity structure is the basic of the structure division which is important for the exploration of unconformity oil traps. The unconformity includes three structure types: the structure with weathered clay and the sapropelic rock, the structure only with sapropelic rock and the structure which formed during interruption of sedimentation. The mineralogical and geochemical examination results of Yihezhuang uplift pre-Tertiary buried weathered crust and some typical weathered crusts with weathered clay and sapropelic rock are summed up and the mineralogical and geochemical characteristics of such unconformity structure are given in this paper. The primary minerals that are not resistible to weathering such as feldspar and mica decreased and the secondary clay minerals such as kaolinite and illite increased gradually. The Fe and Al elements are rich in the clay layer and the upper part of the sapropelic rock. The Ca and Na elements lost heavily. But the contents of K and Mg elements are complicated owing to the factors such as replacement of these two elements.

Key words: unconformity structure; clay mineral; major element oxides; sealing rock; migrating channel.

0 引言

不整合是构造运动和海平面升降的产物,在大陆边缘和构造活动区,不整合尤其常见(梁定益等,1994;葛孟春等,1999)。不整合面及其上下相邻岩层中,常形成各种矿床,同时世界上在不整合面附近发现了很多油气藏(刘克奇等,2006)。从油气成藏的角度来看,不整合结构对油气成藏与分布具有重要意义,主要表现在风化粘土层的封闭能力以及半风化岩层作为油气运移通道和储层的孔、渗性能两个方面。不整合是在古风化壳形成的基础上发育起来的,经历了成土作用的风化壳顶部在一定条件下会存在风化粘土层,发育良好、厚度较大的风化粘土层可以成为良好盖层,对油气的保存具有建设性作用,其通常具有较强的封闭能力,不仅可以封闭常压油气,而且可以封闭超压油气(郝芳等,2005;尹微等,2006)。早在20世纪30年代,Levorsen(1934)就指出,不整合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。我国学者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(潘钟祥,1983)。近年来对油气沿不整合体运移的微观机理也有了一定的研究,曾斌辉和王洪玉(1999)通过二维模型模拟实验,也认为高渗透率的不整合是油气运移的主要通道。古风化壳遭受了长时间的风化淋滤作用,孔隙与裂缝大量产生,形成了孔缝连通体,研究表明,不整合面上、下物性条件好的高孔渗层或下部经风化改造后的半风化岩石是不整合输导油气的主要通道(付广等,2005;张建林,2005),大孔、洞发育的古风化壳是不整合聚集油气的良好储层(贾振远等,1995)。本文通过总结前人的研究成果,认为细致地研究并划分不整合结构,对不整合油气藏的勘探实践具有重要意义。划分不整合结构的前提是深入了解不整合结构各个方面的微观变化特征,国内外研究者采用矿物分析技术和元素分析技术对风化壳的矿物学特征和元素地球化学特征进行了较为细致的研究(Butt *et al.*, 2000; William *et al.*, 2001; Islam *et al.*, 2002; 吴孔友等, 2002, 2003; 牟中海等, 2005; 隋风贵等, 2005)。目前的主要认识为:风化壳上高岭石、伊利石等粘土矿物逐渐生成,碱、碱土金属及其氧化物大量流失,而Si、Al、Fe等常量元素及其氧化物相对富集。本文通过济阳拗陷西和庄凸起前第三系不整合结构矿物、元素变化的实测数据,结合典型地区风化壳的矿物、元素分析结果,研究了

风化粘土层—半风化岩石型不整合结构的矿物学、常量元素地球化学特征,以求能够从岩石的矿物学和地球化学特征的变化方面更好地识别不整合与不整合结构。

1 不整合结构的类型

随着对不整合的研究逐渐深入,许多学者已经注意到,不整合不仅仅是一个“面”,更是一个“体”,其本身具有较独特的微观组构(吴孔友等,2002;张建林,2005;辛仁臣等,2008),也就是在纵向上具有一定的结构。根据前人研究,不整合的纵向结构应包括不整合面之上的岩石和不整合面之下的风化粘土层与半风化岩石(吴孔友等,2003;牟中海等,2005;隋风贵等,2005)。目前对不整合的认识为: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。总体来说,不整合结构可分为风化粘土层—半风化岩石型、半风化岩石型和沉积间断型。风化粘土层—半风化岩石型不整合结构在风化壳形成时经历了较深的风化作用,已达到成土阶段,甚至经历了脱硅作用,但剥蚀搬运作用较弱,使形成的粘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粘土岩;在风化速度相对于剥蚀速度较小的区域,风化残积物有可能一经形成即被搬运走,从而仅发育半风化岩石,在没有进入成土作用阶段的风化较弱地区不整合结构也为半风化岩石型,该类型不整合一般形成于砂岩等沉积岩体之上,粘土矿物并没有形成粘土层而只是作为填隙物充填于裂缝或孔隙之中;沉积间断型不整合只是一个无沉积间断面,在不整合形成的一段时期内既不遭受风化,也不接受沉积,从而形成沉积间断型不整合结构,该不整合结构皆为未遭受风化作用的岩石。

2 不整合结构的矿物学、元素地球化学特征

2.1 不整合结构的矿物学特征

不整合结构的矿物学特征主要表现为长石、云母等原生矿物的蚀变和高岭石、伊利石、蒙脱石等次生粘土矿物的生成,从而导致不整合结构具有一定的矿物分布模式。其中主要的原生矿物为石英,有时也会出现黑云母、白云母、正长石和斜长石等原生矿

物,这些矿物在下部蚀变程度较低,向上蚀变程度增强。例如委内瑞拉安第斯山北部古风化壳下部原生矿物的级别较高,而在风化壳的顶部这些原生矿物则含量甚微(William *et al.*, 2001)。长石、云母等矿物的风化先从矿物的颗粒边缘与矿物解理面开始,先形成一些难以辨别的模糊物质,随着风化的继续进行,这些模糊物质逐渐转化为次生矿物(Islam *et al.*, 2002)。据马在平和李守军(1997)对斜长石风化壳的研究,矿物的风化具有阶段性。因此,在不整合结构中,抗风化能力弱的原生矿物先发生蚀变,由下到上蚀变矿物逐渐增多,蚀变程度逐渐加深。

岩石在风化过程中,成岩矿物被部分溶蚀,并发生了水解与水合作用(Islam *et al.*, 2002)。首先是长石类和含铁镁质矿物遭到破坏,通常最先形成的次生矿物是伊利石与蒙脱石,接下来是埃洛石和高岭石;蒙脱石作为中间产物在湿润的环境中较少保存,而在干旱的环境中大量存在;在风化的最后阶段,伴随着淋滤作用的增强,局部开始发生去硅作用,高岭石向三水铝石转化(Butt *et al.*, 2000; Islam *et al.*, 2002)。粘土矿物的形成还受到地层条件的影响,高岭石在水流通畅的高地或斜坡位置容易生成,而蒙脱石和伊利石在排水条件差的凹陷区域更容易产生并保存下来。另外不稳定的铁镁质矿物(辉石、橄榄石、角闪石、黑云母)在风化作用下还会生成氧化铁,这样风化完全的风化壳剖面上具有复杂的岩性组成,包括风化粘土层中的高岭石、赤铁矿和(或)针铁矿以及三水铝石,还有在半风化岩石中的原生和次生矿物(Butt *et al.*, 2000),铁镁质和超铁镁质岩石风化壳之上易大量发育含铁质带,但在花岗岩中较少见。

因此,对于风化粘土层一半风化岩石型不整合来说,粘土矿物含量由半风化岩石到风化粘土层明显增多,而且在进一步的风化和淋滤作用之下,粘土矿物逐渐向铁铝矿物转化并向下充填裂缝,从而使粘土矿物在风化粘土层底部与半风化岩石顶部较为富集,形成了一个粘土矿物富集带。例如济阳拗陷义和庄凸起前第三系风化壳,其基岩为砂质泥岩,该风化壳上长石含量由半风化岩石到风化粘土层明显降低,高岭石含量与粘土矿物总量明显增加,说明风化壳上长石矿物逐渐被蚀变,并转化为粘土矿物(图 1);新加坡地区 Bukit Timah 花岗岩质风化壳中高岭石、伊利石和蛇纹石等粘土矿物含量由半风化岩石至风化粘土层也呈明显增多趋势(Rahardjo *et al.*, 2004)(图 2);委内瑞拉古风化壳由半风化层

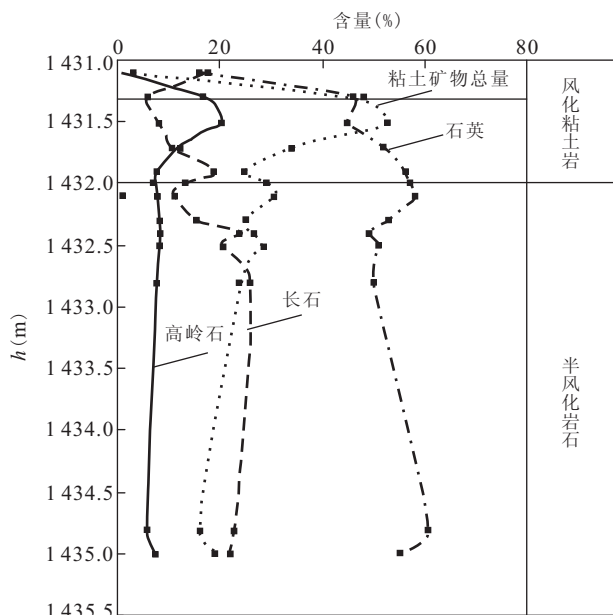


图 1 义和庄凸起沾北 2 井前第三系埋藏古风化壳主要矿物含量变化

Fig. 1 Diagram showing the change of main minerals contents of pre-Tertiary buried weathered crust of well Zhanbei 2 in Yihezhuang uplift

到风化粘土层伊利石和伊利石—蒙脱石的增加趋势表明该层由下向上逐渐增强的风化作用导致伊利石的转化(William *et al.*, 2001)(图 2)。

2.2 不整合结构的元素地球化学特征

不整合结构的元素地球化学特征表现为不活动元素(Al_2O_3 、 Fe_2O_3)的富集,相对不活动元素(SiO_2)的相对富集以及碱和碱土金属元素(CaO 、 Na_2O 、 K_2O 、 MgO)的流失。风化壳物质通常来源于风化壳基底中相对不溶部分的聚集和变性,从化学上来说,风化物质的主要成分为硅、铁和铝的氧化物(Smith *et al.*, 2000)。但碱及碱土金属元素的流失和 Si、Al、Fe 等元素的相对富集程度还与风化母岩的原矿物成分有密切关系。长石类和含铁镁质矿物在风化过程中遭到破坏, Si、Al、Na、Ca 等离子被释放出来, Na、Ca 等离子从地层中淋滤掉,而 Si、Al 离子在高岭石和多水高岭石中被保存下来,或赋存在二氧化硅和高岭石矿物中,于粘土层下部杂色泥岩段再沉积或继续遭受淋滤作用;不稳定的铁镁矿物(辉石、橄榄石、角闪石、黑云母)在风化作用下生成氧化铁(Butt *et al.*, 2000),其中的 Mg 和正长石及黑云母中的 K 都会失去,但由于交代作用有可能再重新回到不整合之中。

因此,对于风化粘土层一半风化岩石型不整合

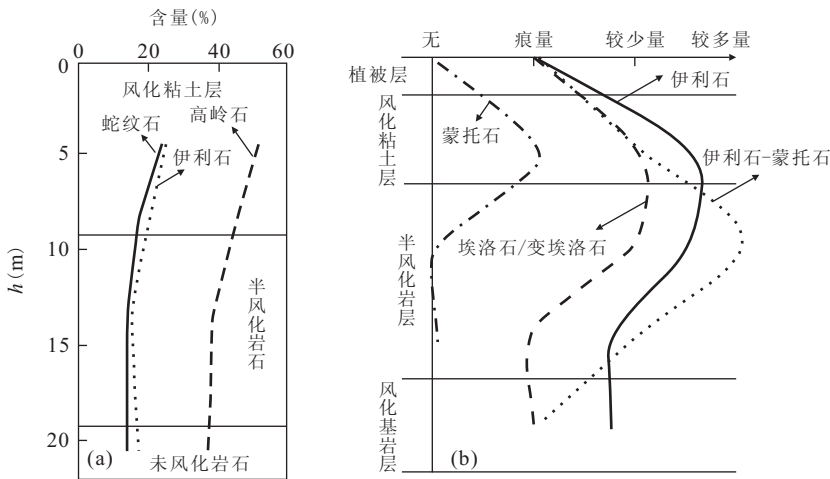


图 2 新加坡花岗岩质风化壳(Rahardjo *et al.* , 2004)(a)和委内瑞拉安第斯山北部古风化壳(William *et al.* , 2001)(b)粘土矿物含量变化

Fig. 2 Diagram showing the change of clay minerals contents of granite weathered crust in Singapore (Rahardjo *et al.* , 2004) (a) and paleo-crust of the North Andean in Venezuela(William *et al.* , 2001) (b)

来说, 风化壳上 Si 是除 O 之外最主要的元素, 其次是 Al, 再次是 Fe. 例如义和庄前第三系埋藏古风化壳 Si 氧化物含量在 60%~80% 之间, Al 氧化物含量在 5%~10% 之间, Fe 氧化物的含量为 5% 左右(图 3). 各元素氧化物的含量变化还与风化母岩的矿物成分有关, 如美国东南部地区辉绿岩风化壳中 Fe 氧化物含量在 10% 左右, 而在花岗片麻岩风化壳中不到 5% (Neung-Hwan and Daniel, 2005) (图 4), Fe 氧化物的含量不同是 Fe 元素在辉绿岩等铁镁质、超铁镁质岩石中本身含量较高导致的. 另外高度风化的风化粘土层中还易发生脱硅作用, 高岭石等粘土矿物向三水铝石转化, Al 和 Fe 及其倍半氧化物在风化粘土层中相对富集(图 4), 而在委内瑞拉安第斯山北部古风化壳地区, 强烈的垂向淋

滤作用使粘土矿物向风化粘土层的中下部迁移并向下部半风化岩石的裂缝中充填, 从而在半风化岩石上部形成了一个 Al、Fe 富集带(图 5). 义和庄前第三系埋藏古风化壳中风化粘土层与半风化岩石上部皆为 Fe、Al 富集区带, 这是由于随着风化程度的增强, 风化粘土层中以 Al、Fe 为主要成分的高岭石和氧化铁等逐渐富集, 而由于沉积层序沉积之后仍在继续的深层风化作用, 部分 Al 和 Fe 及其倍半氧化物经垂向淋滤作用在半风化岩石顶部沉淀, 由此形成了一个从风化粘土层到半风化岩石顶部的 Al、Fe 富集带(图 3).

不整合中 Ca、Na 金属离子大量流失, 但流失率有所差别. 例如义和庄凸起前第三系古风化壳上 Ca 和 Na 含量在半风化岩石与风化粘土层也分别只有

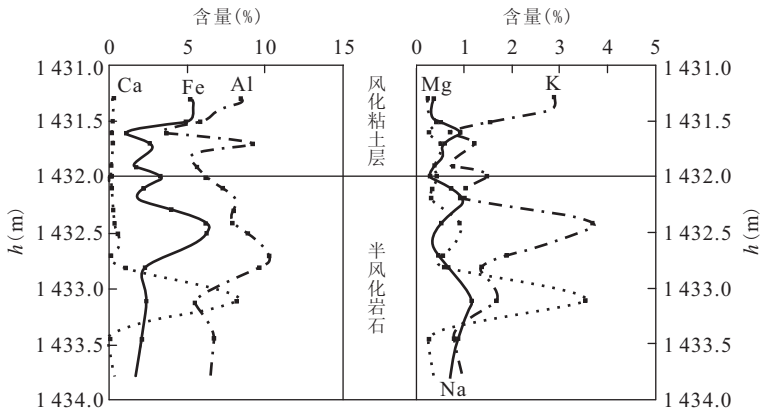


图 3 义和庄凸起沾北 2 井前第三系埋藏古风化壳常量元素含量变化

Fig. 3 Diagram showing the change of elements contents of pre-Tertiary buried weathered crust of well Zhanbei 2 in Yihezhuang uplift

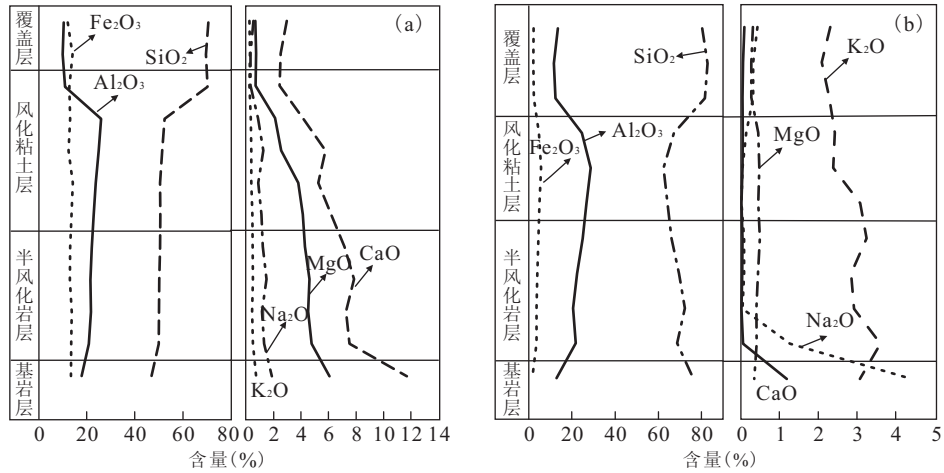


图 4 美国东南部地区花岗岩麻岩风化壳(a)和辉绿岩风化壳(b)元素氧化物含量变化(据 Neung-Hwan, 2005)

Fig. 4 Diagram showing the change of elements contents of granite gneiss (a) and diabase (b) weathered crusts in Southeast America

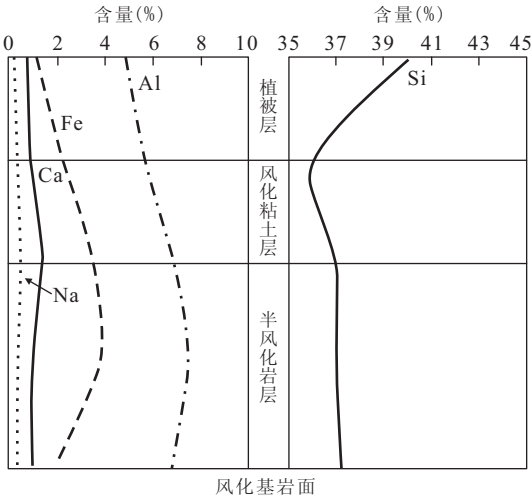


图 5 委内瑞拉安第斯山北部古风化壳元素含量变化(据 William *et al.*, 2001)

Fig. 5 Diagram showing the change of elements contents of the North Andean paleo-crust in Venezuela

不到 1% 的含量(图 3),美国东南部地区花岗岩麻岩风化壳上 Ca 和 Na 含量在风化基岩与半风化岩石的分界面上成阶梯式的显著降低(图 4),至半风化岩石与风化粘土层含量几近于无,说明风化基岩中几乎所有的 Ca 和 Na 在整个风化壳上都已淋失殆尽。义和庄凸起前第三系古风化壳半风化岩石层上 Ca 含量显著增高的区带可能是由于钙质充填。美国东南部地区辉绿岩风化壳上 Ca 和 Na 则表现为比较缓慢的流失(图 4),一直到风化粘土层也还有一定的含量,这是由于较多的原始含量与较弱的淋滤作用导致的(William *et al.*, 2001)。不整合中 Mg 和 K 的流失情况较为复杂,有时会表现出流失后又

重新富集的特点(图 4),义和庄凸起前第三系古风化壳在半风化岩石层中 Mg 和 K 各具有一个富集带,至风化粘土层中 Mg 含量逐渐降低,K 含量在降低之后又有增高,可能是受到了重新沉积的上覆地层中矿物含量的影响(图 3)。Mg 和 K 在不整合中的富集趋势可能是由于交代作用,黑云母等矿物的蚀变有可能产生过剩的 Mg,在风化土层形成之后通过 Mg 交代作用又加入到风化岩层中(Yoko *et al.*, 2005)。

综上所述,风化壳上元素的分布模式决定于风化母岩的原生矿物组成与其经历的化学风化作用,以碱质 CaO 和 Na₂O 的流失、MgO 和 K₂O 的流失或流失后又重新富集、倍半氧化物(Al₂O₃、Fe₂O₃ 或 FeO)的逐渐富集为特征(Tijani *et al.*, 2006)。不整合中一般具有 Fe、Al 元素的富集带,该富集带位于风化粘土层下部和半风化岩层上部。

3 结论

不整合结构对油气成藏与分布具有重要意义,风化粘土层可作为油藏的良好封盖层,半风化岩石孔缝系统可作为油气运移通道,也可作为油气聚集提供良好储层。

(1)由于岩性、气候、地形和风化作用的时间等因素的影响,不整合结构可划分为风化粘土层一半风化岩石型、半风化岩石型和沉积间断型。深入分析风化粘土层一半风化岩石型不整合的结构特征对于不整合油气藏的勘探实践具有重要意义。

(2)风化粘土层一半风化岩石型不整合结构的

矿物学特征主要表现为长石、云母等原生矿物的蚀变和高岭石、伊利石、蒙脱石等次生粘土矿物的生成。粘土矿物含量随风化程度的增高由半风化岩石到风化粘土层明显增多, 粘土矿物在风化粘土层下部与半风化岩石上部较为富集。

(3) 风化粘土层—半风化岩石型不整合结构上元素的分布模式决定于风化母岩的原生矿物组成与其经历的化学风化作用, 不整合中一般 Ca、Na 元素含量迅速减少; 通常具有 Fe、Al 元素的富集带, 该富集带位于风化粘土层的下部与半风化岩层上部; Mg 和 K 的流失情况较为复杂, 有时会由于交代作用表现出流失后又重新富集的特点。

References

- Butt, C. R. M., Lintern, M. J., Anand, R. R., et al., 2000. Evolution of regoliths and landscapes in deeply weathered terrain—Implications for geochemical exploration. *Ore Geology Reviews*, 16(3–4): 167–183.
- Fu, G., Duan, H. F., Meng, Q. F., 2005. Unconformity and transport hydrocarbon characteristic. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 24(1): 13–16 (in Chinese with English abstract).
- Ge, M. C., Feng, Q. L., Jiang, Y. S., et al., 1999. Variability unconformity in Zhongdian region, northwestern Yunnan Province, China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 24(6): 563–567 (in Chinese with English abstract).
- Hao, F., Zou, H. Y., Fang, Y., 2005. The difficulties and frontiers of subtle oil/gas reservoir research. *Earth Science Frontiers*, 12(4): 481–488 (in Chinese with English abstract).
- Islam, M. R., Rojstaczer, S., Aario, R., et al., 2002. Mineralogical changes during intense chemical weathering of sedimentary rocks in Bangladesh. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20(8): 889–901.
- Jia, Z. Y., Cai, Z. X., Xiao, Y. R., et al., 1995. Paleoweathering crust: An important reservoir (body) type of carbonate rocks. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 20(3): 283–289 (in Chinese with English abstract).
- Levorsen, A. I., 1934. Relation of oil and gas pools to unconformities in the midcontinent region. In: Wrather, W. E., Lahee, F. H., eds., *Problem of petroleum geology*. AAPG, Sidney Powers Memorial Volume, 761–784.
- Liang, D. Y., Nie, Z. T., Song, Z. M., 1994. A re-study on seismite and seismo-unconformity: Taking western Sichuan and western Yunnan as an example. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 19(6): 845–850 (in Chinese with English abstract).
- Liu, K. Q., Cai, Z. X., Zhang, S. Z., et al., 2006. Structure of Ordovician carbonate unconformity zone in Tazhong area. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 28(2): 41–44 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Z. P., Li, S. J., 1997. Surface textures of feldspars from weathered granite crusts in the subtropical and tropical areas in the South of China. *Journal of the University of Petroleum, China*, 21(3): 7–11 (in Chinese with English abstract).
- Mu, Z. H., He, Y., Tang, Y., et al., 2005. Relation of unconformity with hydrocarbon accumulation in Luxi area of Junggar basin. *Acta Petrolei Sinica*, 26(3): 16–20 (in Chinese with English abstract).
- Neung-Hwan, O., Daniel, D. R., 2005. Elemental translocation and loss from three highly weathered soil-bedrock profiles in the southeastern United States. *Geoderma*, 126(1–2): 5–25.
- Pan, Z. X., 1983. Significance of unconformity to oil and gas migration and accumulation. *Acta Petrolei Sinica*, 4(4): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Rahardjo, H., Aung, K. K., Leong, E. C., et al., 2004. Characteristics of residual soils in Singapore as formed by weathering. *Engineering Geology*, 73(1–2): 157–169.
- Smith, R. E., Anand, R. R., Alley, N. F., et al., 2000. Use and implications of paleoweathering surfaces in mineral exploration in Australia. *Ore Geology Reviews*, 16(3–4): 185–204.
- Sui, F. G., Zhao, L. Q., Lin, H. X., et al., 2005. The forming mechanism and its combination mode of stratigraphic reservoir in Tertiary in Jiyang depression. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 12(6): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- Tijani, M. N., Okunola, O. A., Abimbola, A. F., 2006. Lithogenic concentrations of trace metals in soils and saprolites over crystalline basement rocks: A case study from SW Nigeria. *Journal of African Earth Sciences*, 46(5): 427–438.
- William, C. M., Russell, S. E., Milner, M. W., et al., 2001. Paleopedology of Middle Wisconsin/Weichselian paleosols in the Merida Andes, Venezuela. *Geoderma*, 104(3–4): 215–237.
- Wu, K. Y., Zha, M., Hong, M., et al., 2003. Structural models of unconformity and recurrent diagenesis of semi-weathering rock in Junggar basin. *Geotectonica & Metallogenia*, 27(3): 270–276 (in Chinese with English abstract).

abstract).

Wu, K. Y., Zha, M., Liu, G. D., et al., 2002. The unconformity surface in the Permian of Junggar basin and the characters of oil-gas migration and accumulation. *Petroleum Exploration and Development*, 29(2): 53—57 (in Chinese with English abstract).

Xin, R. C., Li, G. F., Xiang, S. M., et al., 2008. The incised valley filling architecture of Cretaceous Yaojia Formation in the western clinoform of Songliao basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(6): 834—842 (in Chinese with English abstract).

Yin, W., Chen, Z. N., Xu, H., et al., 2006. Unconformity type and its significance in petroleum geology. *Xinjiang Petroleum Geology*, 27(2): 239—241 (in Chinese with English abstract).

Yoko, N., Munetomo, N., Gerald, B., et al., 2005. Geochemistry and mineralogy of the 2.45 Ga Pronto paleosols, Ontario, Canada. *Chemical Geology*, 214 (1—2): 21—44.

Zeng, J. H., Wang, H. Y., 1999. An experimental study of petroleum migration and accumulation in carrier bed and lithological trap. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 24(2): 193—196 (in Chinese with English abstract).

Zhang, J. L., 2005. The function of stratigraphic unconformity to the oil/gas migration and seal. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 12(2): 26—29 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

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.

葛孟春, 冯庆来, 江元生, 等, 1999. 初论变异性不整合——以滇西北中甸地区为例. 地球科学——中国地质大学学报, 24(6): 563—567.

郝芳, 邹华耀, 方勇, 2005. 隐蔽油气藏研究的难点和前沿. 地学前缘, 12(4): 481—488.

贾振远, 蔡忠贤, 肖玉茹, 等, 1995. 古风化壳是碳酸盐岩一个重要的储集层(体)类型. 地球科学——中国地质大学学报, 20(3): 283—289.

梁定益, 聂泽同, 宋志敏, 1994. 再论震积岩及震积不整合——以川西、滇西地区为例. 地球科学——中国地质大学学报, 19(6): 845—850.

刘克奇, 蔡忠贤, 张淑贞, 等, 2006. 塔中地区奥陶系碳酸盐岩不整合带的结构. 地球科学与环境学报, 28(2): 41—44.

马在平, 李守军, 1997. 我国南方部分花岗岩风化壳中残留长石的表面结构. 石油大学学报, 21(3): 7—11.

牟中海, 何琰, 唐勇, 等, 2005. 准噶尔盆地陆西地区不整合与油气成藏的关系. 石油学报, 26(3): 16—20.

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.

隋风贵, 赵乐强, 林会喜, 等, 2005. 济阳坳陷第三系地层油藏形成机制与组合模式. 油气地质与采收率, 12(6): 1—5.

吴孔友, 查明, 洪梅, 等, 2003. 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.

吴孔友, 查明, 柳广弟, 等, 2002. 准噶尔盆地二叠系不整合面及其油气运聚特征. 石油勘探与开发, 29(2): 53—57.

辛仁臣, 李桂范, 向淑敏, 等, 2008. 松辽盆地盆西斜坡白垩系姚家组下切谷充填结构. 地球科学——中国地质大学学报, 33(6): 834—842.

尹微, 陈昭年, 许浩, 等, 2006. 不整合类型及其油气地质意义. 新疆石油地质, 27(2): 239—241.

曾溅辉, 王洪玉, 1999. 输导层和岩性圈闭中石油运移和聚集模拟实验研究. 地球科学——中国地质大学学报, 24(2): 193—196.

张建新, 2005. 地层不整合对油气运移和封堵的作用. 油气地质与采收率, 12(2): 26—29.