

文章编号:1673-5005(2011)02-0001-05

高邮凹陷南断阶东部阜宁期构造应力场 及其对断层的控制作用

戴俊生¹, 王霞田^{1,2}, 季宗镇¹, 马晓鸣³, 冯阵东¹, 张效恭²

(1. 中国石油大学 地球资源与信息学院, 山东 青岛 266555; 2. 中国石油新疆油田分公司, 新疆 克拉玛依 834000;
3. 中国地质大学 能源学院, 北京 100083)

摘要:在断层级别划分的基础上分析断层的走向变化、组合规律及活动特征,建立地质模型,并确定 SE152° ~ NW332°为区域应力的加载方向,结合岩石力学试验确定岩石力学参数及加载应力值,采用有限单元法对工区阜宁沉积期构造应力场进行数值模拟,详细分析构造应力对断层的控制作用。结果表明:南断阶东部阜宁沉积期最小主应力均表现为张应力,沿真①断层在许庄地区和竹墩地区的向北凸出位置出现两个最小主应力高值区,断层发育密集;剪应力呈条带状右旋、左旋区域相间展布,右旋最大剪应力和最小主应力控制产生北北东向正断层,左旋最大剪应力和最小主应力控制产生近东西向正断层。

关键词:高邮凹陷;断阶带;断裂特征;断层落差;应力场;成因机制

中图分类号:TE 121.1 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1673-5005.2011.02.001

Structural stress field of Funing sedimentary period and its control on faults in the east of south fault terrace in Gaoyou sag

DAI Jun-sheng¹, WANG Xia-tian^{1,2}, JI Zong-zhen¹, MA Xiao-ming³,
FENG Zhen-dong¹, ZHANG Xiao-gong²

(1. College of Geo-Resources and Information in China University of Petroleum, Qingdao 266555, China;
2. Xinjiang Oilfield Branch Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China;
3. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the division of fault grade, fault strike changes, composition rules and fault activity characteristics were analyzed, the geological model was established, and the loading direction of regional stress was calculated as SE152°-NW332°. The rock mechanical parameters and loading stress values were determined on the basis of rock mechanism tests. The numerical simulation on structural stress field of Funing sedimentary period in the east of south fault terrace was done by finite element method, and the control of structural stress on faults was analyzed in detail. The results show that the minimum principal stress of Funing sedimentary period is tensile stress with two high value areas in the north convex parts of Xuzhuang and Zhudun areas along Zhen① fault with dense faults. The shear stress distribution is banding alternating dextrorotatory region with levorotatory region, and the development of north-northeast normal faults is controlled by dextrorotatory maximum shear stress and minimum principal stress. The development of near east-west normal faults is controlled by levorotatory maximum shear stress and minimum principal stress.

Key words: Gaoyou sag; fault terrace; fault characteristic; fault throw; stress field; genetic mechanism

高邮凹陷是苏北盆地东台坳陷中部的一个次级凹陷,由南向北划分为南部断阶带(南断阶)、中部

深凹带和北部斜坡带 3 个次级构造单元。南断阶是指真①断层与真②断层之间的狭长地带,其东部地

收稿日期:2010-09-15

基金项目:国家“十五”科技重点攻关项目(2003BA613A-02)

作者简介:戴俊生(1958-),男(汉族),山东寿光人,教授,博士,博士生导师,主要从事油气区构造解析、构造应力场及大地构造学研究。

区自西向东主要发育许庄和竹墩两个三级正向构造单元,自下而上发育了古近系阜宁组(E_1f)、戴南组(E_2d)、三垛组(E_2s),新近系盐城组(N_y)以及第四系东台组(Q_d),其中阜宁组自下而上又划分为阜一段(E_{1f_1})、阜二段(E_{1f_2})、阜三段(E_{1f_3})和阜四段(E_{1f_4})^[1]。该区自新生代以来主要经历了仪征、吴堡、三垛等几次大规模构造运动,多期次的构造运动导致区内发育的断裂系统错综复杂,直接影响了石油勘探中断块圈闭的落实程度,因此断块主要形成期阜宁期的构造应力场分析研究及其对断层发育的控制等成为必须解决的问题^[2-3]。笔者对南断阶东部阜宁期的构造应力场进行数值模拟分析,进而研究其对断层的控制作用,以指导该时期实际构造图中断层的规律性组合及其他时期构造应力场的分析。

1 断层基本特征

1.1 断层的分级及展布

根据断层的规模和对构造、沉积的控制作用,将南断阶东部阜宁期活动的断层划分为 4 个级别(表 1)^[4-5]。

表 1 阜宁期断层的级别划分

Table 1 Division of fault grade of Funing sedimentary period

断层级别	主要表现	成因	与复杂断块的关系	断层
一级断层	控制凹陷	区域伸展	控制断块区发育	真①断层
二级断层	控制二级构造带			纪 3 断层
三级断层	分隔断块区			$F_1 \sim F_{26}$
四级断层	分隔含油断块	局部伸展	导致断块复杂化	$F_{27} \sim F_{39}$

真①断层作为高邮凹陷的南部边界断层早在阜宁组沉积前就已存在并开始控制沉积,到盐城组二段沉积时一直都在活动^[6],剖面上断面北倾,切穿阜宁组所有地层,控制高邮凹陷南断北超的箕状凹陷沉积(图 1),平面上弯曲转折,北东和近东西向交替出现,整体上呈北东向展布,贯穿于整个南断阶(图 2),是一条典型的具有发育时间早、活动时期长、延伸远、断距大等特点的控凹同生大断层。纪 3 断层为竹墩地区的一条二级断层,形成于阜宁组沉积初期,受真①断层活动影响,平面上走向北东,斜向贯穿于竹墩地区的南北,断面倾向北西,剖面上切割阜宁组所有地层(图 1(c)),对竹墩地区阜宁组及其上覆地层的沉积和油气成藏具有重要的控制作用。

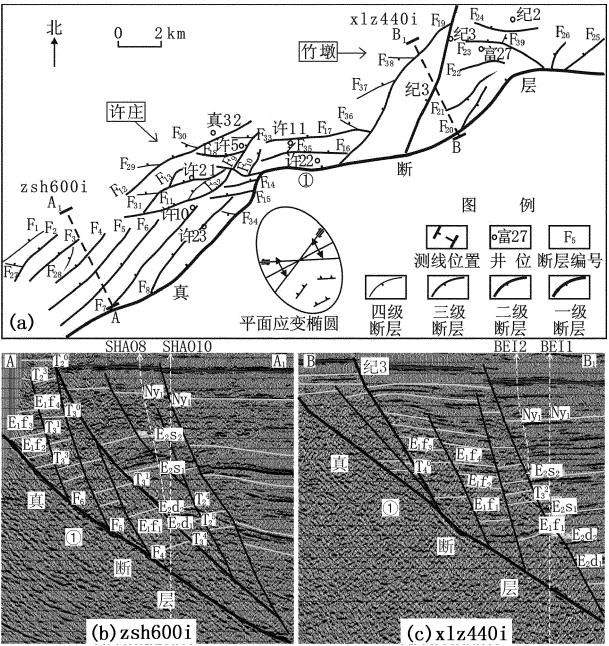


图 1 阜宁期活动断裂体系划分(T_3^3 反射层)

Fig. 1 Division of active fault system of Funing sedimentary period (reflector T_3^3)

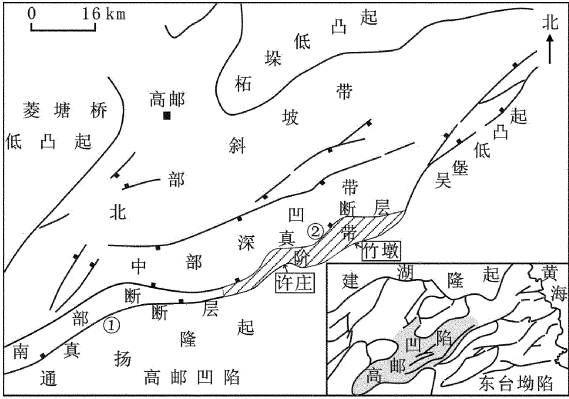


图 2 高邮凹陷南断阶构造位置

Fig. 2 Structural position of south fault terrace in Gaoyou sag

三级断层是划分断块区的断层,研究区阜宁期次级断层以三级断层为主,主要受真①断层活动控制,呈现为北北东向和近东西向两组不同走向的展布,与真①断层不同地段的走向近于一致(图 1(a)),北北东向、北东向断层发育数目较多,如 $F_1 \sim F_{12}$ 、 $F_{19} \sim F_{22}$ 、 F_{25} 、 F_{26} 断层等,而近东西向断层总体上发育数目相对较少,如 $F_{13} \sim F_{18}$ 、 F_{23} 、 F_{24} 断层等。其中许庄地区的 $F_1 \sim F_8$ 断层平面上呈雁列式组合,剖面上则呈阶梯状排列,如图 1(b)所展示的 $F_4 \sim F_6$ 断层,断面北倾,倾角较大,同时切割阜宁组,同沉积活动控制着该组地层的沉积,且向下延伸交于真①断层之上,而上部则被阜宁期之后形成的断层所削

截;竹墩地区的 $F_{20} \sim F_{23}$ 断层受真①断层活动的影响,平面上自北东向南西方向撒开,组合成帚状断层。四级断层规模小,方向性差,走向多变,主要分布在局部构造上,如 $F_{27} \sim F_{39}$ 断层,多数为不垂直相交并终止于三级断层之上,一起构成斜交式断层组合类型,如 F_{29} 、 F_{30} 与 F_{12} 断层等。

1.2 断层活动强度

南断阶东部发育的断层多属于生长断层,断层两盘地层厚度明显不同,上盘与下盘的地层厚度差即断层落差可以用来衡量沉积期断层的活动强度(图3)^[7-8]。

阜宁期活动断层的落差最大值出现在真①断层的中段,达 1.511 km,大于 1.0 km 的落差值主要出现在真①、纪3以及 F_{10} 断层,说明该时期这些断层活动最为剧烈。从区域上看,许庄地区三级断层的落差值相对较大,一般为 300 ~ 700 m,而竹墩地区的则相对较小,一般小于 300 m,反映出该时期许庄地区断层活动相对强烈,其中北北东向或北东向断层的落差值总体上要大于近东西向断层的落差值,活动要更为强烈。

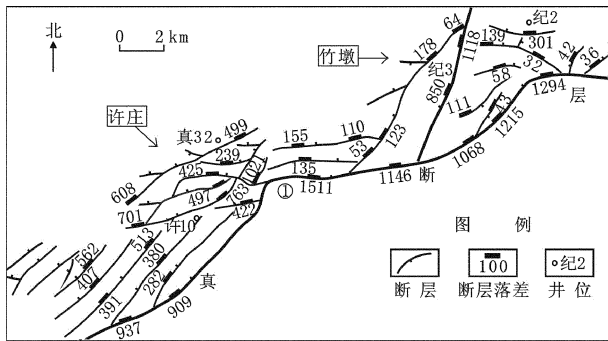


图3 阜宁期活动断层落差

Fig.3 Throw graph of active faults of Funing sedimentary period

2 利用活动断层构造形迹确定阜宁期构造应力方向

包括断层在内的任何一种构造型式的形成和演化,都是一次地壳运动过程中在统一构造应力场作用下发展而成的,它们往往具有共同的变形组构和形成机制。通过对研究区内断层性质、形态及组合规律的分析,可判断出古构造应力场的分布及演化历程^[9]。

南断阶内所有断层均为正断层,断层平面展布形态决定了它们的发育需要一个菱形对称的应力场条件,即在最大主应力轴垂直,中间主应力轴和最小

主应力轴水平时的情况下才可形成^[10]。平面上两组活动正断层的发育方向 $NE37^\circ \sim SW217^\circ$ 与 $NE87^\circ \sim SW267^\circ$ 呈 X 型共轭(图1、4),作为剪切破坏的结果,其形成是由中间主应力与最小主应力的应力差造成的。依据库伦-莫尔准则分析应力,岩石发生剪切破裂时,两组共轭剪裂面的交角应以大于 90° 的钝角指向平面最小主应力方向,或者说这两组剪切面构成长轴平行于压应力的菱形网格^[11],由此结合平面应变椭圆(图1(a))分析计算得南断阶东部阜宁期最小主应力(即张应力)方向为 $SE152^\circ \sim NW332^\circ$ 。

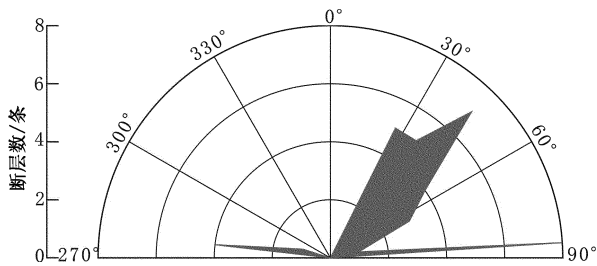


图4 阜宁期活动断层走向玫瑰花图

Fig.4 Rose diagram of active faults strike of Funing sedimentary period

3 阜宁期构造应力场数值模拟

3.1 数值模拟的基本原理

应力场模拟主要采用有限单元方法,其基本思路是将一个地质体离散成有限个连续的单元,单元之间以节点相连,每个单元内赋予其实际的岩石力学参数,据边界受力条件和节点的平衡条件,建立并求解以节点位移为未知量,以总体刚度矩阵为系数的方程组,用插值函数求每个节点上的位移,进而计算每个单元内应力和应变值^[12]。

3.2 数值模拟方法及结果分析

建立南断阶东部阜宁期地质模型主要参考了阜二段底面(T_3^3 反射层)构造图(图1),认为先期存在的断层在初始模型中已经设置,因此将初始模型简化为早在阜宁期前就已经活动的南部边界控凹断层真①断层以及阜宁初期形成的纪3断层。

平面上不同构造单元力学性质有差异,一般断裂带较正常沉积的地层强度弱,凸起区时代老的地层较凹陷区时代新的地层强度大^[12],规模大的断裂带内岩石强度弱于规模小的断裂带。依据实际情况,给应力模拟的不同区块分别赋以不同的力学参数,选用的力学参数来源于岩石力学试验,取值参照部分试验测试的结果^[13-15](表2)。

表 2 阜宁期构造应力场模拟力学参数
Table 2 Mechanical parameters simulating structural stress field of Funing sedimentary period

类型	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	岩石密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
地层	28	0.15	2.21
断层	22	0.20	2.20

选用 SOLID45 单元划分网格后,结合应力分析资料,根据研究区构造应力方向的计算结果即最小主应力方向为 $\text{SE}152^\circ \sim \text{NW}332^\circ$,确定加载方式和加力,边界力包括水平构造力、自身重力和上覆岩层压力,自身重力由岩层密度和重力加速度计算,Ansys 程序自动产生。通过多种施力方案的试验,选择一种最为合理的加载方式,即在考虑自身重力的情况下,最终确定模型北边界施加 3 MPa 拉张力,在上盘和断层底面施加一个向上的略小于上盘自身重力的力 10.78 MPa,以消除掉不合理的重力影响,使上盘自然弯曲。

模拟结果显示:南断阶东部阜宁期最大主应力全部为压应力(负值代表压应力)(图 5(a)),其值一般大于 2 MPa,在真①断层和纪 3 断层附近出现两个低值区,并呈现以低值区为中心向周围区域依次增大的应力分布格局,最大主应力方向竖直向下,

主要是由重力作用造成,断层附近的地势相对较高,因而此处的最大主应力便会出现一个最小值集中区;最小主应力全部为张应力(图 5(b)),其值为 1.7 ~ 8.2 MPa,且沿真①断层在许庄地区和竹墩地区的向北凸出处出现两个最小主应力高值区,其中许庄地区的数值更高,达 8.18 MPa,最小主应力方向基本上垂直于真①断层的展布方向,呈北北西向分布。

最大剪应力基本上呈条带状正负高值区域相间展布(负值代表右旋剪切)(图 5(c)),其中右旋最大剪应力集中区数值一般为 -1.7 ~ -0.5 MPa,分布区对应于许庄西部地区 and 竹墩西部地区,对应于真①断层北北东走向段的下降盘区域,最大值出现在真①断层偏西端的许庄地区,达 -1.75 MPa;左旋最大剪应力数值一般为 0.3 ~ 1.4 MPa,分布区对应于许庄东部地区和竹墩东部地区,对应于真①断层近东西走向段的下降盘区域,最大值出现在真①断层中段的许庄地区,达 1.41 MPa,而真①断层东端的竹墩地区的左旋最大剪应力集中区内的数值及其分布范围则相对较小;总体上,无论是右旋还是左旋最大剪应力,其数值以及高值区分布范围都是许庄地区的要明显大于竹墩地区的,其中右旋最大剪应力的分布范围又明显占优势。

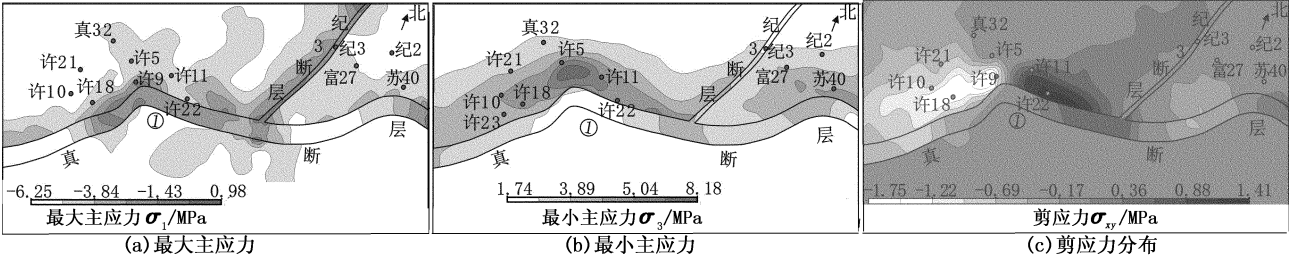


图 5 阜宁期构造应力分布
Fig. 5 Distribution of structural stress of Funing sedimentary period

4 构造应力场对断层的控制作用

结合南断阶东部阜宁期构造应力场数值模拟结果(图 5)及断层展布(图 1)特征可知,影响断层发育的主要控制因素是最小主应力和剪应力的分布。北东向正断层主要由最小主应力控制产生,北北东向正断层主要是由最小主应力和右旋最大剪应力控制产生,而近东西向正断层主要是由最小主应力和左旋最大剪应力控制产生,这说明应力场的分布控制着断层的发育位置,而剪应力的旋向则约束着三级断层的走向。

最小主应力的高值区与该时期断层发育活动的密集区有很好的对应关系,竹墩地区最小主应力高

值区数值相对许庄的要低,因此其断层发育数也较少,且活动断层落差值也较低(图 6),断层活动强度相对较弱,这说明应力场的分布控制着断裂活动。此外,应力场对断裂活动的控制还与应力场方向的变化、差异应力等因素有关。例如许庄地区真①断层凸出处的最小主应力值约 8 MPa,应力方向基本与真①断层垂直,因而真①断层在此处活动强烈,落差值也较大,约为 1.5 km;其北侧三级断层的展布方向与最小主应力方向呈较大角度相交,在此时的活动也相对较强,如 F_9 、 F_{10} 和 F_{12} 等断层,落差值可超过 1.0 km;纪 3 断层西部的 F_{19} 断层附近的最小主应力为 2 ~ 3 MPa,其展布方向不垂直于最小主应力方向且交角也相对较小,因此它的活动相对较

弱,断层落差值也都在200 m以下。

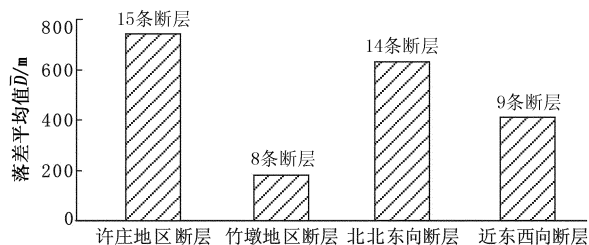


图6 阜宁期三级活动断层落差分析直方图

Fig. 6 Throw analysis histogram of third-class active faults of Funing sedimentary period

对于呈条带状分区展布的剪应力来说,其旋向是控制发育三级断层走向的主要因素,许庄西部地区 and 竹墩西部地区是右旋最大剪应力的集中分布区域,在该部位多产生北北东向的断层,尤其是许庄西部地区, $F_1 \sim F_8$ 北北东向断层呈雁列状集中分布,而在竹墩西部地区虽然最小主应力数值相对较小,发育断层数量少,但是右旋最大剪应力集中区内的 F_{20} 、 F_{21} 断层仍表现为北北东向展布,与真①断层的北北东走向段近于平行;左旋最大剪应力相对集中区主要出现在许庄东部地区和竹墩东部地区的小范围内,该区域内易形成近东西向断层,这一规律在许庄东部地区体现较为显著,如 F_{16} 、 F_{17} 断层与真①断层的近东西走向段平行分布;先期存在的真①断层的强烈活动派生的两组剪应力共同作用便形成了南断阶 X 型的共轭断裂体系,其中右旋最大剪应力集中区数值略高,分布范围大,因此区域内北北东向三级断层的发育较近东西向断层略占优势,断层数目多,落差大(图6),活动相对强烈。

5 结 论

(1)南断阶东部阜宁期活动断层可划分4个级别,真①、纪3断层分别属于一级、二级断层, $F_1 \sim F_{26}$ 、 $F_{27} \sim F_{39}$ 断层分别属于三级、四级断层,其中三级断层主要呈现为北东或北北东和近东西两组不同走向的展布。

(2)南断阶东部阜宁期最大主应力均表现为压应力,受断层附近地势相对较高的控制,在真①断层和纪3断层附近出现两个低值区;最小主应力均表现为张应力,沿真①断层在许庄和竹墩地区的向北凸出处出现两个最小主应力高值区;最大剪应力呈条带状正负值区域相间展布,右旋最大剪应力集中区域受控于真①断层的北北东走向段,左旋的则受控于其近东西走向段。

(3)影响南断阶东部阜宁期断层发育的主要控

制因素是最小主应力和剪应力的分布。最小主应力的高值区与断层发育活动的密集区具有很好的对应关系;右旋最大剪应力集中区数值略高,分布范围大,其约束的北北东向三级断层的发育较受左旋最大剪应力影响的近东西向断层略占优势,断层数目多,落差大,活动相对强烈。

参考文献:

- [1] 李亚辉. 苏北盆地高邮凹陷构造转换带控油机制研究[J]. 石油实验地质, 2006, 28(2): 109-112.
LI Ya-hui. Study of control mechanism of oil and gas by the transfer zone in the Gaoyou sag of the North Jiangsu Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2006, 28(2): 109-112.
- [2] 任红民, 徐建, 张伟青, 等. 高邮凹陷南部断阶带油气勘探潜力分析[J]. 海洋石油, 2006, 26(2): 13-17.
REN Hong-min, XU Jian, ZHANG Wei-qing, et al. Potential analysis for petroleum exploration in the area of south fault-terrace belts in Gaoyou depression[J]. Off Shore Oil, 2006, 26(2): 13-17.
- [3] 曹冰, 刘小燕, 熊学洲. 断层在高邮凹陷复杂断块区成藏中的作用[J]. 江汉石油学院学报, 2003, 25(增刊B): 3-4.
CAO Bing, LIU Xiao-yan, XIONG Xue-zhou. Function of fault in forming reservoirs in complex fault block in Gaoyou depression[J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 2003, 25(sup B): 3-4.
- [4] 侯旭波, 吴智平, 李伟. 济阳拗陷中生代负反转构造发育特征[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2010, 34(1): 18-23.
HOU Xu-bo, WU Zhi-ping, LI Wei. Development characteristics of Mesozoic negative inversion structures in Jiyang depression[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010, 34(1): 18-23.
- [5] 王平. 为什么二、三级断层对油气聚集起控制作用——复杂断块油气田形成条件系列论文之四[J]. 断块油气田, 1994, 1(5): 1-5.
WANG Ping. The controlling mechanism of second or third-class faults on hydrocarbon migration and accumulation[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 1994, 1(5): 1-5.
- [6] 马晓鸣, 戴俊生. 高邮凹陷南部断阶带构造演化特征[J]. 新疆石油地质, 2007, 4(28): 476-479.
MA Xiao-ming, DAI Jun-sheng. Structural evolution of the south terrace in Gaoyou sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 4(28): 476-479.

(下转第19页)