

西沙海域南部多边形断层的发现 及其分布特征与控制因素

杨涛涛, 吕福亮, 王彬, 杨志力, 李丽, 张强

(中国石油杭州地质研究院)

摘要 根据新采集的三维地震资料,在西沙海域南部发现了多边形断层,其发育分布具有层控特征明显、在富泥地层中发育、多方位走向、纵向断距小、平面延伸长度小且形态为不规则多边形等特征。由于研究区东西两侧应力条件的差异,导致多边形断层发育特征的差异明显。通过对多边形断层发育控制因素的分析,认为地层岩性(特别是西沙海域上构造层的远源细粒沉积物)是其发育的主控因素之一,同时水道砂岩、成岩作用及构造作用等也是影响其发育分布的因素。多边形断层可以作为流体运移的通道,它与下部构造断层连接可将深部烃源岩中的油气运移到上部储层中聚集,或继续向上运移到浅部地层中形成天然气水合物。

关键词 西沙海域;多边形断层;断层分布特征;控制因素

中图分类号 TE121.2

文献标识码 A

多边形断层是指相互交叉组成多边形态的张性断层系,具有层控特征明显、主要发育在富泥地层中、平面多方位走向、纵向断距小、平面断裂延伸长度小且呈不规则多边形等特征,它与典型构造成因的断层差别明显^[1-2]。1994年, Cartwright^[1]通过3D地震资料在北海盆地深水区首次发现了多边形断层,至今已有20多年的历史。近年来,随着海域特别是深水油气勘探持续推进,已在全球50多个被动大陆边缘盆地中发现了多边形断层;且随着地震资料品质逐步提高,对其研究也不断深入。目前已发现的多边形断层仅分布在白垩纪以来的地层中,推测主要有两个原因,一是随着地层埋深增加,垂向压实作用愈发强烈,多边形断层的断距被不断压缩,受地震资料分辨力的制约而不易被识别出来;二是前白垩纪深水沉积地层保留较少^[3-4]。多边形断层的相关研究大致可分为两个阶段:早期阶段注重断裂成因机制的研究,密度反转、超压流体、脱水收缩、重力负载等多种成因假说相继被提出^[1-6],它们在一定程度上解释了多边形断层的成因机制,其中脱水收缩假说受到越来越多的认同;后期阶段则注重多边形断层对油气成藏的影响^[7-9]。国内多边形断层研究起步较

晚,目前仅在南海北部大陆边缘盆地和松辽盆地发现了多边形断层^[10-13]。

随着对西沙海域地质条件认识的不断深入,已证实海域西部华光凹陷发育多边形断层,前人已陆续发表了一些研究成果^[4,10-11],但对其南部的多边形断层尚无报道。本文基于近年来新采集的高精度三维地震资料,在西沙海域的南部海域发现了多边形断层,并刻画了其分布特征,分析了多边形断层发育的主控因素及其对油气成藏的影响,期望能为西沙海域地质研究提供帮助。

1 地质背景

南海位于欧亚、太平洋和印度—澳大利亚三大板块的交汇处,经历了复杂的地质演化过程,发育陆缘裂谷盆地、走滑盆地、前陆盆地和大洋盆地等四大类盆地^[14],孕育了多种形式的地质体,蕴含了丰富的油气资源^[14-15]。越来越多的学者认为南海的扩张和演化是太平洋板块向欧亚板块俯冲和印度—澳大利亚板块与欧亚板块碰撞共同作用的结果^[16-17],它经历了陆缘张裂和海底扩张两大构造阶段、陆相—海陆过渡相—海相的沉积环境演化过程^[18]。

收稿日期: 2015-10-20; 改回日期: 2016-06-28

本文受国家科技重大专项“西沙海域油气地质综合研究及有利勘探区”(编号:2011ZX05025-004)和国家自然科学基金“海洋一次波与多次波联合最小二乘逆时偏移”(编号:41504105)联合资助

杨涛涛: 1981年生,工程师,2007年获长安大学地球探测与信息技术专业硕士,现从事海域油气勘探与综合评价工作。通讯地址: 310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号; E-mail: yangtt_hz@petrochina.com.cn

西沙海域位于南海北部陆坡区,除部分岛礁区水深较小外,大部分水域的水深大于500 m,属深水区(图1)。西沙海域处于洋陆过渡壳上,是伴随南海的形成而形成的,它经历了古新世—渐新世的裂陷成盆和中新世以来的热沉降两个构造演化阶段,具有“下断上拗”的双层结构特征,相应地形成下和上两个构造层,下构造层代表古近纪裂陷阶段,上构造层为新近纪—第四纪拗陷阶段^[19-20]。下构造层呈断陷作用形成的半地堑或地堑充填特征,主要受控于多凸多凹的构造格局,以近源沉积为主,沉积物较粗,充填始新统、下渐新统崖城组 and 上渐新统陵水组沉积,属河湖相—海陆过渡相含煤沉积及半封闭浅海相沉积。上构造层为拗陷期沉积,呈中部高、四周被大型凹陷所包围的构造格局,无大型河流供给,为远源海相沉积地层,沉积物颗粒较细,充填下中新统三亚组、中中新统梅山组、上中新统黄流组、上新统莺歌海组 and 第四系乐东组沉积^[21-22]。

2 多边形断层分布特征

据统计,世界上已发现的多边形断层分布具有如下特征:(1)张性断层,纵向上具有明显的层控特征。(2)多边形断层的断距小,一般小于100 m。(3)断面平直,但在变形层底部存在流动层时,也会出现铲式断层^[7];倾角一般在 $30^{\circ}\sim 70^{\circ}$,且倾角、倾向在很小的距离发生很大变化。(4)平面延伸长度小,单个断层长度100~3 000 m,集中分布在500~2 000 m。(5)平面上断层分布密度高,呈多边形分布^[1-12]。本文研究的西沙海域多边形断层具有上述相似特点。

2.1 剖面特征

西沙海域南部的多边形断层在地震剖面上特征

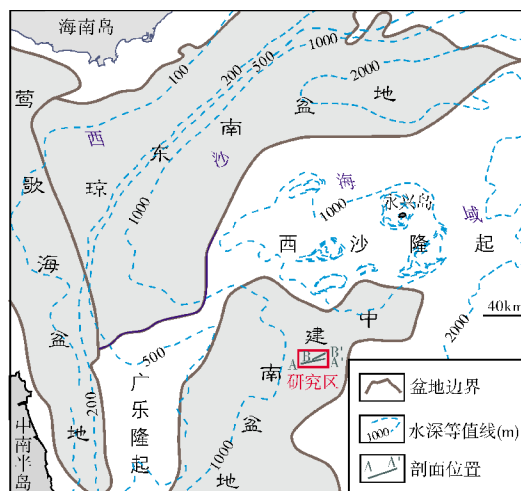


图1 研究区位置示意图

明显(图2),主要体现在:(1)多边形断层具有明显的层控特征,其纵向发育在一个层段内,称为多边形层段,这些层段与未变形层段有明显的界面分隔;(2)发育两种规模的多边形断层,即断开多边形层段的较大断层和仅限于多边形层段内的小断层,层段的中部,断层最发育,层段的上部和下部,断层发育程度相对减弱;(3)多边形断层发育部位的地震反射同相轴明显错断,断面为单一的不连续面,多边形层段底部有时出现铲式断层^[23],纵向最大断距位于断面中部,最大垂向断距小于60 m,一般为40 m;(4)断层倾向具有方向选择性,受地层坡度的影响,多边形断层倾向以朝下坡方向为主,只有少部分断层倾向与之相反,断层倾角变化范围为 $30^{\circ}\sim 65^{\circ}$,平均约为 40° ;(5)受构造应力的影响,在下伏构造脊的部位多边形断层具有断裂密度增大、纵向断距增加及断开地层厚度也增大的特点。

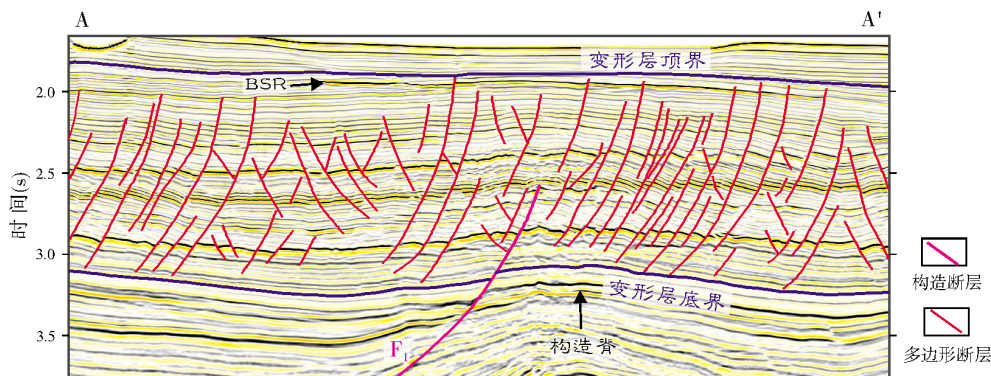


图2 西沙海域南部多边形断层发育区地震剖面(位置见图1)

BSR(Bottom Simulating Reflector):似海底反射,代表水合物稳定带的底界面,是地震识别天然气水合物的典型标志

2.2 平面特征

多边形断层同相轴错断明显,因此使用相干技术能清晰刻画其平面展布。通过相干体地震属性切片分析(图3),多边形断层平面分布具有如下特征:(1)多边形断层走向虽具有一定的随机性,但存在北西和北东两个优势展布方向,在研究区西部,以北西向展布为主,在东部,北西、北东两个展布方向相当;(2)平面延伸长度差异明显(400~3000m),总体具有西部断层密度小、延伸长度大,东部断层密度大、延伸长度小的特点;(3)多边形断层间距即两条近平行断层间距为200~700m,西部间距大,东部间距小;(4)多边形断层展布受下伏构造断层的影响,距构造断层近处,相交角度增大,甚至出现直角相交的现象;(5)下伏构造顶部多边形断层发育密度增大,断裂延伸长度和断裂间距变小,出现与构造相似的环状断裂(图3)。

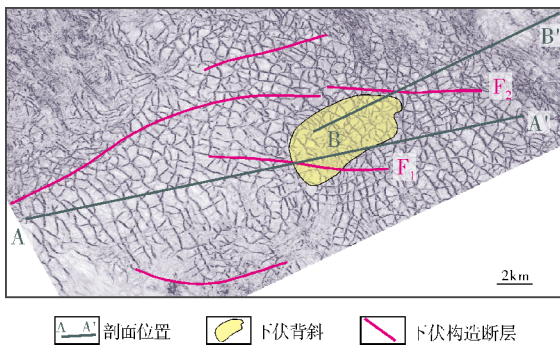


图3 西沙海域南部多边形断层发育区相干切片
位置见图1

3 发育控制因素分析

前人已提出多种多边形断层的形成机制,虽都强调地层压实和体积收缩等因素,但对形成多边形断层的主要控制因素则有不同的认识,形成机制尚未统一。随着研究的不断深入,越来越多的学者认可多边形断层是主要发育在以细粒沉积物为主的地层中,并在地层早期压实作用阶段由于脱水和体积收缩而形成的^[1,23],这与蒙脱石等矿物的脱水作用有着密切的关系^[4]。因受早期成岩过程中的压实脱水、黏土矿物脱水和生烃增压作用的影响^[11],结合西沙海域南部的地质特征,本文认为该区多边形断层的形成受地层岩性、成岩作用和构造应力等因素控制。

(1)地层岩性 地层岩石粒度大小对体积收缩能力有着重要的影响,大颗粒物质能够有效地增加颗粒

之间凝胶体的黏度,使颗粒紧密相连,限制了该地层的收缩和破裂,致使多边形断层不发育^[24];细粒沉积物则相反,多边形断层较发育,特别是黏土矿物中富含的蒙脱石对多边形断层的形成产生显著影响^[25],实验表明,黏土矿物中只要有2%的蒙脱石就能够发生脱水收缩,这有利于多边形断层的发育^[3]。因此已发现的多边形断层绝大部分都发育于泥岩、页岩等细粒沉积物地层中。西沙海域自中新世进入拗陷期沉积以来,呈中部隆起、四周被凹陷包围的构造背景,且无大型河流供给,沉积以细粒物为主;而且有两个因素使得南海北部沉积的黏土矿物中蒙脱石含量较高,特别是新近纪以来蒙脱石一直保持在较高水平^[26]:一是陆源黏土矿物到海洋环境后发生沉降和分选作用,可大幅度提高蒙脱石的相对含量;二是基性火山喷发物质容易在海水作用下原地风化生成自生蒙脱石^[26]。因此西沙海域具备多边形断层发育的岩性条件。

外部地层的岩性变化也会影响多边形断层的发育。较纯泥岩层随着埋深的加大、地层的增温以及流体的排出,会形成高压环境,造成脱水、体积收缩,从而形成多边形断层;若泥岩层与砂岩接触,使得泥岩内部的流体向砂岩中运移,这在很大程度上缓解了泥岩的高压环境,导致了水道砂体附近的泥岩中多边形断层发育程度大大减小。如图4的地震剖面显示,剖面左侧多边形断层很发育,而右侧水道砂岩发育地区多边形断层则不发育,两侧的差别明显。

(2)成岩作用 成岩作用对多边形断层的形成和分布有着重要的影响,多边形断层一般形成于沉积物早期成岩阶段。一般情况下,如果早期成岩作用强,则会阻止多边形断层的发育,如在加拿大大西洋沿岸的Sable次盆地具备发育多边形断层的地质条件,东部成岩作用弱,多边形断层较发育;西部成岩作用强,造成岩层的强度变大,使得地层脱水收缩及上覆地层的收缩受限,导致多边形断层不发育,这种成岩作用的差异造成了多边形断层分布的不同^[27]。西沙海域南部的上构造层埋藏浅,钻井证实该区处于早成岩阶段,因此该区具备多边形断层发育的成岩作用条件。

(3)构造应力 虽然多边形断层不是构造活动成因的断层,但构造应力对其发育分布仍有明显的影响。下伏构造对多边形断层的影响表现为:下伏构造的顶部处在拉张应力环境下,导致该部位地层易受到拉张而形成多边形断层,因此多边形断层在下伏构造的顶部密度增大、断距增加和断开地层的厚

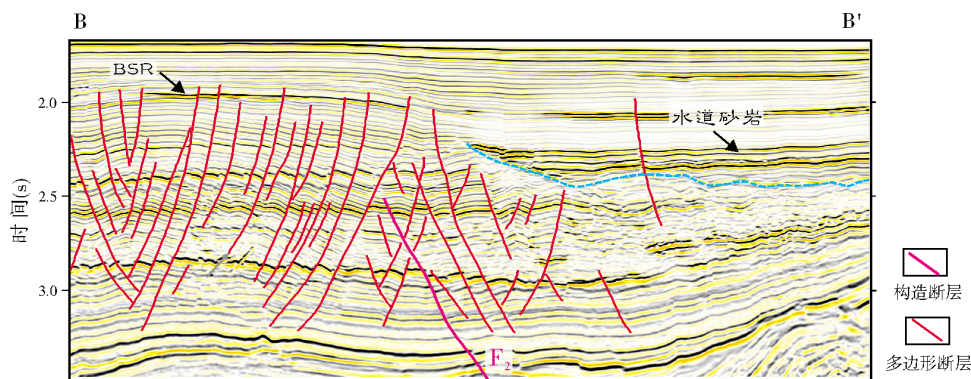


图4 西沙海域南部多边形断层和水道砂岩地震剖面

位置见图1

度增大^[9];构造断层的存在可以改变局部应力场的方向,造成多边形断层与构造断层相交的角度增大,甚至出现近直角相交的情况^[3]。西沙海域南部多边形断层的发育具有这样相似的特点,下伏构造顶部多边形断层发育程度较其他部位高,甚至出现了与构造相似的环状多断裂(图3)。以构造断层 F_1 为边界(图2),以西构造相对低部位为挤压应力环境,多边形断层发育程度较弱;以东高部位为拉张应力环境,多边形断层发育程度较西部明显增强;构造断层两侧应力环境不同导致了多边形断层发育程度有一定变化。因此西沙海域局部构造应力对多边形断层发育起到了明显的控制作用。

4 地质意义

多边形断层可以作为流体运移的通道,对油气成藏有着重要的意义^[27-29]。世界范围内已发现多个多边形断层作为油气运移通道的实例,如刚果盆地和挪威海域^[23]。多边形断层不仅能为流体提供通道,也可作为砂体上侵提供通道^[30],上侵的砂体不仅能作为运移通道,也可以为油气储集提供空间^[2]。

研究区多边形断层对拗陷期油气成藏起着重要的作用。本区烃源岩主要为断陷期沉积的下构造层海陆过渡相煤系地层,拗陷期沉积的中新统三亚组—黄流组复合水道砂体是良好储层,黄流组及之上的海相泥岩是良好的盖层,具备形成岩性油气藏和构造-岩性油气藏的条件,因此,连接断陷期烃源岩和拗陷期储层的油气运移通道是成藏的关键因素。断陷期构造断层发育,而拗陷期以热沉降为主,构造活动微弱,断层不发育,缺乏油源断裂是拗陷期油气成藏的最大风险。新采集的地震资料表明,拗陷期地层中发育大量的多边形断层,它们和深部构造断层结合,就可

以成为有效的油气运移通道,将下部烃源岩中的油气运移到上部砂体中聚集,或者继续向上运移形成天然气水合物,地震剖面上可见明显的BSR地震反射(图2)。因此多边形断层对本区上构造层油气运移聚集有着重要作用,加强相应的分析对地质综合研究具有重要的意义。

5 结论

(1)西沙海域多边形断层发育具有6个特点:纵向上,层控特征明显,平均垂向断距约为40m,平均断层倾角为40°;平面呈不规则多边形,延伸长度400~3000m,断层间距200~700m。

(2)地层岩性对多边形断层发育控制作用明显,上构造层以远源细粒沉积物为主,地层内易形成超压,是多边形断层发育的有利层段;若泥岩与砂岩接触,由于有流体交换泄压,多边形断层则不发育。

(3)多边形断层形成于沉积物的浅埋成岩阶段,下伏构造使其上部地层多边形断层密度增大、纵向断距增加和断开地层厚度增大。

(4)多边形断层与深部构造断层结合形成有效运移通道,可将下部烃源岩中的油气运移到上部储层中聚集,对上构造层油气聚集具有重要意义。

参考文献

- [1] Cartwright J A. Episodic basin-wide hydrofracturing of over-pressured Early Cenozoic mudrock sequences in the North Sea Basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 1994, 11(5): 587-607.
- [2] Cartwright J A, Dewhurst D N. Layer-bound compaction faults in fine-grained sediments[J]. Geological Society of America Bulletin, 1998, 110(10): 1242-1257.
- [3] Hansen D M, Shimeld J W, Williamson M A, et al. Development of a major polygonal fault system in Upper Cretaceous chalk and Cenozoic mudrocks of the Sable Subbasin, Canadian Atlantic margin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2004, 21(9): 1205-1219.

- [4] 吴时国,孙启良,董冬冬.深水盆地中多边形断层的几何特征与形成机制探讨[J].地质力学学报,2008,14(3): 231-240.
- [5] Henriot J P, De Batist M, Verschuren M. Early fracturing of Palaeogene clays, southernmost North Sea: Relevance to mechanisms of primary hydrocarbon migration[C]//Spencer A M. Generation, accumulation, and production of Europe's hydrocarbons. Oxford: Oxford University Press, 1991: 217-227.
- [6] Goult N R. Mechanics of layer-bound polygonal faulting in fine-grained sediments[J]. Journal of the Geological Society, 2003, 159: 239-246.
- [7] Stuevold L M, Faereth R B, Arnesen L, et al. Polygonal faults in the Ormen Lange Field, Møre Basin, offshore Mid Norway[J]. Geological Society, 2003, 216: 263-281.
- [8] Stewart S A. Implications of passive salt diapir kinematics for reservoir segmentation by radial and concentric faults[J]. Marine and Petroleum Geology, 2006, 23(8): 843-853.
- [9] Hansen D M, Cartwright J. The three-dimensional geometry and growth of forced folds above saucer-shaped igneous sills [J]. Journal of Structural Geology, 2006, 28(8): 1520-1535.
- [10] 吴时国,孙启良,吴拓宇,等.琼东南盆地深水多边形断层的发现及其油气意义[J].石油学报,2009,30(1): 22-26.
- [11] 陈端新,吴时国,王志君,等.南海北部陆缘深水盆地多边形断层几何特征及成因[J].石油学报,2012,33(4): 610-616.
- [12] 付晓飞,宋岩.松辽盆地三肇凹陷“T11”多边形断层非构造成因机制探讨[J].地质学报,2008,82(6): 739-749.
- [13] 杨懋新,宋俊如,戴跃进,等.松辽盆地多边形断层的发现及其成因[J].大庆石油地质与开发,2012,31(1): 1-5.
- [14] 王建桥,姚伯初,万玲,等.南海海域新生代沉积盆地的油气资源[J].海洋地质与第四纪地质,2005,25(2): 91-100.
- [15] 姚伯初,万玲,刘振湖.南海海域新生代沉积盆地构造演化的动力学特征及其油气资源[J].地球科学,2004,29(5): 543-549.
- [16] 夏斌,崔学军,谢建华,等.关于南海构造演化动力学机制研究的一点思考[J].大地构造与成矿学,2004,28(3): 221-227.
- [17] 姚伯初.南海海盆新生代的构造演化史[J].海洋地质与第四纪地质,1996,16(2): 1-13.
- [18] 闫义,夏斌,林舸,等.南海北部新生代盆地沉积与构造演化及地球动力学背景[J].海洋地质与第四纪地质,2005,25(2): 53-61.
- [19] 陶维祥,赵志刚,何仕斌,等.南海北部深水西区石油地质特征及勘探前景[J].地球学报,2005,26(4): 359-364.
- [20] 李绪宣,朱光辉.琼东南盆地断裂系统及其油气输导特征[J].中国海上油气,2005,17(1): 1-7.
- [21] 龙根元,吴世敏,曾广东.琼东南盆地北礁凹陷伸展构造的几何学分析[J].海洋地质与第四纪地质,2010,30(3): 71-77.
- [22] 杨涛涛,吴敬武,王彬,等.琼东南盆地华光凹陷构造特征及沉积充填[J].海洋地质与第四纪地质,2012,32(5): 13-18.
- [23] Gay A, Lopez M, Berndt C, et al. Geological controls on focused fluid flow associated with seafloor seeps in the Lower Congo Basin[J]. Marine Geology, 2007, 244(1/4): 68-92.
- [24] Dewhurst D N, Cartwright J A, Lonergan L. Three-dimensional consolidation of fine-grained sediments[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(2): 355-362.
- [25] Dewhurst D N, Cartwright J A, Lonergan L. The development of polygonal fault systems by syneresis of colloidal sediments [J]. Marine and Petroleum Geology, 1999, 16(8): 793-810.
- [26] 刘志飞,李夏晶.南海沉积物中蒙脱石的成因探讨[J].第四纪研究,2011,31(2): 199-206.
- [27] Gay A, Lopez M, Cochonat P, et al. Polygonal faults-furrows system related to early stages of compaction-Upper Miocene to recent sediments of the Lower Congo Basin[J]. Basin Research, 2004, 16(1): 101-116.
- [28] 李士涛,王振奇,张笑,等.非洲下刚果盆地多边形断层系统及其对油气的意义[J].海相油气地质,2011,16(2): 73-78.
- [29] 余一欣,汤良杰,宋纯利.多边形断层系及其研究现状[J].世界地质,2005,24(2): 149-153.
- [30] Larter S, Aplin A C, Bowler B, et al. A drain in my graben: An integrated study of the Heimdal area petroleum system[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2000, 69/70: 619-622.

编辑:黄革萍

Characteristics of Polygonal Faults Distribution and Analysis of Its Controlling Factors in Southern Xisha Offshore, South China Sea

Yang Taotao, Lü Fuliang, Wang Bin, Yang Zhili, Li Li, Zhang Qiang

Abstract: The polygonal faults in southern Xisha Offshore, South China Sea, were first discovered. On the basis of the 3D seismic data and the analysis of the controlling factors for polygonal faults development, it is concluded that the fine grained sediment strata from far source is the favorable development site in upper structure layer of Xisha Offshore. At the same time, channel sandstone, diagenesis and tectonism affected their development and distribution. Polygonal faults, combining with the deep tectonic fault, provided channels for fluid migration from deep hydrocarbon source rocks to the upper reservoir, or continued upward to the shallow strata to form natural gas hydrates.

Key words: Polygonal fault; Fault distribution; Control factor; Xisha Offshore; South China Sea

Yang Taotao: MSc., Geophysical Engineer. Add: PetroChina Hangzhou Institute of Geology, 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang, 310023, China