

文章编号: 1001-6112(2010)06-0600-05

# 油气二次运移动力学分析及实验研究

杨磊<sup>1</sup>, 綦耀光<sup>1</sup>, 孙志信<sup>2</sup>, 任旭虎<sup>3</sup>, 刘新福<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(华东)机电工程学院, 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所, 山东 东营 257000; 3. 中国石油大学(华东)信息与控制工程学院, 山东 东营 257061)

**摘要:** 碎屑岩储层的孔、渗特性对于油气二次运移、聚集和成藏具有重要的影响, 不同层位的碎屑岩储层具有不同的孔隙结构和成藏阻力, 不同构造部位的油气成藏具有不同的成藏动力, 成藏动力与储层自身的孔、渗特性共同决定了油气运移、聚集、成藏的过程。文中针对油气二次运移和聚集的动力和阻力进行了理论分析和计算, 重点对浮力为动力的油气运移开展了系统的物理模拟实验, 通过大量的对比实验, 分析了油气二次运移的不同控制因素, 为圈闭的成藏分析和评价提供了实验参考。

**关键词:** 油气二次运移; 成藏动力; 浮力; 物理模拟

**中图分类号:** TE122.1<sup>+</sup>2

**文献标识码:** A

## THE MECHANICAL ANALYSIS AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF SECONDARY HYDROCARBON MIGRATION

Yang Lei<sup>1</sup>, Qi Yaoguang<sup>1</sup>, Sun Zhixin<sup>2</sup>, Ren Xuhu<sup>3</sup>, Liu Xinfu<sup>1</sup>

(1. College of Machinery and Electronic Engineering, China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China;  
2. Geological Institute of Shengli Oil Field, SINOPEC, Dongying, Shandong 257000, China;  
3. College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China)

**Abstract:** Characteristics of the clastic rock reservoir porosity and permeability have important influence to the secondary hydrocarbon migration and accumulation. Different layers of the reservoir rocks have different pore structure and accumulation resistance, and oil and gas reservoirs in different structural positions have different reservoir forming dynamics. The reservoir forming dynamic, together with the reservoir porosity and permeability characteristics determine the oil and gas migration, accumulation and the process of reservoir formation. In this paper, the authors analyzed and calculated dynamic and resistance of the secondary hydrocarbon migration and accumulation, then carried out a systematic physical simulation experiment on the focus of the buoyancy as a driving force of the oil and gas migration, and analyzed different controlling factors of the secondary hydrocarbon migration. The works of this paper laid the foundation for carrying out physical simulation of the structural deformation and hydrocarbon migration, and also was the experimental reference for the reservoir formation analysis and evaluation.

**Key words:** secondary hydrocarbon migration; reservoir forming dynamic; buoyancy; physical simulation

油气在储层中的运聚规律一直是备受关注的研究问题, 我国油气勘探的实践表明, 在陆相沉积的输导层中油气能否在其内发生二次运移, 取决于油气的成藏动力与成藏阻力<sup>[1]</sup>。油气成藏的动力由构造应力、浮力、水动力、热动力和毛细管力中的一种或几种力所组成; 成藏的阻力则包括输导层本身的毛细管阻力、摩擦力等。油气运移动力能否克服储层中的毛细管阻力及摩擦力等成藏阻力是油气能否发生运移、聚集的关键, 故可用玻璃管充填不同目数的玻璃珠来模拟储层中不同毛细管阻力

的油气运移实验来反映油气在储层中的运移特征。本文以济阳坳陷东营凹陷馆下段为例, 利用现今的馆下段埋深、孔隙度和渗透率等数据, 分析了影响油气运聚的动力和阻力, 发现浮力是影响油气运聚的重要因素; 通过一维玻璃管模拟实验来具体研究和分析浮力与毛细管阻力差值的大小及分布特征, 探讨油气运聚规律。

### 1 油气运聚成藏的力学分析

油气之所以运移、聚集是成藏动力和成藏阻力

收稿日期: 2010-03-10; 修订日期: 2010-10-11。

作者简介: 杨磊(1982-), 男, 博士, 主要从事构造物理模拟、石油机械、机械设计等研究。E-mail: yangsir211@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项《大型油气田及煤层气开发》项目(2008ZX05006)资助。

共同作用的结果,没有动力,油气不可能成藏;同时,成藏动力低于成藏阻力,分散的有机质也无法聚集成藏,只有成藏动力大于成藏阻力时,油气才能在储层中发生二次运移并在合适的圈闭条件下成藏。前人研究表明,油气成藏的动力主要由浮力、构造应力、水动力、热动力和毛细管力等组成;成藏的阻力则主要包括储层孔隙的毛细管力、摩擦力等<sup>[2-4]</sup>。

油气成藏动力可近似用式(1)表示<sup>[4]</sup>:

$$P_d = P_i + P_f - P_j - P_p \quad (1)$$

式中: $P_d$ 为成藏动力; $P_i$ 为烃源岩压力,可以根据相应深度地层压力求得; $P_f$ 为烃类所受的浮力,可以根据相应深度的原油密度求得; $P_j$ 为储层的静水柱压力,可以根据深度求得; $P_p$ 为储层的排替压力,可以根据相应深度的压汞资料求得。

结合本课题所研究的济阳拗陷目标区块,以济阳拗陷东营凹陷成藏动力为依据,从图1中可以看出东营凹陷的成藏动力由深层至浅层是越来越小的,压力封存箱内的动力远大于封存箱外的动力,到了浅部位,其动力的主要来源只有浮力。处于压力封存箱内的烃源岩的地层压力是箱内成藏的主要动力;处于封存箱以上的油藏,其成藏动力主要为浮力。由此可见,不论箱内、箱外油气运移的动力除地层压差外,浮力是影响油气二次运移、聚集的重要因素,因此对浮力为动力的油气二次运移研究具有重要的理论价值和现实意义。

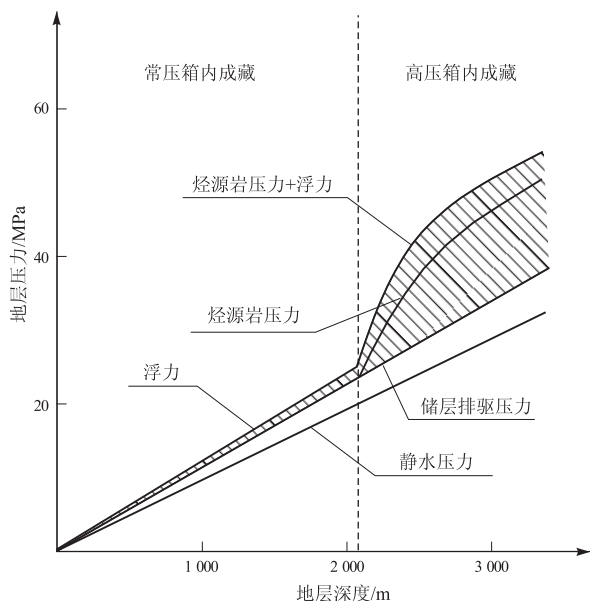


图1 东营凹陷油气成藏动力示意

Fig.1 The driving force sketch of gas and oil in the Dongying Sag

## 2 浮力为动力的油气运移实验研究

### 2.1 浮力作用下油气运移机理分析

#### 2.1.1 浮力的计算

根据阿基米德浮力原理,浸在流体中的物体(固体或不相渗的流体)总要受到浮力的作用,其数值等于他所排替开流体的重量。油、气的密度均小于水,单位体积的油气排开同体积的水的重量,就是单位体积油气所受到的浮力,其大小必然大于油气本身的重量,见下式<sup>[5]</sup>:

$$P_f = V(\rho_w - \rho_o)g \quad (2)$$

式中: $P_f$ 为浮力,单位体积油(气)浸在水中所受浮力; $V$ 为连续油(气)的体积; $\rho_w$ 为地层水的密度; $\rho_o$ 为地下石油(气)的密度; $g$ 为重力加速度。

#### 2.1.2 毛细管力及其计算

毛细管力的大小取决于2种流体间的界面张力、毛细管半径和介质的润湿性,可用下式表示<sup>[6]</sup>:

$$P_c = \frac{2\sigma\cos\theta}{r} \quad (3)$$

式中: $P_c$ 为毛细管压力; $\sigma$ 为油、水界面张力; $\theta$ 为润湿角(油、水界面与岩石孔壁间的夹角); $r$ 为毛细管半径(即孔喉半径)。一般实验情况下,按照实际地质条件,输导层岩石内表面几乎完全被水所润湿,表现为强亲水介质,此时毛细管力计算公式(3)可以简化为:

$$P_c = 2\sigma/r \quad (4)$$

则要计算油气二次运移、聚集所受到的毛细管力,必须已知油水界面张力和岩石的孔喉半径。

油、水界面张力:两相物体间的界面张力大小与物质的相态有关,也与物质的两相分子的性质有关,可以通过表面张力仪来测定,也可以通过数据拟合得到经验公式的办法来求取。例如,根据Schowalter提供的计算诺模图<sup>[4]</sup>,以东营凹陷为例,考虑油水界面张力随温度升高而降低,可列出油水界面张力随深度的变化表,其下降梯度如表1所示。

将表1中油水界面张力( $\sigma$ )与深度( $H$ )的对应数值经数学拟合,便得到二者间的函数关系式: $\sigma = (4\ 665.8 - H)/18\ 522$ ,可求出相应的界面张力。

岩石孔喉半径:岩石孔喉半径通常是在实验室利用水银注入法测得,实际上由于钻井、取心及经费等的限制,用实验的方法获得大量的岩石孔喉半径数据是不现实的,一般研究可以利用岩石孔喉半

表 1 东营凹陷油水界面张力与深度的关系

Table 1 The relationship between the interfacial tension of oil and water and the depth in the Dongying Sag

埋深/km	压力/MPa	温度/°C	油水界面张力/ (N·m <sup>-1</sup> )
0	0.1	20	0.025
1	10	50	0.020
2	20	80	0.014 5
3	30	110	0.009
4	40	140	0.003 5

表 2 实验所用流体的物理性质

Table 2 Physical property of fluid used in the experiment

实验流体	粘度/ (mPa·s)	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	界面张力/ (10 <sup>-3</sup> N·m <sup>-1</sup> )
蒸馏水	1.002	1.007	
200# 染色煤油	1.698	0.723	21.54
260# 染色煤油	1.545	0.749	25.35
280# 染色煤油	1.508	0.782	28.9

径与孔隙度及渗透率间的经验公式,根据孔隙度和渗透率数据来求取相应的岩石孔喉半径:

$$r = \sqrt{\frac{8K}{\varphi}} \quad (5)$$

式中:K 为渗透率;φ 为孔隙度。

综上所述,以浮力为动力的油气二次运移所需的成藏动力可根据下列计算公式获得。

$$P_d = P_f + (\rho_w - \rho_o)h - P_c \quad (6)$$

式中:h 表示油柱高度,其余参数意义如前所述。

## 2.2 实验设计

二次运移是油气从烃源岩到圈闭的重要环节,人们早就注意到,油气在各种通道中的运移是一个极不均一的过程。近年来,为了解油气的这种非均匀运移特征,国内外学者进行了一系列的物理模拟实验<sup>[4-8]</sup>。其中,利用填装玻璃微珠的玻璃管模型,观察静水条件下油在饱和水孔隙介质中靠浮力形成优势运移路径,以及随后沿已形成的路径运移的过程分析研究较多<sup>[9-10]</sup>,但是尚没有开展综合考虑储集层运移环境、原油替代材料、实验流体介质差异等控制因素的实验研究。

### 2.2.1 实验流程

实验所选用的孔隙介质材料为粒度(以筛子目数表示)确定、均匀的玻璃微珠,产地淄博博山玻璃微珠厂;孔隙介质材料的容器是直径为 30~100 mm,长度为 500~1000 mm 不等的玻璃管,根据密封和实验的要求,玻璃管为特殊定制,两端带密封胶塞。实验所需的蒸馏水溶液和染色的 200#、260# 和 280# 煤油的参数如表 2 所示;实验用玻璃微珠的目数和孔隙度如表 3 所示;染色剂采用溶于煤油的油红(苏丹红),按照 1 L 煤油配比 1 g 苏丹红,搅拌均匀无沉淀。

考虑到孔隙介质表面的润湿性是影响油气运移的重要因素,实验前对玻璃珠和玻璃管依次用强酸、清水及强碱清洗,加热到 500 °C,使其表面表现为强亲水性;并对强亲水性材料用浓度分别为 0%,

表 3 不同目数模型的实验参数

Table 3 Experimental parameters of different mesh particle models

实验编号	玻璃珠目数/目	油	水	润湿角/(°)	孔隙度/%
1	10~20	煤油	蒸馏水	0	43.8
2	20~40	煤油	蒸馏水	0	38.6
3	40~60	煤油	蒸馏水	0	36.5
4	60~80	煤油	蒸馏水	0	35.9
5	80~100	煤油	蒸馏水	0	35.2

0.001%, 0.007%, 0.1% 和 2.5% 的二氯二甲基硅烷溶液浸泡,制备出不同润湿性的玻璃珠。实验时筛选某一目数的玻璃微珠和一维玻璃管,经表面润湿性处理后,先将玻璃管注入水,然后充填玻璃微珠到玻璃管中,每充填 5 cm 震荡玻璃管让玻璃微珠完全沉积,不允许有空气泡的存在。

填装好各种实验模型后,采用 2 种方式进行实验:1)从玻璃管的底部用注射器泵入一定量的油,记下驱出的水体积、时间和油在玻璃管中的油柱初始高度,将玻璃管模型置于对比托架上,观察染色煤油在孔隙介质中驱替孔隙水的过程,按一定的时间间隔拍摄照片,记录运移前缘的位置等各种信息;2)直接将玻璃管置于托架上,底部用微量泵恒速注入染色煤油,观察运移过程并记录和拍摄不同时间内煤油运移的位置等各种信息。

### 2.2.2 实验结果观察

按照玻璃微珠的目数(表 3)分为 5 个实验对比大类,每一大类再按照润湿性、煤油型号、初始油柱高度、玻璃管型号等细分为不同的实验对比子类,总共完成了不同控制因素组合方式的油气运移实验 100 余种,通过一个月时间的对比实验发现:

1)在静水条件下,以浮力为动力的油气二次运移时间较长。以 10~20 目玻璃微珠、280# 染色煤油为例,运移过程如图 2 所示,煤油前缘运移到顶端时间为 40 h;从开始运移到顶端聚集约 1/3 量的时间约为 160 h;达到最后平衡态需用 240 h。可见在静水条件下,靠浮力的运移过程缓慢;

2)并不是所有的实验均发生运移现象。以 20 cm

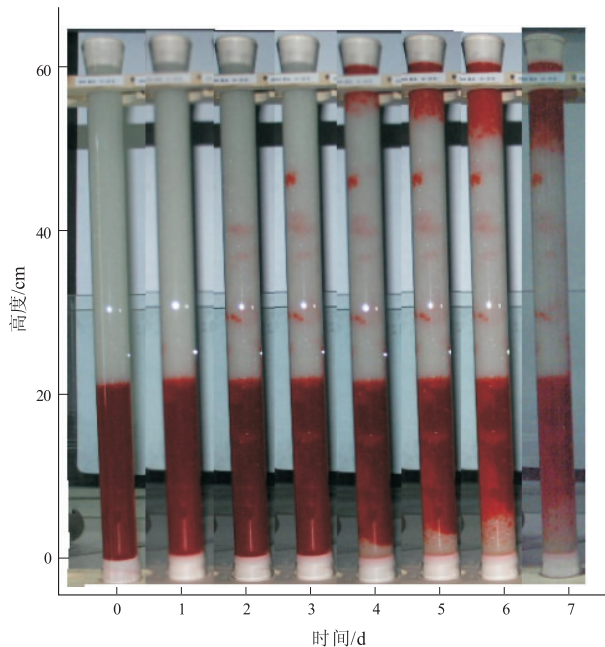


图2 玻璃管油气运移时间对比实验

Fig. 2 The comparison experiment of oil and gas migration time in glass tubes

油柱初始高度、280#染色煤油以及60 cm玻璃管为例,当实验用玻璃微珠大于60~80目时,靠浮力很难实现油气运移;

3)以浮力为动力的油气二次运移是一个不均一的过程,运移的前端会出现跃动,并且已经形成的运移通道为后续油气运移开辟了良好的路径,并且油气运移会有残余,并不是所有的油气都会运移到玻璃管的顶端;

4)通过对比发现,事先用煤油浸泡的玻璃珠具有亲油性,与不用煤油浸泡的相比运移的速度加快。如以20~40目玻璃微珠(一种为煤油浸泡,另一种不浸泡)、200#染色煤油、在水饱和环境中运移为例,都在浮力的作用下发生运移,但玻璃珠浸泡过煤油的玻璃管中发生运移的速度较快(图3);

5)与纯浮力实验相比,采用微量泵注入的充注实验,主控因素为泵入流体的速度和压力,而与目数、孔隙度及密度差等因素关系不大。例如以10~20目玻璃微珠、260#煤油为例,泵入压力为0.2 MPa,泵入流速为1 mL/s,则玻璃管为60 cm长,完全被煤油占据大约需要5 min;如果改变泵入的速度和压力,则时间随之发生改变,并且其运移的前端也出现跳动,但染色煤油前端整体推进,表现为活塞式运移方式。

### 3 影响因素分析

对于充注实验,油气运移、聚集主要受充注条

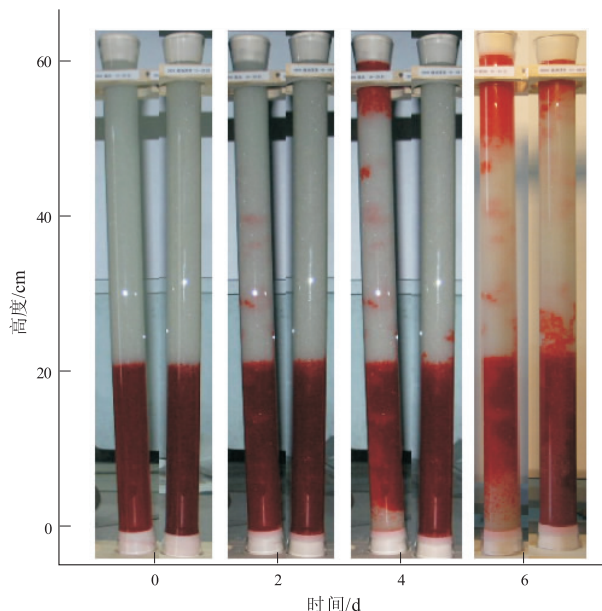


图3 煤油浸泡玻璃珠对比实验

左侧试管为事先煤油浸泡玻璃珠,再水饱和;右侧为干玻璃珠水饱和。

Fig. 3 The comparison experiment with kerosene soaked glass beads

件控制,而与其他因素关系不大;对于纯浮力作用下的油气运移实验则受控于以下因素:

#### 3.1 玻璃珠的润湿性

实验发现随着润湿角的增大,毛细阻力减小,油气运移所需时间缩短,符合理论推导的结果。同时,将用煤油浸泡过的玻璃珠做对比实验,发现玻璃珠表现为亲油性时,有利于油气二次运移。

#### 3.2 实验流体密度差

实验中为便于区别流体密度差对实验的影响,采用了3种不同型号的染色煤油,实验结果为200#煤油的运移时间最短,而280#煤油的运移时间最长,可见在相同的蒸馏水饱和环境中,地质模型不变的条件下,实验流体密度与环境密度差别越大,运移效果越明显。

#### 3.3 实验介质的孔隙度和渗透率

油气运移与否取决于成藏动力和阻力的差值,只有在浮力大于阻力的情况下,才能实现运移;差值越大,则运移速度越快、效率越高。实验采用的玻璃微珠分别为10~100目不等的5大类,随着目数的增大,孔隙度和渗透率逐渐减小。在使用同一实验流体介质和实验容器中,目数越大则越难发生运移,说明实验介质的孔隙度减小,相应的喉道半径减小,运移阻力增大,浮力与阻力的差值减小,则运移时间变长。

#### 3.4 油柱的初始高度

实验中,采用的玻璃管长度不等,因此通过设

定不同的油柱初始高度来判断运移效率。分别设定 5,10,15,20,30,50 cm 的油柱初始高度来进行对比实验,可以发现油柱初始高度越高,越容易发生运移;但当油柱高度大于玻璃管整体高度的 1/3 后,再增加初始油柱高度,对运移的效率影响不大。

需要说明的是实验的前提是改变其中的一个影响因素,保证其他控制因素基本不变,但实验过程中的人为因素可能会影响油气运移的实验结果。本次实验通过严格按照实验设计的基本条件来处理实验器材、实验介质,并严格按实验步骤执行实验要求,从而降低了人为因素的影响,保证了实验结果的客观、准确。

#### 4 结论

油气二次运移和聚集是石油勘探和开发研究的热点,济阳坳陷东营凹陷的钻井资料表明,浮力在油气二次运移中发挥了至关重要的作用。通过对油气二次运移和聚集的动力和阻力的理论分析和计算,并重点针对浮力为动力的油气运移开展了玻璃管物理模拟对比实验,结果显示:当作为储层的玻璃珠表现为亲油性时,有利于油气的运移;实验流体的密度与环境密度差别越大,运移效果越好;介质的孔渗性越好,运移越容易;油柱初始高度越高,越容易运移,但当超过一定高度后,其对运移的影响就不明显。本次实验的结论,为圈闭的成藏分析和评价提供了实验参考,同时对理论分析进行了验证。

#### 参考文献:

[1] 李明诚. 油气运移基础理论与油气勘探[J]. 地球科学:中国地质大学学报,2004,29(4):379-383.

[2] 周波,金之钧,罗晓容,等. 油气二次运移过程中的运移效率探讨[J]. 石油学报,2008,29(4):475-488.

[3] CARRUTHERS D, RINGROSE P. Secondary oil migration: oil-rock contact volumes, flow behavior and rates[M] //PAR-NELL J. Dating and Duration of Fluid Flow and Fluid-Rock Interaction, Special Publications 144. London: Geological Society, 1998:205-220.

[4] SCHWEITZER T T. Mechanics of secondary hydrocarbon migration and entrapment[J]. AAPG Bulletin, 1979, 63(5): 723-760.

[5] 周波,金之钧,罗晓容,等. 尺度放大时逾渗模型中的油气运移路径变化规律探讨[J]. 石油与天然气地质,2007,28(2): 175-180.

[6] 张发强,罗晓容,苗盛,等. 石油二次运移的模式及其影响因素[J]. 石油实验地质,2003,25(1):69-75.

[7] DEMBICKI H JR, ANDERSON M J. Secondary migration of oil: Experiments supporting efficient movement of separate, buoyant oil phase along limited conduits [J]. AAPG Bulletin, 1989,73:1018-1021.

[8] THOMAS M, CLOUSE J A. Scaled physical model of secondary oil migration [J]. AAPG Bulletin, 1995,76(1):19-29.

[9] ENGLAND D A, MACKENZIE A S, MANN D M, et al. The movement entrapment of petroleum fluid in the subsurface[J]. Journal of Geological Society, 1987,114:327-347.

[10] 董亨茂. 地应力对排烃的影响方式及作用模型[J]. 石油实验地质,2000,22(3):202-205.

(编辑 黄 娟)

### 欢迎订阅 2011 年《石油实验地质》

《石油实验地质》是一份报道我国油气普查、勘探及开发成果,反映我国石油地质研究水平的学术性、技术性刊物。本刊紧密结合我国石油工业的发展战略,以石油工业上游所涉及的油气勘探的热点、难点问题为重点进行报道和分析,同时重点报道国内外油气实验测试的最新技术和方法。本刊为中文核心期刊,已被美国“化学文摘(CA)”、俄罗斯“文摘杂志(AJ)”和“中国石油文摘”、“中国地质文摘”、“中国学术期刊文摘”所收录,是“中国科学引文数据库”、“中国学术期刊综合评价数据库”、“中国科技论文统计源”来源期刊,并全文收录于“中国期刊网”、“中国学术期刊(光盘版)”、“万方数据——数字化期刊群”及“维普中文科技期刊数据库”中。

《石油实验地质》为双月刊,逢双月 28 日出版。每本定价 10 元,全年 60 元。在校学生半价优惠。

订刊汇款方式:

1. 银行汇款:中国石油化工股份有限公司无锡实验地质研究所

帐号:32001618636052509495

开户银行:无锡市建设银行营业部;支付行行号:105302000443

2. 邮局汇款:(214151)江苏省无锡市 916 信箱《石油实验地质》编辑部

订刊电话:(0510)83209032 传真:(0510)83202742

电子邮箱:sysydz@mail.wuxisuo.com;网址:http://www.sysydz.net