

生产数据分析在江苏油田岩性油藏中的应用

蔡新明¹, 金忠康², 刘金华¹

(1. 中国石化江苏油田分公司勘探开发研究院, 江苏 扬州 225009; 2. 中国石化江苏油田分公司采油二厂, 江苏 金湖 211600)

摘要:江苏油田岩性油藏构造破碎,地震资料差,砂体横向变化快,单纯依靠静态资料难以精确识别砂体边界及断层。试井能够识别油藏边界,但江苏油田储层渗透率低,测试时间长,不能满足生产需要。生产数据分析利用生产数据和流动压力进行分析,因生产时间长,能反映更大范围的流动及边界信息,通过典型递减曲线图版拟合方法计算储层参数,获得地层动态参数,了解油藏边界情况。生产实践表明,生产数据分析与物探、地质相结合,可提高岩性油藏砂体边界刻画精度,有效指导岩性油藏的滚动开发及措施调整,为江苏油田岩性油藏的精细描述和开发提供了一种新手段。

关键词:生产数据分析;典型曲线;岩性油藏;砂体边界

中图分类号:TE323

文献标识码:A

Application of production data analysis in lithologic reservoirs of Jiangsu Oilfield

CAI Xinming¹, JIN Zhongkang², LIU Jinhua¹

(1. Exploration and Development Research Institute of Jiangsu Oilfield Company, SINOPEC, Yangzhou 225009, China;

2. No.2 Oil Production Plant of Jiangsu Oilfield Company, Jinhu 211600, China)

Abstract: Because there are structure fragmentation, poor seismic data and rapid lateral variation of sand bodies in lithologic reservoirs of Jiangsu Oilfield, it is difficult to be accurately identified the boundary and faults of sand bodies solely by static data. Although well testing can be used to identify the reservoir boundary, it can not meet the needs of production due to the lower permeability of reservoirs in Jiangsu Oilfield and longer testing time. Production data analysis can use production data and flowing pressures of bottom-hole to reflect the flow in a wider range and the boundary information. Using the typical decline curve chart fitting method, reservoir parameters can be calculated to obtain formation dynamic parameters and understand reservoir boundary conditions. Production practice indicate that the combination of production data analysis with geophysical prospecting and geology can improve the accuracy of sand boundary description, effectively guide the rolling development of the lithologic reservoir, and provide a new technical means for fine description and development of lithologic reservoirs in Jiangsu Oilfield.

Key words: production data analysis; typical curve; lithologic reservoir; sand body boundary

江苏油田岩性或构造-岩性油藏储量近4 000×10⁴ t,开发中存在以下难点:构造破碎,地震资料差,小断层识别、储层预测和砂体边界刻画难度大;砂体薄,横向变化快,地层对比难度大。因此,注采井网难以完善,开发效果差,采出程度仅13.8%。

试井能够识别油藏边界,但需关井测压,江苏油田由于储层渗透率低,一般需要10 d甚至一个多月才能探测到砂体边界,费用高,不能满足生产需要。生产数据分析采用的生产数据时间长,能够反映更大范围的流动及边界信息,因而刻画砂体边界更精准。该技术无需复杂的测试工艺和关井测试,既解决了生产井试井成本高、影响产量的问题,又可充分发挥油田开发中积累的大量产量、流压等历

史生产数据的作用^[1-4]。

1 生产数据分析方法

1.1 方法原理

生产数据分析主要有Blasingame^[5-6]、Agarwal、Gardner^[7]等提出的方法,能够实现不关井,减少关井测压的产量损失及测试费用。利用历史产量及流压数据得到传统压恢试井解释的动态参数,并使用解析解计算油气地质储量。Blasingame、Agarwal、

收稿日期:2019-07-10;改回日期:2019-10-28。

第一作者简介:蔡新明(1981—),硕士,高级工程师,现从事油藏工程生产及科研。E-mail:caixm.jsyt@sinopec.com。

Gardner分析方法均采用产量归一化形式,规整化压力积分(NPI)方法则采用压力归一化的积分形式,受噪声及数据分散的影响较小。采用物质平衡时间代替生产时间,把变流压问题转换为定产问题,分析步骤如下^[8]:

(1)确定物质平衡时间。物质平衡时间为 $t_e=Q/q$,即累计产量与当前产量的比值,也就是建立变产量生产与定产量生产之间的等效关系。

$$t_e=\frac{Q}{q}$$

(1)

(2)压力归一化积分:油井生产到该时刻的平均标准化流动压力降:

$$I(t_e)=\left(\frac{\Delta p}{q}\right)_i=\frac{1}{t_e}\int_0^{t_e}\frac{p_i-p_{wf}}{q}dt$$

(2)

(3)压力归一化积分求导:

$$I'(t_e)=\left(\frac{\Delta p}{q}\right)_{id}=\frac{\partial I(t_e)}{\partial \ln(t_e)}$$

(3)

将 $I(t_e)$ 、 $I'(t_e)$ 共同绘制在以 t_e 为横轴的双对数坐标中,生成分析图。不稳定段将会出现一直线段,等同于试井解释中的径向流段。通过拟合导数的水平段,得到油藏的地层系数 kh ,再根据晚期边界反映(斜率为1),通过拟合边界控制流动段便可获得油藏大小和储量。

由油藏原始压力、井底流压数据以及对应的日产油数据,可求取压力归一化积分曲线及导数,再把数据绘制在双对数曲线上。通过移动实际曲线,使实际曲线与理论曲线拟合,通过选择匹配点,读取实际数据中的 $(\Delta p/q)_{match}$ 、 $(t_e)_{match}$ 和理论曲线的 $(p_D)_{match}$ 、 $(t_{DA})_{match}$,计算出储层渗透率和表皮系数,计算公式如下^[8]:

$$p_D=\frac{kh\Delta p}{141.2qB\mu_o}$$

(4)

$$t_{DA}=\frac{0.006\ 33kt_e}{\pi\varphi\mu_oC_r^2e}$$

(5)

$$K_C=\frac{141.2B\mu}{h}\left(\frac{p_D}{q}\right)_{match}$$

(6)

$$r_{ec}=\sqrt{\frac{0.006\ 33K}{\pi\varphi\mu C_t}}\left(\frac{t_e}{t_{DA}}\right)_{match}$$

(7)

$$r_{vac}=\frac{r_{ec}}{\left(\frac{r_e}{r_{wa}}\right)_{match}}$$

(8)

$$S_c=\ln\left(\frac{r_w}{r_{vac}}\right)$$

(9)

1.2 方法可行性验证

根据M38井区实际渗透率、表皮系数等基本参

数建立不同形状的理论模型,通过数值模拟计算油井产量和流动压力,用NPI(规整化压力积分)方法计算模型参数,与M38井区的参数进行方法可行性验证。从建立的模型参数以及生产数据计算的油藏参数对比来看,无论圆形边界油藏还是方形油藏,其动态储量、砂体边界、表皮系数等参数误差均在10%以内(见表1、表2),说明利用该方法计算动态储量、砂体边界、渗透率、表皮系数等参数是可行的。

表1 圆形边界油藏参数对比

方法	半径 / m	渗透率 / 10 ⁻³ μm ²	动态储量 / 10 ⁴ t	表皮系数
理论模型	300	7.7	25.4	5
该方法计算	321	7.9	27.4	5.3
偏差 /%	7	2.6	7.9	5.6

表2 方形边界油藏参数对比

方法	L1/ m	L2/ m	L3/ m	L4/ m	动态储量 / 10 ⁴ t	渗透率 / 10 ⁻³ μm ²	表皮 系数
理论模型	100	200	500	400	70.9	7.7	5.00
该方法计算	98	195	490	392	64.2	8.0	5.26
偏差 /%	-2	-2.5	-2	-2	-9.4	3.9	5.20

1.3 油井流压计算

江苏油田油井流动压力测试较少,但动液面测试基本每月一次。动液面能反映地层能量及流动压力,通过动液面可以计算油井流压,进行生产数据分析。正常生产的抽油井,进入泵筒里的流体被活塞抽上来,油管 and 套管环形空间内的流体由于重力分异,一般形成气段、含有气的油段和含有气的油水混合液段。因此,抽油井的流压实际上是三段压力之和。井底流压计算公式为^[9-10]:

$$p_{wf}=(p_c+0.103\ 3)\exp(1.293\times10^{-4}\rho_gH_d)+(H_p-H_d)\rho_o/100+(H_m-H_p)(\rho_o(1-f)+\rho_wf)/100$$

(10)

油井流压结合产量数据,通过NPI方法进行生产数据分析,以指导生产。

2 参数敏感性分析

通过建立理论模拟,研究各因素对曲线形态的影响,根据实际曲线判别油藏类型,计算动态储量、砂体边界等参数。

2.1 边界类型

不同边界曲线边界特征不同(见图1)。对于封闭边界,压力导数曲线上翘;无限大地层,压力导

数曲线为一条直线;定压边界,压力导数曲线向下弯曲。

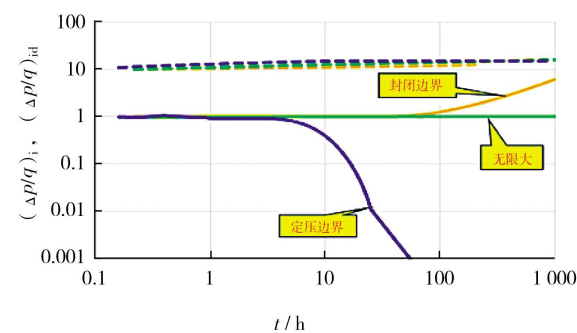


图1 边界类型对NPI曲线形态的影响

2.2 边界距离

油井距离边界越远,则渗流面积越大,曲线上翘的时间越晚,压力及压力导数曲线也越往上(见图2)。

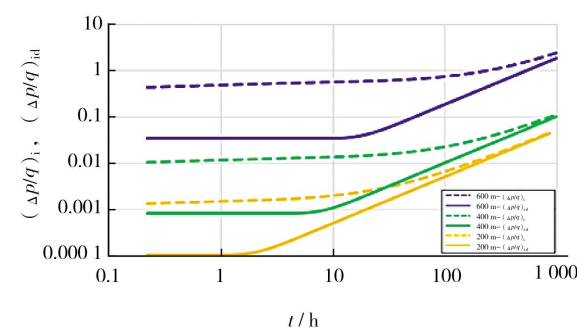


图2 边界距离对NPI曲线形态的影响

2.3 表皮系数

表皮系数影响见图3,可以看出表皮系数为正时,表皮系数越大,附加的压降越大;表皮系数为负时,相当于一个负的附加压降。表皮系数越大,压力曲线越高。

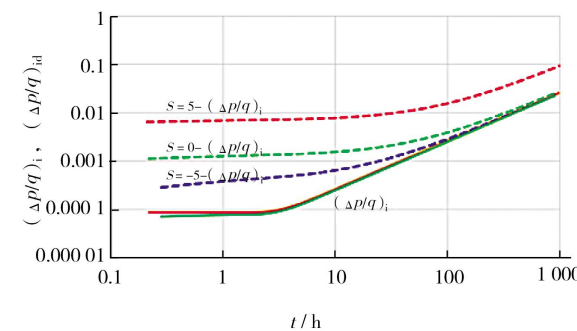


图3 表皮系数对NPI曲线形态的影响

2.4 渗透率

渗透率越大,则附加的压降越小,曲线越靠下,压力曲线及压力导数曲线重合的时间越早(见图4)。

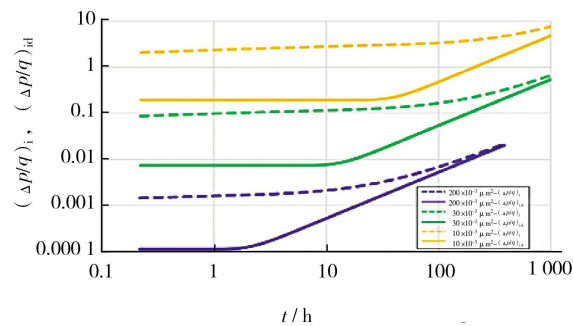


图4 渗透率对NPI曲线形态的影响

3 应用实例分析

3.1 识别内部小断层,指导开发调整

M38断块属于单斜构造,地层向东南倾斜,主要含油层系为E₂d₂⁵和E₂d₁¹,平均渗透率7.7×10⁻³ μm²。2013年10月投入开发,2014年8月开始注水开发。2016年测试压力水平仅0.3。全区动液面持续下降,从最初的970 m下降到目前的2 121 m。该断块由于渗透率低,注水不见效,2018年决定注CO₂试验。构造高部位的大断层在地震剖面上很清楚,且多口井钻遇比较确定。从地震资料看,M38-1与M38-5井之间存在波组扭动和强轴终止,可能发育一条内部小断层F1(见图5,6)。

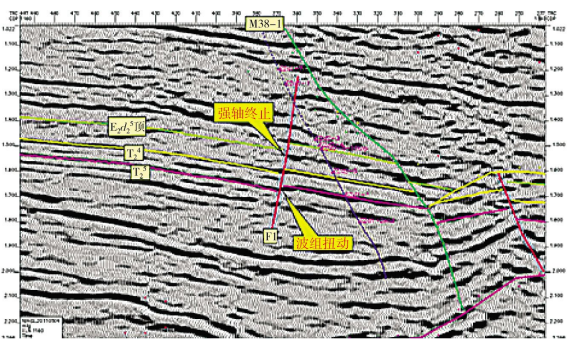


图5 过M38-1井的联络线地震剖面

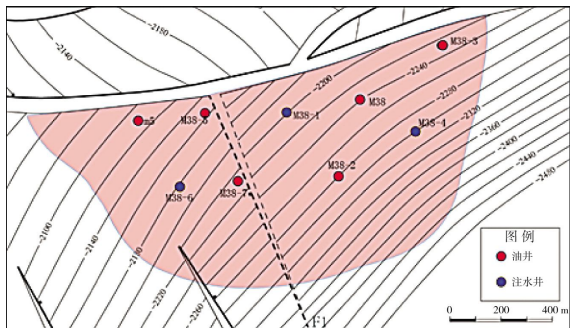


图6 M38断块井网

内部小断层F1存在与否对选择哪口井作注气

井非常重要。通过对M38-1和M38-5井的生产数据分析(见图7,8),两口井采用一条断层的模型拟合都很好,而两条断层的模型拟合效果都不好,说明M38-1和M38-5井附近只存在1条大断层,不存在小断层。M38-1井2018年3月注CO₂后,M38-5井和M38-7井见效明显,其中M38-5井日产油从1.8 t上升至4.2 t(见图9),验证了不存在小断层。

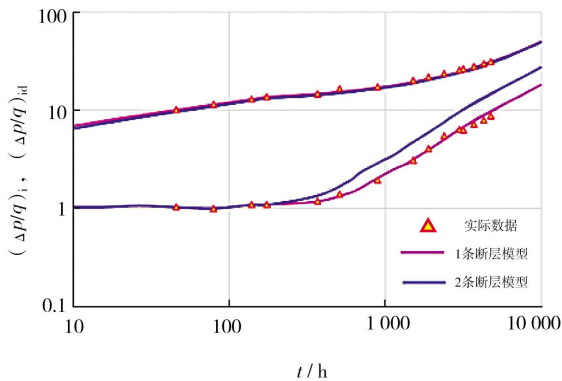


图7 M38-1井NPI曲线

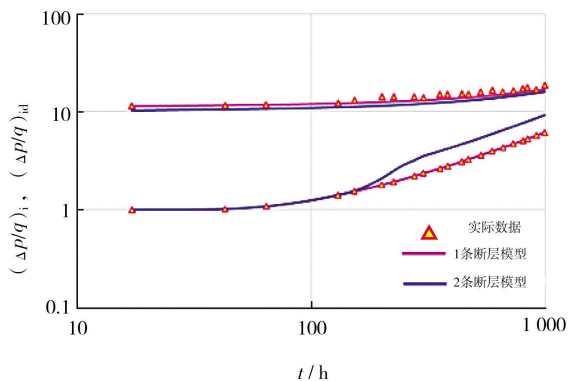


图8 M38-5井NPI曲线

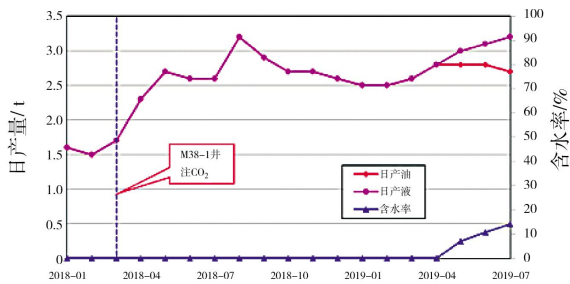


图9 M38-5井生产曲线

3.2 识别岩性边界,为滚动评价提供依据

H43断块由于砂体薄,横向变化快,单靠静态资料难以精确刻画砂体边界,需要通过物探、地质和油藏的综合研究,确定滚动评价潜力。通过HX43井生产数据分析,该井泄油半径为400 m。结合沉积相认识,在HX3井构造高部位和低部位分别部署实施H3-1和H3-2井,均获成功,其中H3-1投产日产油

10 t。

3.3 指导措施选井

通过计算油井渗透率和表皮系数,指导油井措施类型。

MX45井投产初期日产油1.1 t,不含水,产量低。通过生产数据分析,该井表皮系数为-4,不存在井底污染;有效渗透率仅 $1.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为低渗透油层。提出压裂措施,压裂后日产油从1.0 t上升至4.0 t,不含水。

G7-31井调层(E₁f₃)生产,日产液0.8 t,日产油0.5 t,含水38.6%。通过生产数据分析,该井表皮系数12,存在井底污染;有效渗透率 $56 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为中渗透油层。产量低是因近井地带污染造成,为此提出酸化措施。酸化后日产油从0.5 t上升至3.1 t。

4 结论与认识

(1)生产数据分析是在不影响生产的情况下,通过对生产资料(流压和产量)进行分析,获得地层参数,识别油藏边界。

(2)生产分析与物探、地质相结合,提高了砂体边界的刻画精度,有效指导了滚动开发和措施调整,为江苏油田岩性油藏精细描述和开发提供了一种新的手段。

符号解释:

t_e 为物质平衡时间,d; Q 为累计产量,t; q 为日产量,t; $I(t_e)$ 、 $(\Delta p/q)_i$ 为规整化压力函数; Δp 为压差,MPa; p_i 为原始压力,MPa; p_{wf} 为流动压力,MPa; $I'(t_e)$ 为规整化压力导数; p_{at} 为无因次压力; K 为渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; h 为储层厚度,m; B 为地层体积系数; f 、 μ_o 为原油黏度,mPa·s; t_{DA} 为无因次时间; ϕ 为孔隙度; f 、 C_i 为综合压缩系数,MPa⁻¹; r_e 为渗流半径,m; K_e 为计算的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; r_{ec} 为计算的渗流半径,m; r_{wa} 为井的折算半径,m; r_{wc} 为计算的井的折算半径,m; S_e 为计算的表皮系数; p_{wf} 为井底流压,MPa; ρ_g 为天然气密度,g/cm³; H_d 为动液面,m; H_p 为泵深,m; ρ_o 为原油密度,g/cm³; H_m 为油层中深,m; f 为含水率,f。

参考文献:

[1] 刘晓华,邹春梅,姜艳东,等.现代产量递减分析基本原理与应用[J].天然气工业,2010,30(5):50-54.
[2] 郑永健,段永刚,魏明强.水驱气藏生产数据分析方法研究及应用[J].西南石油大学学报(自然科学版),2019,41(4):99-106.
[3] 宋春薇.生产数据分析在庆深气田的应用[J].大庆石油地质与开发,2018,37(4):95-99.
[4] 孙红杰,金宝强,冉明伟,等.现代生产数据分析方法在复杂油藏储层特性评价中的应用(下转第74页)

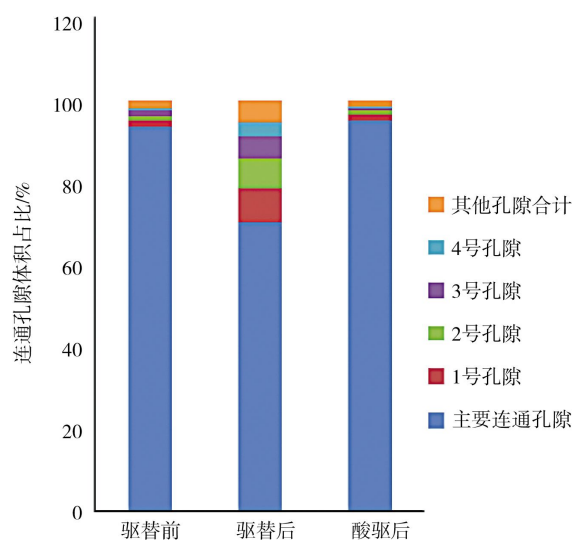


图12 岩心酸驱实验前后孔隙体积占比

酸液驱替后,由岩心孔隙结构图可见,岩心主要连通孔隙体积占比由70.24%提高到95.46%,同时岩心渗透率由 $15.73 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 提高到 $22.59 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,进一步验证了岩心孔隙连通性与岩心渗透率之间的正相关关系。

3 结论

(1)同一区块内的不同渗透率区域针对注入水中固相悬浮物有不同的水质指标。

(2)通过室内试验,得到了不同区域注入水固相悬浮物的指标。

(3)CT扫描结果表明,注入水中固相悬浮物通过堵塞岩心内部喉道,降低岩心内部孔隙连通性,从而使岩心渗透率降低。

(4)固相悬浮物使单个连通孔隙体积降低30%以上,通过酸化的手段可以恢复岩心孔隙连通性。

参考文献:

[1] 胡文瑞.中国低渗透油气的现状与未来[J].中国工程科

学,2009,11(08):29-37.

- [2] 李海涛,王永清,蒋建勋.悬浮颗粒对砂岩储层吸水能力影响评价[J].西南石油学院学报,2006(05):47-49+111.
- [3] BARKMAN J H ,DAVIDSON D H.Measuring water quality and predicting well impairment[J]. Journal of Petroleum Technology,1972,24(7):865-873.
- [4] BASAN P B.Formation damage index number:a model for the evaluation of fluid sensitivity in shaly sandstone [C]. SPE 14317,1985.
- [5] GIORGID P. A systematic determination of formation damage causes[C]. SPE 21143,1990.
- [6] WOOD J M, SPARK I S C. Microbially induced formation damage in oilfield reservoirs[C]. SPE 58750,2000.
- [7] 李明军,何胜林,雷昊,等.涪陵低渗油藏注水水质对渗流能力影响实验研究[J].中国矿业,2018,27(11):165-168.
- [8] 易爱文,杨永钊,李刚,等.杏子川油田注入水水质劣化原因分析及对策研究[J].石油化工应用,2018,37(09):70-74+79.
- [9] 单鲁凯,孙建波.注水水质对低渗透储层损害实验研究[J].石化技术,2015,22(05):163+210.
- [10] 谷潇雨,蒲春生,王蓓,等.超声波解除岩心钻井液堵塞实验研究 [J]. 西安石油大学学报 (自然科学版),2014(01):76-79+88-91.
- [11] 陈龙花.江汉油区注入水水质标准控制指标评价和优选[J].江汉石油职工大学学报,2006(06):36-39.
- [12] 李明军,何胜林,雷昊,等.涪陵低渗油藏注水水质对渗流能力影响实验研究[J].中国矿业,2018,27(11):165-168.
- [13] 王亮. 低渗透油藏注水水质指标及采出水处理专家系统研究[D].成都:西南石油学院,2004.

(编辑 韩 枫)

(上接第 65 页)

- [J].石油地质与工程,2013,27(1):76-78.
- [5] BLASINGAME T A, MCCRAY T L.Dcline curve analysis for variable pressure drop/variable flow rate systems[R]. SPE 21513,1991.
- [6] BLASINGAME T A, JOHNSTON J L, LEE W J. Type-curve analysis using the pressure integral method [A]. SPE 18799,1989.
- [7] AGARWAL R G, GARDNER D C, KLEINSTEIBER S W,et al.Analying well production data using combined type curve and decline curve Concepts[R].SPE 57916,

1998.

- [8] FAST RTA.Techniacal documentation-theory and equations [EB/OL].http://www.ihsenergy.ca/support/docum-entation_ca/Harmony/Default.htm#html_files/reference_m-aterial/analysis_method_theory/mpi_theory.htm.
- [9] 周继德.抽油井压力计算方法[J].大庆石油地质与开发,1986,5(3):57-65.
- [10] 叶雨晨,杨二龙,齐梦,等.一种计算油井井底流压的新方法[J].石油化工高等学校学报,2017,30(5):55-59.

(编辑 谢 葵)