

## 水驱砂岩油藏优势渗流通道识别

刘薇薇, 龚丽荣, 罗福全, 温玉焕, 王力那

(中国石油冀东油田分公司勘探开发研究院, 河北 唐山 063004)

**摘要:**砂岩油藏经过长期注水开发后,通常形成水驱优势渗流通道,使得油井含水快速上升,注入水无效循环严重,油藏开发效果逐渐变差。基于储层物性变化规律和开发动态特征,分析了水驱砂岩油藏优势渗流通道的形成机理及优势通道形成原因。以南堡1-29断块为例,以注采井组为单元,以综合判别参数为主,计算注采井组间的水驱流场,利用Rdos栅状数值模拟和开发动态特征,划分出三类水驱优势渗流通道模式,结合示踪剂分析结果确定优势渗流通道的发育层位,并对主要渗流层进行了优势渗流通道的识别和描述,为制定油藏挖潜对策提供了重要参考依据。

**关键词:**砂岩油藏;优势渗流通道;水驱流场;数值模拟;压差

中图分类号:TE343

文献标识码:A

## Identification of preferential percolation path for water flooding sandstone reservoir

LIU Weiwei, GONG Lirong, LUO Fuquan, WEN Yuhuan, WANG Lina

(Research Institute of Petroleum Exploration and Development of Jidong Oilfield Branch, PetroChina, Tangshan 063004, China)

**Abstract:** After long-term water flooding development, the preferential percolation path of waterflooding has been usually formed in sandstone reservoirs. As a result, the water cut of oil wells rises rapidly, the ineffective recycling of injected water is serious, and the development effect of the oil reservoir becomes worse gradually. Based on the change rule of reservoir physical properties and development dynamic characteristics, it was analyzed the formation mechanism and reason for the preferential percolation path in the waterflooding sandstone reservoir. Taken the injection-production well group in Nanpu 1-29 fault-block as a unit, mainly based on comprehensive discriminant parameters, it was calculated the waterflooding flow field between injection and production wells. Based on the dynamic development characteristics and Rdos grid numerical simulation, three preferential percolation path modes of waterflooding were classified. The developmental horizon of the preferential percolation path was determined by the tracer analysis. In addition, the identification and description of the preferential percolation path of the main seepage layer can provide an important reference for the development of the oil reservoir exploration strategy.

**Key words:** sandstone reservoir; preferential percolation path; water flooding flow field; numerical simulation; differential pressure

优势渗流通道指因地质及开发导致储集层局部形成的低阻渗流通道。注水开发后期,注入水沿此通道形成明显的优势流动而产生无效循环<sup>[1]</sup>。在优势渗流通道发育的地层中,注入水在优势渗流通道中形成无效窜流,注入水效率降低,水驱波及体积减小,层内、层间矛盾加剧,使得油井含水率快速上升,水驱动用程度降低,油藏采收率及开发效益逐渐变差。识别优势渗流通道是制定油藏挖潜对策的前提<sup>[2-5]</sup>。

南堡1-29断块属于层状背斜带气顶的构造油气藏,含油层位NgⅣ②,埋深-2 200~-2 310 m,为辫状河高孔中高渗砂岩储层,平均孔隙度25.57%,

收稿日期:2019-06-10;改回日期:2019-07-30。

第一作者简介:刘薇薇(1983—),女,博士,高级工程师,主要从事油藏提高采收率研究。E-mail: hanshuolww@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“渤海湾盆地黄骅坳陷滩海开发技术示范工程”(2011ZX05050)。

平均渗透率 $462.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,为常规稀油油藏。该断块在开发过程中,示踪剂、产吸剖面及动态资料表明油藏平面、层间及层内三大矛盾日益加剧,油藏优势渗流通道普遍发育,油藏开发效果逐渐变差。为扭转南堡1-29断块开发趋势,必须先识别优势渗流通道,并对其进行准确描述。

## 1 水驱优势通道形成机理

油田在长期注水开发过程中,一方面由于注入水浸泡、冲刷作用,储集层微观属性发生物理、化学变化,致使储集层参数也发生变化;另一方面受储集层非均质性、油水黏度比、注采强度等各种参数影响而产生的渗流差异导致流体趋向于某一局部区域流动,最终在局部产生优势渗流,形成优势渗流通道<sup>[6-7]</sup>。

### 1.1 达西定律

达西定律是渗流力学的基本定律,也称为线性渗流定律,当渗流速度在适当范围内时成立。达西公式如式(1)、式(2)所示,从达西公式入手,在不考虑油水黏度变化因素条件下,影响油水流速的因素包括三个:渗透率( $K$ )、相对渗透率( $K_r$ )和压差( $\Delta p$ )<sup>[8-10]</sup>。

$$v_o = \frac{KK_r A}{\mu_o} \Delta p \quad (1)$$

式中: $v_o$ 为油相渗流速度,m/s; $K$ 为渗透率, $\mu\text{m}^2$ ; $K_r$ 为油相相对渗透率,无量纲; $A$ 为砂层的横截面积, $\text{m}^2$ ; $\mu_o$ 为原油黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ; $\Delta p$ 为两个渗流截面间的折算压差,Pa。

$$v_w = \frac{KK_r A}{\mu_w} \Delta p \quad (2)$$

式中: $v_w$ 为水相渗流速度,m/s; $K_r$ 为水相相对渗透率,无量纲; $\mu_w$ 为水的黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

因此,油藏水驱场受 $K$ 、 $K_r$ 和 $\Delta p$ 三个因素共同作用,根据储层地质条件可以大致分为两种类型油藏:

(1)油藏非均质性强,高渗区域 $K$ 值极大,成为形成优势渗透通道的主因;该类油藏特征为具有极强平面非均质、胶结差、存在原生或次生大孔道。

(2)油藏非均质性强,高渗区域 $K$ 值相对较大,但无法对优势通道形成起决定作用,水驱优势渗流通道的形成受控于 $K$ 、 $K_r$ 和 $\Delta p$ 三个因素的综合作用。该类油藏特征为常规砂岩储层,胶结好,不存在大孔道。南堡1-29断块油藏属于该类型。

### 1.2 水驱优势通道形成机理

常规砂岩储层水驱优势渗流通道的形成受控

于 $K$ 、 $K_r$ 和 $\Delta p$ 三个因素综合作用,水驱优势渗流通道能否形成主要与储层非均质性有关。下面从稳定驱替和不稳定驱替两种油藏类型来分析水驱优势渗流通道形成机理。将稳定驱替油藏定义为油藏规则井网+同步注采+稳定工作制度;不稳定驱替油藏定义为油藏不规则井网+注采不同步+不稳定工作制度。对稳定驱替油藏来说,当油藏生产条件为规则井网+同步注采+稳定工作制度时,油藏压力保持水平高,能够实现稳压开采;对于不稳定驱替油藏来说,当生产条件为不规则井网+注采不同步+不稳定工作制度时,油藏压力保持水平差,油藏压力波动大。

因此,针对稳定驱替油藏,生产压差 $\Delta p$ 对水驱优势渗流通道形成影响小,可以忽略该因素的影响,渗透率成为水驱优势通道形成的主要因素,储层非均质性可导致注入水优先沿高渗透层或高渗透条带流动,这种长期不均衡流动导致高渗透层水洗程度明显比低渗透层高,而且这种差异随着注入体积倍数增加逐步扩大,当注入体积倍数达到一定程度后,优势流动部位就形成了优势渗流通道。另外,储集层内韵律性导致流体纵向窜流,受油水黏度差异及强注强采的影响,随注入体积倍数增加,高低渗透层差异变化更加明显,高渗透层也容易形成优势渗流通道<sup>[10]</sup>。

针对不稳定驱替油藏,油藏压力大幅波动形成复杂的压力分布场,生产压差成为优势渗流通道形成的关键因素,渗透率因素影响次之。

#### 1.2.1 不稳定驱替

南堡1-29断块东部区域109断块水淹严重,由于该断块生产井投产时间不同,为不规则三角形井网,工作制度不稳定,具备典型的不稳定驱替条件,生产压差 $\Delta p$ 为形成优势渗透通道的关键因素,从开发历程中选取4个时间点进行压力分布状况分析,从油藏数值模拟结果中提取了4个时间节点的的压力分布状况图,如图1所示。

从图中可以看出,对于不稳定驱替油藏,开采过程中会形成大的压降漏斗,将直接影响水驱流向和流场分布;受压力场变化影响,水驱优势渗流通道的形成和发展受时间变化,具有时变性。

#### 1.2.2 稳定驱替

对于稳定驱替油藏,生产压差对水驱优势渗流通道控制作用减弱,因此,优势渗流通道主要影响因素为 $K$ 和 $K_r$ 。



由于含水饱和度  $S_w$  是动态变化参数,见水早的区域容易形成水驱优势渗流通道<sup>[15-16]</sup>;油藏见水时间的早晚受压力场、渗透率场和重力场的多重作用,因此,水驱优势通道主要依靠油藏数值模拟方法研究。

结合油藏数值模拟结果与储层渗透率分布状况,给出南堡 109 断块三种类型水驱优势渗流通道分布规律:

- (1) $K$  值大,  $S_w$  大:以 NgIV②6 小层中上部为例;
- (2) $K$  值小,  $S_w$  大:以 NgIV②6 小层底部为例;
- (3) $K$  值大,  $S_w$  小:以 NgIV②6 小层顶部为例。

## 2 水驱优势通道综合识别

### 2.1 识别条件

优势渗流通道形成时,注水井的注入动态、采油井的生产动态以及生产参数上都会发生明显变化,主要表现在以下 8 个方面:(1)注水井注水量变化对油井产液量影响明显;(2)注水井吸水指数和油井采液指数变化明显;(3)部分油井含水上升快,采出程度低,剩余油富集;(4)存水率低;(5)油井井底压力上升,注水井井底压力下降;(6)井组注采比变化明显;(7)示踪剂监测结果表明部分井组井间渗透率是初期渗透率的 2~3 倍,渗透率突进系数大于 3;(8)水淹非均质严重,形成明显底部水淹型。通过以上参数对比,基本可以判定某井周围是否有异常<sup>[17]</sup>。根据实际生产情况,基本可以判断异常是窜槽还是大孔道造成<sup>[17]</sup>。

目前南堡 1-29 断块注采井网完善,砂体连通性好,能够形成有效驱替,但非均质性强,平面、层内及层间三大矛盾突出;区块高含水低采出,注水低效、无效循环严重,存水率下降,开发效果差。大量水井吸水剖面资料表明,纵向上,层内底部储层

渗透率要好,吸水强度大;层间动用程度差异较大,储层中下部吸水强度大,主要吸水产液层为 NgIV②6,形成水驱优势渗流通道的可能性最大;平面上,水驱矛盾突出,注水井指进严重,渗透率相对较高的区域,注采强度大,是水驱形成优势通道的区域。示踪剂监测表明,部分井组井间渗透率是初期渗透率的 2~3 倍,渗透率突进系数大于 3,已形成优势渗流通道,主体断块水淹严重,稳产难度大。

从生产动态上还可以看出,累积产液量与累积注水量具有很好的相关性,累积注水量大小是形成水流优势通道最根本、最直接的原因之一。NgIV②6 小层注入量大,累产液量就大,形成水流优势通道的井就越多。

### 2.2 研究思路

以南堡 1-29 断块为例,以注采井组为单元,以 Rdos 栅状数值模拟方法为主,计算注采井组间的水驱流场,以地质、生产动态、产吸剖面、试井等识别方法为辅,用其定性识别结果校正 Rdos 模拟,综合识别研究区水流优势通道。水驱优势通道综合判别思路和方法如图 3 所示。

动态识别主要根据生产动态响应进行分析,Rdos 栅状数值模拟通过结合地质模型,在模拟中加入产液、吸水剖面数据和早期认识,可以实现较准确的动态优势通道识别。

### 2.3 历史拟合

在地质模型的基础上,补充流体性质与生产动态,根据渗流力学原理自适应地模拟生产过程中油水流动,对比计算结果与实测资料,自动进行参数修正与历史拟合,最终得到当前的剩余油分布。在模拟过程中,注采单元按小层划分,并随着生产过程进行动态调整。严格限定水井的注水量和油井的产液量,自动拟合油井含水。另外,动态监测资料的

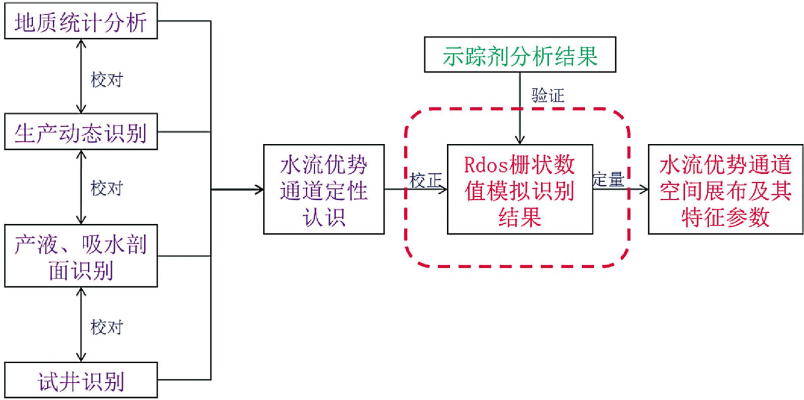


图 3 水驱优势渗流通道综合判别思路和方法



应用修正了地质模型不足,模拟过程中水量劈分更准确。油藏指标重点拟合油藏含水率和压力变化规律。此次生产历史拟合时间从 2007 年 6 月至 2017 年 8 月,通过模型调整后的拟合精度满足模拟要求,区块及单井拟合率均达 95%以上。图 4 为南堡 1-29 全区含水率、累产油历史拟合结果。

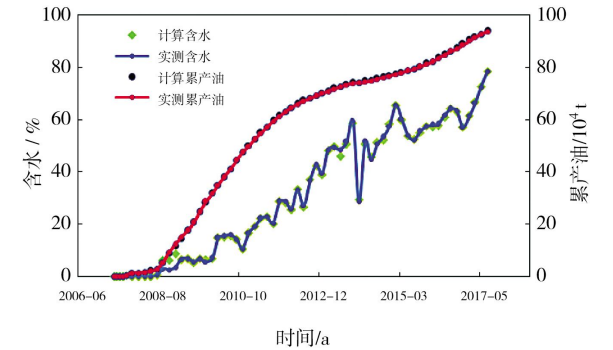


图 4 含水率与累产油历史拟合结果

2.4 水驱优势渗流通道分布

Rdos 数值模拟得到的 NgIV②3,5,6 小层和叠合后的流管分布结果如图 5~8 所示,图中流管颜色、粗细分别表示含水率及累产注量大小,蓝色代表含水 100%,红色代表含水 50%。从图中可以看出,全区主力断块 1-29 和 109 断块注采相对比较完善,阶段累计注入量比较高,流量较大;油层中上部 NgIV②3,5 小层流管分布和流量相对底部流管均匀,油层底部 NgIV②6 小层存在高渗通道和大孔道。综合来看,南堡 109 断块 NgIV②6 小层优势渗流通道最为发育。

将校正后的 Rdos 模拟流管图与示踪剂监测结果和油藏数值模拟剩余油分布研究结果进行对比,强优势渗流通道的符合率较高,模拟结果可靠,可用于现场应用。

目前西部区域 1-29 断块导管架多数井关井,东部区域 109 断块水淹严重,水流优势通道发育,平面上主要分布于东北方向。

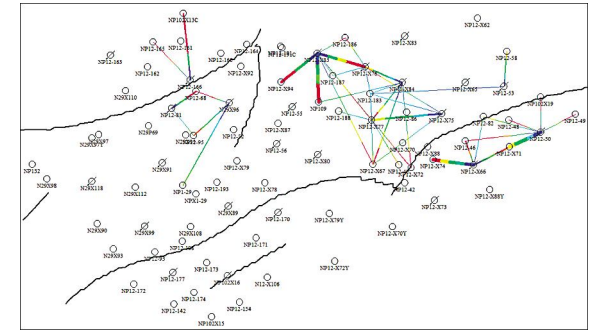


图 5 NgIV②3 流管分布

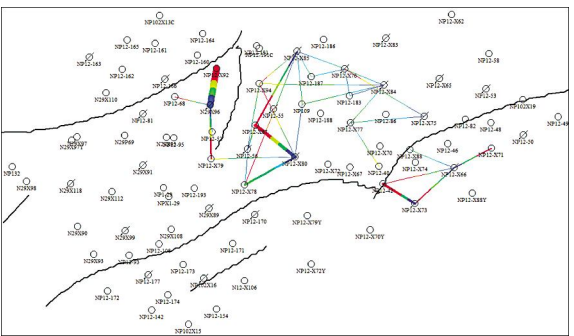


图 6 NgIV②5 流管分布

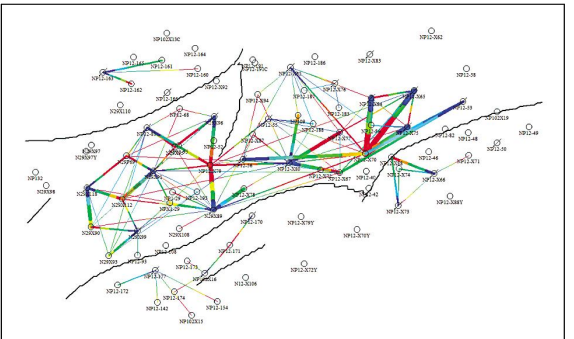


图 7 NgIV②6 流管分布

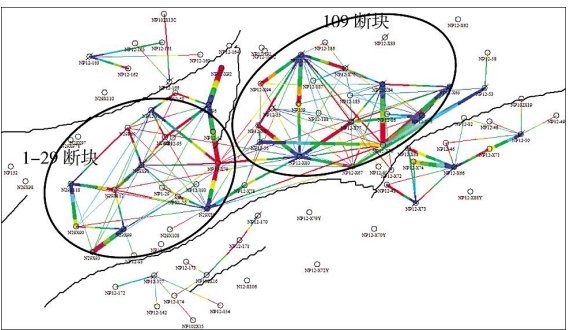


图 8 叠合后流管分布

结合 Rdos 栅状数值模拟结果,通过分析本层渗透率、渗透率级差、累计注水量、注水强度、产液量、吸水强度等相关因素的权重比例,绘制了 NgIV②6-1 小层优势渗流通道分布图(见图 9)。结合各小层及叠合流管分布结果,可以看出南堡 1-29 断块优势渗流通道比较发育。

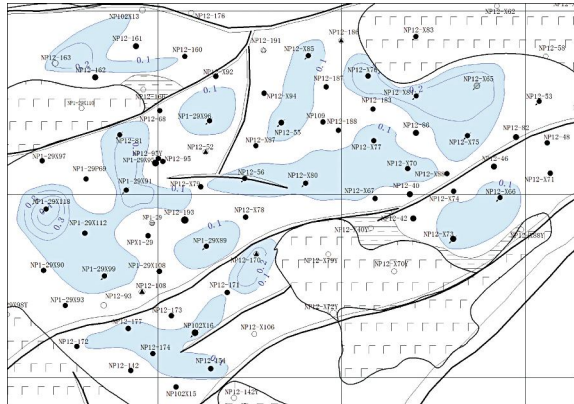


图 9 优势渗流通道分布

### 3 实际应用及效果

数值模拟及研究结果表明,在 109 井区内大范围水淹,该井区内有很多对注采井对间存在优势渗流通道(见图 10)。针对研究井区,开展了以挖潜剩余油为主的深部调驱措施,调驱体系为高强度交联聚合物调剖体系+水驱流向改变剂调剖体系+复合絮凝调剖体系,取得了较好的增油效果。

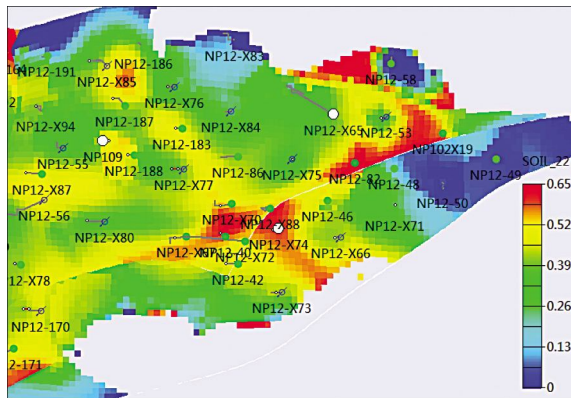


图 10 南堡 109 断块平面含油饱和度分布(NgIV②6)

如注水井 NP12-X77 井采取深部调驱措施后,对应油井 NP12-86 井的含水率从 97.3%降为 86.4%,产油量从 0.9 t/d 上升到 4.6 t/d,日增油 3.7 t。实施深部调驱后,剖面吸水状况变好,缓解了平面、层内矛盾,整个断块控水稳油效果明显,但老井产量递减依然较大,稳产形势严峻。

鉴于各小层层间差异和注采不均衡状况,采取一套井网,分层开发方式。针对 NgIV②3 小层目前压力低状况,实施注水恢复压力;针对 NgIV②5,6 小层整体实施多段塞深部调剖调驱方案,待 NgIV②3 小层压力恢复后,再针对 NgIV②3 实施调剖调驱。

### 4 结论及建议

(1)平面水驱优势渗流通道受储层渗透率、油水相对渗透率和压力场变化共同影响,不稳定驱替条件下,油藏压力场变化是优势渗流通道形成的主要因素;稳定驱替条件下,水驱优势通道受含水饱和度和储层渗透率双重作用的影响。

(2)依据渗透率和含水饱和度,划分出三类水驱优势渗流通道模式;南堡 109 断块 NgIV②6 小层优势渗流通道最为发育;绘制了南堡 1-29 断块 NgIV②6-1 小层优势渗流通道分布图;在南堡 109 断块实施了深部调驱措施,见到了明显增油降水效果。

(3)在动静结合基础上,充分利用示踪剂、相渗

曲线和数模结果,实现定量刻画优势通道及多因素综合分析,逐层刻画水驱优势渗流通道分布特征是下步主要研究方向。

#### 参考文献:

- [1] 刘海波.大庆油区长垣油田聚合物驱后优势渗流通道分布及渗流特征[J].油气地质与采收率,2014,21(5): 69-72.
- [2] 姜瑞忠,于成超,孔垂显.低渗透油藏优势渗流通道模型的建立及应用[J].特种油气藏,2014,21(5): 85-88.
- [3] 李科星,蒲万芬,赵军,等.疏松砂岩油藏大孔道识别综述[J].西南石油大学学报,2007,29(5):42-44.
- [4] 胡书勇,张烈辉,罗建新,等.砂岩油藏大孔道的研究回顾与展望[J].特种油气藏,2006,13(6):88-89.
- [5] 孙明,李治平.注水开发砂岩油藏优势渗流通道识别与描述[J].断块油气田,2009,16(3):50-52.
- [6] 姜汉桥.特高含水期油田的优势渗流通道预警及差异化调整策略[J].中国石油大学学报(自然科学版),2013,37(5):114-118.
- [7] 曹亚明,郑家朋,孙桂玲,等.南堡陆地中浅层油藏优势渗流储层特征研究[J].石油天然气学报,2013,35(4): 114-116.
- [8] 谭光明.河 31 断块优势渗流通道识别及治理方法[J].特种油气藏,2007,14(1):87-90.
- [9] 张士奇,卢炳俊,张美玲.水淹储层大孔道存在的分析与识别[J].大庆石油地质与开发,2008,27(6):76-79.
- [10] 杨勇.正韵律厚油层优势渗流通道的形成条件和时机[J].油气地质与采收率,2008,15(3):105-107.
- [11] 盖德林,刘春天,贾振岐.注采井间水流优势方向的识别[J].大庆石油学院学报,2007,31(5):47-50.
- [12] 刘红岐,李宝莹,王万福,等.锦 16 区块储层及优势通道特征分析[J].西南石油大学学报(自然科学版),2014,36(6):60-67.
- [13] 郝金克.利用无因次压力指数定性识别优势通道[J].特种油气藏,2014,21(4):123-125.
- [14] 陈程,宋新民,李军.曲流河点砂坝储层水流优势通道及其对剩余油分布的控制[J].石油学报,2012,33(2): 257-263.
- [15] 张航,李治平,郝振宪.利用动态数据判断优势渗流通道[J].石油天然气学报,2014,36(12):158-161.
- [16] 惠钢,王友净,李佳鸿,等.中-高含水期低渗透储层优势渗流通道研究—以温米油田温西一区块三间房组储层为例[J].油气地质与采收率,2015,22(6):74-79.
- [17] 王森,冯其红,宋玉龙,等.基于吸水剖面资料的优势通道分类方法——以孤东油田为例[J].油气地质与采收率,2013,20(5):99-102.

(编辑 谢 葵)