

特低渗透油藏产量递减及水驱特征规律

张英芝, 滕加丰, 汪艳勇, 彭会君

中国石油天然气股份有限公司大庆榆树林油田开发有限责任公司, 黑龙江大庆 151100

摘要 特低渗透油藏具有低孔隙度、低渗透率等特点, 且存在启动压力梯度, 且普遍发育微裂缝, 常规产量递减规律和水驱特征曲线不能很好地反映特低渗透油藏的生产特征。本文从渗流理论出发, 结合生产数据, 研究了特低渗透油藏的产量递减和含水上升规律。研究表明, 进行特低渗透油藏的产量递减和水驱特征曲线分析时, 必须考虑启动压力的影响; 并且特低渗透油藏产量递减分为两个递减阶段, 用两条递减曲线拟合能得到较好效果; 而用水驱特征曲线法时, 对高含水已关井进行含水恢复, 能够真实反映油藏含水水平, 并可以进行最终采收率预测。本研究成果对特低渗透油田实施挖潜措施和调整提供决策依据和技术支持。

关键词 特低渗透油藏; 产量递减规律; 水驱曲线; 含水恢复; 启动压力

中图分类号 TE348

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.14.007

The Production Decline Law and Water Drive Characteristic Curves in Ultra-low Permeability Reservoirs

ZHANG Yingzhi, TENG Jiafeng, WANG Yanyong, PENG Huijun

Daqing Yushulin Oilfield Development Company Limited, China National Petroleum Corporation, Daqing 151100, Heilongjiang Province, China

Abstract Low porosity, low permeability, presence of a starting pressure and development of micro-fractures are the main characteristics of ultra-low permeability reservoirs, and the conventional production decline law and the water drive characteristic curves can not correctly reflect their production features. Based on the seepage theory, combined with production data, a production decline law and water drive characteristic curves in ultra-low permeability reservoirs are obtained. It is shown that in the analysis of the production decline, water cut and water drive characteristic curves, the effect of the starting pressure must be considered. The production decline of an ultra-low permeability reservoir experiences two stages, and using two decline curves to fit the production data can achieve better results. In the analysis of the water drive characteristic curves, recovering the water cut of high water cut wells can reveal the real water cut level of the reservoir, and the ultimate recovery can be predicted more accurately. This paper can provide some guidelines for the tapping potential measures and modification for the ultra-low permeability reservoir.

Keywords ultra-low permeability reservoir; production decline law; water drive characteristic curves; water cut recovery; starting pressure

0 引言

特低渗透油藏储量丰富, 在中国石油产量中所占的比重呈逐年上升趋势。如何经济有效地开发特低渗透油藏, 不仅是关系国内石油工业快速发展、急需解决的重大课题, 而且是保障国内 21 世纪能源持续发展的战略问题。研究油藏的动态变化规律, 寻找影响油田生产动态变化的因素, 能够为开发调整提供依据和指导^[1]。因此, 对特低渗透油藏产量递减曲线分析和水驱特征曲线分析进行研究具有重大现实意义。

油气藏产量递减曲线和水驱特征曲线分析, 是油气藏工程中应用极为广泛的一种方法。目前研究的产量递减和水驱规律是在中、高渗透的油藏开发中总结出来的基本规律, 已不适用于特低渗透油藏; 特低渗透油藏的生产井必须采取大型的压裂改造措施, 才能投入工业开发。特低渗透油藏起初产量较高, 但由于渗透率低, 能量补充不足, 导致产量递减迅速, 应用常规的产量递减和水驱规律会出现一些偏差, 但对此规律在特低渗透油藏的应用前人尚未研究^[2-7]。本文通过对

收稿日期: 2011-03-09; 修回日期: 2011-04-12

作者简介: 张英芝, 高级工程师, 研究方向为油田开发方案和油藏工程理论, 电子信箱: zhangyingzhi@petrochina.com.cn

产量递减曲线和水驱特征曲线分析的修正,使其在特低渗透油藏中得到很好的应用效果。

1 特低渗透水驱油田产量递减规律

自 1945 年 Arps 将产量递减规律归纳为双曲型、指数型、调和型 3 种以来^[2],人们一直在研究产量递减的各种规律,并在油田开发中得到了广泛的应用。针对特低渗透油藏,室内实验表明,其油相相对渗透率曲线呈直线形式^[8-9],则设油相相对渗透率为

$$k_{\text{ro}}(s_w)=a-bs_w \quad (1)$$

其中, k_{ro} 为油相相对渗透率; s_{w} 为含水饱和度; a 为常数; b 为常数。

在注水保持地层压力情况下，如不考虑井间产量差异，产油量可以写成：

$$q_c = \frac{2\pi k k_m(s_w)h}{B_o \mu_o} \cdot \frac{\Delta p - \delta P}{\ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right)} = \frac{2\pi k h \Delta p (1 - \frac{\delta P}{\Delta p})}{B_o \mu_o \ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right)} k_m(s_w)$$

$$= q_{oi} E k_w(s_w) \quad (2)$$

其中, $q_{\text{a}} = \frac{2\pi kh\Delta p}{B_o\mu_o \ln(\frac{R_c}{r_w})}$, $E = 1 - \frac{\delta p}{\Delta p}$, Δp 为生产压差, Pa; k 为渗

透率, μm^2 ; μ 为黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; B 为体积系数; h 为油层厚度, m ; r_w 为井径, m ; R_e 为供油半径, m ; δP 为启动压力, Pa ; 下标 o, w 为油、水相。

在注采平衡情况下，产量与地层含水饱和层之间存在如下关系：

$$\frac{ds_w}{dt} = \frac{q_o B_o}{V_n}$$

其中, V_p 为油层孔隙体积; t 为生产时间。整理, 得

$$q_0 = EA e^{-DEt} \quad (3)$$

其中, $A=q_{oi}e^C$, $D=\frac{q_{oi}B_0b}{V_p}$, C 为常数。

以某油井为例来说明启动压力对其产量递减的影响。设 $A=10\text{t}$, $D=0.31\text{a}^{-1}$, E 分别为 1, 0.95, 0.90, 0.85 (启动压力逐渐增大), 其产量递减如表 1 所示。

表 1 产量递减与启动压力关系表

Table 1 Relation between production decline and starting pressure gradient

E	产量/t									
	1a	2a	3a	4a	5a	6a	7a	8a	9a	10a
1	7.33	5.38	3.95	2.89	2.12	1.56	1.14	0.84	0.61	0.45
0.95	7.08	5.27	3.93	2.92	2.17	1.62	1.21	0.90	0.67	0.50
0.90	6.81	5.15	3.90	2.95	2.23	1.69	1.28	0.97	0.73	0.55
0.85	6.53	5.02	3.86	2.96	2.28	1.75	1.34	1.03	0.79	0.61

由表 1 可知,当存在启动压力时,初始产量随启动压力的增大而变小,并且递减速率也随着启动压力的增大而变小。

特低渗透油藏由于其低孔、低渗特性,自然产能低,必须实施压裂改造措施,才能投入工业开发。在生产中表现为初始产量高,递减快;后期产量低,递减慢。进行产量递减拟合时,很难用一条曲线进行拟合预测。初期产量递减主要是由于压裂裂缝导流能力下降引起的,递减快,后期产量递减主要是含水变化规律引起的,递减慢。考虑不同原因引起的产量递减,因此应用初期和后期两条指数递减曲线对其生产数

据进行拟合,得到较好的应用效果。图 1—图 2 为大庆外围某油田二、三类区块产量递减拟合曲线。

二类区块初期递减拟合公式

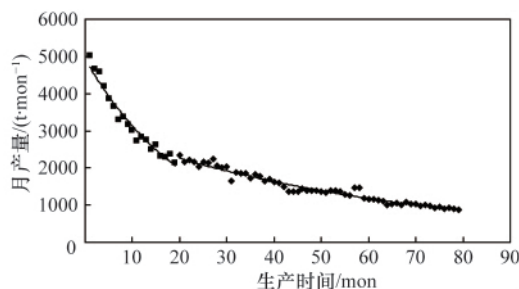
$$Q_1 = 4930.6e^{-0.0456t}$$

二类区块后期递减拟合公式

$$Q_2 = 3116.5e^{-0.0161t}$$

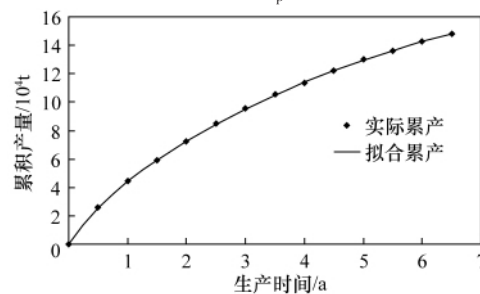
二类区块预测采收率为

$$\eta = \frac{N_{p1} + \frac{Q_2}{D_2}}{N_p} = 20.89\%$$



(a) 月产量拟合

(a) Fitted curve of monthly oil production



(b) 累积产量拟合

(b) Fitted curve of cumulative production

图1 大庆外围油田某二类区块实际开发数据与拟合预测结果

Fig. 1 Prediction results and practical production data of second class reservoir in Daqing peripheral oilfields

其中, N_p 为累计产量;下标 1,2 分别表示递减初期及后期阶段。

此区块用经验公式标定的采收率为 21%,与预测结果相比误差为 0.52%。

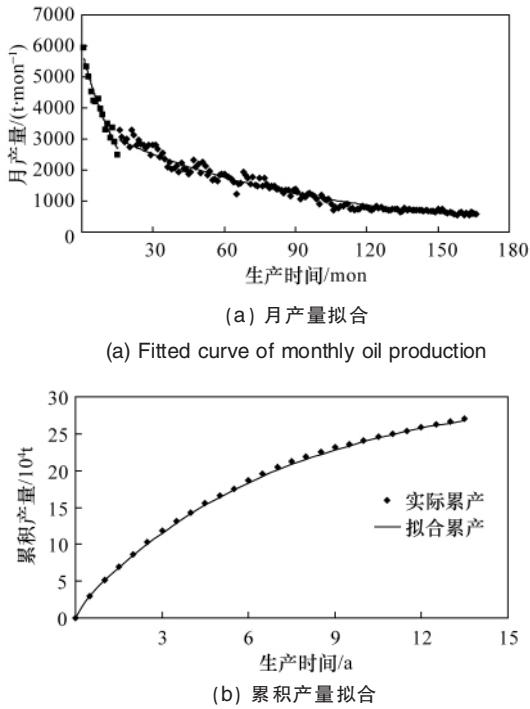


图 2 大庆外围油田某三类区块实际开发数据与拟合预测结果图

Fig. 2 Prediction results and practical production data of a third class reservoir in Daqing peripheral oilfields

三类区块初期递减拟合公式

$$Q_1=5875.2e^{-0.0558t}$$

三类区块后期递减拟合公式

$$Q_2=3577.3e^{-0.0158t}$$

三类区块预测采收率为

$$\eta=\frac{N_{p1}+\frac{Q_2}{D_2}}{N_p}=16.41\%$$

此区块用经验公式标定的采收率为 17%,与预测结果相比误差为 3.47%。

对大庆外围油田特低渗透油藏产量递减规律研究表明,应用两条指数递减曲线对其生产数据进行拟合,不仅能拟合初期递减较快时的生产数据,而且能够较好地预测最终采收率。对比二类区块和三类区块的递减规律可以看出,由于三类区块地层能量补充慢,其初期递减速度明显大于二类区块,而后期都维持在较低的产量,二类区块和三类区块递减率接近,并且其递减速度也明显低于生产初期。

2 特低渗透油藏水驱规律

在特低渗透油藏中油水两相渗流条件下,油水两相的相对渗透率比随出口端含水饱和度 s_{we} 的变化,可以表示为^[10]

$$\frac{k_{rw}}{k_{ro}}=ae^{-bs_{we}} \quad (4)$$

水油比为

$$WOR=\frac{\mu_o k_{rw} B_o \rho_w}{\mu_w k_{ro} B_w \rho_o E} \quad (5)$$

两边取对数,得

$$\log WOR=\log \frac{\mu_o B_o \rho_w}{\mu_w B_w \rho_o E a}+\frac{F}{2.303}+\frac{3bs_{ai}}{4.606N_o}N_p \quad (6)$$

其中, s_{ai} 为原始含油饱和度; ρ 为密度, t/m^3 ; N_p 为累积产量,t; N_o 为地质储量,t; s_{wi} 为束缚水饱和度; $F=\frac{b}{2}(3s_{wi}+s_{or}-1)$, s_{or} 为残余油饱和度。

$$\text{令 } \alpha=\log \frac{\mu_o B_o \rho_w}{\mu_w B_w \rho_o E a}+\frac{F}{2.303}, \beta=\frac{3bs_{ai}}{4.606}, R_o=\frac{N_p}{N_o}, \text{ 则得}$$

$$\log WOR=\alpha+\beta R_o \quad (7)$$

以某区块为例说明启动压力对含水率上升规律的影响。根据该区块的实际相渗曲线和物性参数, $\mu_o/\mu_w=9$, $B_o=1.1104$, $\rho_o/\rho_w=0.86$, E 分别为 1, 0.95, 0.90, 0.85 (启动压力越来越大), 其含水变化规律如表 2 所示。

由表 2 可以看出,当存在启动压力时,在相同的含水率下,随启动压力梯度的增大,采出程度减小,即随着启动压力的增大,含水率上升速度加快。

表 2 含水变化规律与启动压力关系表

Table 2 Relation between production decline and water cut change law

E	含水率									
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	98%
	采出程度/%									
1	4.93	8.59	11.02	13.02	14.85	16.67	18.67	21.10	24.76	32.40
0.95	4.70	8.36	10.79	12.78	14.61	16.44	18.43	20.87	24.53	32.17
0.90	4.46	8.12	10.55	12.54	14.37	16.20	18.19	20.62	24.28	31.93
0.85	4.20	7.86	10.29	12.28	14.11	15.94	17.93	20.37	24.03	31.67

对于特低渗透油藏,由于普遍发育微裂缝,层内非均质性严重,油井见水很不均匀,沿裂缝方向见水很快,而垂直裂

缝方向见水缓慢^[11-12]。在裂缝方向上的油井见水很快,发生暴性水淹,为了防止无效循环,需对这些井进行关井。在水驱特

征曲线上表现为含水上下波动,含水率一直不高,很难用水驱特征曲线预测,但实际很多井已经进入高含水阶段。通过研究发现,对高含水井进行含水恢复,即在处理数据时,将高含水关闭的井,假设其按关井时的产水量一直在生产,可以得到很好的预测效果。图3—图4为大庆外围某油田二、三类区块含水恢复前后含水变化曲线。

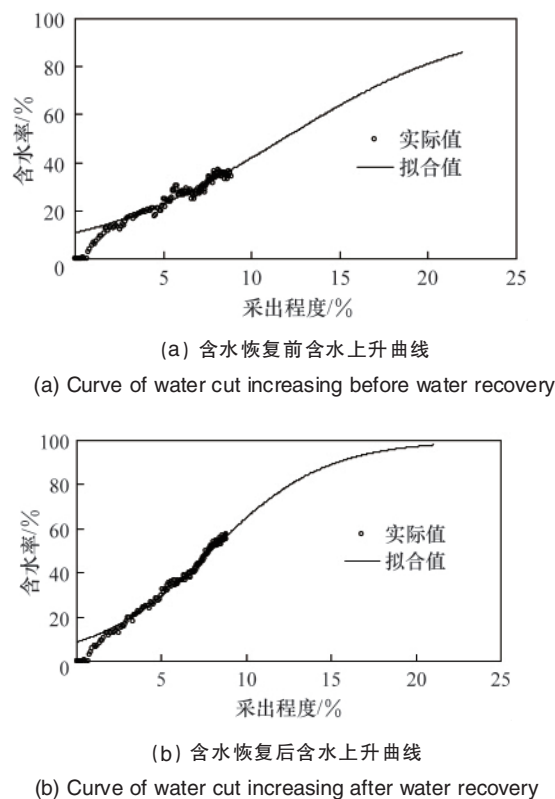


图3 大庆外围油田某二类区含水恢复前后含水变化曲线
Fig. 3 Water change curve of before and after water cut recovery of a second class reservoir in Daqing peripheral oilfields

二类区块未含水恢复时,含水上升曲线拟合得到公式

$$\lg WOR = 0.0047N_p \cdot R_o - 0.9155$$

二类区块预测采收率为

$$\eta = \frac{\lg(WOR)_{\max} - \alpha}{\beta \cdot N_p} = 33.56\%$$

二类区块含水恢复后,含水上升曲线拟合得到公式

$$\lg WOR = 0.0078N_p \cdot R_o - 1.0188$$

二类区块预测采收率为

$$\eta = \frac{\lg(WOR)_{\max} - \alpha}{\beta \cdot N_p} = 21.02\%$$

此区块用经验公式标定的采收率为21%,与预测结果相比误差为0.09%。

三类区块未含水恢复时,含水上升曲线拟合得到公式

$$\lg WOR = 0.0135N_p \cdot R_o - 1.2757$$

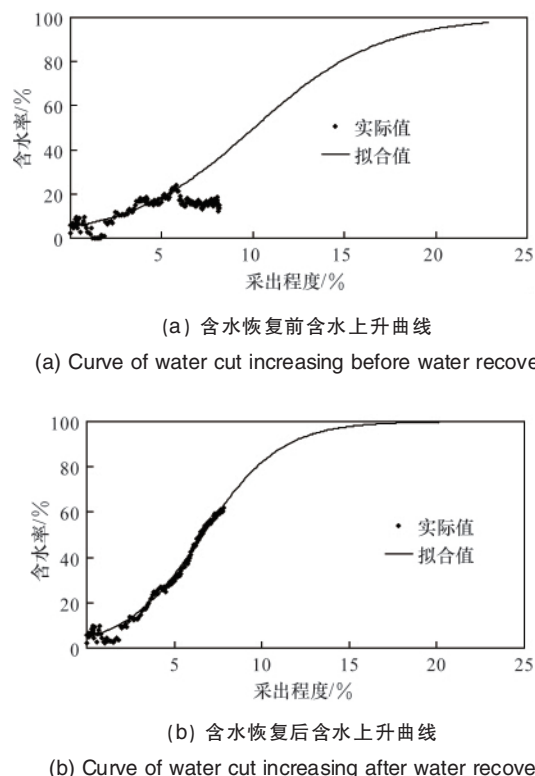


图4 大庆外围油田某三类区含水恢复前后含水率变化曲线
Fig. 4 Water change curve of before and after water cut recovery of a third class reservoir in Daqing peripheral oilfields

三类区块预测采收率为

$$\eta = \frac{\lg(WOR)_{\max} - \alpha}{\beta \cdot N_p} = 23.37\%$$

三类区块含水恢复后,含水上升曲线拟合得到公式

$$\lg WOR = 0.0209N_p \cdot R_o - 1.3058$$

三类区块预测采收率为

$$\eta = \frac{\lg(WOR)_{\max} - \alpha}{\beta \cdot N_p} = 15.45\%$$

此区块用经验公式标定的采收率为17%,与预测结果相比误差为9.12%。

对大庆外围油田特低渗透油藏含水变化规律研究表明,目前的含水率水平并不代表实际的含水率水平,并且预测的采收率偏高,对其进行含水恢复才能真实体现其含水率水平,含水恢复后预测得到的最终采收率比未含水恢复预测所得最终采收率更接近经验公式所标定的采收率。因此,进行含水恢复是特低渗透油藏水驱特征曲线分析的必要有效方法。对比二类区块和三类区块的含水上升规律可以看出,三类区块含水恢复前后,其含水上升速度都高于二类区块,其原因在于,三类区块原始含水饱和度较高,储层物性差,采出程度较低,水驱开发效果较差。

3 结论

特低渗透油藏由于其不同于中高渗透油藏的特点,进行

产量递减和水驱特征曲线分析时, 必须考虑启动压力的影响。当存在启动压力时, 初始产量随启动压力的增大而变小, 递减速率也随着启动压力的增大而变小, 并且在其他相同情况下, 启动压力梯度越大, 含水率就越大。

特低渗透油藏按指数递减生产, 由于普遍实施压裂投产, 生产过程可明显的分为两个递减阶段, 初期递减较快, 后期递减缓慢, 用两个指数递减进行拟合能得到较好的预测结果。对于特低渗透油藏, 由于微裂缝的影响, 油井见水很不均匀, 沿裂缝方向和垂直裂缝方向差别很大, 对高含水已关的井进行含水恢复, 能够真实反映油藏含水水平, 并可以有效的进行最终采收率预测。

对比二类区块和三类区块的产量递减和含水上升规律表明, 三类区块含水上升速度高于二类区块, 并且初期递减速度高于二类区块。

参考文献 (References)

- [1] 李道品. 低渗透砂岩油田开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 34-46.
Li Daopin. Effective development technique of low permeability oilfield [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 34-46.
- [2] 陈元千. 油气藏工程计算方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992: 5-23.
Chen Yuanqian. Calculation method for oil and gas reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992: 5-23.
- [3] 张志敏, 王俊魁. 预测油气藏可采储量的一种简易方法 [J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(3): 87-90.
Zhang Zhimin, Wang Junkui. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2007, 26(3): 87-90.
- [4] 王俊魁. 油田产量递减规律的研究 [J]. 大庆石油地质与开发, 1982, 1(1): 38-47.
Wang Junkui. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*,

1982, 1(1): 38-47.

- [5] 王俊魁. 预测油气田产量的一种新模型[J]. 新疆石油地质, 2001, 22(1): 48-52.
Wang Junkui. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2001, 22(1): 48-52.
- [6] 张风莲, 韩令春, 王晓达, 等. 低渗透油藏井网加密后产量递减分析方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(2): 46-49.
Zhang Fenglian, Han Lingchun, Wang Xiaoda, et al. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2007, 26(2): 46-49.
- [7] 鲁建中. 油田年产量与含水率预测方法 [J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(4): 62-65.
Lu Jianzhong. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2007, 26(4): 62-65.
- [8] 计秉玉. 产量递减方程的渗流理论基础[J]. 石油学报, 1995, 16(3): 86-96.
Ji Bingyu. *Acta Petrolei Sinica*, 1995, 16(3): 86-96.
- [9] 杨正明, 刘先贵, 孙长艳, 等. 低渗透油藏产量递减规律及水驱特征曲线[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(3): 55-58.
Yang Zhengming, Liu Xiangui, Sun Changyan, et al. *Petroleum Exploration and Development*, 2000, 27(3): 55-58.
- [10] 黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 80-101.
Huang Yanzhang. The porous flow mechanism of low-permeability reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 80-101.
- [11] 王景, 凌升阶, 南中虎. 特低渗透砂岩微裂缝分布研究方法探索[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(2): 51-53.
Wang Jing, Ling Shengjie, Nan Zhonghu. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(2): 51-53.
- [12] 侯建锋. 安塞特低渗透油藏合理开发井网系统研究[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(1): 72-75.
Hou Jianfeng. *Petroleum Exploration and Development*, 2000, 27(1): 72-75.

(责任编辑 刘志远)

·学术动态·



“中国核学会 2011 年学术年会”征文

中国核学会将于 2011 年 10 月 11—14 日在贵阳召开“中国核学会 2011 年学术年会”, 会议主题为“蓬勃发展中的中国核科学技术”。

征文范围: 辐射防护; 计算物理; 铀矿地质分会; 铀同位素分离; 辐射研究与辐射工艺; 核电子学与核探测技术; 核化工; 核物理; 核能动力; 核技术经济与管理现代化研究; 核医学; 核材料; 核聚变与等离子体物理; 原子能农学; 核化学与放射化学; 铀矿冶; 核科技情报研究; 同位素; 粒子加速器; 核技术工业应用; 脉冲功率技术及其应用。

征文截止日期: 2011 年 7 月 30 日。

联系电话: 010-68555584; 传真: 010-68527188。

会议网站: <http://xshy.ns.org.cn>。