

致密砂岩气藏地层孔隙压力预测方法

童凯军¹, 周文², 单钰铭²

1. 中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海油田勘探开发研究院, 天津 300452
2. 成都理工大学能源学院, 成都 610059

摘要 收集新场构造须二气藏的地质、测井、钻井和压裂等相关资料, 尝试运用包括等效深度法、Eaton法、有效应力法在内的多种方法对研究区地层孔隙压力剖面进行了预测。根据前人对川西地区异常高压的产生机制的研究分析, 认为川西前陆盆地上三叠统地层异常高压的形成主要受欠压实、生烃增压、黏土矿物脱水增压及构造抬升多种机制影响。最终选用 Eaton 法建立工区的地层孔隙压力剖面。对地层孔隙压力预测模型进行验证与单井评价, 结果表明, 模型的预测结果精度较高, 能够满足工程要求。根据各单井地层深度划分, 新场构造地压梯度情况可大致划分为正常压力带、过渡压力带、高压异常带和压力相对平稳带 4 个压力区间。该成果对指导后续钻井施工作业和区域地应力场等相关研究具有重要的现实意义。

关键词 测井; 地层孔隙压力; Eaton 法; 地压梯度

中图分类号 TE271

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)15-0062-05

Prediction of Formation Porosity Pressure in Deep Formation

TONG Kaijun¹, ZHOU Wen², SHAN Yuming²

1. Bohai Oilfield Exploration and Development Institute, Tianjin Branch of China National Offshore Oil Corporation Limited, Tianjin 300452, China
2. College of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract With various data of well logging, drilling and fracture in Xuer gas reservoir of Xinchang structure, predictions were made by using different approaches including equivalent depth method, Eaton method and effective stress method, for the formation porosity pressure section in this area. According to previous studies for the active mechanism of abnormal high pressure in western Sichuan depression, it is shown that the abnormally high pressure in the foreland basin of the Upper Triassic Formation is mainly affected by uncompacted hydrocarbon booster, booster and dewatering of clay minerals, tectonic uplift. Therefore, in this paper, the Eaton method is adopted to establish the formation porosity pressure section. By verifying the predicting model and evaluating single wells, it is indicated that the predicting model has a very high accuracy to meet the demand of production. According to the depth of stratum, the Xinchang structure can be divided into four pressure areas, including the normal pressure belt, the transition pressure belt, the abnormal high pressure belt and the relatively smooth belt. All of above results may provide some guidance for subsequent drilling jobs and regional stress field researches.

Keywords well logging; formation porosity pressure; Eaton method; ground pressure gradient

0 引言

地层孔隙压力是影响钻井工程施工作业的主要因素之一。如果不能准确地检测到这一压力大小, 将导致钻进过程中井漏、井喷、卡钻等诸多问题的产生^[1-3]。准确地预测地层孔隙压力大小, 是当前石油勘探生产中急需解决的技术难题。

川西坳陷自中三叠系以后进入了陆相盆地发育阶段, 沉

积形成了巨厚的碎屑岩地层。经过几十年勘探开发, 在区内发现了浅层(J_p)、中层(J_s)、深层(T_{3x})等多个大、中型气田, 而这些气田绝大多数具有高异常地层压力特征(图 1), 上三叠统须家河组更是如此^[4-5]。本文综合川西坳陷新场构造多口井的测井、压裂、钻井等相关资料, 对研究区须家河组地层孔隙压力的预测方法及相关应用进行探讨。

收稿日期: 2010-03-11

作者简介: 童凯军, 助理工程师, 研究方向油气田开发地质, 电子信箱: tongkaijun714@126.com

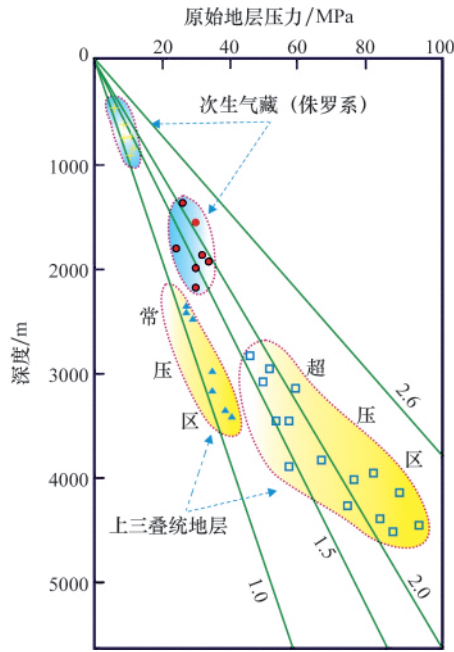


图 1 川西坳陷地层压力分布剖面

Fig. 1 Section profile of formation pressure distribution in western Sichuan depression

1 地层孔隙压力检测方法

1.1 等效深度法

泥页岩正常压实趋势线是等效深度法和 Eaton 法预测地层孔隙压力的核心和基础。对于不含气的纯岩石地层, 声波时差的大小取决于岩性、压实程度、孔隙度及孔隙中的流体含量。在正常压实情况下, 泥页岩孔隙度 (由声波时差反映) 随深度 H 的增加而减小, 呈指数衰减规律, 进一步简化可由声波时差表征的正常压实趋势方程。

$$\ln \Delta t = -C_p \cdot H + \ln \Delta t_0 \quad (1)$$

其中, Δt 为某深度点对应的声波时差值, $\mu s/0.3048m$; Δt_0 为地表声波时差, $\mu s/0.3048m$; C_p 为压实指数, 无量纲; H 为井深, m 。

利用式 (1) 可以绘出地层埋藏深度与声波时差的关系图, 进而建立正常压实趋势线, 确定可能存在的异常压力地层段。如果正常压实趋势线上某一点的时差值与超压带上某一点的时差值相同, 说明这两点压实程度相同, 具有等效性, 超压点时差值的正常趋势线上某点的深度即为等效深度。

$$p_p = G_0 \cdot H + (G_n - G_0) \cdot H_e \quad (2)$$

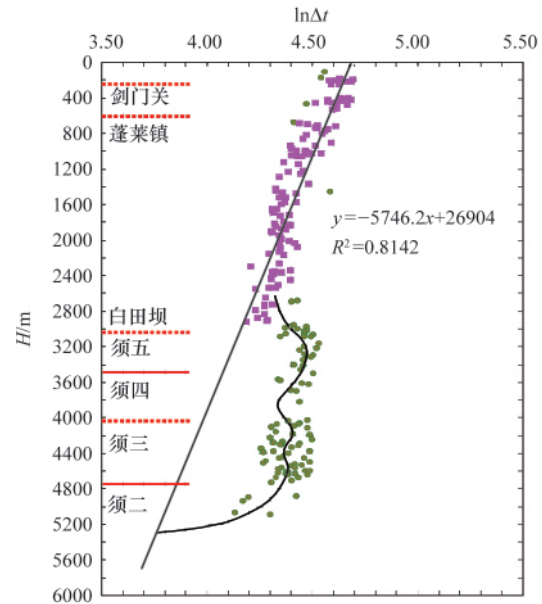
其中, p_p 为地层孔隙压力, MPa ; G_0 为覆压梯度, $10^{-3}MPa/m$; G_n 为静水压力梯度, $10^{-3}MPa/m$; H_e 为等效深度, m 。

根据前述正常压实曲线构建步骤, 建立了新场地区单井的压实曲线, 部分单井的正常压实趋势如图 2 所示。综合多口单井的正常压实趋势线关系式, 可以获得全区正常压实的综合关系式

$$\ln \Delta t = 4.444 - 0.000108H \quad (3)$$

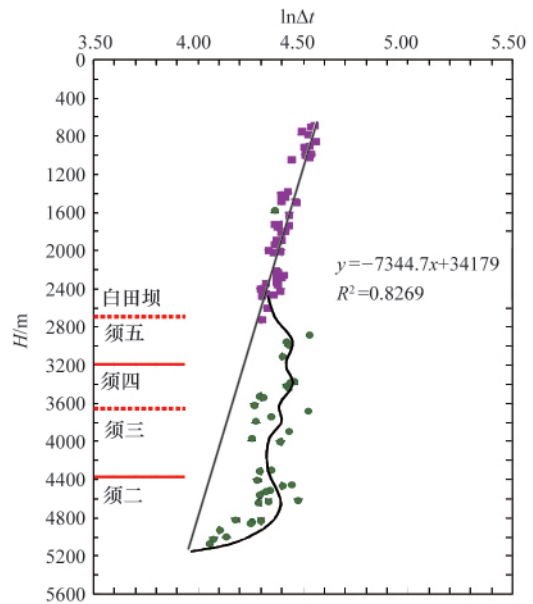
1.2 Eaton 法

1972 年, Eaton 在墨西哥湾等地区经验及测井方法实验的



(a) CX560 井

(a) CX560 well



(b) L150 井

(b) L150 well

图 2 新场构造部分单井正常压实趋势

Fig. 2 Normal compaction trend line for a part of single well in Xinchang structure

基础上建立了地层孔隙压力梯度与测井参数之间的关系^[6], 其原理是上覆压力梯度的变化决定了压实观察参数的实际值和正常趋势值的比率与地层孔隙压力的关系。Eaton 法是目前较常用的预测地层压力的经验方法, 综合考虑了除压实作用以外的其他高压形成机制作用, 并总结和参考了钻井实测压力与各种测井信息之间的关系, 是一种比较实用的方法。其压力估算公式的基本形式为^[6]

$$p_w = p_0 - (p_0 - p_w) (\Delta t_i / \Delta t)^c \quad (4)$$

其中, p_0 为上覆地层压力, MPa; p_w 为地层水静液柱压力, MPa; Δt_n 为同一深度正常压实趋势线上的对应值; c 为压实指数。对于不同的数据类型, 指数 c 的变化范围差异较大; 对于同一种数据, 指数 c 的值可随岩性、成岩作用程度等变化, 如对于声波时差数据, 指数 c 一般取值 3.0。1995 年, Browsers 提出改进的 Eaton 方程, 发现 $c=5.0$ 时, 在美国墨西哥湾沿岸应用效果最好^[6]。

受实测资料限制, 往往将 c 视为常数, 计算效果也可达到工程精度需要。本文中, 通过实测压力资料与测井计算的数据反推 c , 发现 c 不是一个固定数值, 具有随声波时差减少逐渐增大的趋势, 与反映地层特性的声波速度曲线的关系较好。图 3 为测井计算的压实系数随声波时差的变化情况, 二者具有较好的非线性关系, 相关系数 0.8579, 该拟合精度符合工程计算要求。建立 Eaton 法预测地层孔隙压力的非线性方程

$$\begin{cases} p_p = p_0 - (p_0 - p_w) \left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t} \right)^c \\ c = 25534 \Delta t^{-2.2075} \end{cases} \quad (5)$$

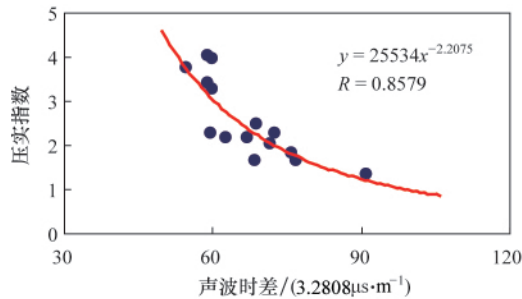


图 3 压实指数与声波时差关系

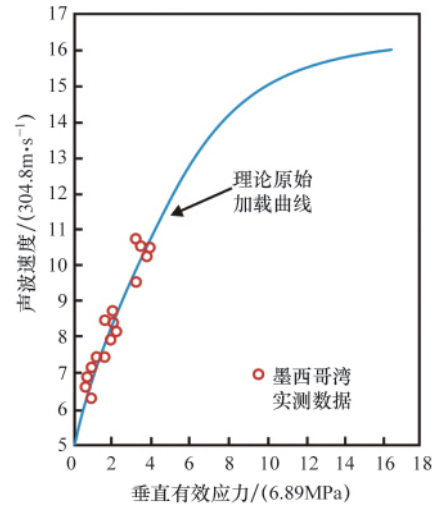
Fig. 3 Compaction index and acoustic time

1.3 有效应力法

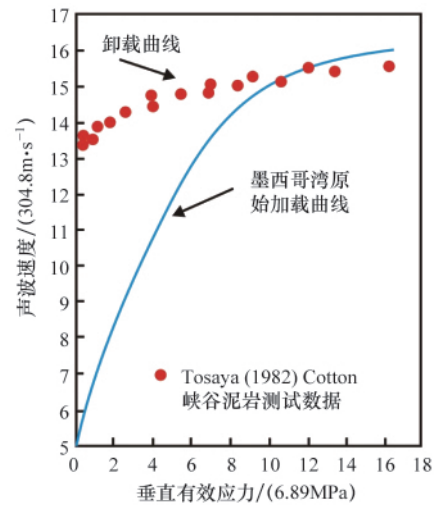
为了解释异常高压地层孔隙压力的形成机制, 更科学地计算地层孔隙压力, 需要研究沉积压实过程中的应力-应变关系。岩石的应力-应变关系分为 2 种^[3]: 压实加载曲线关系和压实后的卸载曲线关系(图 4)。

若在压实过程中沉积物的垂直有效应力保持一直增加的状态, 在压实及成岩以后仍保持压实过程中的最大值, 应按加载情况确定垂直有效应力。如果水热增压或地层剥蚀等原因造成了垂直有效应力降低的卸载现象, 且目前的垂直有效应力值低于原始压实过程中曾经有过的最大值, 在检测地层孔隙压力时应考虑卸载情况^[7-8]。

传统的单点计算模型在利用声速计算 p_p 时没有将岩性、孔隙度、孔隙流体类型等影响因素系统地考虑进来。声速低不一定意味着存在高压, 也有可能是岩性较软或孔隙度较高引起的。影响声速的因素较多, Han 等分析研究了孔隙度、泥质含量对声波速度的影响规律, 发现影响砂泥岩中声波传播速度主要有 3 个因素: 孔隙度、泥质含量和有效应力。此外,



(a) 原始加载曲线关系



(b) 卸载曲线关系

图 4 沉积压实过程岩石力学关系

Fig. 4 Rock mechanical relations for sedimentary compaction process

仅用泥质含量来表示岩性的影响并不充分, 泥质含量相同的砂泥岩矿物组成、颗粒粗细、胶结物等不一定相同, 还可以将地层密度考虑进来。综合考虑各影响因素的地层孔隙压力综合计算模型为

$$\begin{cases} V_p = A_0 + A_1 \rho + A_2 \varphi + A_3 \sqrt{V_{sh}} + A_4 (p_e - e^{-A_5 p_e}) \\ p_p = p_0 - p_e \end{cases} \quad (6)$$

其中, $A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$ 为经验系数; ρ 为地层密度, g/cm^3 ; φ 为孔隙度, %; V_{sh} 为泥质含量; p_e 为地层有效应力, MPa。

根据上述思路, 建立川西地区声速与有效应力的数学模型。

$$V_p = 2.2505 + 0.9869\rho - 9.719\varphi - 0.9056\sqrt{V_{sh}} + 2.6432(p_e - e^{-6.5048p_e}) \quad (7)$$

图 5 为考虑了地层岩性和孔隙度条件, 根据式(7)建立

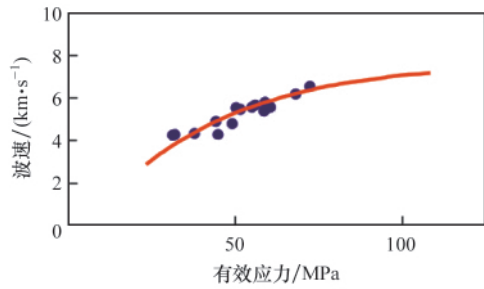


图 5 声波速度与有效应力的关系图

Fig. 5 Acoustic velocity and effective stress

的地层声速与有效应力的关系图。

2 地层孔隙压力预测方法优选

针对川西地区上三叠统致密砂岩层异常高压的产生机制,前人做了大量富有成效的工作。研究表明,川西前陆盆地上三叠统地层异常高压的形成原因主要有欠压实作用、生烃增压作用、黏土矿物脱水增压作用、构造抬升作用等。这些作用对上三叠统地层异常压力的影响,在不同地质时代有所不同^[5]。多种作用的影响导致川西致密储层中地层压力可高达 $2.0 \times 10^{-2} \text{MPa/m}$,等效深度法计算致密储层高异常压力已不适用。在 Eaton 法中引入的压实指数 c 能够较好地反映压力形成的机制,而且为了回避压力成因的复杂性,本文在钻井压力测试成果的基础上,以 Eaton 法为主建立研究区的地层孔隙压力剖面。

3 模型效果验证和评价

3.1 计算结果验证

利用上述地层孔隙压力预测模型得到了各单井的须家河组地层孔隙压力梯度剖面,与部分深度点钻井显示的地层压力数据进行了对比,结果如图 6 所示,平均相对误差仅 4.56%。由此可见,所建地层孔隙压力模型的预测结果精度高,能够满足工程要求。

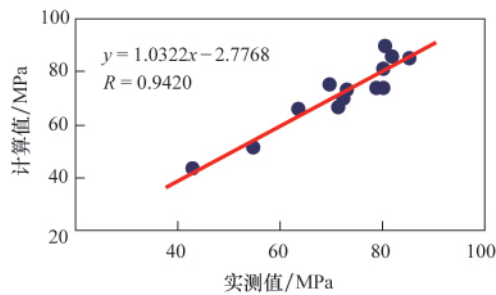


图 6 地层孔隙压力实测值与计算值对比

Fig. 6 Measured and calculated pore pressures

3.2 单井剖面构建和评价

根据地层压力预测模式,利用测井资料,建立了川西新场地区构造单井地层压力剖面。其中,新场构造典型井 X851

井地层压力剖面如图 7 所示,表明地层压力剖面分布特征与该地区的实际压力分布特征相吻合。对 X851 井地层压力剖面统计发现:1km 以上地层地压梯度为 $(1.0 \sim 1.2) \times 10^{-2} \text{MPa/m}$; 1~2km 段地层地压梯度为 $(1.1 \sim 1.55) \times 10^{-2} \text{MPa/m}$; 2~4.5km 段地层地压梯度为 $(1.2 \sim 1.85) \times 10^{-2} \text{MPa/m}$; 4.5~4.85km 段地层地压梯度为 $(1.05 \sim 1.5) \times 10^{-2} \text{MPa/m}$ 。

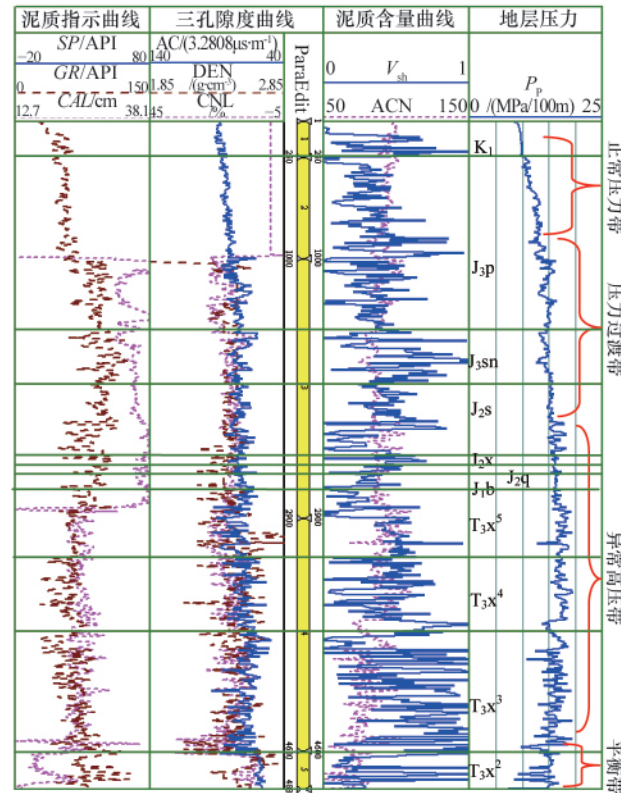


图 7 X851 井地层孔隙压力剖面

Fig. 7 Pore pressure profile of X851

此外,基于上述地层孔隙压力预测模型计算得到了单井地层孔隙压力与深度的关系;压力剖面在分段地层压力和整体压力变化趋势上都和实钻结果符合较好。对比实钻资料,可以总结出工区孔隙压力剖面具有以下特征:在有深井钻探的各个构造上地层压力都随深度增加,并且明显地分为几个压力带;根据统计分析,可大致划分正常压力带、过渡压力带、高压异常带和压力相对平稳带 4 个大的压力区间。压力区间划分及压力取值范围如表 1 所示。

由表 1 可以看出,川西地区须家河组须二段地层孔隙压力地压梯度范围在 1.55~1.75 之间,基本处于一个压力相对平衡带。压力剖面总体上表现为沙溪庙组~须三段压力较高,上、下都有减小的趋势,给钻井作业和井身结构的设计带来困难。

4 结论与建议

不同地区引起地层孔隙压力异常的作用机制不尽相同,

表 1 川西地区地层孔隙压力剖面简表
Table 1 Pore pressure profile in western Sichuan

编号	压力分带	地压梯度/ ($10^{-2}\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$)	对应层位	井深范围/m	
1	正常压力带	1.00~1.10	剑门关组、蓬莱镇组上部	0~700	
2	过渡压力带	1.10~1.55	蓬莱镇组下部、遂宁组	700~1900	
3	高压异常带	高压段	1.50~1.80	沙溪庙组~白田坝组	1900~3000
		超高压段	1.80~2.00	须家河组五段	3000~3400
		高压段	1.68~1.85	须家河组四、三段	3400~4800
4	压力相对平衡带	1.55~1.75	须家河组二段	4800~5200	

地层孔隙压力异常不是单一因素作用的结果。针对新场构造异常地层孔隙压力的预测,本文对等效深度法、Eaton 法及有效应力法等多种方法进行综合研究,结果表明每种方法有其适用条件。根据研究区实际地质情况,选用 Eaton 模型有效地建立工区地层孔隙压力剖面,开展模型的有效性验证与综合评价。本文所建立的地层孔隙压力模型的预测结果精度较高,满足工程要求。此外,根据各单井地层深度划分,新场构造地压梯度情况可大致划分为正常压力带、过渡压力带、高压异常带和压力相对平衡带 4 个压力区间,为后续钻、完井及地应力场研究提供指导。

参考文献 (References)

- [1] 郭永峰, 金晓剑. 地层压力精确预测准则及其应用 [J]. 石油钻探技术, 2004, 32(2): 15-17.
Guo Yongfeng, Jin Xiaojian. *Petroleum Drilling Techniques*, 2004, 32(2): 15-17.
- [2] 王震亮, 孙明亮, 耿鹏, 等. 淮南地区异常地层压力发育特征及形成机理[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(1): 32-34.
Wang Zhenliang, Sun Mingliang, Geng Peng, et al. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(1): 32-34.
- [3] 刘之的, 夏宏泉, 陈平. 利用测井资料计算碳酸盐岩三个地层压力[J]. 钻采工艺, 2005, 28(1): 18-21.
Liu Zhidi, Xia Hongquan, Chen Ping. *Drilling & Production Technology*, 2005, 28(1): 18-21.
- [4] 周文, 闫长辉, 邓虎成, 等. 油气藏现今地应力场评价方法及应用[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
Zhou Wen, Yan Changhui, Deng Hucheng, et al. *Application and evaluation methods for reservoir present stress field*[M]. Beijing: Geological Press, 2007.
- [5] 王震亮, 李耀华, 张健. 川西地区上三叠统异常流体压力的主要形成机制[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(1): 43-50.
Wang Zhenliang, Li Yaohua, Zhang Jian. *Oil & Gas Geology*, 2007, 28(1): 43-50.
- [6] 刘向君, 刘堂晏, 刘诗琼. 测井原理及工程应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
Liu Xiangjun, Liu Tangyan, Liu Shiqiong. *Engineering application and theory for well logging*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.
- [7] 樊洪海. 地层孔隙压力预测检测新方法研究与应用 [D]. 北京: 中国石油大学(北京)石油工程学院, 2001.
Fan Honghai. *Application and detection methods research for formation pore pressure* [D]. Beijing: College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, 2001.
- [8] 祖峰, 张宗林, 丰全会, 等. 异常地层压力检测和预测方法 [J]. 石油钻采工艺, 2004, 26(1): 35-38.
Zu Feng, Zhang Zonglin, Feng Quanhui, et al. *Oil Drilling & Production Technology*, 2004, 26(1): 35-38.

(责任编辑 刘志远)

·学术动态·

“第三届全国生物入侵学术研讨会”征文



中国植物保护学会主办的“第三届全国生物入侵学术研讨会”将于 2010 年 11 月 26 日在海口召开。本次会议将以全球变化与生物入侵为主题,针对我国入侵生物的预防预警、检测监测、控制管理等方面的理论与技术,尤其是全球气候变化下的生物入侵这一热点与前沿问题展开广泛交流。

征文内容:全球变化(气候变化、大气变化、土地利用格局变化)对生物入侵的影响;入侵物种的基础生物学与生态学;入侵物种的防控(预防预警、检测监测、生态修复、综合治理等)新技术。

征文截止时间:2010 年 10 月 20 日。

联系电话:0898-23300243;电子信箱:lypehy@l63.cnm;联系人:彭正强。

会议网址: <http://www.ipmchina.net/cspp/>。