

双侧向测井响应特征分析及环境校正方法

谢关宝^{1,2}

1. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101
2. 中国石油大学(北京), 北京 102249

摘要 双侧向测井是确定地层含油性的关键测井资料之一,但由于受各种复杂因素的影响,其测井信息对油气层分辨能力受到限制,给油气层解释带来困难。本文依据电测井理论和快速正演数值计算方法,模拟不同储层条件下双侧向测井响应并分析其特征,从而揭示双侧向测井的影响因素;以此为基础,采用反演算法,对双侧向测井资料进行预处理,计算目的层位的原状地层电阻率、冲洗带电阻率及侵入半径,实现双侧向测井资料的环境校正。实际应用表明,该方法可有效消除双侧向测井的环境因素影响,识别油、气、水层符合率更高,可满足工程需要。

关键词 双侧向测井;响应特征;环境校正

中图分类号 P631.811

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.20.012

Analysis of Dual Laterolog Response Characteristics and Environmental Correction

XIE Guanbao^{1,2}

1. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China
2. China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract Dual laterolog is a key to determine whether the stratum contains oil or not. However, due to impact of reservoir thickness, thin interbed oil reservoir, mud invasion and other factors, the discrimination capacity for oil and gas layers of the logging information is limited, bringing difficulties for oil and gas layer interpretation. Based on the electrical logging theory and fast forward numerical calculation method, this paper simulates dual laterolog response under different reservoir conditions and analyzes its characteristics, revealing factors influencing the dual laterolog. On this basis, the inversion algorithm was used to carry out preprocessing of the dual laterolog data, calculate the virgin zone resistivity, flushed zone resistivity and invasion radius, realizing the environmental correction of dual lateral logging data. Applications show that this method can effectively eliminate environmental influence on dual laterolog, and identify oil, gas and water layers with high accuracy, meeting engineering demand.

Keywords dual laterolog; response characteristics; environmental correction

在分析区域地质特征基础上,充分利用现有测井资料,对目的层段进行精细处理解释是地质学家极为关注的问题之一。双侧向测井资料是确定地层含油性关键测井资料之一,自20世纪80年代以来,国内学者针对胜利油田、塔里木油田、辽河油田、大港油田及大庆油田的实际需要,进行了有

针对性的研究工作。研究发现,在实际测井过程中,受钻井液性能、泥浆侵入、围岩、储层厚度等各种复杂因素的综合影响^[1-6],双侧向测井资料对油气层分辨识别能力受到限制;剔除这些影响因素,得到原始地层信息,是测井分析家在进行油气层测井解释前所必须做的工作。本文以正演模拟手段

收稿日期:2014-04-01;修回日期:2014-06-06

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05014-001)

作者简介:谢关宝,高级工程师,研究方向为测井方法、地球物理正反演及资料解释,电子信箱:baoupe@163.com

引用格式:谢关宝. 双侧向测井响应特征分析及环境校正方法[J]. 科技导报, 2014, 32(20): 74-78.

首先分析双侧向测井在不同地层条件下的响应特征,得到双侧向测井资料对储层厚度、互层及泥浆侵入对其特征影响的规律,同时利用快速反演算法实现双侧向测井资料的环境校正。

1 响应特征分析

储层厚度、砂泥岩间互层及泥浆侵入对储层电阻率都有不同程度的影响^[2,3,5]。针对双侧向测井进行正演数值模拟分析。

1.1 不同层厚单砂层响应特征

假设地层模型为:围岩电阻率为 $1.0 \Omega \cdot m$,原状地层电阻率为 $25.0 \Omega \cdot m$,泥浆电阻率为 $0.1 \Omega \cdot m$,地层无侵入。正演模拟结果如图1、图2所示。图1中实线代表浅侧向电阻率,虚线代表深侧向电阻率。分析图中结果可知,当储层单层厚度小于 $0.5 m$ 时,储层双侧向视电阻率值随着储层厚度变薄而减小;当储层单层厚度在 $0.7 m$ 时,储层双侧向视电阻率值大于地层真电阻率,造成这种现象的原因是由于储层厚度接近双侧向测井的纵向分辨率,引起仪器的过聚焦,从而造成“假极大”现象^[2~5];当储层单层厚度大于 $1 m$ 时,储层双侧向视电阻率值受层厚影响已经较小。

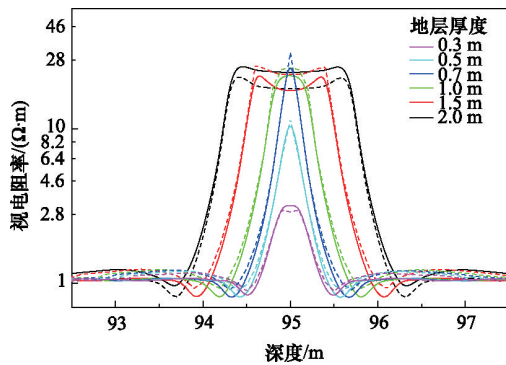


图1 不同厚度单砂层双侧向测井响应

Fig. 1 Dual laterolog response of single sand layers with different thicknesses

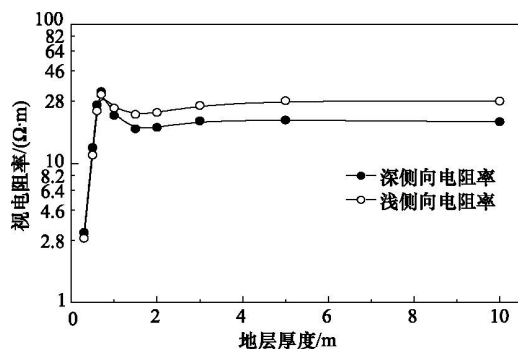


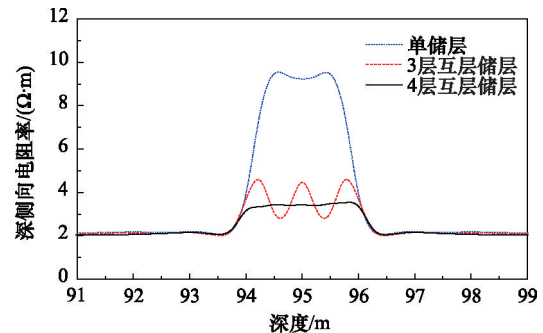
图2 双侧向电阻率响应与层厚度关系

Fig. 2 Relationship of dual lateral resistivity response and layer thickness

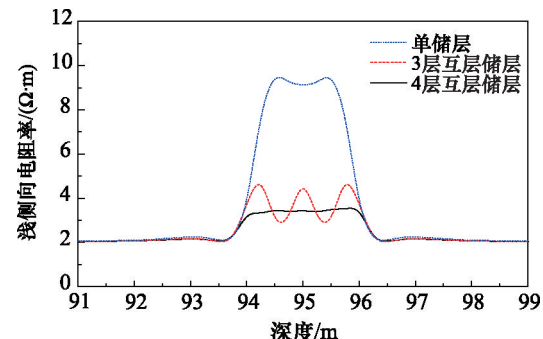
在数值模拟过程中,在较厚储层时出现了双侧向视电阻率值幅度差,是因为使用了目标区的双侧向仪器参数。测井仪器参数,特别是仪器电极系数 K 值不准确,极易造成双侧向测井响应的双轨现象的产生^[2,3],但不影响储层厚度响应变化的规律分析,因此在进行正演数值模拟时必须选择正确的仪器参数(后文计算使用的仪器参数均作了标定)。

1.2 薄互层响应特征

由于仪器本身分辨率的限制,对于薄互层情况,测井曲线呈低阻特征,设定数值模拟模型为:地层总厚度 $2.0 m$,储层分为单储层、3层互层储层、4层互层储层,其中原状地层电阻率为 $25.0 \Omega \cdot m$,冲洗带电阻率为 $10.0 \Omega \cdot m$,薄互层夹层电阻率为 $2.0 \Omega \cdot m$,围岩电阻率为 $2.0 \Omega \cdot m$,泥浆电阻率 $1.0 \Omega \cdot m$,储层侵入半径为 $1.5 m$,模拟结果如图3所示。设定地层总厚度为 $1.0 m$,其他条件与图3模拟条件相同,模拟结果如图4所示。



(a) 深侧向



(b) 浅侧向

图3 总厚 $2.0 m$ 薄互层双侧向测井响应曲线

Fig. 3 Dual laterolog response of $2.0 m$ thin interbed

由图3、图4可知,因受仪器分辨率的限制,当储层由高阻厚层向高、低阻砂泥岩互层演变时,会出现测储层视电阻率值量结果大幅度低于薄互层单层真电阻率值的现象^[5,7,8]。

通过双侧向测井砂泥岩互层正演特征分析可知,在实际测井过程中,由于受仪器分辨率的限制,在遇到薄互层沉积地层时,会导致地层视电阻率值大大低于该储层真电阻率值,从而造成油层的误判,降低测井解释符合率。

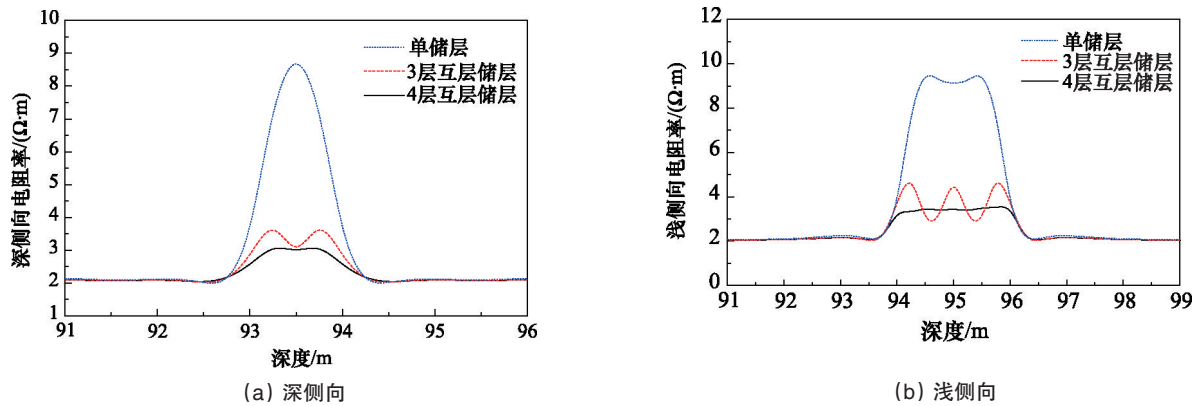


图4 总厚1.0 m薄互层双侧向测井响应曲线
Fig. 4 Dual laterolog response of 1.0 m thin interbed

1.3 不同侵入深度响应特征

当储层的地层水矿化度较低、泥浆滤液矿化度较高时,地层呈现低阻侵入特征,导致测井仪器测得的地层视电阻率值远低于地层真电阻率,极端情况下,还会导致油层呈现水层特征。为模拟该现象,设置数值模拟地层模型为:原状地层电阻率 $20.0 \Omega \cdot m$ 、冲洗带电阻率 $2.0 \Omega \cdot m$ 、泥浆电阻率 $0.2 \Omega \cdot m$ 。如图5所示,其中,实线代表浅侧向电阻率,虚线代表深侧向电阻率。在无侵或侵入深度较浅情况(侵入深度约0.1~0.3 m)下,深侧向测井视电阻率值小于浅侧向测井视电阻率值,该现象主要由双侧向电极设计及深、浅电流分布的差异造成;随着侵入深度的增加(侵入深度大于0.5 m),深浅双侧向测井视电阻值均逐渐减小,且出现深侧向视电阻率值大于浅侧向视电阻率值的现象(即正差异),并且随侵入深度的增大,两者差异逐渐减小,深侵(侵入半径大于2.5 m)情况下,深浅双侧向视电阻率值接近重合,此时的测井响应主要反映侵入带的特征。

数值模拟结果表明,随着侵入深度的增加,双侧向测井响应值降低,泥浆侵入(尤其是盐水泥浆)是形成油气层低电阻率显示的重要因素之一^[5,7]。

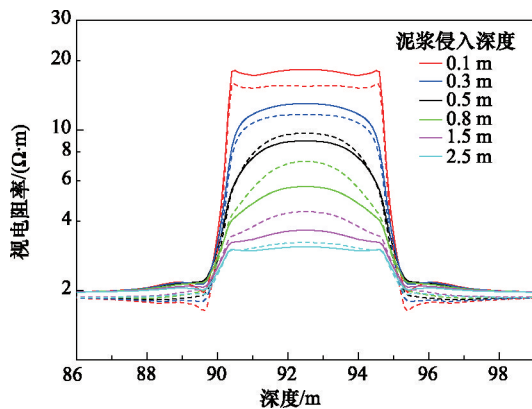


图5 双侧向电阻率侵入特性曲线
Fig. 5 Invasive characteristics of dual lateral resistivity

2 环境校正

电阻率测井资料的环境校正可选择旋风图版手工进行,而计算机的自动环境校正即为地球物理学的反演问题。反演是正演的逆过程,即根据测井响应计算地层的参数(如电阻率、介电常数、侵入半径等)^[2,3]。

2.1 反演基本原理

在反演求解时,首先需要将非线性方程组利用泰勒公式展开,忽略其高次项,将其转化为线性矛盾方程组求解^[8,9]。

假设测井响应 $y_k (k=1, 2, \dots, N)$ 由参数 $s_j (j=1, 2, \dots, M)$ 决定,则

$$y_k = f_k(s_1, s_2, \dots, s_M) \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

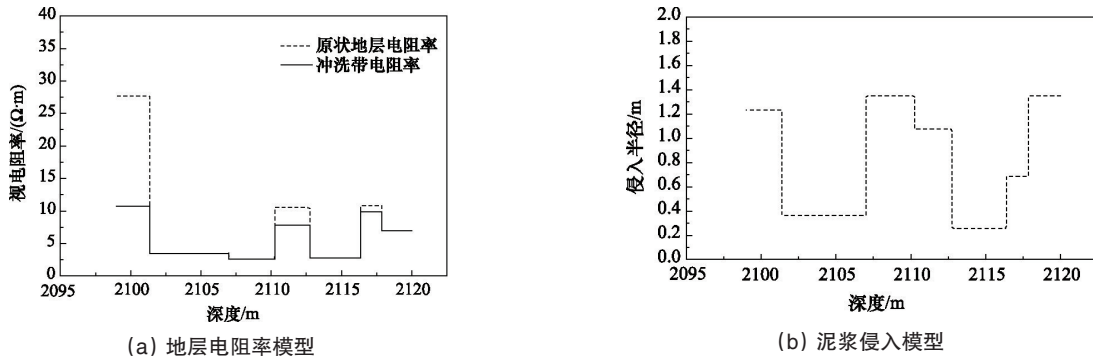
而目前对于非线性方程组还没有严格的解析解,因此,无法找到一组 s_1, s_2, \dots, s_M , 使式(1)中的 N 个方程都能得到满足,只能试图寻找一组 s_1, s_2, \dots, s_M , 使得其误差平方和为最小,即

$$\Phi = \sum_{k=1}^N |f_k - y_k|^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

先根据测井响应 y_1, y_2, \dots, y_N 对 s_1, s_2, \dots, s_M 进行估计,估计值称为初始猜测。利用正演数值算法,根据初始猜测计算测井响应。如果计算得到的测井响应与测得的测井响应值一致,则认为初始猜测即为地层参数真实值;如果不一致,则根据寻优算法对初始猜测进行修改,然后根据新的 s_1, s_2, \dots, s_M 计算出 f_1, f_2, \dots, f_N , 在计算过程中,应确保式(2)误差平方和 Φ 小于上次计算的 Φ , 逐步迭代,直至 Φ 小于预先设定的值,此时的 s_1, s_2, \dots, s_M 即可认为是地层的真实值。

2.2 反演模型验证

为验证本文反演算法的稳定性、可靠性,设定如图6所示的理想模型,利用本文采用的反演算法,对理想模型正演计算双侧向测井响应,计算结果如图7(a)所示,根据该计算结果反演计算地层模型(图7(b))。对比地层模型与反演结果可知,反演结果与设定的地层模型基本一致,同时其精度可以满足工程需要。

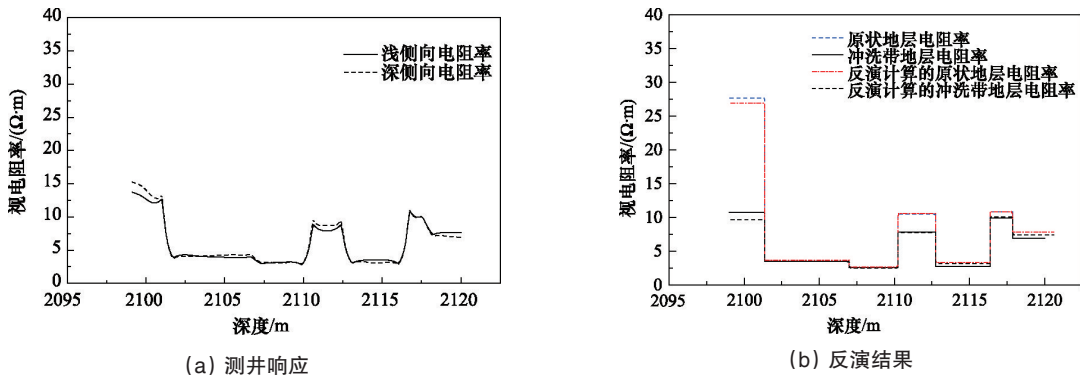


(a) 地层电阻率模型

(b) 泥浆侵入模型

图6 均匀介质模型

Fig. 6 Homogeneous medium model



(a) 测井响应

(b) 反演结果

图7 计算结果

Fig. 7 Calculation results

3 实例分析

X井为研究区块一口开发井,开发油藏层位为侏罗系头屯河组T2砂层,地层水矿化度为26.0 g/L,所使用的泥浆滤液矿化度7.2 g/L,地层水矿化度与泥浆滤液矿化度差异较大,

自然电位呈现明显负异常特征,该井采用斯伦贝谢CSU双侧向测井仪器进行了地层电阻率测量。根据双侧向仪器,设定反演参数,对双侧向测井资料进行反演处理,得到地层的原状电阻率、冲洗带电阻率和泥浆滤液侵入半径(图8)。

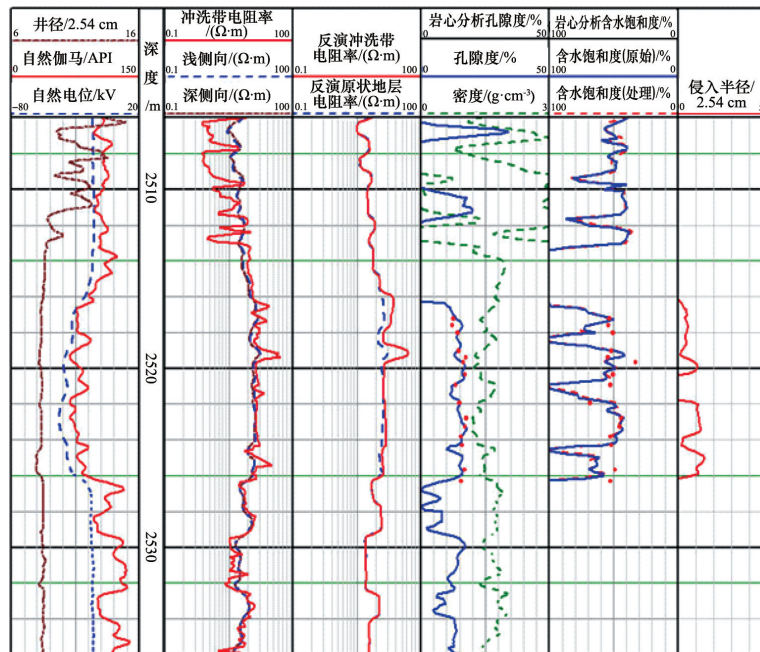


图8 X井测井反演综合图

Fig. 8 Inversive calculation of X Well logging data

在 2506~2516 m 及 2526~2536 m, 岩性均为泥岩, 反演的深、浅侧向电阻率基本重合; 在 2516~2526 m, 岩性为砂岩, 反演的原状地层电阻率和测量得到深侧向视电阻率值基本一致, 反演的深、浅侧向电阻率呈现增阻侵入特征, 侵入半径约为 0.4~1.4 m。出现增阻侵入特征主要原因是由于泥浆滤液矿化度远低于地层水矿化度, 在储层物性较好井段, 由于泥浆滤液的侵入, 从而造成反演得到的冲洗带电阻率高于深侧向电阻率值。

采用目标区同一套计算参数, 分别用测井的深侧向电阻率和反演的深侧向电阻率采用 POR 程序处理, 两者计算的含水饱和度基本相等。本井有密闭取心资料, 为验证结果可靠性, 首先将取心资料进行深度归位, 对比归位后密闭取心分析的含水饱和度、孔隙度发现: 处理得到孔隙度与岩心分析孔隙度平均绝对误差小于 1.08%, 反演前后计算的含水饱和度与岩心分析的含水饱和度的平均绝对误差分别为 9.95% 和 9.65%, 反演前后得到的含水饱和度平均绝对误差约为 1.54%, 反演前后的深侧向视电阻率值差异较小。综合以上分析, 反演处理可有效提高油水层参数计算精度, 消除双侧向测井资料的环境因素影响。

4 结论

1) 通过双侧向测井响应正演数值模拟, 系统分析了储层厚度、互层、泥浆侵入深度等对双侧向测井响应的影响, 并分析了其规律特征。

2) 采用快速反演算法, 反演得到目的层位的原状地层电阻率、冲洗带电阻率及侵入半径, 实现对双侧向测井环境校正。实际应用表明, 该方法收敛速度快、稳定性高, 利用反演结果计算得到的储层参数精度高, 可有效消除双侧向测井的环境因素影响。

参考文献 (References)

[1] 丁次乾. 矿场地球物理[M]. 东营: 石油大学出版社, 1992: 20-42.
Ding Ciqian. Mine geophysics[M]. Dongying: University of Petroleum

Press, 1992: 20-42.

- [2] 张庚骥. 电法测井(上册)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1984: 83-179.
Zhang Gengji. Electrical logging[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1984: 83-179.
- [3] 谢关宝. 双侧向测井资料的预处理方法研究[D]. 东营: 中国石油大学, 2004.
Xie Guanbao. Study on the method of dual laterolog data preprocessing [D]. Dongying: China University of Petroleum, 2004.
- [4] 冯启宁, 郑学新. 测井仪器原理[M]. 东营: 石油大学出版社, 1991: 10-58.
Feng Qining, Zheng Xuexin. Logging instrument principle[M]. Dongying: University of Petroleum Press, 1991: 10-58.
- [5] 王智. 测井资料环境校正技术研究及应用[D]. 成都: 西南石油大学, 2006.
Wang Zhi. Logging data environment correction technology research and application[D]. Chengdu: Southeast Petroleum University, 2006.
- [6] 谢关宝, 范宜仁, 吴海燕, 等. 储层泥浆侵入深度预测方法研究[J]. 测井技术, 2006, 30(3): 240-242.
Xie Guanbao, Fan Yiren, Wu Haiyan, et al. Research of mud invasion depth prediction method in reservoir[J]. Well Logging Technology, 2006, 30(3): 240-242.
- [7] 欧阳健, 张建华, 胡启, 等. 渤海湾海水泥浆侵入油气层双侧向测井定量分析研究[J]. 测井技术, 1998, 22(4): 256-260.
Ouyang Jian, Zhang Jianhua, Hu Qi, et al. Quantitative study of dual laterolog response to oil/gas formation invaded by high salinity mud filtrate in Bohai Gulf[J]. Well Logging Technology, 1998, 22(4): 256-260.
- [8] 王晓畅. 南堡凹陷复杂油气层测井响应特征与评价方法研究[D]. 东营: 中国石油大学, 2008.
Wang Xiaochang. Study on logging response characteristics and evaluation method of complex reservoir in nanpu sag[D]. Dongying: China University of Petroleum, 2008.
- [9] 赵明, 高杰, 孙友国. 常规电测井联合反演研究与实际应用[J]. 测井技术, 2003, 27(1): 16-19.
Zhao Ming, Gao Jie, Sun Youguo. Joint inversion study of conventional electrical logging and its applications[J]. Well Logging Technology, 2003, 27(1): 16-19.

(责任编辑 刘志远)



《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映中国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域中国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过 300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。