

基于水动力学理论的微观流动单元 渗流数学模型

武男¹,朱维耀¹,石成方²,叶继根²,龙运前³

1. 北京科技大学土木与环境工程学院,北京 100083

2. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083

3. 浙江海洋学院创新应用研究院,舟山 316022

摘要 为了研究非均质油藏内部渗流规律,反映不同开发阶段地层中流体流动规律及分布特征,揭示流场变化与储层特征间的内在联系。本文基于水动力学原理及流线簇方程,提出储层中波及范围内具有相似流动规律及储层特征的渗流区域为微观流动单元,建立流量贡献率、流动单元流量非均匀分布曲线和流量强度差异系数渗流数学模型,通过流动单元的区域流量对总产量贡献的大小进行划分,建立流动单元高速流动区与低速流动区的划分准则。通过对五点井网一个注采单元的模拟,结合流线簇方程进行表征,结果表明,高速流动区能量充足,其占整个流动单元面积的53.7%,提供了总流量的61.7%,为流量的主要贡献区域;低速流动区域占整个流动单元总面积的46.3%,只提供了总流量的38.3%。

关键词 微观流动单元;渗流数学模型;流动单元划分;平面流动特征

中图分类号 TE312

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.08.010

Seepage flow mathematical model of micro-flow units based on hydrodynamics theory

WU Nan¹, ZHU Weiyao¹, SHI Chengfang², YE Jigen², LONG Yunqian³

1. Civil and Environmental Engineering School, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China

2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China

3. Innovation Application Research Institute, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China

Abstract This paper studies the seepage law in heterogeneous reservoir to find out the flowing law and distribution of fluids at different development stages for revealing the internal relations between flow field and reservoir characteristics. Based on hydrodynamics theory and streamline cluster equation, this paper proposes that the seepage region which has similar fluid flowing law and reservoir characteristics is a micro-flow unit. The seepage flow mathematical model of the contribution rate of flow (CRF), nonuniform distribution curve of flow units (NDCFU) and the difference coefficient of flow intension (DCFI) has been established, and the principle for dividing high and low velocity flow area is based on the flow contribution rate of flow units. Simulation of constant-rate water flooding dynamics in an injection-production unit of the inverted 5-spot pattern and plotting by means of streamline cluster equation show that the high velocity flow area had sufficient driving energy, occupying 53.7% of the entire flow unit area, but providing 61.7% of the total flow, and contributing most to the production. The low velocity flow area occupied 46.3% of the entire flow unit area, but only provided 38.3% of the total flow.

Keywords micro-flow units; seepage flow mathematical model; division of flow units; characteristic of planar flow

收稿日期:2014-12-30;修回日期:2015-02-04

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05010-002)

作者简介:武男,博士研究生,研究方向为油气田开发与渗流力学基础,电子信箱:w284451337n@126.com;朱维耀,教授,研究方向为渗流力学、流体力学和油气田开发,电子信箱:weiyak@sina.com

引用格式:武男,朱维耀,石成方,等.基于水动力学理论的微观流动单元渗流数学模型[J].科技导报,2015,33(8):63-67.

储层流动单元研究是国外 20 世纪 80 年代中后期兴起的一种储层研究方法,相比之下,国内的探索性研究起步晚,且由于具体的地质条件和实际资料的限制及研究问题的出发点不同,对流动单元的认识及研究方法也不完全一致^[1]。以往的流动单元研究方法可分为以地质研究为主的流动单元划分方法(沉积相法、层次分析法、非均质综合指数法)和以数学手段为主的储层参数分析法(流动分层指标 FZI 法^[2]、孔喉几何形状 R35 法、生产动态参数法、多参数综合法)两类,流动单元研究既能反映储层的岩石物理性质,又能反映流体渗流特征,对油田后期开发调整具有重要的意义,但目前提出的流动单元存在的关键问题:1) 流动单元的层次结构分析问题,地质上流动单元的划分主要是通过统计学聚类分析实现的,没有确定的理论性公式及划分方法^[3];2) 流动单元与岩石物理相的内在区别问题^[4];3) 流动单元的动态概念问题,流动单元研究不仅要反映流体流动的可能性,更要反映流体流动的现实性即不同开发阶段地层中流体的流动及分布规律。

为解决上述 3 个问题,结合地质、开发两方面的因素,提出储层中水驱波及范围,具有相似的流动规律及储层特征的单元为“流动单元”,基于水动力学理论建立起流动单元渗流数学模型,提出了流动单元划分方法及准则,通过对采用恒速注水的五点井网注采单元间流动单元的划分,分析流动单元内控制液体分布和运动的因素,在注采单元间将流动单元划分为高速与低速流动区,为下一步引入有效流动单元的概念,揭示剩余油形成机制奠定基础。

1 流动单元研究方法

流动单元是储层中水驱波及范围内,具有相似的流动规律及储层特征的渗流区域^[5]。

以水动力学理论为基础,提出流量贡献率、流量非均匀分布曲线与流量强度差异系数 3 个概念,将流动单元划分为高速流动区和低速流动区。建立起一套可以反映不同开发阶段地层中流体流动规律及分布特征的“流动单元划分方法”。

流量贡献率:定义与主流线呈 ϕ 角度的流线扫过的区域流量占注采单元间总流量的百分比为流动单元的流量贡献率,用 θ 表示。

流量非均匀分布曲线用以分析和比较一个流动单元内的流量分布不均匀程度,该曲线作为一个研究流量在地层中分布的便利的图形方法,可以直观的分析一个流动单元内的流量分布的均匀与不均匀的程度,为油田开发调整提供参考和依据。

2 流动单元划分方法

2.1 流量贡献率渗流数学模型

根据势的叠加原则,无限大地层中存在等产量一源(B)一汇(A)(图 1),任意一点 M 的渗流速度可由源汇相叠加求

得,地层内任意一点的渗流速度为

$$|v| = \frac{qd}{\pi h} \cdot \frac{1}{r_1 r_2} \quad (1)$$

式中, q 为恒速注水流量, m^3/d ; r_1 为地层中任意一点距水井的距离, m ; r_2 为地层中任意一点距油井的距离, m ; v 为渗流速度, m/d ; h 为地层厚度, m ; d 为注采井距的 1/2, m 。

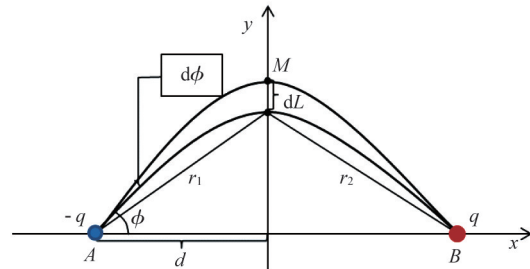


图 1 主截面流量微元示意

Fig. 1 Schematic diagram of micro-element flow of the principal cross-section

主截面的 y 轴上的任意一点 M (图 1), $r_1 = r_2 = r = \frac{d}{\cos \phi}$, 其渗流速度为

$$|v| = \frac{q}{\pi h d} \cdot \frac{1 + \cos 2\phi}{2} \quad (2)$$

式中, ϕ 为流线扫过角度, rad 。

流过主截面的 y 轴上的任意一个微元 dL 的流量为

$$dQ = |v| dL = \frac{|v| d}{\cos \phi} d\phi = \frac{(1 + \cos 2\phi) \cdot d}{2 \cos \phi} d\phi \quad (3)$$

纵观井网,可以取出具有代表性的油水系统单元,均质地层中主流线两侧流线对称分布,流动单元相似的流动规律及储层特征^[6],因此研究的流动单元可以由图 1 所示的一个分流线 AMB 与主流线 AB 所围成的纺锤形区域代表,根据流线分布,研究流动单元水动力学状况,对于五点井网、反七点井网、反九点井网边井、角井,分流线(最外侧流线)与主流线夹角 ϕ_{max} 分别为 $\frac{\pi}{4}$ 、 $\frac{\pi}{6}$ 、 $\arctan \frac{1}{2}$ 、 $\frac{\pi}{4} - \arctan \frac{1}{2}$ 。

流量贡献率计算公式为

$$\theta = \frac{\int_0^{\phi} dQ}{\int_0^{\phi_{max}} dQ} = \frac{\int_0^{\phi} \frac{(1 + \cos 2\phi) d}{2 \cos \phi} d\phi}{\int_0^{\phi_{max}} \frac{(1 + \cos 2\phi) d}{2 \cos \phi} d\phi} = \frac{\sin \phi}{\sin \phi_{max}} \quad (4)$$

式中, ϕ_{max} 为流线扫过最大角度, rad 。

当面积波及系数为 1 时,以五点井网为例,流量贡献率曲线为 $\theta = \sqrt{2} \sin \phi$ (图 2)。

2.2 流量非均匀分布曲线与流量强度差异系数

第 2.1 节建立的流动单元流量贡献率曲线是单调递增曲线,无法划分流动单元和反应其特点,为了找到合理划分流动单元的标准,提出流量非均匀分布曲线与流量强度差异系数。

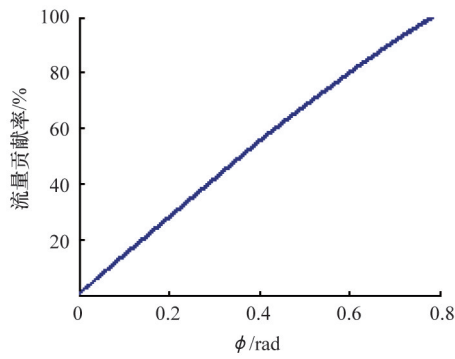


图2 五点井网的流量贡献率曲线

Fig. 2 Contribution rate of flow of inverted 5-spot pattern

流量非均匀分布曲线:以各流线与分流线间(图3所示积分区)的驱替面积百分数为横坐标,以对应的流量贡献率为纵坐标,从分流线计起一直到主流线,定义这些点所组成的曲线为流量非均匀分布曲线(图4)。

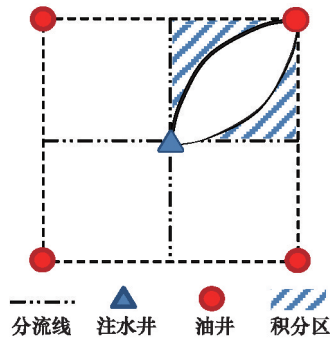


图3 流量非均匀分布曲线示意

Fig. 3 Schematic diagram of nonuniform distribution curve

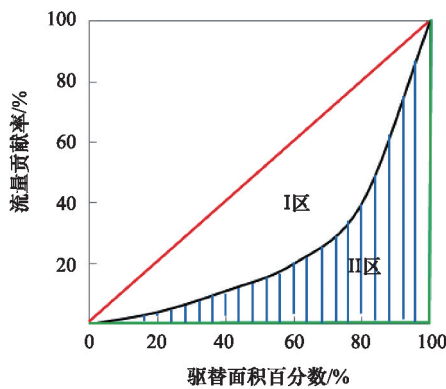


图4 流动单元流量非均匀分布曲线

Fig. 4 Nonuniform distribution curve of flow units

流量绝对均匀分布曲线:流动单元内相同驱替面积对产量的贡献相同。

流量绝对不均匀分布曲线:流动单元内所有的流量全部由主流线所提供。

实际井网的流动单元流量非均匀分布曲线位于流量绝对均匀分布线与绝对不均匀分布线之间,因此本文研究的流动单元流量非均匀分布曲线就是流线与分流线围成的面积百分数(图4)与这部分面积的流量贡献率的关系曲线。

图4中红色直线为流量绝对均匀分布曲线,绿色折线为流量绝对不均匀分布曲线, S_1 为流量绝对均匀分布曲线与流量非均匀分布曲线所围成的面积, S_0 为流量绝对不均匀分布曲线与流量非均匀分布曲线所围成的面积。

流量强度差异系数 $G = S_1 / (S_1 + S_0)$, 即流量非均匀分布曲线与流量绝对均匀分布曲线围成的面积百分数, G 越大表明流量分布越不均匀,反之越小越均匀。

利用流线簇方程^[7],将流量贡献率曲线转换为流量非均匀分布曲线。按照流线与等势线正交的原则,可得到流线簇也是一组圆,并且圆心都在 y 轴上,其中 x 轴也是一条流线^[8,9]。流线方程为

$$\frac{2dy}{x^2 + y^2 - d^2} = \text{常数} \quad (5)$$

以直角坐标表示的流线簇的方程为

$$x^2 + \left(y - \frac{d}{C_1}\right)^2 = \frac{d^2(1 + C_1^2)}{C_1^2} \quad (6)$$

可见流线是圆心在 $(0, d/C_1)$ 、半径为 $d\sqrt{1 + 1/C_1^2}$ 的圆族,在稳定流动时,液体质点运动轨迹线与流线是一致的。

$$C_1 = \frac{2 \tan \phi}{\tan^2 \phi - 1} \quad (7)$$

在不考虑井间干扰和面积波及系数的情况下,以五点井网为例,按照流量非均匀分布曲线解析公式(式(8)),并绘制出流动单元流量非均匀分布曲线(图5)。

$$\theta_s = 1 - \frac{\sqrt{2}(1-S)}{\sqrt{1+(1-S)^2}} \quad (8)$$

式中, S 为驱替面积百分数。

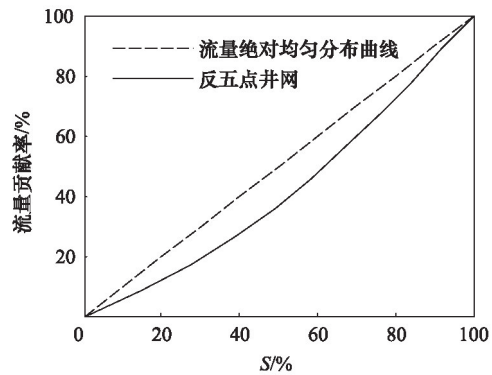


图5 五点井网流量非均匀分布曲线

Fig. 5 Nonuniform distribution curve of inverted 5-spot pattern

2.3 不同井网模式下流量贡献率曲线与流动单元非均匀分布曲线图版

根据建立的流动单元渗流数学模型,建立不同井网模式

下的流动单元划分标准,绘制流动单元划分图版并定义特征曲线。通过第2.1节建立七点井网、反九点井网边井和角井流量贡献率渗流数学模型

$$\theta_7 = \frac{\int_0^\phi dQ}{\int_0^{\frac{\pi}{6}} dQ} = 2 \sin \phi_7 \quad (9)$$

$$\theta_{9b} = \frac{\int_0^\phi dQ}{\int_0^{\arctan \frac{1}{2}} dQ} = \sqrt{5} \sin \phi_{9b} \quad (10)$$

$$\theta_{9j} = \frac{\int_0^\phi dQ}{\int_0^{\frac{\pi}{4} - \arctan \frac{1}{2}} dQ} = 3.1623 \sin \phi_{9j} \quad (11)$$

式中, ϕ_7 、 ϕ_{9b} 、 ϕ_{9j} 分别为反七点井网、反九点井网的边井及角井流线扫过的角度; θ_7 、 θ_{9b} 、 θ_{9j} 为反七点井网、反九点井网的边井和角井的流动单元流量贡献率; 其中, $\phi_7 \in [0, \frac{\pi}{6}]$, $\theta \in [0, 1]$, $\phi_{9b} \in [0, \arctan \frac{1}{2}]$, $\phi_{9j} \in [0, \frac{\pi}{4} - \arctan \frac{1}{2}]$ 。不同井网的流量贡献率如图6所示。

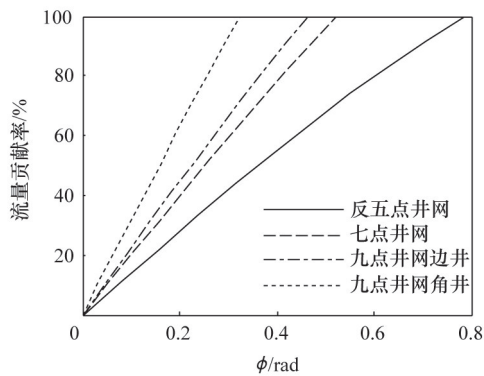


图6 不同井网的流量贡献率曲线

Fig. 6 Contribution rate of flow of different well patterns

利用流线簇方程,将流量贡献率曲线中的横坐标——流线扫过的角度转换为驱替面积百分数,得到不同井网模式下的流量非均匀分布曲线解析公式

$$\theta_7 = 1 - \frac{2(1-S)}{\sqrt{3+(1-S)^2}} \quad (12)$$

$$\theta_{9b} = 1 - \frac{\sqrt{5}(1-S)}{\sqrt{4+(1-S)^2}} \quad (13)$$

$$\theta_{9j} = 1 - \frac{\sqrt{10}(1-S)}{\sqrt{9+(1-S)^2}} \quad (14)$$

3 流动单元划分准则

流量非均匀分布曲线求导得到流量非均匀分布导函数曲线(图7),求解单位面积增量的流量贡献率增量。流量绝对均匀分布曲线的导数值为1,大于1表示单位驱替面积贡献大,注入水主要通过此区域到达生产井,区域流速大于平均流速,反之贡献小,因此定义大于1的区域为高速流动区、小

于1则为低速流动区^[8]。

对不同井网模式下的流量非均匀分布曲线进行求导(图7),找出导数为1的点,划分流动单元的高速流动区与低速流动区;在流动单元非均匀分布曲线图版上将导数为1的点(表1)进行线性拟合,得到1条特征曲线。其最小二乘拟合公式为 $\theta = -0.9879S + 0.8404$, 当 $\theta + 0.9879S > 0.8404$ 时为高速流动区域;当 $\theta + 0.9879S < 0.8404$ 时为低速流动区域。这条线从理论上解决了高速流动区和低速流动区的划分。

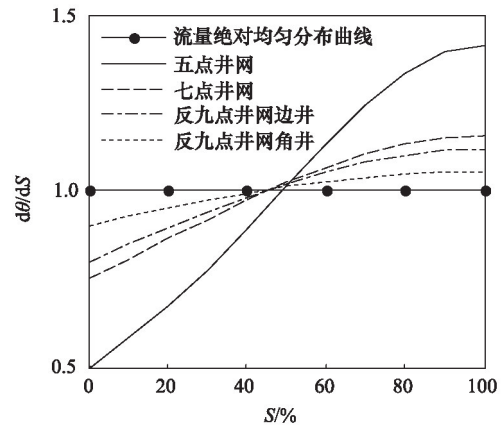


图7 不同井网流量非均匀分布导函数曲线

Fig. 7 Nonuniform distribution derivative function curve of different well patterns

表1 流动单元划分准则

Table 1 Dividing principle of flow units

井网模式	S	θ
反五点	0.463	0.383
三角形七点	0.439	0.407
反九点井网边井	0.429	0.416
反九点井网角井	0.426	0.420

4 示例与特征分析

以五点井网为例, q 取 $100 \text{ m}^3/\text{d}$, 源汇间距离为 200 m , 划分注采单元间的高速与低速流动区(表2)。

表2 五点井网流动单元划分

Table 2 Flow unit division of inverted 5 spot pattern

流动单元分类	位置	与主流线夹角/(°)	流动单元特征
I类	蓝线内部	0~16.7	高速流动区
II类	红线与蓝线之间	16.7~31.0	低速流动区
III类	红线外	31.0~45.0	压力平衡区

基于已有的流线模型^[9,10],对流动单元划分进行平面表征(图8),红线内部就是所研究的流动单元,红线外侧为水驱未波及区域。蓝色流线内部为高速流动区,其占整个流动单元面积的53.7%,却提供了总流量的61.7%,这个区域水驱的能量充足,驱替效果好;黄线与红线间为低速流动区域,其特点是区域占整个流动单元面积的46.3%,却只提供了总流量的38.3%。

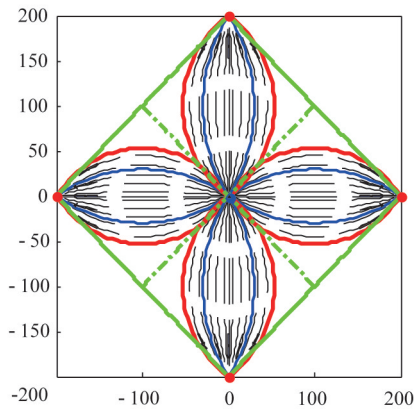


图8 五点井网流动单元划分示意

Fig. 8 Schematic diagram of flow unit divisions

5 结论

1) 本文研究的微观流动单元为储层中具有相似的流动规律及储层特征的渗流区域,基于水动力学理论,提出流量贡献率、流量非均匀分布曲线与流量强度差异系数3个概念,建立了流动单元划分方法及准则,将流动单元划分为高速流动区与低速流动区。

2) 通过流量非均匀分布曲线的导函数划分高速与低速流动区,建立流动单元划分准则,通过最小二乘拟合得到特征曲线 $\theta = -0.9879S + 0.8404$,得到确定的理论性公式及划分方法,解决了以往的流动单元划分方法不能描述流动“快慢”的现实性问题。

3) 以五点井网为例划分流动单元,结合流线簇方程进行表征,结果表明,高速流动区能量充足,其占整个流动单元面积的53.7%,却提供了总流量的61.7%,为流量的主要贡献区域;低速流动区域占整个流动单元总面积的46.3%,却只提供了总流量的38.3%。基于水动力学理论的流动单元渗流数学模型为进一步引入有效流动单元的概念,揭示剩余油形成机制奠定基础。

参考文献 (References)

[1] 窦之林. 储层流动单元研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
Dou Zhilin. The study on flow unit of reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000.

- [2] 靳彦欣, 林承焰, 赵丽, 等. 关于用FZI划分流动单元的探讨[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(5): 130-132.
Jin Yanxin, Lin Chengyan, Zhao Li, et al. Discussions on FZI methodology in flow unit identification[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(5): 130-132.
- [3] 彭仕必, 尹志军, 常学军, 等. 陆相储集层流动单元定量研究新方法[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(5): 68-70.
Peng Shibi, Yin Zhijun, Chang Xuejun, et al. A new quantitative method to study flow unit of non-marine reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(5): 68-70.
- [4] 李伟才, 姚光庆, 周锋德, 等. 低渗透油藏不同流动单元并联水驱油[J]. 石油学报, 2011, 32(4): 658-663.
Li Weicai, Yao Guangqing, Zhou Fengde, et al. Water displacing oil efficiency with cores grouped in parallel of different flow units in low-permeability reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(4): 658-663.
- [5] Aggoun R C, Tiab D, Owayed J F. Characterization of flow units in shaly sand reservoirs—Hassi R'mel Oil Rim Algeria[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2006, 50(3): 211-226.
- [6] 何应付, 尹洪军, 刘莉, 等. 复杂边界非均质渗流场流线分布研究[J]. 计算力学学报, 2007, 24(5): 708-712.
He Yingfu, Yin Hongjun, Liu Li, et al. Research on streamline distribution of flow through heterogeneous porous media with complex boundary[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2007, 24(5): 708-712.
- [7] 侯健, 孙焕泉, 李振泉, 等. 微生物驱油数学模型及其流线方法模拟[J]. 石油学报, 2003, 24(3): 56-60.
Hou Jian, Sun Huanquan, Li Zhenquan, et al. Mathematical model and simulation of streamline method for microbial flooding[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(3): 56-60.
- [8] 张林, 张春阳. 中高渗透层优势通道定量表征方法初探[J]. 新疆石油天然气, 2012, 8(2): 50-53.
Zhang Lin, Zhang Chunyang. Quantitative characterization of dominant water channel in high permeability reservoir[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2012, 8(2): 50-53.
- [9] Jongkittinarukorn K, Tiab D. Identification of flow units in shaly sand reservoirs[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1997, 17(3): 237-246.
- [10] Bandilla K W, Rabideau A J, Janković I. A parallel mesh-free contaminant transport model based on the Analytic Element and Streamline Methods[J]. Advances in Water Resources, 2009, 32(8): 1143-1153.

(责任编辑 刘志远)

《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿:www.kjdb.org。