

# 基于示点性过程模拟的碳酸盐岩裂缝型储层建模方法

赵彬<sup>1,2</sup>, 侯加根<sup>1</sup>, 刘钰铭<sup>1</sup>, 段冬平<sup>1</sup>

1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249
2. 长江大学地球物理与石油资源学院, 湖北荆州 434023

**摘要** 在深埋藏碳酸盐岩裂缝型储层中, 裂缝既是主要的储集空间, 又是重要的渗流通道, 其发育程度直接关系到油气藏聚集规模 and 单井产能大小, 但该类油藏埋藏深、经多期构造作用和岩溶作用改造的特点使储层内裂缝分布规律极为复杂, 裂缝识别和预测难度大, 裂缝空间分布和属性参数表征困难。本文根据示点性过程模拟理论, 提出基于示点性过程模拟的碳酸盐岩裂缝型储层建模方法, 并以塔河油田 X 区裂缝型油藏为例, 利用蚂蚁体属性数据约束单井裂缝密度插值得到裂缝密度分布模型, 进而在裂缝产状统计数据 and 裂缝密度分布模型的约束下, 建立了研究区离散裂缝网络模型, 直观刻画了油藏内裂缝网络的空间形态和结构, 为准确描述裂缝系统的连通性、非均质性 and 渗流行为提供有效的地质模型, 丰富了储层建模方法研究, 对有效开发碳酸盐岩裂缝型储层具有一定的实际意义。

**关键词** 碳酸盐岩; 裂缝型储层; 示点性过程模拟; 裂缝建模; 离散裂缝网络

**中图分类号** TE344

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.03.05

## Modeling of Carbonate Fractured Reservoirs Based on Marked Point Process Simulation

ZHAO Bin<sup>1,2</sup>, HOU Jiagen<sup>1</sup>, LIU Yuming<sup>1</sup>, DUAN Dongping<sup>1</sup>

1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
2. School of Geophysics and Oil Resources, Yangtze University, Jingzhou 434023, Hubei Province, China

**Abstract** The cracks not only serve as the major reservoir space, but also as the important fluid flow channel in deep buried carbonate fractured reservoirs, and the development of fractures controls the scale of reservoirs and the productivity of a single well directly. Such reservoir features deep buried depth and complicated distribution of fractures due to the reformation of reservoirs. The crack identification, fracture prediction, and fracture characterization are very difficult. In this paper, a modeling method of carbonate fractured reservoir based on the marked point process simulation theory is proposed. The fracture density distribution model is established through the single-well data interpolation under volume constraints with attribute of ants. Taking the fractured reservoirs in Tahe X area as an example, a discrete fracture network is built with fracture occurrence statistical data and fracture density distribution model constraints. The discrete fracture network modeling can be intuitively reflect the fracture's space form and structure, to provide an effective geological model for the research of connectivity, heterogeneity, and percolation characteristics of the fractured system. This method can be used in reservoir modeling and development of carbonate fractured reservoirs.

**Keywords** carbonate; fractured reservoirs; marked point process simulation; fracture modeling; discrete fracture network

收稿日期: 2010-11-18; 修回日期: 2010-12-13

基金项目: 国家科技重大专项(2008ZX05014)

作者简介: 赵彬, 博士研究生, 研究方向为油气田开发地质与油藏描述, 电子信箱: dwxy\_zhaobin@126.com; 侯加根(通信作者), 教授, 研究方向为油藏地质与油藏描述, 电子信箱: houjg63@cup.edu.cn

## 0 引言

近年来,在塔里木盆地、鄂尔多斯盆地等深埋藏碳酸盐岩储层,陆续发现了高产碳酸盐岩古岩溶裂缝型油气藏,裂缝在该类油气藏中既是主要的储集空间,又是重要的渗流通道,其发育程度直接关系到油气藏聚集规模和单井产能大小,因此识别、预测并定量表征储层裂缝是该类油气藏有效开发的核心问题之一。裂缝型储层模型既能反映裂缝表征参数、裂缝空间分布规律,又能满足油藏工程研究需要,因此被广泛应用于裂缝型储层研究。

总结国内外裂缝型储层模型研究进展,目前裂缝型储层建模及其流体渗流研究主要基于等效连续介质模型和离散裂缝网络模型。等效连续介质模型由 Barentblatt 等<sup>[1]</sup>于 1960 年首次提出,1963 年, Warrant 和 Root<sup>[2]</sup>在此基础上提出了 Warrant-Root 模型,之后该模型得到了广泛的应用,成为目前发展最为完善的裂缝模型。等效连续介质模型易于模拟、计算相对简单,但对裂缝属性及非均质性的过度简化导致储层许多细节信息丧失。相对于连续介质模型,离散裂缝网络模型能够直观地刻画储层内裂缝网络的空间形态和结构,进而更加准确地描述裂缝系统的连通性、非均质性以及渗流行为,因此离散裂缝网络模型的出现是裂缝型储层研究领域的一个里程碑事件。自 1970 年 Louis 等<sup>[3]</sup>提出离散裂缝网络模型以来, Wilson<sup>[4]</sup>, Dershowitz<sup>[5]</sup>, Sarda<sup>[6]</sup>, Araujo<sup>[7]</sup>, 王恩志等<sup>[8]</sup>国内外专家对离散裂缝网络模型进行了较为深入的研究,但研究内容多集中于确定性数学方法、地质力学模拟方法以及流体渗流等方面,对于如何利用裂缝建模技术建立离散裂缝网络模型,尤其碳酸盐岩裂缝型储层这类特殊油气藏的裂缝建模开展较少,因此,开展碳酸盐岩裂缝型储层建模方法研究,对于进一步丰富储层建模方法、有效开发裂缝型油气藏具有重要的实际意义。

裂缝储集体属于离散型变量,目前适用于离散变量的随机模拟方法包括基于目标的示点性过程模拟方法和基于像元的截断高斯模拟方法和序贯指示模拟方法,在裂缝储集体形状、大小和空间分布规律能够定义的前提下,基于目标的示点性过程模拟方法是裂缝型储层建模的优选建模方法。本文根据示点性过程模拟理论,提出基于示点性过程模拟的碳酸盐岩裂缝型储层建模方法,并以塔河油田 X 区奥陶系碳酸盐岩裂缝型油藏为例,探讨基于示点性过程模拟的碳酸盐岩裂缝型储层建模的基本原理、思路和方法。

## 1 基于目标的示点性过程随机建模原理

所谓示点性过程,就是对某一空间区域内的每一个离散点进行标值的过程,其基本思路是根据点过程的概率定律,按照空间中几何物体的分布规律产生这些物体的中心点空间分布,然后将物理性质(如物理几何形状、大小、方向等)标注于每一离散点<sup>[9]</sup>,可以用随机序列  $\psi = \{[x_n; m(x_n)]\}$  表示,其中  $x_n$  为连续空间内的一个随机点过程,  $m(x_n)$  为每个点的标值。

从地质统计学角度讲,示点性过程就是研究目标点及其性质在三维空间中的联合分布,可定义为由表示第  $i$  类目标点在位置  $u$  处是否出现的随机函数  $P_i(u, i)$  和描述第  $i$  类目标点物理性质(几何形状、大小、方向)参数的随机变量  $X_i$  组成的集合  $\{P_i(u, i), X_i\}$ ,这样通过在空间上先确定产生目标点的位置,再模拟产生目标的相关属性,构成了一次标点过程,并得到一次模拟实现。

示点性过程模拟建立在对目标体地质认识的基础上,在模拟过程中,将一些关于目标体的先验地质认识(目标体形状、大小、空间分布规律)作为条件约束信息加入模型中,可以使随机模拟结果最大限度地接近地质实际。由于三维空间内目标体(如裂缝)的分布以及目标体的属性(如裂缝产状)极为复杂,在随机模拟过程中需要应用优化算法(如迭代算法或模拟退火)<sup>[10]</sup>对目标体分布进行“逐步逼近”,即用各种参数分布和相互作用的多种组合进行迭代,直至最终得到一个满意的随机模拟结果为止。具体来说,就是设计一个目标函数,并确定一个目标函数阈值,根据先验地质认识随机产生目标体,计算目标函数值,直至达到目标函数阈值为止。

## 2 基于示点性过程模拟的碳酸盐岩裂缝型储层建模技术

碳酸盐岩裂缝型储层中的裂缝按成因可以分为构造裂缝和非构造裂缝,一般来说,构造裂缝是储层内主要的有效裂缝类型,因此本文提及的裂缝均为构造裂缝。虽然碳酸盐岩裂缝型储层中的构造裂缝大小悬殊、空间分布随机,但是裂缝的发育方向、形状大小、产状信息、分布规律等仍具有一定的规律性,因此可将裂缝视为离散变量,根据示点性过程原理,选择碳酸盐岩地层作为“背景相”,将裂缝作为“模拟目标体”,模拟过程就是将模拟生成的中尺度裂缝目标体随机投放于地层背景相中,通过大量具有不同方向、长度、形状、倾角和方位角等属性的离散裂缝片表征储层裂缝分布。建模流程如图 1 所示。

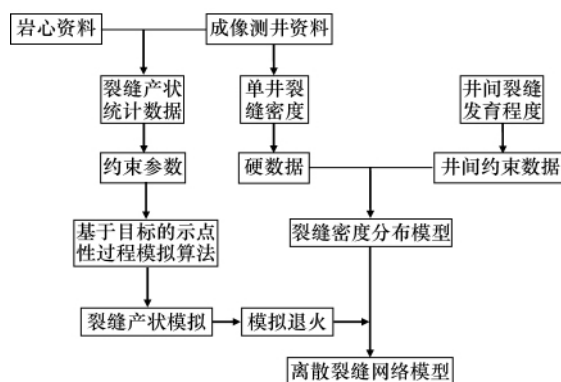


图 1 基于示点性过程模拟的裂缝型储层建模流程

Fig. 1 Fractured reservoir modeling based on marked point process simulation

2.1 建模约束参数

在示点性过程模拟中,裂缝目标体的随机投放方式难以体现地层中真实的裂缝分布规律,为了使裂缝网络模型更加符合地质实际,在模拟前需要将研究区内裂缝的先验地质认识作为建模约束参数,在约束参数的约束下建立离散裂缝网络模型。裂缝型储层建模约束参数即研究区裂缝产状统计数据,包括裂缝的组系、长度、方位角、倾角等,可通过岩心观察及成像测井等井孔资料统计获取。

2.2 裂缝密度分布模型

裂缝建模中应用模拟退火算法对裂缝目标体分布进行“逐步逼近”,由于裂缝密度分布属性可以体现裂缝型储层内裂缝的发育及空间分布趋势,因此建立裂缝密度分布模型作为模拟退火的目标函数,根据先验地质认识随机产生裂缝目标体,直至最终获得一个满意的离散裂缝网络模型为止。

裂缝密度模型一般通过成像测井资料计算得到的单井裂缝密度插值得到,在成像测井资料有限、单井裂缝密度数据较少的情况下,单纯通过井间插值建立的裂缝分布密度模型可靠性差。此时通常的做法是借助地震资料对井间插值进行约束,但由于碳酸盐岩油藏埋藏较深,常规碎屑岩地层中与裂缝储层响应较好的地震属性(如波阻抗、振幅、频率等)<sup>[11]</sup>与碳酸盐岩油藏中裂缝的响应关系并不明显,为了实现地震资料对井间裂缝密度的有效约束,需要对地震资料进行预处理,增强裂缝的边界特征,突出裂缝造成的地层不连续性,并以此为基础提取能够反映裂缝分布密度的地震属性。

方差体技术和蚂蚁追踪技术<sup>[12-13]</sup>均为目前识别断层、裂缝及地层不连续变化的有效方法,通过地震相邻道和样点的方差体分析,能够突出地震同相轴异常点的位置,从而增强地震数据在空间上的不连续性,采用蚂蚁追踪技术在方差体中发现满足预设断裂条件的不连续痕迹并进行追踪,最终获得的蚂蚁体属性具有低噪音、显示清晰断裂和裂缝痕迹的特点,能够反映井间裂缝的发育富集程度,因此,本文利用蚂蚁体属性数据对单井裂缝密度插值进行约束,保证裂缝密度分布模型的可靠性。

2.3 离散裂缝网络模型

在裂缝产状统计数据的约束下,使用基于示点性过程模拟的裂缝建模方法,将模拟生成的裂缝目标体随机投放于碳酸盐岩地层背景相中,模拟产生每一裂缝组系的裂缝片网络,直至产生裂缝的密度达到给定的裂缝密度分布模型,最终组合各组系裂缝片网络获得裂缝模型。

3 应用实例

遵循上述建模方法和步骤,以塔河油田X区奥陶系碳酸盐岩裂缝型油藏为例,建立研究区储层模型。X区位于塔河油田东北部,全区有各类钻井近百口,总面积约50km<sup>2</sup>。区内奥陶系油藏主要为多期岩溶作用、多期构造叠加及构造变形作用形成的裂缝型油藏,裂缝是储层中重要的储集空间和渗流

通道,有效裂缝以构造裂缝为主,具有边缘平直、延伸较远的特征,并具有一定的方向性、组系特征和规模特征。

3.1 裂缝型储层建模

(1) 确定建模约束参数。通过区内取心井及成像测井资料分析,区内裂缝走向与断层方向一致,主要发育北东向、北西向和东西向3个组系,裂缝主要以高角度裂缝为主,裂缝延伸0.3~110m,其中北东向裂缝延伸长度相对较大,分组统计中尺度裂缝的方位角、倾角、长度等属性(表1),建立中尺度裂缝产状统计数据。

表1 塔河油田X区裂缝产状统计数据  
Table 1 Fracture occurrence parameters  
of Tahe X area

| 组系  | 方位角<br>(平均值)/(°) | 倾角<br>(平均值)/(°) | 延伸长度<br>(平均值)/m |
|-----|------------------|-----------------|-----------------|
| 北东向 | 105~168(138)     | 45~90(79.73)    | 1.5~110(55)     |
| 北西向 | 22~79(45)        | 46~90(79.63)    | 1~70(40)        |
| 东西向 | 151~208(180)     | 45~90(79.46)    | 0.3~60(35)      |

(2) 建立裂缝密度分布模型。在方差体分析的基础上使用蚂蚁追踪技术提取蚂蚁体属性,建立蚂蚁体属性模型(图2),通过成像测井资料计算区内单井裂缝密度,以单井裂缝密度作为硬数据,蚂蚁体属性模型作为井间约束软数据,通过井间插值分别建立塔河油田X区3个组系的裂缝密度分布模型(图3)。

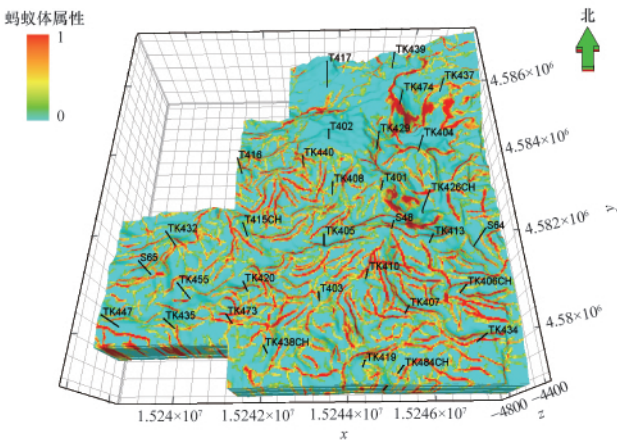


图2 塔河油田X区蚂蚁体属性模型  
Fig. 2 Ants attribute volume model of Tahe X area

(3) 建立离散裂缝网络模型。在建模约束数据和不同组系裂缝密度分布模型的约束下,采用基于示点性过程模拟的裂缝建模方法,分别模拟产生北东向、北西向和东西向3个组系的离散裂缝片网络集合(图4),最终组合各组系裂缝片网络获得塔河油田X区油藏离散裂缝网络模型。

3.2 模型验证

碳酸盐岩储层中裂缝发育的主控因素包括局部构造、断

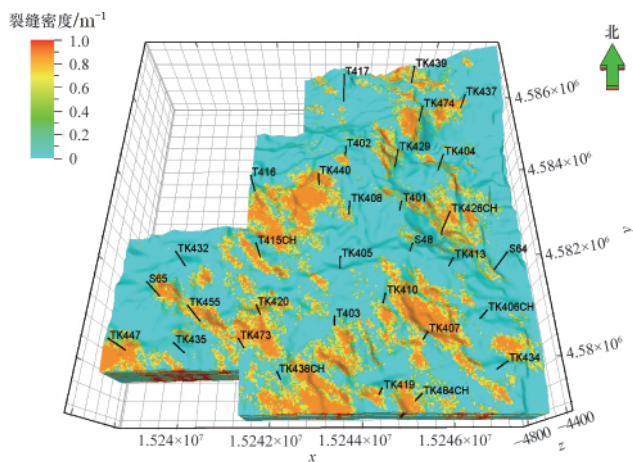


图3 塔河油田X区裂缝密度模型(裂缝组系:北西向)  
Fig. 3 Fracture density distribution model of Tahe X area (fracture groups: NW)

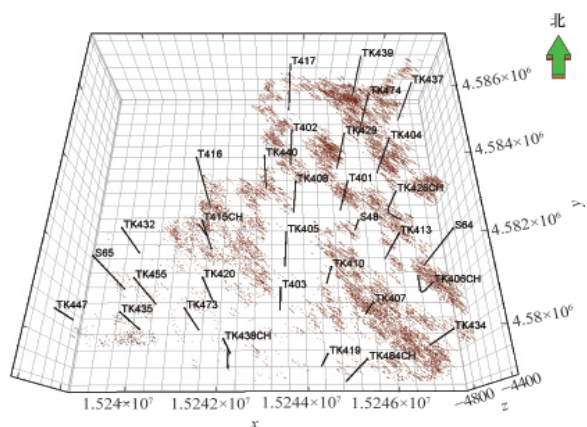


图4 塔河油田X区油藏离散裂缝网络模型  
(裂缝组系:北西向)  
Fig. 4 Discrete fracture network model of Tahe X area (fracture groups: NW)

层展布及古地貌因素等,针对塔河油田奥陶系碳酸盐岩裂缝型储层,断层对裂缝发育的控制作用尤为重要,裂缝发育程度与距断裂距离呈反比,断裂发育区域裂缝发育程度高,远离断裂带裂缝密度迅速降低。通过塔河油田X区成像测井解释单井裂缝走向玫瑰花图与断层关系图(图5)可以看出,裂缝发育的优势方向与奥陶系顶面的断层分布一致,体现区内断层对小尺度裂缝的控制作用。

分析塔河油田X区离散裂缝网络模型,模拟生成北东向小尺度裂缝7867条,北西向小尺度裂缝6242条,东西向小尺度裂缝9130条,其中东西向裂缝最为发育,其次为北东向裂缝,北西向裂缝发育程度最低,与研究区断层分布规律一致,体现了成像测井数据的约束作用。叠加研究区断层模型(图6)可以看出,裂缝的发育密度及展布与断裂发育方向一致,

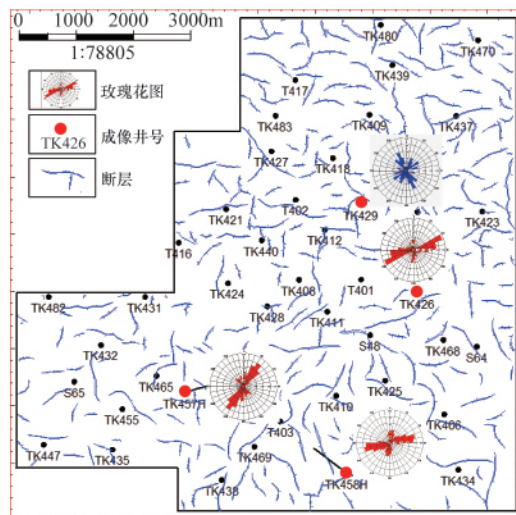


图5 塔河油田X区裂缝走向与断层分布关系  
Fig. 5 Relationship between fracture strike with fault distribution in Tahe X area

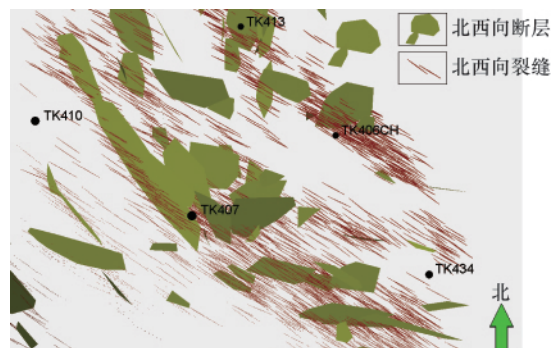


图6 塔河油田X区断层及离散裂缝网络模型叠加图(局部)  
Fig. 6 Partial stacking chart of faults and DFN model in Tahe X area (local view)

距相同走向的断层越近,小尺度裂缝密度越大,相同方位的断裂密度越大,小尺度裂缝密度也越大。

#### 4 结论

(1) 利用蚂蚁体属性数据约束单井裂缝密度插值获得的裂缝密度分布模型,体现了储层内裂缝的发育富集程度,保证了裂缝密度分布模型的可靠性。

(2) 根据示点性过程模拟理论,提出了基于示点性过程模拟的碳酸盐岩裂缝型储层建模方法,直观再现了储层内裂缝网络的空间形态和结构。

(3) 基于示点性过程模拟的裂缝型储层建模方法,不仅忠实于井震数据,还能将储层中有关裂缝发育及分布规律的地质认识作为条件信息加到模型中,更为客观地体现裂缝信息,模拟结果更具可信性。

## 参考文献 (References)

- [1] Barenblatt G I, Zheltov I P, Kochina N. Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks [J]. *Prikl. Mekh.*, 1960, 24: 852–864.
- [2] Warren J E, Root P. J. The behavior of naturally fractured reservoirs[J]. *SPE Journal*, 1963, 3(3): 245–255.
- [3] Louis C, Maini Y N. Determination of in-situ hydraulic parameters in jointed rock [C]//Proceedings of the Second Congress of the International Society for Rock Mechanics. Belgrade: Yugoslavian Science Press, 1970, 1: 235–245.
- [4] Wilson C R, Witherspoon P A. Steady state flow in rigid networks of fractures[J]. *Water Resources Research*, 1974, 10(2): 328–335.
- [5] Dershowitz B, Lapointe P, Eiben T, et al. Intergration of discrete feature network methods with conventional simulator approaches [J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2000, 3(2): 165–170.
- [6] Sarda S, Jeannin L, Bourbiaux B. Hydraulic characterization of fractured reservoirs: simulation on discrete fracture models [J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2002, 5(2): 154–162.
- [7] Araujo H, Lacentre P, Zapata T. Dynamic behavior of discrete fracture network (DFN) models [C]. SPE International Petroleum Conference in Mexico, Puebla Pue, Mexico, 2004: 91940–MS.
- [8] 王洪涛, 王恩志. 岩体主干裂隙系统三维非稳定渗流分析模型 [J]. 水

动力学研究与进展, 1998, 13(2): 206–213.

Wang Hongtao, Wang Enzhi. *Journal of Hydrodynamics*, 1998, 13 (2): 206–213.

- [9] 姜香云, 王志章, 吴胜和. 储层三维建模及在油藏描述中的应用研究 [J]. *地球物理学进展*, 2006, 21(3): 902–908.

Jiang Xiangyun, Wang Zhizhang, Wu Shenghe. *Progress in Geophysics*, 2006, 21(3): 902–908.

- [10] 胡向阳, 熊琦华, 吴胜和. 标点过程随机模拟方法在沉积微相研究中的应用 [J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2002, 26(2): 19–22.

Hu Xiangyang, Xiong Qihua, Wu Shenghe. *Journal of the University of Petroleum: Natural Science Edition*, 2002, 26(2): 19–22.

- [11] 李忠, 梁波, 巫芙蓉. 地震裂缝综合预测技术在川西致密砂岩储层中的应用 [J]. *天然气工业*, 2007, 27(2): 40–42.

Li Zhong, Liang Bo, Wu Furong. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(2): 40–42.

- [12] Mitra P P, Singh K. Synergy through seismic attributes in reservoir management—A case study [C]. SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia, 2001: 68648–MS.

- [13] Randolph P, Gaston B. Advances in seismic fault interpretation automation [J/OL]. [2010–10–08]. <http://www.searchanddiscovery.net/documents/2005/pepper/images/pepper.pdf>.

(责任编辑 刘志远)

## 《科技导报》“封面文章”征稿

为快速反映我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在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、结论。

在线投稿: [www.kjdb.org](http://www.kjdb.org)。

