# 随机游走过程在三维储层建模中的应用和问题

石书缘[1],冯文杰[2],尹艳树[3],杨 锐[3],姜 仁[4],胡 浩[3]

1. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083
2. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249
3. 长江大学地球科学学院,湖北荆州 434023
4. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院,河北廊坊 065007

**摘要** 在对随机游走算法基本原理简要介绍的基础上,对其在两个方面做了进一步改进。(1)在迁移概率的计算中,加入了蒙特卡罗影响因子,更符合河流振荡性随机游走发育的特点,得到的模型更具决策性;(2)在河道加宽模式中,沿着主流线利用圆形方式充填,得到加宽后的河道更合理,不会在高曲率处出现河道宽度突变。随后在改进算法基础上利用东部某油田的实际数据进行了检验,模拟实现与实际地质模型吻合度较高。抽稀后的模拟实现与未抽稀模拟实现的吻合率大,同一网格点相类型相同的比率达到77.3%,说明算法具稳健性。最后,分析了目前随机游走过程在油气储层建模领域仍然存在的问题及其可能的解决方案。

**关键词** 随机游走;储层建模;改进;随机性

**中图分类号** P628.2 **文献标识码** A **doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.19.008

## Application and Prospect of Random Walk in 3D Reservoir Modeling

SHI Shuyuan[1], FENG Wenjie[2], YIN Yanshu[3], YANG Rui[3], JIANG Ren[4], HU Hao[3]

1. *Research Iinstitution of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China*
2. *China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China*
3. *Geosciences Institution, Yangtze University, Jingzhou 434023, Hubei Province, China*
4. *Langfang Branch of Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Langfang 065007, Hebei Province, China*

**Abstract** This paper reviews the basic principles of the random walk, and proposes two modifications for the technology, related with the random influencing factor and the widening channel methods. First, in the calculation of the transition probability, the Monto Carlo factor is added to increase the stochastic extent and to make the model more deterministic. Second, the circling filling approach is used to reconstruct the width of the channel along the channel mainstream, so that the channel will not vary sharply in the high curvature points. The real data from the eastern oilfield is used to test the modified algorithm. It is shown that it is similar to drawing picture by a geologist and the results agree with the real geological phenomenon, with a coincidence rate of 76.5%. Furthermore, the results of the modified algorithm using the sparsing testing agree with the results before the sparsing, with a rate of matching of 77.3%. Finally, some problems in using the random walk are analyzed and related solving schemes are proposed.

**Keywords** random walk; reservoir modeling; modified; stochastic

## 0 引言

自从1984年挪威的Haldorsen和美国的Lake[1]发表了第一篇文章以来,储层建模一直以较快的速度发展。近年来,在算法的设计及应用方面更是迅猛发展。其中有在传统的两点地质统计学基础上,发展了基于训练图像的多点地质统计学模拟算法[2],改善了仅利用两点间相关性的基于变差函数的两点地质统计学算法不能再现复杂形态的缺点。但是,多点地质统计学算法仍然是一种基于像元的算法,它在数据条件

收稿日期:2012-03-26;修回日期:2012-06-20
基金项目:国家自然科学基金项目(40902043)
作者简介:石书缘,硕士研究生,研究方向为储层沉积学及地质建模,电子信箱:shi18yuan@163.com

化方面仍然存在不足,且模拟中容易出现河道不连续及河道尺寸与实际情况不符合等情况。为此,许多学者在分析了基于目标的算法具有再现目标体的宏观形态优点的基础上,提出了综合建模的思路——即算法间耦合[3-9]。由于多点地质统计学具有再现微观形态的优势,故寻找合适的算法约束多点地质统计学成为了建模的另一种思路。随机游走算法本是经济学领域[10]的一种研究手段,在油气领域应用改进的时间不长,首次于 1997 年由西安石油大学王家华等[11-12]引入河流相储层随机建模领域,并得到认可。此后,王家华等致力于随机游走过程算法的设计及其应用[13-14]。尽管如此,他们研究的算法局限于二维,并没有在三维地质建模上取得较大的突破。在上述研究基础上,石书缘等利用 Fluvisim 算法[15]中河道构型假设的优势结合 Leader 经验公式,提出了随机游走过程应用于河流相三维建模的方法[16]。但由于河道的加宽模式等问题,算法并没有采用油田数据进行实例应用,仅停留在理论模拟阶段。在进行一系列改进后,本文利用东部某油田的实际数据对再改进后提出的三维随机游走过程算法进行了模拟检验。在此基础上,进一步通过抽稀验证,模拟结果显示,算法的稳健性及实用性均较好。

## 1 改进的三维建模算法简介

随机游走过程的基本原理包括 8 个步骤:(1) 区域网格化,方便以后河道主流线沿着网格节点的迁移;(2) 数据条件化及校正,对河道主流线迁移进行约束;(3) 在此基础上,进行层面的判别,区分模拟工区发育的多期河道,分期模拟;(4) 在每个层面上做河道源头的搜寻,主要是为了找到河道模拟起始点;(5) 在每个发育的河道期次面上,利用加入了蒙特卡罗影响因子的公式计算迁移概率,比较各个方向概率大小,选出概率最大的方向作为下一模拟节点的起始点;(6) 河道主流线的光滑,目的是为了减少模拟河道主流线上面的冗余点;(7) 在每个河道期次面上,利用 Leader 公式计算得到其河道发育的宽度;(8) 利用 Fluvisim 中的剖面构型公式沿着主流线计算河道剖面构型,并利用下层面对其进行约束,沿着河道主流线模拟,即可得到河道的三维模型,至此模拟结束。对于每个点的详细步骤,可见文献[6]和[16],本文不再详细介绍,其中改进后的算法流程如图 1 所示。本文主要详细介绍算法的再改进部分,体现在两个方面:一是在原来的计算迁移概率的基础上,引入了蒙特卡罗因子,增强了随机性;二是对河道加宽模式的改进。

(1) 改进了主流线游走控制,如式(2)和图 2 所示。主要体现在加入了随机因子控制,使游走过程在概率计算的基础上有一定的随机扰动,即具有一定的随机性。其中,式(1)为改进前,式(2)为改进后。

$$P(1\rightarrow ab)=\frac{\mu_{ab}(1/d_{1ab})}{\sqrt{n_x^2+n_y^2}} \qquad (1)$$

$$P(1\rightarrow de)=\frac{\mu_{de}(1/d_{1de})}{\sqrt{n_x^2+n_y^2}}+RDA\cdot\frac{\text{random}(de)}{1000} \qquad (2)$$

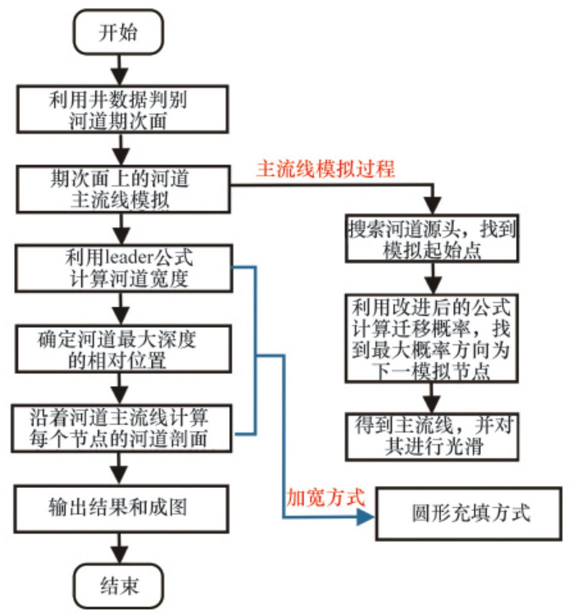



图 1 随机游走过程三维建模流程

Fig. 1 Flow chart of 3D random walk modeling

式中,$P$ 为迁移概率;$d_{1de}=\sqrt{(x_{de}-i)^2+(y_{de}-j)^2}$;$n_x$ 为 $x$ 方向最大网格数,$n_y$ 为 $y$ 方向最大网格数;$\mu_{de}$ 为 $de$ 方向迁移系数(人工设定),并且 $d_{1de}$ 越大,迁移概率越小;$RDA$ 为随机扰动幅度,由建模者设置;random($de$)为随机数,已经取其模值,能够控制随机数之间倍率在 100 以内。1000 用于减小随机数的量级,与概率相匹配,与 $RDA$ 配合达到约束随机因子的目的。

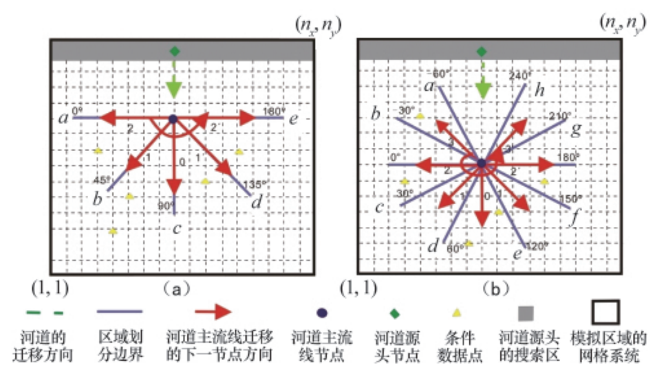
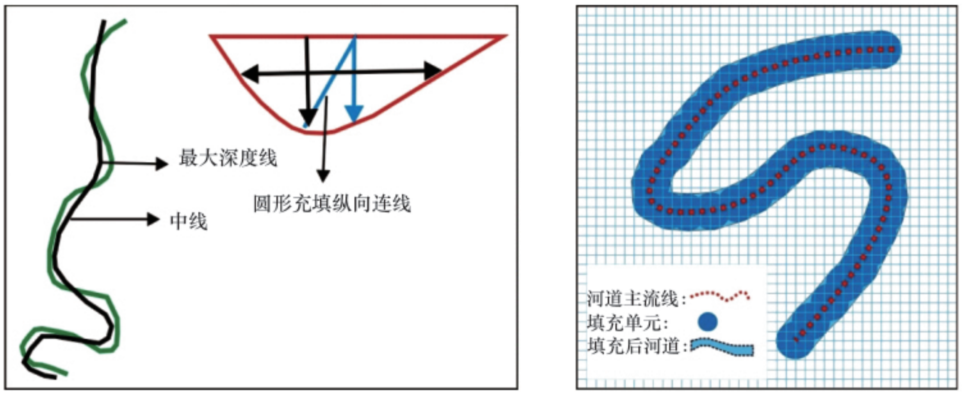



图 2 迁移概率求取模式

Fig. 2 Pattern maps of transmission probability

(2) 改进了加宽模式,如图 3 所示。以前的加宽模式是简化了的 Fluvisim 算法[15],仅直接利用河道宽度及构型公式对河道进行加宽,容易产生河道宽度突变的问题,同时得到的河道构型过于理想,存在太圆滑等不合理之处。改进之后,利用由 Leader 公式计算出来的宽度值一半作为加宽的半径,沿着河道的最大深度线——即深泓线(具体算法流程参考基于目标层次的建模算法 Fluvisim)在整个半径长度范围内进行圆形充填加宽,从模拟效果上看,明显改善了以往在高弯度




(a) 剖面特征

(a) Profile character

(b) 平面特征

(b) Planer character

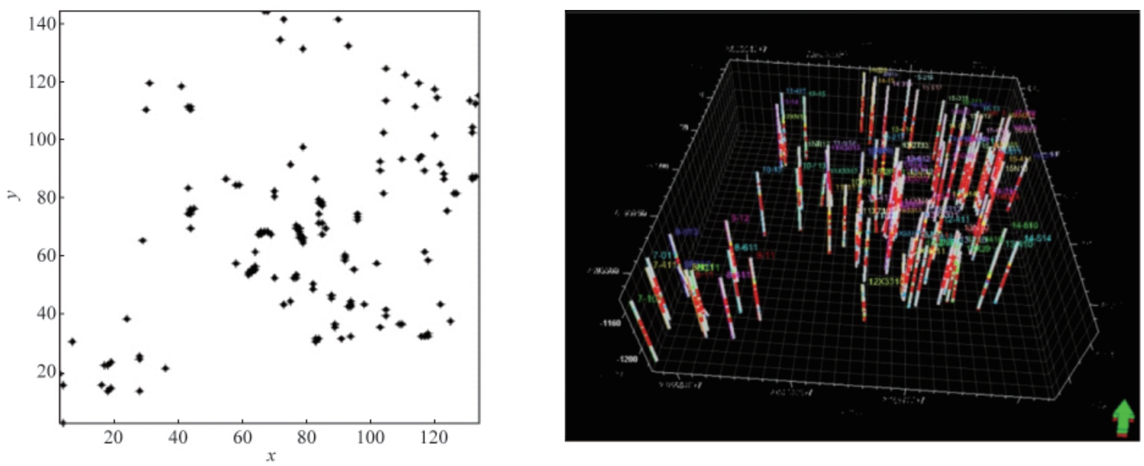
图 3　改进后的河道充填模式

Fig. 3　Channel filling mode after modification

河道上存在宽度突变和河道构型过于圆滑[16]的问题。

## 2　油田实例应用和算法检验

本文对改进方法的测试采用了实际储层数据,利用某油田某工区中的河流相储层测井解释数据,如图 4 所示,经适当处理后得到了能直接用于储层模拟的数据。原始数据中有 104 口井,其中 98 口井钻遇河道砂岩层,其余 6 口未钻遇河道砂岩井的数据当作泥岩做约束处理。经过处理发现砂层厚度约为 19.5m,为多期发育河道,且非均质性非常严重。在对地质基本知识分析基础上,综合考虑工区的实际大小和模拟精度后,将工区单个网格定义为 50m×50m×0.5m,总网格数为 140×145×40=812000 的三维地质体。




(a) 井位坐标

(a) Coordinate of well

(b)相代码图

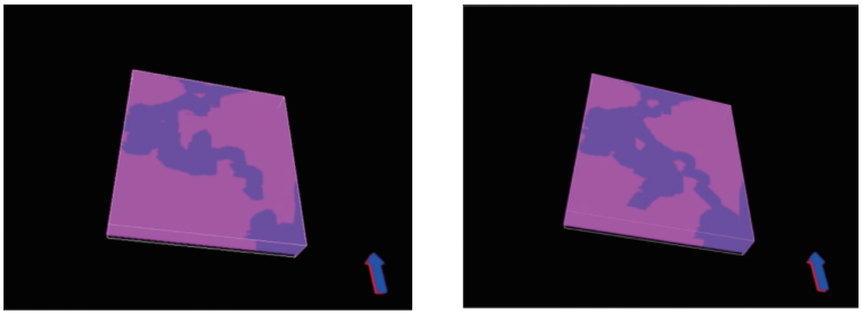
(b) Faces code

图 4　模拟工区井位示意

Fig. 4　Sketch map of simulated area

利用改进的模拟方法对经上述处理的 104 口井数据进行模拟,结果如图 5(a)所示。与地质学家手工制图(图 6)类似,通过利用两者图形显示前的数据对比 (即利用测井数据整理得到的相数据与模拟结果数据对比),模拟结果与原始数据之间的吻合率达 76.5%, 且模拟结果中没有解释的沉积相图的光滑等现象,再现了一些微小局部的沉积相上的变化,说明算法具备地下曲流河储层三维模型实例模拟的能力。

进一步做了抽稀验证模拟,采用的方法是:首先抽稀去掉 30 个条件数据, 把余下的 74 口井的数据当作条件数据。图 5(b)为去掉 30 个条件数据后的模拟结果,对比条件数据抽稀前后的模拟结果,两者吻合率达到 77.3%,说明算法具有一定的稳健性。



(a) 原始条件数据
(a) Original data

(b) 抽稀数据后
(b) After sparsing data

图 5　抽稀验证模拟结果立体显示
Fig. 5　Sparsing simulated results

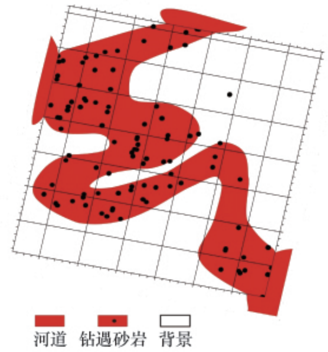
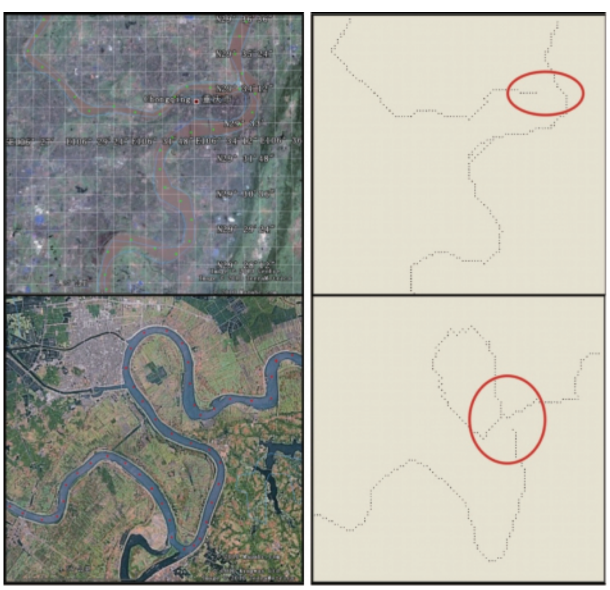



图 6　条件数据的沉积相解释图（仅采用 2 种相）
Fig. 6　Sedimentary facies interpretation map from well data (only two facies used)

## 3　问题展望及可能解决方案分析

结合方法在理论模拟阶段的实例测试和本文的实例模拟,综合分析了各种模拟结果,得出随机游走过程仍然存在以下几个方面的不足,主要表现以下方面。

(1) 从 Google Earth 现代河流的随机游走过程的理论模拟结果显示(图 7(a)),可以看出算法模拟后在复杂河道的交汇处会产生模拟空白区,这个问题在利用它对主流线约束的基于随机游走过程的算法中表现得不够明显,同样能够起到约束的作用[9]。但是在单独的主流线模拟结果中却表现明显。在高弯度河流中,甚至出现不必要的交汇(图 7(b))。如果采用从模拟的各个方向把先前模拟节点层当作起始模拟点,尤其是交汇处需要充分利用条件数据,可能解决好图 7 出现的问题。但这将导致大量重复模拟,加重计算机模拟的负担。



(a) 原始采样
(a) Original data

(b) 模拟主流线显示
(b) Mainstream results

图 7　随机游走目前解决不好的情况
Fig. 7　Bad situations simulated by random walk

(2) 模拟河道的起始点选取困难,算法适应于高密度井网区,但是高密度井网区能找到的模拟河道源头亦多。采用在一定范围内搜索河道源头的算法,并不一定适合于所有的河流,且范围的选取是个难题,选取不好,即可能导致找不到河道源头的情况,也可能出现找到的河道源头过多,导致模拟情况变复杂增加计算机的负担。故可考虑在模拟中对搜索范围进行设置,这样可以达到减少计算机负担的目的。

(3) 模拟算法容易受到条件数据个数的限制,算法本身是基于迁移概率游走的。如果条件数据过少的话,会导致模拟结果简单化,且很容易不符合实际情况。但当条件数据过多时,又会出现不必要的河道。总之,随机游走过程在条件井点多的情况模拟有难度[10]。故可采取建立一种模拟评价标准,设置一个条件数据模拟数量分界点,小于多少条件数据采用什么方式模拟,多于多少条件数据又采取不同的方式模拟。

(4) 河道的宽度和深度之间的关系定论不清晰,因每种类型河流的宽深之间具有不同的经验关系,而在算法设计时采用相同的公式, 故在这个过程中可能会产生一定的误差。针对这种情况,建模者可以通过建立河道宽度和深度之间关系的模式库,在模拟时可根据需求选取不同的公式,或者对不同的公式设置一定的权值,再进行加权计算。

(5) 随机游走过程可以很好地预测河道主流线,但在其它沉积相类型方面的模拟试验不够。对于其他沉积相类型,同样可以利用随机游走过程来建立冲积扇,三角洲平原的水道模型。

## 4　结论

在介绍了三维随机游走过程建模算法基本原理的基础上,对算法在两个方面做了进一步改进。对改进的三维建模算法利用东部某油田的资料做了实例分析,利用测井数据整理与模拟结果对比表明,模拟结果吻合率达到 76.5%,说明算法具备再现实际地下河流相的储层模型的能力。进一步对模拟实例做了抽稀验证分析,模拟结果显示数据抽稀前后的吻

合率达到77.3%,这说明算法具有一定的稳健性。总体而言,从本文中可以归纳出如下认识。

(1)算法改进方面,在迁移概率的计算中,加入了蒙特卡罗影响因子,更符合河流振荡性随机游走发育的特点,得到的模型更具决策性;在河道加宽模式中,沿着主流线利用圆形充填方式,得到加宽后的河道更合理,不会在高曲率处出现宽度突变。

(2)算法应用方面,突破了以往理论模拟的局限,成功地把随机游走过程的三维建模算法应用到油田实例模拟,这不仅提高了储层建模算法的实用能力,而且能够为我国碎屑岩油田(以河流相为主的储层)提高油气采收率起到实际作用。

(3)算法探讨方面,现有算法都有其局限性,尤其是在地质条件复杂的情况下,应该注重选择适合的算法进行建模,同时也应重视对现有算法的改进。

## 参考文献(References)


[1] Haldorsen H H, Lake L W. A new approach to shale management in field-scale models[J]. *SPE Journal*, 1984, 24(4): 447-457.

[2] Strebelle S B, Journel A G. Reservoir modeling using multiple-point statistics [C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 30 September-3 October 2001, New Orleans, LA, US, 2001: 1-11.

[3] 尹艳树, 吴胜和, 张昌民, 等. 基于储层骨架的多点地质统计学方法[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 2008, 38(S2): 157-164.
Yin Yanshu, Wu Shenghe, Zhang Changmin, *et al*. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 38(S2): 157-164.

[4] Hajizadeh A, Safekordi A, Farhadpour F A. A multiple-point statistics algorithm for 3D pore space reconstruction from 2D images [J]. *Advances in Water Resources*, 2011, 34(10): 1256-1267.

[5] 尹艳树, 吴胜和, 翟瑞, 等. 利用Simpat模拟河流相储层分布 [J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2008, 30(2): 19-22.
Yin Yanshu, Wu Shenghe, Zhai Rui, *et al*. *Journal of South-west Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2008, 30 (2): 19-22.

[6] 石书缘, 尹艳树, 冯文杰, 等. 基于随机游走过程的多点地质统计学建模方法[J]. 地质科技情报, 2011, 30(5): 55-60.
Shi Shuyuan, Yin Yanshu, Feng Wenjie, *et al*. *Geological Science and Technology Information*, 2011, 30(5): 55-60.

[7] Yin Y, Zhang C, Yin T, *et al*. A skeleton-based multiple point geostatistics for reservoir stochastic modeling [C]//12th Conference of International Association for Mathematical Geology, Beijing, China, 27 August, 2007: 587-590.

[8] Liu Y H, Safian A. A study of static modeling factors that are critical to flow simulation [C]. International Petroleum Technology Conference, 3-5 December 2008, Kuala Lumpur, Malaysia, 2008.

[9] Okabe H, Blunt M J. Pore space reconstruction of vuggy carbonates using microtomography and multiple-point statistics [J]. *Water Resource Research*, 2007, 43: W12S02, doi: 10.1029/2006WR005680.

[10] 雷钰丽, 李阳, 王崇骏, 等. 基于权重的马尔可夫随机游走相似度度量的实体识别算法[J]. 河北师范大学学报: 自然科学版, 2010, 34(1): 26-30.
Lei Yuli, Li Yang, Wang Chongjun, *et al*. *Journal of Hebei Normal University: Natural Science Edition*, 2010, 34(1): 26-30.

[11] 王家华, 张团峰. 油气储层随机建模 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
Wang Jiahua, Zhang Tuanfeng. Oil and gas reservoir stochastic modeling[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.

[12] Wang J H, Zhang T F, Huang C D. The simulation of braided channels in two dimensions with random walk model [C]//Zhao P, Agterberg F P, Jiang Z. Mathematical Geology and Geoinformatics: Proceeding of the 30th International Geological Congress, Zeist: VSP, 1997, 25: 115-124.

[13] Wang J, Wang X, Ren C. 2D conditional simulation of channels on wells using a random walk approach [J]. *Computers & Geosciences*, 2009, 35(3): 429-437.

[14] 王家华, 周润. 自回避随机游走算法的研究与应用 [J]. 软件导刊, 2010, 9(11): 76-78.
Wang Jiahua, Zhou Run. *Software Guide*, 2010, 9(11): 76-78.

[15] Deutsch C V, Wang L. Hierarchical object-based stochastic modeling of fluvial reservoirs[J]. *Mathematical Geology*, 1996, 28(7): 857-880.

[16] 石书缘, 尹艳树, 冯文杰. 随机游走过程的河流相三维建模 [J]. 复杂油气藏, 2011, 4(3): 38-41.
Shi Shuyuan, Yin Yanshu, Feng Wenjie. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2011, 4(3): 38-41.


**(责任编辑　胡少卿,朱宇)**

**·科学共同体介绍·**

## 中国农业机械学会

中国农业机械学会(Chinese Society for Agricultural Machinery)成立于1963年3月,**刘仙洲**、**郭栋才**、**何光远**、**李守仁**、**高元恩**、**陈志**等历任学会理事长。

中国农业机械学会是中国科学技术协会所属的全国一级学会,最高领导机构是全国会员代表大会,办事机构设在中国农业机械化科学研究院。学会现有会员12500余人,高级会员300多人,分支机构21个。

中国农业机械学会旨在推动科技人员的创造发明和工作积极性,鼓励和奖励为繁荣科技事业,促进农业机械(化)的发展和行业的进步,为在学术研讨、科技交流、技术咨询、科学普及、教育培训、编辑出版、成果推广和国际合作等工作中做出贡献的学会组织、学会工作人员和科技工作者专门设立了中国科学技术发展基金会农业机械发展奖励基金。

中国农业机械学会或分科学会主办的学术类和科技类刊物有10余种,主要有《农业机械学报》、《农业机械》、《中国农机化》等。

学会1989年加入国际农业工程学会。自1978年以来,先后与世界各国的农业机械学会、农业工程师学会、农业工程学会、工程师学会、透平机学会、地面机器学会等学术团体建立了联系。

中国农业机械学会现为第9届理事会,有理事162人、常务理事54人。**罗锡文**任理事长,**李树君**任秘书长。

**(责任编辑　秦改)**