

多点地质统计学建模的发展趋势

石书缘¹, 尹艳树², 冯文杰³

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 长江大学 地球科学学院, 湖北 荆州 434023;
3. 中国石油大学 地球科学学院, 北京 102249)

摘要:从算法研究、训练图像处理和实际应用三个方面详细解剖了国内外多点地质统计学的发展历程,在此基础上,分析了多点地质统计学主流的几种算法的核心原理、适用范围及优缺点,以此来对储层建模的发展趋势作出展望。目前,多点地质统计学虽是随机建模的一种前沿研究热点,但由于其尚未成熟,仍需对建模算法进行研究。为此,在前人研究的基础上,重点分析了多点地质统计学的发展趋势:合理处理训练图像;合理利用软信息;选择合适的相似性方法;选择合适的标准化方法;合理利用平稳性;算法间的耦合;选择合适的过滤器;拓展缝洞型碳酸盐岩模拟。最后,提出多点地质统计学在储层建模方面,应从增加储层的模拟区域、提高模拟精度、扩大储层相的模拟范围和提高计算机模拟效率等方面进行改进。

关键词:储层建模;多点地质统计学;模拟精度;缝洞型碳酸盐岩模拟;发展趋势

中图分类号: TE319

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2012)04-0655-06

目前,中国东部大部分油田进入高含水开发阶段,在新区勘探难度加大的情况下,对老油田进行挖潜寻找剩余油及拓展深层碳酸盐岩勘探开发已成为当前油气勘探开发的几个主要发展方向。自 Haldorsen 等^[1]发表第一篇油气储层建模方面的论文以来,储层建模技术得到迅速推广和应用。储层建模包括确定性建模及随机建模^[2]。随机建模运用的方法主要是地质统计学方法,但传统的地质统计学受限于两点变差函数,不能很好地再现复杂的储层地质特征,因此新发展起来的多点地质统计学方法备受关注。在国外,Guadiano 等^[3]提出了多点地质统计学算法,由于需要重复扫描训练图像,对计算机的性能要求比较高,并没有广泛地用于实例研究;Strebelle 等^[4]在此基础上将多点统计概率保存于“搜索树”中,提出了 Snesim 算法,解决了需要大量重复扫描训练图像的问题,大大提高了计算效率,之后,多点地质统计学算法才真正成为一种可实用的随机建模算法在国际上流行开来。此后,许多学者对 Snesim 算法进行了改进,从训练图像着手的,主要体现在对动态训练图像的处理及训练图像库的建立上;从算法本身着手的,如提出 Simpat 算法和 Filtersim 算法等。在中国,裘怿楠等^[5-6]推动了中国开发储层地质的研究,但在储层建模领域,一直停留在定性的地质模型解剖^[7]和传统的基于两点的变

差函数方法^[8-9]上。直到吴胜和等^[10]全面系统地介绍了多点地质统计学原理及其应用,储层建模学者才将焦点转向多点地质统计学。近年来,有不少学者在多点地质统计学方面^[11-12]做了很多工作,但仍然主要以引进国外算法结合中国油田实际应用研究为主,并没有太多的理论算法创新。为此,笔者认为,了解整个多点地质统计学的发展历程和主流算法的基本原理及其适应范围,对于中国多点地质统计学乃至整个储层建模领域都有着重要的作用。

1 研究进展

1.1 国外

在算法研究上,Guadiano 等^[3]提出了多点地质统计学算法,但当时算法为迭代算法,需要耗费大量的计算机内存空间和 CPU,受限于当时的计算机水平,并没有得到推广应用。此后,Stebelle 提出的 Snesim 算法可应用于实际研究中,但它仍然是基于概率估计,不能再现非平稳地质现象。为此,在数字图像形态学和计算机视觉^[13]研究的基础上,结合模式识别等手段,Arpat 等^[14]提出了 Simpat 算法。由于 Simpat 算法是采用单点的数据事件来计算相似性的,具诸多局限性,在条件数据少的情况下会出现模拟信息度缺乏和多种相似模式,为此,Zhang 等^[15-17]提出了利用整体数据事件代替单点数据事

件的 Filtersim 算法;还提出利用过滤器进行模式分类,把模式空间划分为几个等值的模式空间,再进行相似模式判别,达到增强扫描速率、提高模拟效率、节省内存空间的效果。Filtersim 算法最大的改进,在于连续性变量的模拟功能突破了传统相控建模的局限,解决了碳酸盐岩物性不直接受岩相控制的模拟问题。针对条件化处理问题,Suzuki 等^[18]提出了一种新的方法——实时后处理方法(PRTT),其主要思想是在某一点上如果条件化失败,不是去掉一些条件数据缩小数据模板,而是返回到上一步,对前面模拟的数据进行修改。Eskandari 等^[19]利用最优化的空间模拟,采用独特的基于生长的模式再现方式,提出了新的 Growthsim 算法,它能模拟多个点的模式并且条件化到多点数据事件,模式从已有的井或已被模拟的位置向外生长,并允许根据邻近数据所揭示的数据模式对已有数据模式进行推导和模拟。M Honarkhah 和 Jef Caers^[20]在 Filtersim 等基于模式的算法上又提出了综合考虑多个模式之间关系的 Dispat 方法。

在训练图像的处理上,针对平稳性问题,不少学者提出了解决方法^[21-22],大多采用将训练图像划分成多个小训练图像,再分别对每个训练图像模拟,得到模拟结果后采用某种方式进行整合,得到动态训练图像的模拟结果。针对训练图像的单一性问题,Zhang 和 Bezrukov 等^[23-24]提出了建立训练图像库的问题,这样方便进行模式统计。Chugunova 等^[25]提出建立主变量训练图像与附加信息训练图像之间的经验统计关系。

在实际应用上,针对不同模拟方式可能产生不同的模拟结果,Maharaja 等^[26]提出了不同相分级别模拟的方法。Stien 等^[27]对 Snesim 算法进行了改进,允许删除条件数据点处的值,而不是直接删除条件数据点。当所有节点被模拟后,再对那些被删掉值的数据点进行重新模拟。Hurley 等^[28]利用 Filtersim 方法直接对并筒图像进行了模拟,解决了以前需要单独建立训练图像预处理的问题。

1.2 国内

Snesim 算法引入中国后,在整体上,相比国外对于算法理论的改进而言,中国学者对理论研究较少,主要集中在算法的应用上。其中,冯国庆等^[29]用多点地质统计学模拟了东部某砂岩油藏岩相分布;张伟等^[30]采用多点地质统计学并结合相控建模模拟,用相模型来指导孔渗建模,在实践中得出了多点地质统计学方法不仅忠实于井点数据,而且可以在使用的训练图像中加入地质概念,从而对随机模

型进行地质约束;张挺等^[31-32]提出了利用多点地质统计学方法进行微观孔隙图像的重构,提出了基于多点地质统计学的多孔介质重构方法。在算法设计上,没有涉及到基本原理的改进。尹艳树等^[33]在分析了基于目标的 Fluvsim 算法的优点(容易再现目标形态)和 Simpat 方法的优点(再现微观形态特征)基础上,进行了算法间的整合,提出了基于储层骨架的多点地质统计学方法;石书缘等^[12]在改进随机游走过程的基础上,利用其精确再现的河道主流线对数据事件进行约束,提出了基于随机游走过程的多点地质统计学方法。

2 主流算法概况

2.1 Snesim 算法核心原理及其优缺点

对于任意 1 个给定的数据样板 τ_n 和 1 个训练图像 T ,定义训练图像 T_n 为诸点的集合,使得以 u 为中心的 τ_n 中的所有结点都在 T 内。 T_n 的大小用 N_n 表示。在应用 τ_n 对 T 进行扫描的过程中,当训练图像中 1 个数据事件与数据样板的数据事件 DEV 相同时,称为 1 个重复。这样,在平稳假设的前提下,数据事件 DEV 在训练图像中的重复数 $c(DEV)$ 与 N_n 的比值,则相当于该数据事件出现的概率,即多点统计,通过这样计算就能得到整个多点概率的模式表^[4]。求取搜索树中存储的概率计算公式为

$$\text{Prob}\{s(u_\alpha) = s_{k_\alpha}; \alpha = 1; \dots, n\} \approx \frac{c(DEV)}{N_n},$$

式中: $s(u_\alpha)$ 为数据事件值; s_{k_α} 为第 k 个相的属性值; α 为相的类型; n 为最大相类型数; $c(DEV)$ 为数据事件 DEV 出现的次数; N_n 为训练图像尺寸大小。

该算法是利用训练图像代替了两点之间的变差函数,相较于基于变差函数的序贯高斯模拟等算法而言,它能再现具复杂结构的储层构型。但是它仍然是基于概率估计的算法,具不稳定性,难以再现非平稳的地质现象,容易造成模拟河道的中断,且由于随机抽样中的不确定性,导致在目标形态再现方面存在缺陷。故 Snesim 方法适合于稳定训练图像的模拟,且对不同类型的河道需要采用不同的模拟网格尺寸。

2.2 Simpat 算法核心原理及其优缺点分析

Arpat^[14]在 Snesim 算法基础上,提出了 Simpat 算法,核心是加入了相似性计算方法,以此来比较待估点处数据事件与训练图像中数据模式之间的相似性,并用最相似的数据模式整体替换掉待估点处数据事件。而在相似性计算中,Arpat 采用的是曼哈顿距离函数,其中数据事件与模式之间的距离函数为

$$d[dev_T(u), pat_T^j] =$$

$$\sum_{\alpha=0}^{n_T} |dev_T(u + h_\alpha) - pat_T^j(h_\alpha)|,$$

式中: $d[dev_T(u), pat_T^j]$ 为曼哈顿距离; $dev_T(u)$ 为已知点 u 处的数据事件; T 为使用的模块; pat_T^j 为第 j 个训练模式; j 为模式指数; α 为训练图像的数量; n_T 为模块中的最大模拟节点数目; $dev_T(u + h_\alpha)$ 为待估点 $(u + h_\alpha)$ 处的数据事件; $pat_T^j(h_\alpha)$ 为训练图像内的数据模式。

为了加强对地质现象方向性及数据量权重的考虑,对曼哈顿距离计算相似性时,可进一步考虑对主变量训练图像和次变量训练图像分开对待,判别出权重,则数据事件与模式之间的距离函数为

$$d^{1,2}[dev_T(u), pak_T^j] = w \times d^1[dev_T^1(u), pak_T^{1j}] + (1 - w) d^2[dev_T^2(u), pak_T^{2j}],$$

式中: $d^{1,2}[dev_T(u), pak_T^j]$ 为综合 2 类数据后的曼哈顿距离; w 为主变量训练图像所占的权重; $d^1[dev_T^1(u), pak_T^{1j}]$ 为主变量训练图像的曼哈顿距离; $dev_T^2(u), pak_T^{2j}$ 为次变量训练图像的曼哈顿距离。

相较于基于概率估计的 Snesim 算法而言, Simpat 采用单点数据模式估计的方法,将地下的储层构型看作是一幅整体图像,然后利用上面介绍的距离函数计算数据事件和模式之间的距离函数计算两者之间的相似性,利用相似程度整体替换。这样的话强化了地质模式的选择性,避免了单点概率估计所带来的随机不确定性。但在条件数据较少的情况下,该算法的模拟结果仍然会出现连续性的中断,且需要耗费大量的 CPU,故该算法在实用中较少。

2.3 Filtersim 算法核心原理及其优缺点分析

为了进一步改进多点地质统计学算法, Zhang^[15] 提出了利用过滤器先对训练模式进行过滤器分值。在三维中,主要利用三维过滤器函数计算,其主要表达式为

$$S_{\tau,y}(i,j,k) =$$

$$\sum_{z=-m_2}^{m_2} \sum_{y=-m_1}^{m_1} \sum_{x=-m_1}^{m_1} f_\gamma(x,y,z) T(i+x,j+y,k+z),$$

式中: $S_{\tau,y}(i,j,k)$ 为训练图像模式中 (i,j,k) 点处的应用第 γ 个过滤器后的计算值; m_1 为平面模块上 x 和 y 方向最大尺寸的 $1/2$; m_2 为 z 方向的最大尺寸的 $1/2$; $f_\gamma(x,y,z)$ 为定义于 $n = (2m_1 + 1)^2 (2m_2 + 1)$ 个象元位置上的第 γ 个过滤器; $T(i+x,j+y,k+z)$ 为连续或离散型三维训练图像 T 在 $(i+x,j+y,k+z)$ 位置的值。

在通过过滤器函数计算分值分类的基础上,采

用距离函数来重组相似模式,即

$$d(DEV, PROT) =$$

$$\sum_{t=1}^3 w(t) \cdot \left[\sum_{i=1}^{n_t} |x^{(t)}(i_t) - y^{(t)}(i_t)| / n_t \right],$$

式中: DEV 为数据事件; $PROT$ 为当前模拟网格水平上的训练模型模块; t 为数据类型, t 为 1 时表示原始数据, t 为 2 时表示当前网格图中早期模拟值, t 为 3 时表示在早期的粗网格中模拟得到模式的匹配值; i_t 为 t 类型数据的像元点; n_t 为像元点的最大值; $x_t(i_t)$ 为 x 方向的 t 类数据的模式值; $y_t(i_t)$ 为 y 方向的 t 类数据的模式值; $w(t)$ 为各类型数据的权重, $w(1) > w(2) > w(3)$ 。通过上式识别出最相似模式后,再用整体模式代替未知事件进行模拟。这样就能减少对计算机内存空间的需求。

该算法是对 Simpat 算法的进一步优化,基本原理相似,在 Simpat 的基础上,利用整体模式代替单点模式,且加入了过滤器对模式进行分类,减少了计算机的负担。由于该算法对整体模式进行了过滤处理,故能直接模拟连续型变量,这是该算法较前两种算法的优势。但 Filtersim 算法在河道构型模拟方面,仍具不稳定性,没处理好河道的连续性问题。

2.4 Growthsim 算法核心原理及其优缺点分析

该算法由 K. Eskandari^[19] 在 2007 年的世界地质统计学大会上提出,主要在 Snesim 的基础上进行改进,采取了利用最优化空间模拟和独特的基于生长算法进行模式重现。多点模拟结构允许空间模式的参数和模拟延伸,这是在相邻区域的空间模式的条件下进行的。其中相应模式的概率是通过单点贝叶斯定理: $P(A|B) = \frac{P(A,B)}{P(B)}$ 来计算的,其

中: A 为模拟模式, B 为条件模式, $P(A,B)$ 为从多点直方图中得到的模拟和条件模式的联合概率, $P(B)$ 是来自原始直方图的条件模式的先验概率。

该算法的优势在于可以连续地逐层地模拟空间模式的三维构型,缺点在于不够稳定,只能模拟平稳的地质现象,并不能再现非平稳现象。

3 发展趋势

总之,多点地质统计学的发展迄今已有 10 多年的研究历史,但作为一种实用算法还不到 10 年。从整个发展历程来看,算法的改进都是实践—理论创新—再实践的过程。从算法核心原理及其适用性的分析上,了解到多点地质统计学必是储层建模未来的发展趋势之一。但迄今为止,算法大多仍尚未成熟,且停留在理论研究阶段,不能应用于各种类型储

层模拟中(尤其是非河道储层)。几种核心算法始终没有解决好连续性问题,算法本身没有实质性的改进,主要体现在模拟结果显示和提高计算效率上。笔者在综合了中外多点统计学的研究现状及主流算法的应用实例分析的基础上,认为多点地质统计学应用于储层随机建模中需从以下 8 个方面进行深入研究。

3.1 训练图像问题

训练图像尺度。训练图像可看作是地质模式的集合,故地质模式信息的多少可由训练图像的尺度来表征,即大尺度的训练图像能包含更多的结构信息,小尺度的训练图像结构信息少。结构信息多,模拟精度高,但需更耗费更多的 CPU 模拟时间,结构信息小则相反,寻找训练图像模拟尺度大小与计算机模拟效率之间的平衡是未来发展趋势。

动态训练图像的划分方式。模拟已不再局限于稳定性训练图像的模拟,对动态训练图像的模拟目前主要采用对训练图像划分的方式。因不同的划分方式将产生不同的模拟结果,故建立评价划分方式的标准及建立训练图像库成为可能的选择方法。

3.2 合理利用软信息

由于不同的数据之间具有不同的模式和量纲,在软信息对硬信息指导过程中,选择两者的网格化方法成为重点。可以采取软信息(如地震信息等)通过与硬信息和原型模型之间直接建立对应的训练图像;或者在 2 类数据独立情况下分别建立训练图像,并分别应用井信息和地震信息计算条件概率,然后将 2 个概率综合为 1 个条件概率;或在两者不独立情况下求取它们对综合条件概率贡献的权重。总之,对具体的模拟工区,可能采用不同的综合方法,今后可把建立一套适合于不同工区的评价体系及怎样提高软信息利用效率作为研究重点。

3.3 相似性方法的选择

由于 Simpat 算法和 Filtersim 算法都采用了相似性距离函数,随着 2 种算法在油田实际应用中的扩大,相似性距离函数的采用对模拟结果产生的影响将变得更加明显,采用哪种相似性距离函数也就成了一个实际问题。目前 Simpat 算法采用曼哈顿距离函数来计算相似性,而实际上在多数情况下,更多是采用欧式距离函数来进行分类及相似性划分,因此,对其他相似距离函数的考虑是一种必然,尤其是对于不同储层而言。

3.4 标准化方法的选取

各种地质体数据(地质的、储层的、地震的等)之间的量纲实际上并不相同,为综合各种不同类型

的数据,可考虑对不同类型数据标准化,进而能够对各种类型数据进行整合,达到协同模拟的目的。因此,标准化方法的选择将对模拟结果产生影响,如采用主观标准化,可能与实际偏差较大,如果采用客观方法,方法的选择将是面临的难题。

3.5 合理利用平稳性

只要是随机建模就需要考虑平稳性的影响,条件数据少是影响平稳性的关键因素。在实际研究中,识别更多的储层信息、建立合适的储层规模、在建模中分区对待等非平稳性特征,都是在充分挖掘可作为地质原始条件的数据,这将是解决平稳性问题的一条重要思路。目前储层的研究主要集中于二维研究,把二维数据向三维数据甚至多维数据的转换也将是今后研究的重点。

3.6 算法间耦合

多点地质统计学与其他建模方法进行耦合共同服务于储层建模,如尹艳树等^[33]加入河道中线对多点统计学约束提出的基于储层骨架方法,并提到了算法间耦合的重要性^[34],在 Fluvisim 算法的基础上提出了一种新的曲流河点坝建模方法^[35];Liu 等^[36]在基于象元方法中提到了使用流线模拟的重要性。因此,一味地独立发展多点地质统计学算法,可能并不是最完美的,利用其他方法的优势,对多点统计学再现储层宏观形态方面的劣势进行补充,将是今后储层建模重点考虑的方向之一。

3.7 合理选择过滤器

随着 Filtersim 算法应用的推广,合理选择过滤器必然提到重要的地位。很显然,单纯使用默认过滤器不能满足模拟的需求,那么,如何对不同的储层设计不同的过滤器均值划分方案,得出每类储层适应的过滤器类型,需要储层建模工作者在今后的实践中回答。

3.8 拓展缝洞型碳酸盐岩的模拟

在碳酸盐岩储层建模方面,多点统计学建模集中于常规储层模型的建立。如 Zhang 等^[16]利用 Filtersim 算法对碳酸盐岩进行了三维孔隙结构的模拟,Hajizadeh 等^[37]利用二维训练图像对常规孔隙空间进行了三维模拟,而 Okabe^[38]虽然利用多点地质统计学模拟孔洞型碳酸盐岩,但也还仅仅是理论探讨,并不能用于实际储层模拟,尤其是无法模拟我国塔里木盆地深层的缝洞型碳酸盐岩。故如何对算法作出改进,使其能够模拟复杂的缝洞型碳酸盐岩储层,是建模学者需要研究的方向。

4 结束语

地质过程的复杂性导致了地质现象的复杂性,

增加了储层模拟预测的难度。地下的具体情况是不能直接看见的,建模者扮演的就是揭开地下储层特征的角色。纵观当今建模方法的形势,多点地质统计学实为储层地质建模者的一种揭开储层特征的最佳工具。

总之,由于储层建模具有不确定性,运用多点地质统计学进行随机建模,应从增加储层的模拟区域、提高模拟精度、扩大储层相的模拟范围、节省模拟时间、提高计算机模拟效率等方面努力,达到减少或消除不确定性结果的目的,从而更好地解决储层预测问题。目前,最主要的还是解决计算效率和模拟精度的问题,不能一味地依靠计算机的发展来提高效率,而更重要的是从算法本身着手。针对我国在碎屑岩储层中发现新的油气资源难度加大的情况,如何在碳酸盐岩中找到更多的油气,利用较少的条件资料得到预测的地质模型,为勘探开发做出决策,是一个关键性的问题。前人已经在碳酸盐岩建模方面做了开创性的研究,虽然仅仅局限于理论模拟;如何将理论模拟结合实际,尤其是针对中国海相碳酸盐岩后期改造严重的特点,如何利用多点地质统计学模拟复杂的缝洞型碳酸盐岩储层,是今后需要重点攻克的方向。希望有更多的人参与算法研究,使算法更加成熟,更加适合于地下储层构型的模拟,更好地服务于油气工业的勘探开发。

参考文献:

- [1] Haldorsen H, Lake L W. A new approach to shale management in field-scale models [C]//SPE 10976, 1984, 447 - 457.
- [2] 吕晓光,王德发,姜洪福. 储层地质模型及随机建模技术[J]. 大庆石油地质与开发, 2000, 19(1): 10 - 15.
- [3] Guardiano F and Srivastava R M. Multivariate geostatistics: beyond bivariate moments [M]. In Soares, A. Geostatistics-Trioia, Kluwer Academic Publ., Dordrecht. 1993: 133 - 144.
- [4] Strebelle S, Journel A. Reservoir modeling using multiple-point statistics [C]//SPE 71324, 2001.
- [5] 裘怿楠. 储层地质模型[J]. 石油学报, 1991, 12(4): 55 - 62.
- [6] 裘怿楠,贾爱林. 储层地质模型 10 年[J]. 石油学报, 2000, 21(4): 101 - 104.
- [7] 周银邦,吴胜和,岳大力,等. 复合分流河道砂体内部单河道划分[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(2): 4 - 8.
- [8] 郎静,梁峰,侯伯刚. 油藏精细描述技术在歧南西斜坡隐蔽油气藏勘探中的应用[J]. 物探与化探, 2006, 30(2): 123 - 128.
- [9] 刘鸿博,周文,郑军,等. 塔河 9 区三叠系下油组油藏精细地质建模[J]. 物探与化探, 2010, 34(2): 242 - 245.
- [10] 吴胜和,李文克. 多点地质统计学理论、应用与展望[J]. 古地理学报, 2005, 7(1): 137 - 143.
- [11] 尹艳树,吴胜和. 提高河流相储层建模精度的河道中线约束方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(6): 78 - 81.
- [12] 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算法[J]. 地质科技情报, 2011, 30(5): 55 - 60.
- [13] Duda O, Hart P, Stork D. Pattern classification [M]. 2nd edition. New York: John Wiley & Sons Inc, 2001.
- [14] Arpat G B. Sequential simulation with patterns [D]. California, USA: Stanford University, 2005.
- [15] Zhang T F. Filter-based training pattern classification for spatial pattern simulation [D]. California: Stanford University, 2006.
- [16] Zhang T, Bombarde S, Strebelle S, et al. 3D porosity modeling of a carbonate reservoir using continuous multiple-point statistics simulation [C]//SPE 96308, 2006.
- [17] Zhang T F, Switzer P, Journel A G. Filter-based classification of training image patterns for spatial simulation [J]. Mathematical Geology, 2006, 38(1): 63 - 80.
- [18] Suzuki S, Strebelle S. Real-time post-processing method to enhance multiple-point statistics simulation [C]//Petroleum Geostatistics, 2007, Cascais, Portugal: 10 - 14.
- [19] Eskandari K, Srinivasan S. Growthsima multiple point framework for pattern simulation [C]//Petroleum Geostatistics, Cascais, Portugal, 10 - 14 September 2007.
- [20] Honarkhah M, Caers J. Stochastic Simulation of Patterns Using Distance-Based Pattern Modeling [J]. Mathematic Geoscience, 2010, 42: 487 - 517.
- [21] Wu J. 4D seismic and multiple-point pattern data integration using geostatistics [D]. California, USA: Stanford University, 2007.
- [22] Manuel L, Carrera J. Application of multiple point geostatistics to non-stationary images [J]. Mathematical Geoscience, 2009, 41: 29 - 42.
- [23] Zhang T F, McCormick D, Hurley N, et al. Applying multiple-point geostatistics to reservoir modeling a practical perspective [C]//Petroleum Geostatistics, 2007, Cascais, Portugal: 10 - 14.
- [24] Bezrukov A V, Davletova A R, UfaNIPlneft-Ltd R N. Methods of multiple-point statistics in geological simulation practice: prospects for application [C]//SPE 135911, 2010.
- [25] Chugunova T, Hu L Y, Lerat O. Conditioning a process-based fluvial model using a non-stationary multiple-point statistics approach [C]//Petroleum Geostatistics, Cascais, Portugal: 10 - 14.
- [26] Maharaja A, Journel A. Hierarchical simulation of multiple-facies reservoirs using multiple-point geostatistics [J]. SPE 95574, 2005.
- [27] Stien M, Abrahamsen P, Hauge R, et al. Modification of the algorithm [C]//Petroleum Geostatistics, Cascais, Portugal: 10 - 14.
- [28] Hurley N F, Zhang T F. Method to generate full - bore images using borehole images and multipoint statistics [C]//SPE 120671, 2011.
- [29] 冯国庆,陈浩,张烈辉,等. 利用多点地质统计学方法模拟岩相分布[J]. 西安石油大学学报, 2005, 20(5): 9 - 14.
- [30] 张伟,林承焰,董春梅. 多点地质统计学在秘鲁 D 油田地质建模中的应用[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(4): 24 - 28.
- [31] 张挺. 基于多点地质统计的多孔介质重构方法及实现 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
- [32] 张挺,卢德唐,李道伦. 基于二维图像和多点统计方法的多孔介质三维重构研究 [J]. 中国科学技术大学学报, 2010, 40(3):

271 - 277.

- [33] 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, 2008, 38(增刊 II): 157 - 164.
- [34] 尹艳树, 张昌民, 李玖勇, 等. 多点地质统计学研究进展与展望[J]. 古地理学报, 2011, 13(2): 245 - 252.
- [35] 尹艳树, 张昌民, 李少华, 等. 一种曲流河点坝侧积层建模的新方法[J]. 石油学报, 2011, 32(2): 315 - 319.
- [36] Liu Y H, Safian Atan. A study of static modeling factors that are critical to flow simulation[C]//SPE 12894, 2008.
- [37] 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, doi:10.1016 /j. advwtres. 2011.06.003.
- [38] Okabe H, and Blunt M J. Pore space reconstruction of vuggy carbonates using microtomography and multiple - point statistics[J]. Water Resour. Res., 2007, 43, W12S02, doi: 10.1029/2006WR005680.

THE DEVELOPMENT AND PROSPECT OF MULTIPLE-POINT GEOSTATISTICS MODELING

SHI Shu-yuan¹, YIN Yan-shu², FENG Wen-jie³

(1. Research Institute of China Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 2. School of Geosciences, Yangtze University, Jingzhou 434023, China; 3. China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Starting with algorithm designing, training image, and practical application, the authors analyzed multiple-point statistics research trends both in China and abroad. On such a basis, the core principles of the main four MPS algorithms, their applicable ranges and advantages as well as disadvantages were analyzed, so as to forecast the trend of reservoir modeling. Multiple-point geostatistics is an international forefront research tool in stochastic modeling; nevertheless, as the algorithm is not yet mature, it should be further improved. On the basis of previous researches, the existing problems of the multiple-point geostatistics that need to be modified and the direction of the processing of training images are proposed, such as suitable processing of training image, choice of similarity methods, choice of standardized data, smoothing, coupling among algorithms, and expansion of the simulation extent for fractured-vuggy carbonate reservoir. In order to improve the usage of multiple-point geostatistics for reservoir stochastic modeling, we should spare no efforts to increase the simulation area, improve simulation accuracy, expand the scope of simulation of reservoir types, save simulation time and improve simulation efficiency.

Key words: reservoir modeling; multiple-point geostatistics; simulation accuracy; fractured-vuggy carbonate; reservoir; development trend

作者简介: 石书缘(1987 -), 男, 中国石油勘探开发研究院在读硕士研究生, 从事储层沉积学及储层地质建模方面研究。