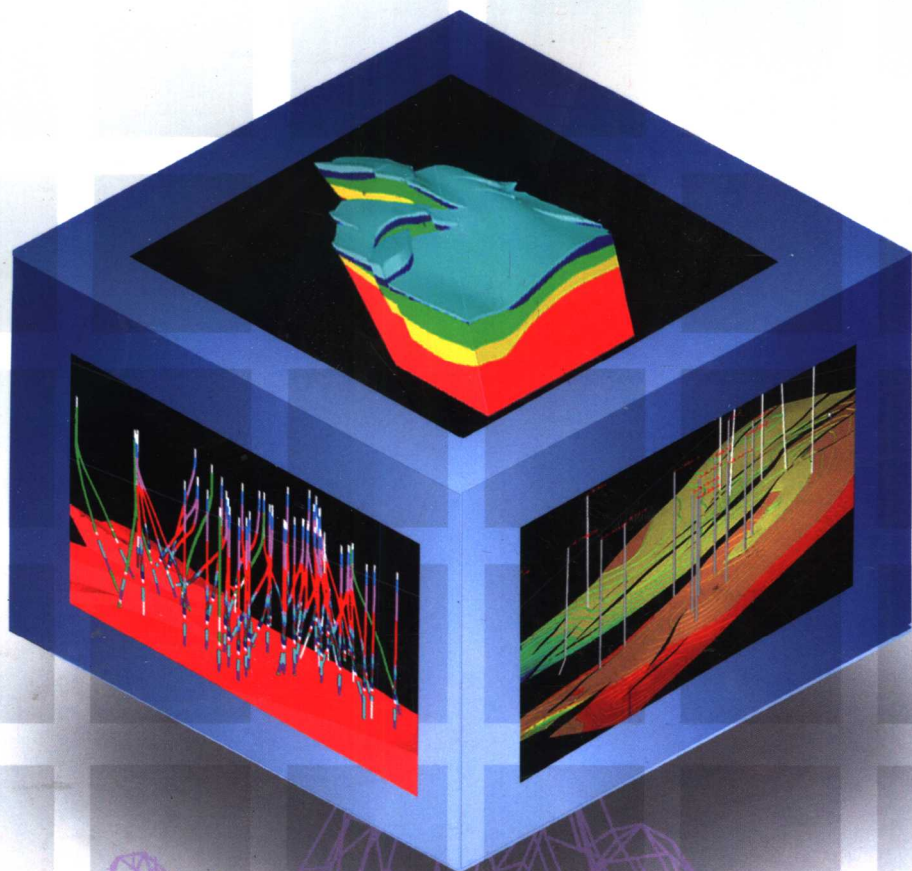
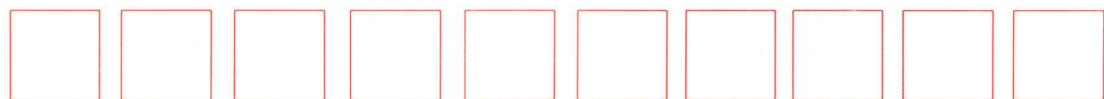


李少华 尹艳树 张昌民 著

储层随机建模系列技术



石油工业出版社
PETROLEUM INDUSTRY PRESS

国家自然科学基金 (40602013、40572078)、油气资源与勘探技术
教育部重点实验室联合资助

储层随机建模系列技术

李少华 尹艳树 张昌民 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书较详细地介绍了“剩余资源研究小组”(3RG)在十多年的研究工作中在储层随机建模方面所取得的一些成果,主要包括建模数据管理和统计分析、建模算法的改进与创新、随机建模技术的实际应用经验以及煤层气储层建模等多个方面。

本书可供从事油气藏描述方面研究的科研工作者及相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

储层随机建模系列技术 / 李少华, 尹艳树, 张昌民著.

北京: 石油工业出版社, 2007.7

ISBN 978-7-5021-6156-9

I. 储…

II. ①李…②尹…③张…

III. 储集层 - 建立模型

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 097876 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.cn

发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2007 年 7 月第 1 版 2007 年 7 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 12

字数: 306 千字 印数: 1—1000 册

定价: 40.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

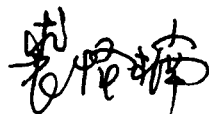
序

储层随机建模技术的出现至今刚 20 多年，目前已经成为现代油藏描述和油藏管理中必不可少的常规技术，在油气田开发中得到了广泛的应用，并取得了很好的效果。这是因为储层随机建模技术把地质与数学、地质统计学以及计算机科学紧密地结合在一起，使地质工作者能够充分利用现代计算机软、硬件的强大功能，链接地球物理、地质和石油工程进行多学科综合一体化的科学研究，对地下油气储层进行精细的三维定量表征，并且定量评价不同勘探开发阶段的各种不确定性因素，进行合理的风险分析，为正确地作出油藏管理所应采取的战略战术决策提供可靠的基础。

正因为储层随机建模技术的强大生命力，它一出现就受到国内广大石油地质工作者的热衷关注。特别是在国内石油高等院校内涌现出了一批青年石油储层地质工作者，他们在研究、发展、创新和应用这一技术于油气储层地质和油藏描述、油藏管理中，作出了卓有成效的努力和贡献。长江大学地球科学学院的“剩余资源研究小组”（3RG）的一批青年学者们就是其中一个典型的代表。他们从解读斯坦福大学发布的地质统计学源程序库 GSLIB 数万条源程序开始，在学习吸收国外先进随机建模技术的同时，结合我国广为分布的陆相储层的实际情况，在国内各大油区、各种类型油田进行了大量的应用和实践，不仅成功地解决了油气田开发生产中的大量实际问题，还对储层随机建模技术进行了很多有益的探索、改进、完善和创新。本书的出版，就是他们十多年来在这一新技术领域所作贡献的一个初步总结。

本书除概略地介绍了储层随机建模技术的产生、发展、研究现状及今后研究的热点问题外，较为详细地介绍了研究小组在十多年的研究工作中所取得的建模技术、经验和创新，内容涵盖了储层随机建模的各个方面。如：在建模数据管理和统计分析方面，他们引进了 GIS 先进的数据管理和分析技术；在建模算法方面，使河道砂体的建模更符合沉积地质规律。在随机建模技术的实际应用经验方面，更有较多篇幅的介绍：如目前广为应用的相控建模中如何针对多物源、相变剧烈等陆相湖盆沉积中常见的复杂情况，建好基础相模型；在建模应用中如何在多个实现中优选模型；如何评估模型不确定性等。作者还介绍了他们将储层随机建模技术扩展到煤层气储层和碳酸盐岩孔、缝、洞储层方面的探索。这些都是同行们可以广为借鉴和共享的宝贵经验和财富。

本书的出版不仅从一个侧面反映了我国青年地质学者在储层随机建模技术上所作出的努力，也肯定会对推动这一技术在我国的发展和提高作出应有的贡献，我愿借此机会摇旗呐喊，衷心祝愿作者在攀登储层地质理论和技术高峰上大步前进！



2007 年 6 月于北京

前 言

储层随机建模技术产生于 20 世纪 80 年代初期，在 90 年代初引入到国内，是一项新的油藏定量描述技术。储层随机建模技术引入到国内后，在裘怿楠等老一辈石油工作者的大力倡导及推广下，得到了广泛的应用，取得了丰硕的成果。由于储层随机建模方法本身的一些限制以及中国油气储层的特殊性，完全采用他人的方法不适于中国油气田特点，需要结合国内油气田的实际，不断改进和提出新的随机建模技术思路与方法。特别是当前我国很多油田进入高含水开发阶段，储层的非均质性是影响油藏采收率的关键因素，需要对其进行更精细的定量表征，因此也需要不断发展与完善储层随机建模技术。

建立储层地质模型是现代油藏描述的核心与关键。建立储层地质模型主要有两种途径，即确定性建模与随机建模。确定性建模以确定性资料为基础，推测井间确定的、唯一的储层参数分布。然而，地下储层是复杂的，它是许多复杂地质过程（沉积作用、成岩作用和构造等作用）综合作用的结果，具有复杂的储层结构空间配置及储层属性参数的空间变化。以非常有限的资料描述地下储层属性的分布，必然存在着不确定性与随机性，因此储层随机建模技术得到越来越广泛的应用。储层随机建模是指以已有的信息为基础，以随机函数、地质统计学为理论，应用随机模拟方法产生可选的、等概率的储层模型方法。储层随机建模在描述储层非均质性、综合各类信息、评价不确定性等方面具有明显优势。储层随机建模的方法及其适应性研究得到了石油界的广泛关注，并且已经有了很多成功的应用，已经成为现代油藏描述的核心技术。

自 20 世纪 90 年代初储层随机建模技术引入到国内，“剩余资源研究小组”（3RG）就开始追踪该项技术的发展。由于该项技术是一项比较新的油藏定量描述技术，在其具体的随机模拟算法以及方法的适用性方面还需要不断的发展与完善。3RG 研究组结合我国油气田的实际情况，除了不断学习吸收国外先进的建模技术外，自身也在不断的对储层随机建模技术进行创新与完善，形成了一系列具有鲜明特色的技术：（1）针对我国陆相储层非均质性强的特点，提出了基于高分辨率层序地层学的层次建模方法；以旋回为单位，首先建立构造模型与微相模型，在相控基础上建立储层物性参数模型。（2）首次提出并设计了基于储层骨架的多点地质统计学随机建模方法。目前国内关于多点地质统计学的研究刚刚起步，主要是借用国外的算法作研究。国外目前主流的算法 Snesim 和 Simpat 都存在一些不足，提出的基于储层骨架的多点地质统计学随机建模方法克服了它们的一些缺点，更好地再现了河道形态及其分布规律。并且提出了解决河道非平稳现象建模的方法。在河流相建模中，对分支河道与主河道区别对待，即在建模前认为它们属于“不同的”沉积微相类型，分别模拟后再还原到河道微相类型，从而建立具有非平稳特征的河道分布模型。（3）较深入地探讨了储层随机建模技术与地理信息系统相结合的方法与思路，并进行了应用研究。国内外学者对这两项技术结合的可行性进行过探讨，但是未见实例研究报道。（4）提出多物源条件下储层随机建模的方法，解决传统随机建模方法只能设置一个主要物源方向的问题。（5）针对布尔方法存在的限制与不足，提出了改进方法，并应用于克拉 2 大气田的储层骨架预测中，为克拉 2 大气田储量的核算提供了坚实的地质基础。（6）提出用滞后距倒

数为权系数的线性规划法对变差函数进行球状模型的自动拟合，结合了此前用于拟合的加权多项式法和线性规划法的优点。(7) 综合利用基于目标与基于象元的随机建模方法建立储层微相模型，结合了两种方法的优点。(8) 利用试验设计的方法与理论定量评价储量计算中的不确定性，确定关键的不确定性因素。(9) 综合利用岩心、测井、地震、测试、生产动态、原型模型及地质家经验建立微相模型。另外 3RG 研究组利用随机建模技术建立了煤层气储层地质模型，较早地应用随机建模技术建立了碳酸盐岩缝洞型储层孔隙度模型，扩展了储层随机建模技术在国内的应用领域。

3RG 研究组的研究丰富与完善了储层随机建模的方法，扩展了该项技术的应用领域与范围，并且在生产实践中得到广泛的应用。目前这些成果已经在江汉油田、南阳油田、中原油田、长庆油田、江苏油田、大港油田、吐哈油田、塔里木油田、大庆油田、中海油湛江分公司、中海油天津分公司、中联煤层气公司等得到广泛的应用。

本书是张昌民教授领导的 3RG 研究组 10 多年集体研究的成果，张尚锋博士、尹太举博士、王振奇教授、林克湘教授等作了大量地质方面的基础工作，严申斌硕士作了部分文字校对工作。在这些技术实施的过程中，得到了多家石油公司和企业的大力支持与帮助，研究组长期得到裘怿楠教授的指导与帮助，中国石油大学（北京）的吴胜和教授对本书部分章节的编写提出了宝贵建议，在此一并致以衷心的感谢。

该书第一章由李少华、尹艳树执笔；第二、第四、第五、第六、第七、第九、第十一章由李少华、张昌民执笔；第三、第八、第十章由尹艳树执笔；第十二章由陈恭洋、李少华执笔。全书由李少华统稿。

限于经验与水平，书中如有不当之处，望读者不吝指正！

目 录

第一部分 综 述

第一章 储层随机建模概述	(3)
第一节 储层随机建模技术的发展	(3)
第二节 储层随机建模研究现状	(4)
第三节 研究热点展望	(12)

第二部分 建模方法研究

第二章 与高分辨率层序地层学相结合的层次建模	(17)
第一节 方法原理	(17)
第二节 WZ12-1 油田储层精细描述	(18)
第三节 地震储层预测	(27)
第四节 储层沉积相建模	(35)
第五节 储层物性参数模型	(47)
第三章 基于储层骨架的多点地质统计学随机建模方法	(55)
第一节 原理介绍	(55)
第二节 基于储层骨架的多点地质统计学	(61)
第三节 方法检验	(68)
第四章 基于 GIS 的储层随机建模方法	(77)
第一节 GIS 与储层随机建模的结合	(77)
第二节 GIS 管理基础数据的实现	(79)
第五章 多物源储层地质建模	(84)
第一节 多物源建模方法	(84)
第二节 多物源建模实例	(84)
第六章 布尔模拟方法的若干改进	(91)
第一节 布尔方法模拟多种微相分布	(91)
第二节 产生目标中心点方法的改进	(102)
第七章 线性规划法自动拟合变差函数的改进	(105)
第一节 方法的改进	(105)
第二节 实例计算	(107)
第八章 混合建模方法预测微相分布	(109)
第一节 目标层次建模及序贯指示建模基本原理	(109)
第二节 建模思路及步骤	(111)
第三节 实例研究	(111)

第九章 定量评价储量计算中的不确定性	(115)
第一节 方法原理.....	(115)
第二节 BZ25-1 油田沙河街组油藏基础地质.....	(117)
第三节 数据准备与三维构造建模.....	(121)
第四节 沉积相建模.....	(125)
第五节 储层物性参数建模.....	(131)
第六节 储量计算与模型粗化.....	(133)
第七节 不确定性评价.....	(142)
第十章 综合一体化储层微相建模	(145)
第一节 多学科资料综合的方法.....	(145)
第二节 实例研究.....	(146)

第三部分 应用领域扩展

第十一章 煤层气储层地质模型的建立	(159)
第一节 煤层气储层地质模型研究内容.....	(159)
第二节 枣园试验区煤层气储层地质模型建立.....	(160)
第十二章 碳酸盐岩缝洞型储层随机建模	(170)
第一节 建模思路与步骤.....	(170)
第二节 模型的建立.....	(172)
参考文献	(179)

第一部分 综 述



第一章 储层随机建模概述

建立储层地质模型是现代油藏描述的核心与关键，建立储层地质模型主要有两种途径，即确定性建模与随机建模。确定性建模以确定性资料为基础，推测井间确定的、唯一的、真实的储层参数。然而，地下储层是复杂的，它是许多复杂地质过程（沉积作用、成岩作用和构造作用）综合作用的结果，具有复杂的储层结构空间配置及储层参数的空间变化。以非常有限的资料描述地下储层属性的分布，必然存在着不确定性与随机性，因此储层随机建模技术得到越来越广泛的应用。储层随机建模是指以已知的信息为基础，以随机函数为理论，应用随机模拟方法产生可选的、等概率的储层模型方法。储层随机建模在描述储层非均质性、综合各类信息、评价不确定性等方面具有明显优势。储层随机建模的方法及其适应性研究得到了石油界的广泛关注，并且已经有了很多成功的应用，已经成为现代油藏描述的核心技术。

第一节 储层随机建模技术的发展

储层随机建模技术的产生与地质统计学及油气生产的需要密切相关。地质统计学创建于 20 世纪 60 年代初，由法国著名学者 G. Matheron 教授提出，最初主要应用于采矿业。他的学生 A. Journel 在 1978 年以英文出版了专著《矿业地质统计学》，在世界范围内产生了很大的影响，对地质统计学的发展起了很大的推动作用。地质统计学的基本原理是以研究各种地质变量在空间的相关性为基础，主要由三大部分组成：变量的空间相关性分析、克里金估计和随机模拟。地质统计学在最初的二十年中，其应用主要在固体采矿业方面。Journel 在他的专著中对随机模拟进行了详细的介绍。在 20 世纪 80 年代，出现了油藏描述技术，地质统计学在石油勘探开发中的应用才大大地发展了。在 1985 年之前随机模拟技术的模拟方法以非条件模拟为主，如转向带法 (Turning Band Method)、傅立叶谱法和 LU 矩阵分解法等，在水文方面有一定程度的应用。地质统计学的随机模拟在油藏描述中的应用，已被世界各国的同行称为油气储层的随机建模。目前大家基本认为挪威的 H. Haldorsen 博士和美国的 L. Lake 教授在 1984 年共同发表的第一篇油气储层随机建模方面的论文“A new approach to shale management in field-scale models”是储层随机建模产生的标志。

1988 年，国际石油工程师协会在苏格兰举行了一次关于储层表征的专题讨论会，许多参加会议的人对于储层表征的随机方法发表了他们的想法，关于随机方法是否对模拟储层有实际意义在当时存在很大争论。1991 年国际石油工程师协会在美国的科罗拉多矿业学院举办了关于储层表征的第二次专题研讨会，这次会议对随机方法的实际价值进行了肯定。此次会议上讨论的焦点不再是是否应该应用随机方法，而是应该用哪种方法。储层随机建模开始成为研究热点。关于储层随机建模原理及应用方面的文献迅速增多，如仅在国际石油工程师协会各种会议上发表的涉及随机模拟的文章，在 1994 年和 1995 年均 30 篇以上，其他会议和杂志如 AAPG 及其会议、数学地质及其会议也有大量文献，如 AAPG

在1994年专门出了储层随机建模的专辑(《Stochastic Modeling and Geostatistics: Principles, Methods, and Case Studies》, 1994)。1992年, 斯坦福大学的Deutsch教授和Journel教授领导的研究小组开发的地质统计学软件库GSLIB面向社会免费提供源程序, 极大地促进了地质统计学和随机模拟方法的发展。

在国内, 储层随机模拟方面的研究大致始于20世纪90年代初期。原中国石油天然气总公司1992年出版的《国外储层建模技术》是当时国内较早的比较系统地介绍储层建模技术原理及应用的一本专著。中国石油勘探开发科学研究所的裘怿楠教授(1991, 1994)极大地推动了储层随机建模技术在我国的应用。西安石油学院的王家华及张团峰(2001)、石油大学的纪发华(1994)、熊琦华(1995)、吴胜和(1997, 1999, 2001)、中国地质大学的于兴河(1996)、江汉石油学院的张昌民、李少华(1999, 2000, 2001)等也作了大量的研究工作。在随后的几年, 随机建模技术受到越来越广泛的重视, 发表的论文与专著也急剧增加, 在各个油田也得到了广泛应用。然而与国外研究相比, 在基础理论以及商品化软件方面还有较大的差距。

第二节 储层随机建模研究现状

经过20多年的发展, 储层随机建模技术在模拟的方法、软件以及实际应用方面都取得了很大的进展, 该项技术正在成为现代油藏描述的核心技术, 下面分别从模拟方法算法、地质知识库、模拟软件及应用几个方面介绍该项技术的研究现状。

一、储层随机模拟方法

按照随机模拟基本单元不同, 随机建模方法可以分为基于目标的方法和基于象元的方法两类。基于目标的方法的模拟基本单元为目标物体(即是离散性质的地质特征, 如沉积相、流动单元等), 它只可以模拟离散储层参数, 标点过程即属此类; 基于象元的方法的模拟基本单元为象元(即网格化储层格架中的单个网格), 它既可用于连续性储层参数的模拟, 又可用于离散地质体的模拟。这类方法包括高斯模拟、截断高斯模拟、指示模拟等。传统的基于象元的模拟方法很大一部分是基于变差函数的, 近几年基于“训练图像”的多点地质统计学越来越受到广大学者的关注。

随机建模的算法较多, 而不同的算法其基本原理、基本假设也不相同, 所建模型反映的侧重点及适用范畴也具有差异。表1-1总结了不同随机建模方法的地质适用性及优缺点, 提出了一些改进措施和方案。

1. 基于目标的随机模拟方法

基于目标的方法(主要是示性点过程)通过直接产生整体目标块而建立储层结构模型。它只能对离散变量进行建模, 最初为勘探早期井网较稀条件下建立砂泥岩剖面优选的方法, 在20世纪80年代及90年代早期得到重点研究和广泛应用。随着资料的丰富以及对模型精度要求的提高, 基于目标的建模逐渐显示出适应性, 最主要的缺点是目标构型要求简单、不同目标需要不同的构型描述参数、条件化难以实现。以挪威计算中心为代表的地质建模家在示性点过程建模方面提出了一些新的观点, 并在实际中得到检验。这些发展包括: ①再现具有曲线形顶底特征的目标; ②多井钻遇同一目标的实现; ③现代贝叶斯统计技术的应用; ④综合地震数据。

表 1-1 常见随机模拟方法的比较 (据吴胜和修改, 1999)

随机模拟方法		变量类型	适用条件	评述
分类	名称			
以目标物体为单元	布尔方法	离散型	目标几何构型简单, 主要用于勘探早期砂体和泥岩夹层描述	原理简单, 计算量小, 易将沉积学知识溶入模拟中; 难以条件化
	示性点过程	离散型	目标几何构型简单, 如河道等	模拟的结果直观上更容易接受, 符合地质规律; 难以完全条件化, 数学模型复杂
以象元为模拟单元	序贯高斯	连续型	变量必须是正态或多元正态分布, 要计算变差函数	计算速度快, 数学上具有一致性; 要求变量服从正态分布
	截断高斯	离散型	变量必须是正态或多元正态分布, 要计算变差函数	适合解决具有明显相序的情况, 模拟结果能够很好地保持相序
	序贯指示模拟	连续和离散型	主要用于渗透率和微相的分布, 要求各指示类型的变差函数	能综合多种信息, 适合解决极值分布问题; 计算量大, 需要推断很多协方差函数
	模拟退火	连续和离散型	要构建目标函数, 通常都包括变差函数在内	能综合多种信息, 是最灵活的随机模拟方法; 计算量大, 不易收敛
	分形随机模拟	连续型	变量具分形特征, 如渗透率、裂缝的分布	快速和经验性强, 难考虑间接信息
	多点地质统计	离散型	要建立训练图像	具备传统两点地质统计学与基于目标模拟方法的优点, 实际应用还有很多问题要解决

利用现代贝叶斯统计技术, A.R.Syversveen (1994, 1996) 给出了再现泥岩顶底曲线特征的算法, 其基本思想是假定泥岩顶底服从正态高斯分布, 随后通过高斯函数预测顶底位置相对于泥岩中心位置的偏移, 从而再现泥岩顶底波动特征。对于多井钻遇同一目标, 通过引入泥岩配置参数 T , 对多井钻遇情况进行了考虑, 为多井钻遇目标条件化实现提供了参考。然而模拟只考虑了二维情况, 对于三维更为复杂的情况, 没有作详细的说明。此外, 在模拟泥岩分布时, 认为泥岩长宽分布是独立的, 这与实际情况是不相符合的。而泥岩之间的相互影响也没有得到更好的考虑。

基于目标的建模方法在综合地震数据方面一直是研究的热点。对于地震数据的处理, 难以利用地质统计学克里金协同算法。O.Lia (1994) 等采用贝叶斯统计方法将地震数据综合到模型中。进一步地, 为了对地震属性质量进行描述, 引入地震属性质量因子 w : 当 $w = 0$ 时, 则先验的地震概率足以区分不同的目标; 当 $w = 1$ 时, 则需要考虑地震属性对应的不同目标的概率。

基于目标的方法还有一种是考虑建立流线的分布, 随后给流线赋予一定的储层属性, 随机游走模型就是其中的一种。王家华 (2001) 在大庆油田曾经应用随机游走模型建立了网状河分布。Jones (2001, 2003) 也在这方面进行了研究。他认为盆地沉积作用复杂, 但具有特征的流动趋势。这种趋势可以通过一系列指示主要流动方向的线段来模拟。其中, 古水流轨迹 (flowpath) 用来建立一个方位角向量, 指示河流流动方向, 局部随机修改方位角就可以再现河流流动方位变化特征。Patterson (2002) 等也做了类似的研究。更进一步, 他通过计算河流中线曲率, 预测点坝位置及侧积体倾向。

1996年, Deutsch建立了基于目标的层次模型(Fluvsim)。他认为储层是一个层次系统,因而其建模是在层次分析的基础上分层次逐级建模的。其模拟思想有别于以往的建模思想。首先,建模过程是由大到小,即先模拟河道带的分布,随后在河道带内模拟河道分布;其次,产生目标体方式不同。在目标层次模拟算法中,一次可以产生多个不同目标块,这些不同目标具有成因意义,也就是说,模拟过程充分考虑了沉积成因。例如对于河流,在建模时并不是只产生河道分布,而是一次可以产生河道及其附属相(堤岸、决口扇)的分布;再次,河道产生过程是通过模拟河流主流线进行的,而非传统的点过程;最后,在模拟算法中,通过综合模拟退火算法,使得模型在综合多种信息以及条件化井数据方面有了很大提高,其井误差不超过20%。Fluvsim通过修改目标块生成程序,可以方便模拟其他沉积环境的储层展布。而其考虑储层成因建模则使得建模结果逼真地反映了储层几何特征及空间分布,因此更多的学者利用Fluvsim非条件模拟再现地下储层特征,并把Fluvsim非条件模拟实现作为建模的知识库指导目的区块储层建模。

在国内,赖泽武(2001)提出了基于目标的储层结构模拟方法,并开发了相应的MOD-OBJ程序。该方法综合考虑了先验地质信息,将确定性和随机模拟方法相结合,可用于河流相、三角洲相的砂体分布建模。张春雷(2004)提出了一种新的改进型储层沉积相建模的河道模型,该模型扩展了对河流分叉、交汇等现象的描述和模拟,通过协同布尔模拟可以使沉积相建模有效地结合多方面的次级信息,降低了储层模型的不确定性。文健(1994)给出了布尔模拟中砂体剖面面积计算方法,李少华(2001, 2004)对布尔模拟进行了改进,包括多个岩相实现,以及依据沉积学原理优先在未填充区填充目标的新思想。

2. 基于象元的随机模拟方法

基于象元的模拟算法很多,如序贯指示、序贯高斯、截断高斯、两点直方图、分形模拟、马尔可夫场模拟及模拟退火等。在这些方法中,应用较多的方法主要有序贯指示、序贯高斯、截断高斯及模拟退火方法。

在最初的设计中,截断高斯模拟在获得截断值时,往往认为空间各点属性频率分布是不变的,截断值是一个常数。这显然是不合理的,频率曲线应该是空间位置的函数。针对这个问题,Xu(1993)认为利用井资料就可以建立相频率的空间分布,以此作为截断值进行沉积相的建模就更符合实际。陈亮(1998)利用改进后的截断高斯模型建立了扇三角洲微相分布,效果较好。

序贯指示建模方法由于能够以不同变差函数表征不同变量空间变异特征,而对于后验概率的推断是非参数估计,因此受到广泛的应用。然而,其算法也存在一些缺点。首先,各类型全局比有时难以实现,这是由于各类型变量的最终比例强烈依赖于被随机抽取的最先被模拟的网格点的位置。如果这些最先被模拟的网格点紧邻着某一特定类的数据,那么该类型变量模拟值的比值趋于迅速增加,最终将超过它的全局比例。当指示变差函数的变程增大时这种影响更明显,并且它主要是影响那些全局比例低的类型变量。Soares(1998)提出了一种简单的算法用于控制每模拟一个网格点后类型变量所占比例的偏差,从而较好地解决了该问题。在国内,张祥忠(2003)则提出了多级序贯指示建模策略,从而使得模拟结果能较好反映类型变量空间分布;其次,变差函数求取及再现有时存在困难。Jinchi Chu(1996)针对传统的序贯指示模拟由于需要推导多个指示变差函数而致使模拟耗时较多,且模拟值可能不能很好再现变量的指示变差函数的问题,提出了一种快速且能够较好

再现变差函数的序贯指示模拟方法；再次，传统的基于象元的方法难以再现储层曲线形态，序贯指示模拟也不例外。Xu (1996) 为了再现河流弯曲特征，利用河流局部地区主流线方向角修整变差函数的方向，从而再现具有曲线特征的河流储层。

模拟退火算法通过目标函数，从而可以综合各种尺度的信息；通过迭代，可以获得与实际统计特征相符合的地质模型。不过，模拟退火也有不少缺点，如在井点处地层不连续。Deutsch (1994) 发表了一篇关于模拟退火应用的文章，文中详细论述了应用模拟退火应该注意的几个问题，其中提到采用给条件数据赋予较大权值的方法来避免模拟结果中人为的不连续现象。Carle (1997) 针对这个问题指出，给条件数据赋予较大权值的方法没有很好的理论依据，并且在其他地方应用该方法时权值取多大也没有统一标准。为此，他通过实验得出基于以下这三点可以避免人为的不连续现象：①构造与空间变异模型的非均质性相匹配的滞后距矢量；②提供更先进的初始图像；③减小目标函数中考虑的滞后距个数，可以避免前者文章中提到的人为的不连续性。Goovaerts 在 1998 年提出了一种可以兼顾估值精度和模拟特点的模拟退火方法。传统的估值方法（如克里金）追求的是估计的精度，而随机模拟追求的是对变量统计特征（如变差函数、直方图）的再现，在估计精度上不如传统的估值方法。Goovaerts 通过研究认为，利用兼顾估值精度和模拟特点的模拟退火方法得到的结果优于纯粹的估值方法或纯粹的随机模拟方法得到的结果。

分形模拟的最大特点是其自相似性。在数据点较少时，更能体现其优越性，可用于连续变量（如孔隙度）的模拟，也可用于模拟天然裂缝的分布。分形模拟具有运算速度快的优点，但它也具有要求模拟变量具有分形特征，难以考虑间接信息的缺点。1994 年，G. Raul del Valle 将分形理论用于对裂缝性储层的数值模拟中 Dominique Berta、H. H. Hardy 和 R. A. Beier 等利用 FGn 模型研究了一些储层物性的分形分布并将这种分布应用于油藏模拟中。Hewett 将分形随机域引入岩石物理参数的随机模拟，其基本理论为分数布朗运动和分数高斯噪音。Painter 在分形随机模拟中引入了 Levy 稳态概率分布，避免了高斯分布的假设，可用于成层性很强的地层条件下随机变量的分形模拟。Barton 对自然裂缝的分形作了详尽的论述，分析了从 Archean Albites 3 ~ 10mm 的微裂缝到南大西洋海底 105mm 的裂缝。Kelkar (1994) 研究了利用分形几何来描述岩石特性的空间相关结构。1997 年，Joseph Olarewaju、Saleem Ghori、Alhasan Fuseni 和 Mohammed Wa jid 利用分形模拟对裂缝密度进行了随机模拟，为克服传统网格放大带来的误差，Yann Gautier 和 Benoit Noetinger 将重正化群技术应用于非均质性储层模拟中来，并用此技术对流体流动路径进行了识别。国内，石油勘探开发研究院刘明新等人在“八五”期间利用分形理论进行了储层建模研究。

序贯高斯方法目前成为储层物性建模最常用的方法，然而需要孔渗分布服从多元正态分布，在实际储层中，孔渗分布是相当复杂，渗透率极值分布控制油水运动。对于渗透率极值分布，更好的处理是进行离散处理，采用序贯指示建模来进行预测。

尽管序贯指示建模应用相当广泛，然而对其再现储层形态的怀疑一直没有停止过，这是由于序贯指示建模是以变差函数为依据来反映储层形态及空间分布特征，而变差函数只考虑了两点相关性。地质现象复杂性决定了对其描述应该是基于更多点信息的，而变差函数很难真实反映储层地下结构及形态。因此，需要考虑新的反映储层结构及空间分布的方法。利用训练图像取代变差函数、采用数据样板及数据事件反映储层几何构型的多点地质统计学成为近期随机建模方法研究的热点。

3. 多点地质统计学随机建模方法

之所以把多点地质统计学方法单独列出来是因为该方法独特的性能，与传统的基于两点统计以及基于目标的随机建模方法有很大的不同。基于变差函数的两点统计学只能表达空间上两点之间的变化性，而对于复杂的曲线型特性（如河道）以及储层内部强连通性（如裂缝）方面的结构研究则显得无能为力。基于目标的方法在模拟之前，首先对目标体几何形态进行定量表征，因此这种方法可以较好地再现目标体几何形态。但这种方法也有其不足：①对于复杂几何形态，参数化较为困难；②由于该方法属于迭代算法，因此当单一目标体内井数据较多时，井数据的条件化较为困难，而且要求大量机时。

为了克服传统的基于变差函数的随机建模方法和基于目标的随机建模方法存在的不足，多点地质统计学的概念应运而生。Stanford 油藏预测中心的 Strebelle、Caers、Journel、Arpat 等人设计了多点地质统计学储层随机建模方法。在多点地质统计学中，应用“训练图像”代替变差函数表达地质变量的空间结构性，因而可克服传统地质统计学不能再现目标几何形态的不足；同时，由于该方法仍然以象元为模拟单元，而且采用序贯算法（非迭代算法），因而很容易忠实硬数据，并具有快速的特点，故克服了基于目标的随机模拟算法的不足。因此，多点统计学方法综合了基于象元和基于目标的算法优点，同时克服了已有的缺陷。

多点地质统计学应用于随机建模始于 1992 年。在最初的考虑中，由于模拟退火具有强大综合数据能力及再现储层统计特征的能力，Farmer (1992)、Deutsch 和 Journel (1992) 在模拟退火目标函数中加入多点统计信息分量，通过退火迭代从而满足多点统计特征。然而由于迭代经常陷入局部最小的情况，导致实现在并没有再现真实统计概率情况下就中止了。更严重的情况是由于迭代是在扰动多次后按一定的概率接受或者拒绝扰动，因此很难保证在未知地区是否正确抽样；此外由于这种后处理的迭代过程导致模拟实现具有较好的相似性，致使不确定性的评价存在困难，失去了随机模拟一个重要优势，即不确定性评价，因此没有得到广泛应用。

1992 年，Srivastava 提出了后处理迭代算法，对基于传统变差函数的模拟实现进行后处理，以恢复多点统计特征。这种方法在数据样板大、模拟对象属性取值多时，模拟速度极其缓慢。针对此问题，Wang (1996) 提出了生长算法。其思想是再现储层沉积的加积过程，通过限制随机路径，从而提高模拟速度。然而预先定义的随机路径及储层属性优选值得进一步讨论。此外，由于其判断节点模拟值时采取的仍然是迭代思想，运行速度其实仍然是一个限制。1998 年，Caers 和 Journel 应用神经网络结合马尔柯夫链蒙特卡罗模拟再现储层多点统计特征。但是神经网络内部结构稳定性还需要评价，并且由于采取了接受或者拒绝函数，因此其收敛也不容易获得。

上述的多点地质统计学算法都是迭代算法，存在模拟实现收敛问题。针对此问题，Guardiano 和 Srivastava (1993) 提出了一种非迭代算法。它并不通过变差函数及克里金建立条件概率分布，而是直接从训练图像中获得概率，是序贯模拟算法的一种。对于每一个未取样点，通过扫描训练图像获得重复数推断局部 cpdf。由于条件数据构形可变，因此模拟过程可以是非迭代的，而且运行速度很快。由于其简单性和可操作性，在多点地质统计学应用于地质建模中具有重要的意义。然而，该方法由于需用重复扫描训练图像，使得对于计算机要求非常高，运行速度比较慢，导致在当时应用起来非常困难。为了解决这个问题，Strebelle (2000) 在 Guardiano 和 Srivastava 的算法基础上，通过建立“搜索树”

策略,将多点统计概率保存于“搜索树”中,较好地解决了重复扫描图像的问题,从而使多点统计能够迅速实施。搜索树策略的提出,使得多点地质统计学应用于实际储层建模成为可能,在多点地质统计学的发展上具有里程碑的意义(Journel, 2003)。Strebelle将此方法命名为Snesim(single normal equation simulation)。Snesim推出后,受到各国学者的关注,结合各自应用研究,发表了对Snesim评价的文章。尽管Snesim在再现储层构型方面及条件化数据方面相比较于传统的随机建模方法有较大提高,但是还有一些方面需要考虑。这些方面包括平稳性假设、数据样板选择及储层构型再现、综合多学科信息以及物性建模等。Snesim需要进行合理的改进以更好适用于储层精细地质模型的建立。

2003年,在Stanford油藏预测中心的会议上,Arpat提出了一种新的多点地质统计学随机建模方法Simpat(simulation with patterns)。模拟仍然采用了序贯模拟的思路,但是已经不是传统意义上的统计概率推断,而是通过聚类方法提取训练图像中典型数据事件(称为模式),随后推断未知点及其相邻条件数据构成的数据事件与先前模式的相似程度,确定未知点处属性值。Simpat方法由于是采取相似性度量来推断可能的模式,因此从理论上讲能够考虑非平稳地质模式再现。然而,由于在相似性判断中,聚类分析后的模式仅通过欧几里德距离考虑并置点对的相似性,导致高阶统计规律没有得到反映,小规模的结构特征很难得到真实再现。此外,地质现象是相当复杂的,通过部分模式来反映所有的地质现象的考虑也是不周到的。Arpat考虑到了这一点,通过引入计算机视觉领域有关图像处理的知识,对训练图像进行一次倒角变换,从而将数据模式内的点对联系起来。以变换后的训练图像作为输入,便可以充分考虑高阶统计规律,较好再现不同储层展布特征。为了能够更好再现储层构型,Arpat直接从训练图像中搜索最相似的数据模式,并将最相似模式整体替换掉待估点周围的数据构成的数据事件。由于训练图像中的数据模式反映的是一定的地质模式,也就是储层构型,因此这种整体替换的方法能够较好再现储层构型。目前,国际上对多点地质统计学储层随机建模方法研究主要集中在Snesim上,对于Simpat方法,由于其新颖性,少有报道。

二、地质知识库及原型模型

储层地质模型的建立是现代油藏描述的重点和难点,而储层地质知识库的建立则是储层建模中一项十分重要的基础工作,它直接影响到建模结果好坏。所谓储层地质知识库,是指通过充分利用已有的各种资料对研究区进行详细研究和统计分析,建立表征储层各种特征的地质知识,这些知识可以直接作为输入参数参与储层建模,或者为某些参数的确定、模拟方法的选择、实现的选取及结果的检验提供数据或地质依据。

在井资料缺乏的地区,一般很难把握储层性质和参数的地质统计特征,例如实验变差函数的求取通常需要至少30~50个数据对才能得到比较可靠的结果。在这种情况下,必须通过地质类比分析,借助原型模型完善储层地质知识库,为建模提供比较合理的参数。

原型模型是指与模拟目标区储层特征相似的露头、开发成熟油田的密井网区或现代沉积环境的精细地质模型。李少华(2004)讨论了原型模型建立的几种方法,包括利用露头、开发成熟油田密井网区以及现代沉积考察等。

利用露头调查建立地质知识库,国内和国外的学者已经做了不少的工作。国外在这方面工作做的较多,投资大,采用了各种先进的手段对多种沉积环境下的露头进行了研究。如美国能源部研究了怀俄明州粉河盆地边缘出露的上白垩统陆架砂脊露头;美国俄克拉荷马大学对Oklahoma附近的一些露头进行了详细调查,主要研究砂体几何形态和砂体内部