



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

碳酸盐岩缝洞型油藏开采机理
及提高采收率基础研究丛书

卷五

丛书主编/李 阳

碳酸盐岩缝洞型油藏 数值模拟技术与应用

康志江 邸 元 崔书岳 著

NUMERICAL SIMULATION TECHNOLOGY AND ITS
APPLICATION FOR PALEOKARST CARBONATE RESERVOIRS

石油石化
学术文库

THE ACADEMIC LIBRARY
OF PETROLEUM AND
PETROCHEMICALS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

碳酸盐岩缝洞型油藏开采机理
及提高采收率基础研究丛书

卷五

丛书主编/李 阳

碳酸盐岩缝洞型油藏 数值模拟技术与应用

NUMERICAL SIMULATION TECHNOLOGY AND ITS
APPLICATION FOR PALEOKARST CARBONATE RESERVOIRS

康志江 邸 元 崔书岳 著



中国石油大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS

图书在版编目(CIP)数据

碳酸盐岩缝洞型油藏数值模拟技术与应用/康志江,
邸元,崔书岳著. —东营:中国石油大学出版社,
2017.12

(碳酸盐岩缝洞型油藏开采机理及提高采收率基础研
究丛书;卷五)

ISBN 978-7-5636-5790-2

I. ①碳… II. ①康… ②邸… ③崔… III. ①碳酸盐
岩油气藏—油藏数值模拟—研究 IV. ①TE344

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 303198 号

书 名: 碳酸盐岩缝洞型油藏数值模拟技术与应用

作 者: 康志江 邸 元 崔书岳

责任编辑: 张 廉(电话 0532—86981531)

封面设计: 悟本设计

出 版 者: 中国石油大学出版社

(地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路 66 号 邮编: 266580)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子邮箱: shiyoujiaoyu@126.com

排 版 者: 青岛友一广告传媒有限公司

印 刷 者: 山东临沂新华印刷物流集团有限责任公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981531, 86983437)

开 本: 185 mm×260 mm

印 张: 14

字 数: 301 千

版 印 次: 2017 年 12 月第 1 版 2017 年 12 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5636-5790-2

印 数: 1—1 500 册

定 价: 95.00 元

丛书编委会

主 编：李 阳

编 委：袁向春 窦之林 曲寿利 计秉玉 康志江
王世星 胡向阳 鲁新便 林 涛 刘中春
金 强 姚 军 侯加根 张宏方 薛兆杰
刘学利 郑松青

丛书序一

碳酸盐岩油气在全球油气开采中占有极为重要的地位。碳酸盐岩油气资源量约占全球油气资源总量的 70%。我国广泛发育碳酸盐岩沉积,石油资源量高达 340×10^8 t,已经成为我国油气增储上产的重要接替领域。目前,我国碳酸盐岩油气探明储量的 2/3 分布在塔里木盆地,以缝洞型油藏为主。缝洞型油藏开发难度很大。

李阳院士带领的科技团队,以国家 973 计划项目“碳酸盐岩缝洞型油藏开发基础研究”“碳酸盐岩缝洞型油藏开采机理及提高采收率基础研究”和国家科技重大专项“碳酸盐岩油田开发关键技术”(“十一五”和“十二五”)等为依托,历时十余年,创建了缝洞型油藏开发理论与技术,实现了缝洞型油藏开发的重大突破,为塔河油田的科学高效开发提供了理论依据和技术支撑。

在上述科学研究、技术开发和生产实践所获得的科技成果的基础上,李阳院士领导的团队凝练提升并精心著述完成《碳酸盐岩缝洞型油藏开采机理及提高采收率基础研究丛书》。

该丛书共分 8 卷,分别涉及碳酸盐岩地质、地球物理、油藏建模、流动机理、数值模拟、注水开发、提高采收率、工程工艺方面的最新理论和技术成果,是目前该领域的代表性著作,集中体现了该领域理论研究和技術开发的现状、研究前沿和发展趋势。

该丛书系统阐述了缝洞型储集体形成机制模式、超深层缝洞型碳酸盐岩地球物理识别技术、分级分类岩溶相控建模技术、缝洞物理模拟及流体流动机制、缝洞型油藏数值模拟技术、空间结构井网及多井单元水驱技术、注气提高采收率技术以及储层改造、分段注水、稠油降黏、深抽等工程工艺技术,同时介绍了相关技术在塔河油田的应用情况,为碳酸盐岩缝洞型油藏高效开发提供了范例。

随着国内外海相碳酸盐岩油气勘探的深入发展,越来越多的碳酸盐岩缝洞型油气藏将不断被发现并投入开发。该丛书的出版问世必将大力促进碳酸盐岩缝洞型油气藏勘探开发的科技进步和高效生产。

该丛书可供油气勘探开发特别是碳酸盐岩油气勘探开发的科研人员、院校师生、现场技术人员和管理人员参考。



中国科学院院士

丛书序二

塔河油田是我国发现的特大型碳酸盐岩缝洞型油藏,具有超埋深、地质时代老、超高温高压、原油性质复杂等特点,其储集空间主要是大型溶洞和裂缝。针对如此特殊的油藏,国外还没有形成成熟的开发理论和方法。以李阳院士为首席科学家的项目组完成了国家重点基础研究发展计划项目“碳酸盐岩缝洞型油藏开发基础研究”“碳酸盐岩缝洞型油藏开采机理及提高采收率基础研究”,破解了缝洞型油藏开发这一世界级难题,从技术层面实现了油田开发由陆相碎屑岩油藏向海相碳酸盐岩油藏的跨越。在总结 973 计划项目重要成果的基础上,结合塔河油田的开发实践,形成了该丛书。

该丛书共包括 8 卷,既有理论创新,又有实用技术。其中,卷一和卷四分别解决了缝洞型油藏储集体形成机制和流体流动机理两个科学认识问题,阐明了岩溶作用与缝洞系统的成因联系,建立了缝洞系统发育模式,发展了缝洞型介质物理模拟流动实验方法,揭示了缝洞型介质的单相流动、两相流动及介质间流体交换规律,建立了流体流动的复合流动模型。卷二、卷三、卷五、卷六、卷七、卷八阐述了超深层缝洞储集体地球物理形体描述、多尺度非连续缝洞储集体建模、缝洞型油藏数值模拟、注水开发、注气提高采收率以及工程工艺等开发关键技术。上述成果推动了塔河油田的高效开发,填补了缝洞型油藏开发相关领域的空白,为保障国家能源安全、拓展海外资源领域提供了重要技术支撑。

该丛书是一套系统阐述缝洞型油藏开发理论与技术的著作,它对从事专业理论研究的学者具有一定的参考价值,对油田开发工作者的矿场实践具有重要指导意义。希望通过该套丛书的出版能引起更多学者对这一领域的关注,以促进我国碳酸盐岩油田开发技术的进一步发展。

罗平亚

中国工程院院士

丛书前言

陆相碎屑岩储层和海相碳酸盐岩储层是石油两大主要储层类型。中国石油工业起源于陆相碎屑岩油藏,陆相生油理论和注水开发技术在石油工业半个多世纪的快速发展中发挥了重要作用。随着勘探开发的重点由东部向西部和南方转移、由陆相向海相转移,我国西部和南方海相碳酸盐岩储层成为石油工业增储上产的主要领域之一。据国家新一轮油气资源评价,我国海相碳酸盐岩石油地质资源量为 340×10^8 t,主要分布在塔里木和华北地区的叠合盆地,具有埋藏深、时代老等特点,经历了多期构造运动的改造,复杂程度更高,勘探开发难度非常大。随着塔河油田的发现,海相碳酸盐岩开发成为新的研究领域。

海相碳酸盐岩油藏可分为孔隙型、裂缝-孔隙型和缝洞型三种介质类型。我国海相碳酸盐岩油藏中,缝洞型油藏占有重要的比重,约占探明储量的 $2/3$ 。塔河油田是我国已经发现的特大型碳酸盐岩缝洞型油藏,属于超深层、超高温高压复杂储层油藏。

碳酸盐岩孔隙型油藏开发主要采用碎屑岩油藏的开发理论与方法,裂缝-孔隙型油藏开发主要采用基于双重介质的开发理论与方法,但像塔河油田这样的以大型溶洞和裂缝为主要储集空间的油藏,由于国内外没有成熟的开发理论和方法,开发初期面临着钻井成功率低、储量动用程度低、产量递减快以及采收率低等开发困难。

缝洞型油藏在开发中主要存在三大难题:一是缝洞发育和分布规律认识难度大,由于经历了多期构造运动、多期岩溶叠加改造等过程,储集空间类型多、尺度差异大,储集体纵横向变化大;二是对缝洞型油藏流体流动规律的认识难度大,缝洞型油藏一般以缝洞单元为相对独立的流体储集体,单元内多种流动形式共存,介质间流体交换机理不清,流动规律复杂;三是补充能量、提高采收率难度大。

为成功开发这类油藏,迫切需要在碳酸盐岩缝洞型储集体形成机制、缝洞储集体定量描述、缝洞型油藏流体流动机理等方面进行攻关研究,建立碳酸盐岩缝洞型油藏开发基础理论与关键技术。

在上述背景下,2006年以来先后立项了国家重点基础研究发展计划(简称973计划)项目“碳酸盐岩缝洞型油藏开发基础研究(2006CB202400)”和“碳酸盐岩缝洞型油藏开采机理及提高采收率基础研究(2011CB201000)”,开展了碳酸盐岩缝洞系统发育模式及成因、缝洞储集体地球物理描述、缝洞型油藏数学表征、缝洞型油藏流体流动机理、缝洞型油藏数值模拟和缝洞型油藏高效开发等方面的研究,经过两期973计划项目10年的研究,形成了8个方面的重大进展:

(1) 创建了岩溶动力作用组合分析法,阐明了岩溶作用与缝洞系统的成因联系,揭示了碳酸盐岩缝洞型储集体形成机制,建立了缝洞系统发育模式。

(2) 自主研发了物理模型正演技术,形成了针对超深层缝洞体的小面元、高覆盖三维地震资料采集方法,研制了地震高精度成像方法,建立了超深层缝洞储集体地球物理形体描述技术。

(3) 突破了碎屑岩地质建模思路,以岩溶成因和构造控制建立溶洞和多尺度裂缝离散分布模型,提出了表征大型溶洞特征的非渗流属性参数方法,形成了多尺度非连续缝洞储集体建模方法。

(4) 发展了缝洞型介质物理模拟流动实验技术,揭示了缝洞型介质的单相流动、两相流动及介质间流体交换的机理与规律,建立了流体流动的复合流动模型。

(5) 在多重介质模型的基础上,建立了离散缝洞和多重连续介质混合数值计算模型,形成了较为完整的碳酸盐岩缝洞型油藏数值模拟技术,并在多个缝洞型油藏数值模拟研究中取得了很好的应用效果。

(6) 建立了缝洞单元综合评价技术,揭示了注水开发机理,形成了缝洞型油藏注水开发及优化技术。

(7) 建立了缝洞型油藏剩余油评价技术,揭示了剩余油形成及动用机制,明确了提高采收率的主要技术途径,形成了注氮气提高采收率技术及配套工艺。

(8) 形成了缝洞型油藏储层改造、分层注水、稠油降黏、深抽及堵水等工程工艺技术。

为总结973计划项目研究成果,丰富碳酸盐岩油藏开发理论,推动该类油藏开发水平的提高,组织编写了本丛书。本丛书共分8卷,第一卷碳酸盐岩岩溶储层缝洞结构与充填模式,阐述碳酸盐岩缝洞系统发育规律、演化机理和控制机制;第二卷碳酸盐岩缝洞型油藏缝洞单元地球物理表征,阐述缝洞体地震正演模拟技术、超深层缝洞体地震精确成像方法和缝洞体地震识别与流体检测技术;第三卷碳酸盐岩缝洞型油藏地质建模方法,论述碳酸盐岩缝洞型油藏储集特征、缝洞单元的划分与评价和碳酸盐岩缝洞型油藏三维地质建模方法;第四卷碳酸盐岩缝洞型油藏流动机理,阐述缝洞型介质单相流体流动规律、两相流体流动规律和介质间流体交换规律;第五卷碳酸盐岩缝洞型油藏数值模拟技术与应用,阐述缝洞型油藏多重介质

数值计算模型、离散缝洞和连续介质混合数值计算模型；第六卷碳酸盐岩缝洞型油藏多井单元注水开发技术，阐述缝洞型油藏缝洞单元评价、注水开发及优化技术；第七卷碳酸盐岩缝洞型油藏提高采收率技术，阐述缝洞型油藏剩余油形成机制、评价及注氮气提高采收率技术；第八卷碳酸盐岩缝洞型油藏开发工程工艺技术，阐述缝洞型油藏酸压、堵水、深抽、降黏等工程工艺技术。本丛书成文过程中，经专家多次讨论，数易其稿。本丛书不仅是 973 计划项目所有研究人员的科研成果结晶，也凝聚了众多专家的智慧。

感谢国家 973 重点基础研究项目组袁向春、窦之林、曲寿利、李江龙、康志江、王世星、胡向阳、鲁新便、林涛、刘中春、荣元帅、金强、姚军、侯加根、张宏方、薛兆杰、刘学利、郑松青、刘慧卿、邹胜章、钟建华、顾汉明、管路平、朱生旺、赵群、曹辉兰、吕爱民、吴锋等所有研究人员。

感谢中国科学院郭尚平院士，中国工程院韩大匡院士、罗平亚院士、康玉柱院士、彭苏萍院士，罗治斌教授，黄素逸教授，闫金定博士，张烈辉教授等在本丛书撰写过程中给予的多次指导！

在本书的编著和校稿过程中，康志江、郑松青、薛兆杰等同志做了大量工作，付出了辛勤劳动，在此一并表示感谢！

中国工程院院士

前言

碳酸盐岩油藏是全世界最重要的油气勘探开发领域之一,其储集体可以分为孔隙型、裂缝-孔隙型及缝洞型三种类型,在我国塔里木盆地发现的世界级海相碳酸盐岩油田——塔河油田——属于缝洞型。这种缝洞型油藏经历了多期构造运动、多期岩溶叠加、多期成藏改造过程,储集空间类型以溶孔、裂缝、溶洞为主,空隙空间尺度从数微米到数十米,跨越多个数量级,具有很强的非均质性和多尺度性。

油藏数值模拟是油气藏高效开发的关键技术,其计算结果对于研究油藏复杂的流动机理,分析剩余油的分布特征及位置,科学制定开发技术政策及开发方案具有十分重要的意义。然而,现有的针对常规孔隙型油藏或者裂缝-孔隙型油藏建立的基于连续介质模型的数值模拟方法无法真实、准确地描述碳酸盐岩缝洞型油藏多相流体流动的规律。本书系统地介绍近几年缝洞型油藏数值模拟的新方法,反映了多尺度复杂介质数值模拟方面的技术进步。

本书共分为6章,第一章简要介绍碳酸盐岩缝洞型油藏的储层特征和现有的数学模型;第二章从表征单元体理论出发,建立碳酸盐岩缝洞型油藏连续介质数值计算模型;第三章基于大型溶洞多相流体流动瞬时平衡和重力分异的特征,建立碳酸盐岩缝洞型油藏离散缝洞和连续介质混合数值计算模型;第四章介绍碳酸盐岩缝洞型油藏离散方程的求解方法,解决了碳酸盐岩缝洞型油藏由于非均质性极强而在数值模拟中遇到的收敛性差、计算速度慢的问题;第五章介绍碳酸盐岩缝洞型油藏数值模拟软件平台;第六章介绍碳酸盐岩缝洞型油藏数值模拟技术在塔河油田的实际应用情况。

本书的研究成果得到了国家科技重大专项(2016ZX0514)、国家自然科学基金项目(51574277)、国家重点基础研究发展计划(2011CB201000)的资助,本书的出版得到了国家出版基金项目的支持,在此一并表示感谢。

本书在编写过程中,得到了美国科罗拉多矿业学院石油工程系 Wu Yushu 教授的协助和支持,得到了中国石化石油勘探开发研究院计秉玉、王光付、刘中春、赵艳艳、张允、吕心瑞等,以及北京大学的一批硕士研究生和博士研究生,如彭浪、黄林、代亚非、钟恒森、张园、邵仁杰和宋世瀚等的协助和支持,在此对他们表示衷心的感谢。

本书第一章由康志江、李红凯执笔；第二章由康志江、邸元执笔；第三章由邸元、张冬丽执笔；第四章由邸元、黄孝特执笔；第五章由康志江、崔书岳执笔；第六章由崔书岳、郑松青、康志江执笔。全书由康志江、邸元统一修改定稿。

由于作者水平有限，书中难免存在错误与不妥之处，敬请读者批评指正。

目 录

第一章 碳酸盐岩缝洞型油藏储层特征及数学模型	1
第一节 碳酸盐岩缝洞型油藏储层特征	1
一、岩溶纵向发育特征	3
二、储集空间类型	4
三、储集体类型	5
四、储集体分布的非均质性与离散性	8
第二节 碳酸盐岩缝洞型油藏储层流体流动的数学模型	9
一、连续介质模型	10
二、离散缝洞网络模型	11
第二章 碳酸盐岩缝洞型油藏连续介质数值计算模型	13
第一节 碳酸盐岩缝洞型油藏连续介质模型的建立	13
一、单重介质模型的表征单元体	14
二、多重介质模型的表征单元体	15
三、多重介质模型 REV 与单重介质模型 REV 的关系	16
四、渗透率 REV	17
五、碳酸盐岩缝洞型储层多重介质模型的建立	19
第二节 碳酸盐岩缝洞型油藏多重介质模型	20
一、多重介质模型	20
二、基本控制方程的建立	20
三、基本控制方程的有限差分法离散	23
四、基本控制方程的有限体积法离散	25
五、溶洞、裂缝和基质介质之间的传导系数	36
第三节 碳酸盐岩缝洞型油藏多重介质数值模拟程序及应用	38
一、多重介质数值模拟程序的验证	38

二、缝洞储层水驱油物理实验拟合	44
三、缝洞储层水驱油平板模型数值模拟	48
四、缝洞系统平板模型数值模拟	50
第三章 碳酸盐岩缝洞型油藏离散缝洞和连续介质混合数值计算模型	55
第一节 缝洞型介质溶孔与溶洞尺寸界线的确定方法	55
一、确定三重介质溶孔与溶洞尺寸界线的流程	55
二、三重介质单相平面径向流动问题的求解	56
三、缝洞概念模型及三重介质的流动特征	58
四、溶孔与溶洞尺寸界线的确定	60
第二节 单缝洞体内油水两相流的数值模拟及流型分类	62
一、大型溶洞中多相流体流动的基本控制方程	62
二、单缝洞体内 VOF 油水两相流的数值模拟	65
三、单缝洞体内两相流动的流型分类	68
四、单缝洞体临界注水速度的确定	69
第三节 离散缝洞和连续介质混合数值计算模型	73
一、离散溶洞在连续介质模型中的嵌入	74
二、基于重力分异的离散缝洞和连续介质混合数值计算模型的验证	76
三、连续介质中嵌入大型溶洞概念模型的数值计算	78
第四章 碳酸盐岩缝洞型油藏离散方程的求解方法	87
第一节 碳酸盐岩缝洞型油藏离散方程的隐式求解	87
一、全隐式数值方法	87
二、自适应隐式数值方法	89
第二节 线性方程组稀疏矩阵的存储	92
一、基于非零元素的稀疏矩阵存储方法	92
二、线性方程组稀疏矩阵的可变分块结构存储	93
第三节 基于可变分块结构的线性方程组迭代算法	94
一、正交极小化方法	94
二、广义极小残差法	96
三、双共轭梯度法	99
四、共轭梯度平方法	101
五、稳定双共轭梯度法	104
六、分块不完全 LU 分解预处理方法	105
第四节 碳酸盐岩缝洞型油藏数值模拟器的计算效率	106

第五章 碳酸盐岩缝洞型油藏数值模拟软件平台	113
第一节 碳酸盐岩缝洞型油藏数值模拟软件平台的架构和数据组织	113
第二节 碳酸盐岩缝洞型油藏数值模拟软件的数据处理和图形显示	116
一、碳酸盐岩缝洞型油藏数值模拟软件平台界面的主要功能	117
二、油藏模型和井参数的显示功能	119
三、历史拟合的对比图	121
四、地质模型的三维可视化	124
五、方案预测及多方案对比	128
第六章 碳酸盐岩缝洞型油藏数值模拟应用	131
第一节 T7-615 单元数值模拟	131
一、单元概况	131
二、生产历史拟合	133
三、剩余油分布与调整潜力	156
四、开发调整方案	162
第二节 S80 单元数值模拟	167
一、单元概况	167
二、生产历史拟合	169
三、剩余油分布与调整潜力	186
四、开发调整方案	190
第三节 碳酸盐岩缝洞型油藏数值模拟研究的主要认识	195
一、生产历史拟合	195
二、剩余油研究的步骤	196
参考文献	198

第一章

碳酸盐岩缝洞型油藏储层特征及数学模型

碳酸盐岩油藏在世界油气资源中占有重要地位。据统计,在全球已探明油气储量中,碳酸盐岩油藏储量约占 50%,其中 60% 以上属于碳酸盐岩缝洞型油藏。根据储集体类型,碳酸盐岩油藏大体可以划分为碳酸盐岩缝洞型油藏、碳酸盐岩裂缝-孔隙型油藏、碳酸盐岩孔隙型油藏三大类。随着油气资源勘探开发程度不断加深,近年来海相碳酸盐岩油藏已成为国内外勘探开发的主战场之一。在我国已探明碳酸盐岩油藏储量中,缝洞型油藏约占 2/3,是我国石油增储上产的主要领域之一。碳酸盐岩缝洞型油藏是经多期次构造运动、多期次岩溶叠加改造以及多期次油气运移聚集成藏等共同作用形成的。在塔里木盆地发现的大型海相碳酸盐岩油田——塔河油田——是我国目前已开发的规模最大的碳酸盐岩缝洞型油藏,其埋深超过 5 600 m,原始地层压力在 60 MPa 左右,地层温度在 125 °C 以上,属于超深、超高温、高压复杂油藏,其油藏特征与孔隙型和裂缝-孔隙型油藏截然不同。碳酸盐岩缝洞型油藏不同类型的空隙空间尺度差异巨大,流体流动复杂,开发难度很大。

塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏一次采油采收率较低,只有 10%~13%,需要人工注水补充地层能量以进行二次采油开发。碳酸盐岩缝洞型油藏数值模拟方法模型准确、计算高效,对碳酸盐岩缝洞型油藏流体流动机理的研究和油藏高效开发具有十分重要的意义。

第一节 碳酸盐岩缝洞型油藏储层特征

塔河油田是近年来在塔里木盆地北部发现的亿吨级碳酸盐岩大油田,其奥陶系油藏位于沙雅隆起阿克库勒凸起南部斜坡区。受多期岩溶作用叠加改造,塔里木盆地形成了一个具有特色的与古风化壳有关的岩溶洞穴裂缝油藏,风化壳以下 300 m 范围内发育了不同尺度的溶蚀孔洞和裂缝(图 1-1 和图 1-2),储集体分布具有严重的非均质性。碳酸盐岩基质是指岩石中除裂隙、洞穴、溶洞以外的基块部分。通过研究约 2 000 个致密灰岩基质和小岩芯样品的分析结果(图 1-3)可知,基质孔隙度介于 0.06%~1.30% 之间(平均值为 0.62%),基质孔隙度小于 1% 的样品占 92.9%,仅有 7.1% 的样品基质孔隙度在 1%~2% 之间;基质渗透率介于 $0.001 \times 10^{-3} \sim 1.97 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间(平均值为 $0.066 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$),



图 1-1 不同尺度的溶蚀孔洞



图 1-2 不同尺度的裂缝

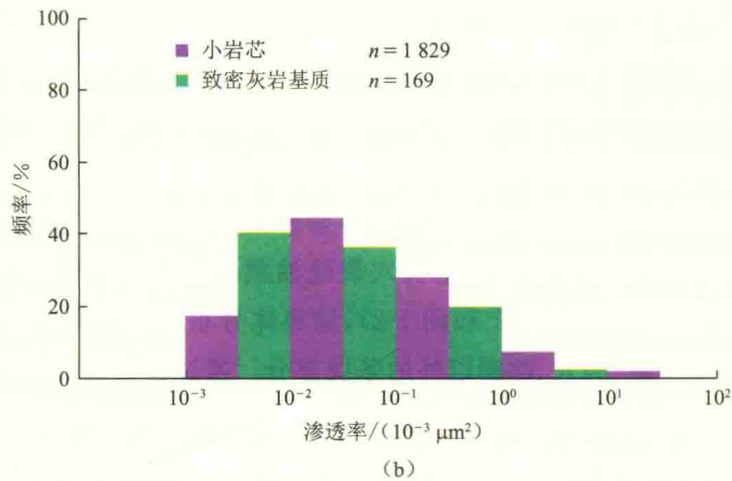
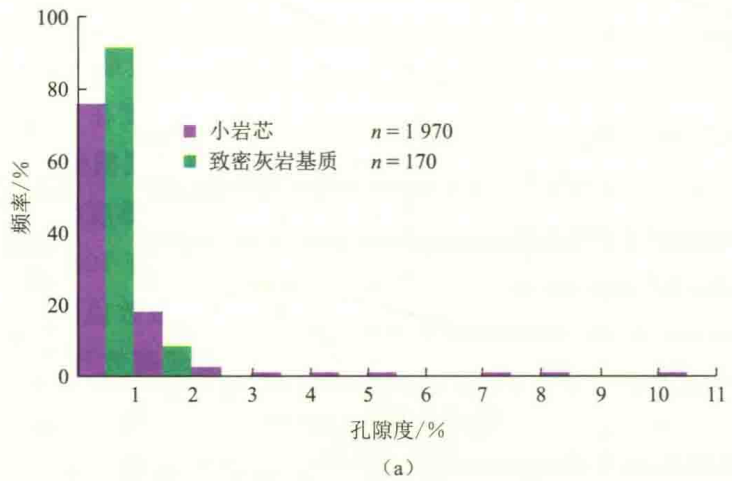


图 1-3 奥陶系碳酸盐岩孔渗分布特征
n—样品数