

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 | 卷三

丛书主编/李 阳

碳酸盐岩缝洞型油藏 地质建模方法

侯加根 胡向阳 李 阳 李永强 等著

GEOLOGICAL MODELING OF PALEOKARST CARBONATE RESERVOIRS

石油石化
学术文库

THE ACADEMIC LIBRARY
OF PETROLEUM AND
PETROCHEMICALS



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



“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

卷三

丛书主编/李 阳

碳酸盐岩缝洞型油藏 地质建模方法

GEOLOGICAL MODELING OF PALEOKARST CARBONATE RESERVOIRS

侯加根 胡向阳 李 阳 李永强 等著

图书在版编目(CIP)数据

碳酸盐岩缝洞型油藏地质建模方法/侯加根等著.
—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;卷三)
ISBN 978-7-5636-5883-1

I. ①碳… II. ①侯… III. ①碳酸盐岩油气藏—地质模型—研究 IV. ①TE344

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 303185 号

书 名: 碳酸盐岩缝洞型油藏地质建模方法

作 者: 侯加根 胡向阳 李 阳 李永强 等

责任编辑: 袁超红(电话 0532—86981532)

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: 13

字 数: 277 千

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

书 号: ISBN 978-7-5636-5883-1

印 数: 1—1 500 册

定 价: 88.00 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。

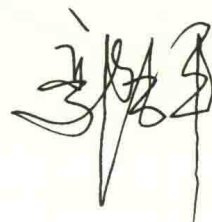
在上述科学研究、技术开发和生产实践所获得的科技成果的基础上,李阳院士领导的团队凝练提升并精心著述完成《碳酸盐岩缝洞型油藏开采机理及提高采收率基础研究丛书》。

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技术，阐述缝洞型油藏酸压、堵水、深抽、降黏等工程技术。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

碳酸盐岩缝洞型油藏属于复杂的油藏类型,其储量规模较大,具有较高的产能。碳酸盐岩缝洞型储集体包括溶洞、溶蚀孔洞和裂缝,其中溶洞根据其几何形态和规模可细分为地下河、孤立洞、竖井及廊道。由于缝洞型储集体空间分布的不规则性、缝洞本身的多尺度性以及勘探开发技术的限制,该类油藏的开发遇到了很多困难。建立定量表征缝洞型储集体和属性参数三维空间展布的地质模型,是油藏数值模拟及编制开发方案、提高采收率的地质基础。

到目前为止,储层建模技术在我国碎屑岩储层描述,特别是老油田碎屑岩储层描述中已趋于成熟,裂缝型碳酸盐岩储层建模技术也已经有了长足的发展。但由于碳酸盐岩缝洞型储集体空间展布的复杂性,传统的碎屑岩油藏描述理论和建模方法并不适用,该类油藏的定量描述尚未取得令人满意的进展。

本书是国家 973 计划项目“碳酸盐岩缝洞型油藏开采机理及提高采收率基础研究”课题“碳酸盐岩缝洞型油藏地质模型研究”、国家科技重大专项“碳酸盐岩油田开发关键技术”课题“碳酸盐岩缝洞型油藏三维地质建模技术”成果的总结。书中描述了地下河、孤立洞、竖井、廊道、溶蚀孔洞、大尺度裂缝、中尺度裂缝、小尺度裂缝等 8 种储集体定量表征技术,针对溶洞储集体,建立了溶洞内部充填物类型及充填程度的定量识别标准;基于不同充填特征,建立了不同类型缝洞型储集体属性参数定量表征方法;提出了岩溶高地古地貌单元断裂与潜水面主控、岩溶斜坡潜水面主控的岩溶相控缝洞发育模式;在此基础上,采用多点地质统计学模拟算法和基于目标的模拟算法模拟了地下河、孤立洞等不同类型储集体的空间分布特征,建立了不同类型缝洞型储集体离散分布模型。在各类缝洞型储集体模型的约束下,采用随机模拟的方法分别建立了缝洞型油藏溶洞储集体、溶蚀孔洞储集体和裂缝储集体属性参数模型。书中重点介绍了 5 项主要研究成果:

- (1) 缝洞单元内部组构要素表征技术;
- (2) 缝洞型储层单井属性参数表征技术;
- (3) 缝洞型储集体离散分布模型建模方法;
- (4) 缝洞型储集体属性参数建模方法;
- (5) 缝洞型油藏地质储量计算方法。

全书内容共分8章。第一章绪论,介绍碳酸盐岩缝洞型油藏的一般特征、塔河油田概况、碳酸盐岩缝洞型油藏地质建模研究现状并提出本书碳酸盐岩缝洞型油藏多元约束多尺度型相控建模的思路。第二章碳酸盐岩缝洞型储集体分类分级,根据不同类型、不同规模的缝洞型储集体分别采用特定的定量表征手段和建模方法的思路,根据成因类型及尺度规模的差异对缝洞型储集体进行分类分级。第三章碳酸盐岩油藏缝洞单元内部组构要素表征,建立碳酸盐岩缝洞型储集体定量表征技术,论述不同类型储集体形态规模、充填特征、配置关系和连通性特征。第四章碳酸盐岩缝洞型储层单井属性参数表征,阐述基于缝洞型储集体充填特征的属性参数表征方法。第五章碳酸盐岩缝洞离散分布模型建立,论述不同类型缝洞型储集体建模约束参数及不同类型缝洞储集体离散分布模型建模方法。第六章碳酸盐岩缝洞型油藏属性参数模型建立,介绍不同类型储集体属性参数建模方法。第七章碳酸盐岩缝洞型油藏地质储量计算方法,介绍缝洞型油藏油水界面的确定方法、动用地质储量计算方法。第八章碳酸盐岩缝洞型油藏地质模型应用,阐述缝洞型油藏三维地质模型在油藏物理模拟、油藏数值模拟及剩余油挖潜中的应用。

感谢在本书撰写过程中康玉柱院士、郭尚平院士、韩大匡院士、彭苏萍院士、罗平亚院士、袁向春教授、罗治斌教授、窦之林教授及曲寿利教授等给予的多次指导;感谢中国石化石油勘探开发研究院李江龙教授、王光付教授、康志江教授、张宏方教授等领导、专家给予的大力支持和帮助;感谢国家973重大基础研究项目组及国家科技重大专项项目组所有研究人员;中国石油大学(北京)刘钰铭老师、马晓强博士、齐得山硕士,长江大学赵彬老师,中国石化石油勘探开发研究院权莲顺、吕心瑞高工等为本书做了大量研究工作,在此对他们的大力支持和帮助一并表示感谢!

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 碳酸盐岩缝洞型油藏一般特征	1
第二节 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏地质背景	5
一、区域概况	5
二、构造背景	6
三、地层与沉积特征	7
四、古地貌背景	9
第三节 碳酸盐岩缝洞型油藏地质建模研究现状	11
第四节 碳酸盐岩缝洞型油藏多元约束多尺度相控建模方法的提出	12
一、缝洞型储层建模原则适用性分析	13
二、缝洞型油藏多尺度储集体分类建模必要性	13
第二章 碳酸盐岩缝洞型储集体分类分级	16
第一节 储集空间分类分级	16
一、溶洞储集体	18
二、溶蚀孔洞储集体	20
三、裂缝储集体	21
四、基质岩块	23
第二节 缝洞单元划分	25
一、缝洞系统与缝洞单元	25
二、缝洞单元划分	26
第三章 碳酸盐岩油藏缝洞单元内部组构要素表征	30
第一节 组构要素概念	30
一、现代岩溶溶洞	31

二、野外相似露头	31
三、组构要素划分	33
第二节 组构要素识别	35
一、溶洞的识别	36
二、溶蚀孔洞的识别	49
三、裂缝的识别	49
第三节 典型单元组构要素特征	50
一、典型单元组构要素识别	50
二、典型单元组构要素特征	58
第四章 碳酸盐岩缝洞型储层单井属性参数表征	74
第一节 溶洞属性参数	74
一、溶洞内部充填特征	74
二、基于充填特征的溶洞属性参数解释方法	83
三、缝洞单元充填特征分布规律	86
第二节 溶蚀孔洞属性参数	94
第三节 裂缝属性参数	94
一、裂缝倾角的判断	95
二、裂缝解释模型	95
第四节 缝洞单元属性参数分布特征	96
一、不同类型缝洞型储集体属性参数分布特征	96
二、溶洞内部属性参数分布特征	96
第五章 碳酸盐岩缝洞离散分布模型建立	99
第一节 溶洞离散分布模型	102
一、岩溶模式	103
二、井间定量约束参数	105
三、建模算法	111
四、溶洞离散分布模型	120
第二节 溶蚀孔洞离散分布模型	127
第三节 裂缝离散分布模型	129
一、研究区裂缝参数	129
二、大尺度裂缝离散分布模型	132
三、中尺度裂缝离散分布模型	133
四、小尺度裂缝离散分布模型	135
第四节 离散分布模型融合	137

第六章 碳酸盐岩缝洞型油藏属性参数模型建立	139
第一节 溶洞属性参数模型	139
一、属性建模算法	139
二、变差函数拟合	140
第二节 溶蚀孔洞属性参数模型	142
一、孔隙度建模硬数据	142
二、孔隙度建模井间约束软数据	143
三、序贯高斯协同模拟	144
第三节 裂缝属性参数模型	147
一、裂缝开度及传导率	147
二、裂缝等效孔隙度模型	149
三、裂缝等效渗透率模型	149
第七章 碳酸盐岩缝洞型油藏地质储量计算方法	154
第一节 缝洞型油藏油水界面确定方法	154
一、油水界面的一般确定方法	154
二、碳酸盐岩缝洞型油藏油水界面的确定方法	155
三、塔河油田缝洞单元油水界面研究	157
第二节 缝洞型油藏储量计算方法	164
一、地质储量计算方法	164
二、储量计算方法适应性分析	166
三、碳酸盐岩缝洞型油藏储量计算方法	167
第三节 缝洞型油藏典型单元地质储量计算	168
一、S48 典型缝洞单元地质储量计算	168
二、T615 典型缝洞单元地质储量计算	170
三、T607 典型缝洞单元地质储量计算	171
第八章 碳酸盐岩缝洞型油藏地质模型应用	174
第一节 地质模型用于油藏数值模拟	174
第二节 基于地质模型分析剩余油分布	177
参考文献	179

第一章 绪 论

碳酸盐岩储层在全球油气勘探开发中的重要地位不言而喻。我国的碳酸盐岩主要分布于渤海湾盆地、四川盆地、鄂尔多斯盆地以及塔里木盆地(江怀友等,2008)。虽然在近50年的勘探历程中发现了普光气田、塔河油田等大型油气田,但碳酸盐岩储层整体探明程度仍处于较低的水平,今后海相碳酸盐岩层系一定是我国油气勘探开发的主战场(汤良杰等,2006)。

在塔里木盆地,奥陶系碳酸盐岩是重要的油气勘探对象。塔北隆起是塔里木盆地的主要油气产区之一,在这里发现了阿克库勒、轮南、哈拉哈塘和英买力等多个油气区块,其中位于阿克库勒凸起上的塔河油田是目前国内第一个海相古生界大油田(康玉柱,2002)。截至2011年底,塔河油田累计提交探明地质储量 11.01×10^8 t,累计产油 $5\,830 \times 10^4$ t,年产原油 725×10^4 t,年产天然气 16.8×10^8 m³。

我国海相碳酸盐岩储层主要有岩溶型储层、礁滩相储层以及白云岩储层3种类型(康玉柱,2008),其中岩溶型储层以溶蚀缝、洞发育为显著特征。塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层是一种典型的岩溶成因缝洞型储层,它既不同于我国东部任丘油田的单纯裂缝型碳酸盐岩储层,也不同于四川盆地普光气田的礁滩相储层,更不同于常规孔隙型砂岩储层。

第一节 碳酸盐岩缝洞型油藏一般特征

喀斯特(karst)是水对可溶岩(碳酸盐岩、硫酸盐岩和卤化物岩)产生以溶蚀为主的地质作用过程和现象的专业术语,在中国普遍称其为“岩溶”。喀斯特原是伊斯特里亚(Istria)半岛上石灰岩高原的地名,因为喀斯特的第一个理论概念是在该地区建立的,因此百年前就已开始使用这一名词来指代石灰岩高原的奇特地貌。我国的岩溶分布广、面积大、类型多,从地下几千米的深处到海拔5 000 m以上的山峦均有发育。据统计,我国岩溶面积(包括裸露型、覆盖型和埋藏型)估计达 200×10^4 km²。1966年开始,我国将“喀斯特”改称“岩溶”。岩溶的类型可以根据不同的原则进行多种分类。例如,按可溶岩岩性,可划分为碳酸盐岩岩溶、硫酸盐岩岩溶和卤化物岩岩溶;按气候条件可划分为热带岩溶、温带岩溶,等等。对岩溶的研究包括岩溶水文地质、工程地质学、岩溶景观开发、溶洞

研究及岩溶矿床学等。

国外早期的岩溶研究以欧洲为主。19 世纪中叶,岩溶研究进入地理(特别是地貌学)和地质综合研究时期,内容包括岩溶的地质成因、地貌特征、岩溶发育的长期观测等。19 世纪末,学者斯维奇(J. Cvijic)研究了喀斯特高原的奇特地貌,并在 1893 年发表著作阐明了岩溶形态的成因主要是侵蚀—溶蚀作用,为大多数学者所认同。他还提到了岩溶的侵蚀基准面的问题,并将岩溶地区的地下水分为 3 个带:上部为干燥带(即充气带),中间为季节饱和带,下部为全饱和带。在我国,晋代就有关于岩溶现象的文字记载;宋代的沈括和范成大指出钟乳石的成因为沉淀作用,如沈括在《梦溪笔谈》第 25 卷中写道:“又石穴中水,所论皆为钟乳……皆湿之所化也。”宋代的周云非在《岭外代答》中还提到了地下河袭夺地表水系的现象。明代的徐霞客更是考察了广西、贵州、云南一带的 100 多个溶洞,并作了详细记载,写下了著名的《徐霞客游记》,这比欧洲最早的岩溶著作早了近 200 年。新中国成立以来,伴随着国民经济建设的需要,开展了许多岩溶方面的工作。1966 年召开的全国岩溶学术会议讨论了岩溶学的基本问题和研究方向,1975 年召开了全国岩溶十年规划会议,并在桂林成立了中国地质科学院岩溶地质研究所。进入 20 世纪后,南斯拉夫、苏联、罗马尼亚、波兰、法国、德国、意大利、西班牙和美国等都开展了岩溶研究工作,并出版了一些岩溶专著,如《溶洞研究》(1965 年)、《喀斯特现象》(1968 年)、《北半球的喀斯特》(1972 年)、《喀斯特地貌》(1973 年)等。

Roehl(1967)认为“岩溶其实是一种成岩作用形成的地貌,具有多种清晰且可解释的形态”。Esteban 和 Klappa(1983)认为“岩溶作为一种成岩相,是碳酸盐岩在大气水成岩环境中留下的一种印记,它受碳酸钙的溶解和迁移控制,可发生在多种气候条件和大地构造背景下,并形成一些地貌景观”。

近几十年来,随着油气在岩溶型岩层中的发现,油气地质领域的岩溶研究也积极开展起来,与古岩溶有关的碳酸盐岩储层已成为一种重要的油气储层(袁道先等,1994;Robin, 1975; Ford et al., 1978; Longman, 1980; Scholle et al., 1983)。

储层中的岩溶作用应该说是一种广义的成岩作用。它包含了对原岩的改造、新矿物的产生及水的运动和水的化学特征的改变。目前已发现的油气多分布在古岩溶地层中。对于什么是古岩溶,目前还没有统一的说法。Walkden(1974)和 Wright(1952)将古岩溶定义为“被年轻的沉积物或沉积岩覆盖的岩溶”;James 和 Choquette(1988)认为“古岩溶是发生于地质历史时期中的岩溶,它通常被更年轻的沉积物或沉积岩所覆盖,古岩溶可以进一步划分为被沉积物或沉积岩所覆盖的埋藏古岩溶和没有被覆盖的残余古岩溶”。总之,古岩溶是地质历史时期中发生的岩溶,而现代岩溶应该是正在发育的岩溶,正处于岩溶发育的某个阶段。从这个方面来讲,岩溶是古代还是现代并不是关键,重要的是岩溶的演化。

1985 年,在美国科罗拉多矿业学院由 Choquette 和 James 组织召开了“古岩溶系统及不整合面特征和意义”研讨会,会后于 1987 年由美国石油地质学家协会(AAPG)出版了古岩溶研究专辑《古岩溶》(*Paleokarst*),其中包含了当时国际上碳酸盐岩古岩溶储层