

储层特征研究与预测

——以胜利油田义和庄区块为例

隋少强 张义杰 曹思远 编著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书应用现代储层研究的方法，从基本地质条件出发，按照储层研究“点—面—体层次研究”的技术原则，充分发挥地质、地球物理、油藏工程、应用数学和计算机技术等多学科协同攻关特性，以义和庄区块为例，综合地研究了碳酸盐岩古潜山储层地质特征，建立了单井地质模型，并应用灰色过程模式识别等方法进行了储层预测。本书对于从事此类研究的科技人员具有重要参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

储层特征研究与预测/隋少强等编著. -北京:地质出版社, 2003. 10
ISBN 7-116-02529-4

. 储... . 隋... . 储集层-特征-研究 储集层-特征-预测 . P618. 130. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 091278 号

CHUCENG TEZHENG YANJU YU YUCE

责任编辑: 陈 磊

责任校对: 王素荣

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话: (010) 82324508 (邮购部); (010) 82324565 (编辑部)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zbs@gph.com.cn

传 真: (010) 82310759

印 刷: 北京印刷学院实习工厂

开 本: 787mm×1092mm¹/₁₆

印 张: 6.5

字 数: 160 千字

印 数: 1—600 册

版 次: 2003 年 10 月北京第一版·第一次印刷

定 价: 18.00 元

ISBN 7-116-02529-4/P·1871

(凡购买地质出版社的图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行处负责调换)

前 言

对于碳酸盐岩古潜山油气藏来说，只有在储层岩石裂缝和岩溶比较发育的区域，才能形成有利的含油气区。但是，裂缝和岩溶这两种主要的控制储层产能的物性参数，具有很强的非均质性，因此，对于这种类型储层的研究与预测难度较大。目前，国内外对于潜山类储层的研究还不太成熟，属于世界级难题。

目前已发现的国内潜山灰岩储层主要分布在渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地、塔里木盆地及四川盆地。由于各盆地的构造演化史、海相碳酸盐岩地层的发育时期、风化剥蚀期及油源岩等方面的不同，决定了它们所形成的潜山油气藏各具特点。本书以胜利油田义和庄区块为例，对碳酸盐岩古潜山油气藏储层进行剖析。

本书是作者在博士论文的基础上完成的，在此衷心地感谢我的导师王允诚教授，是他引导我走上了油气田勘探开发的道路，是他悉心地指导我完成了博士论文的答辩。在此，我向当时同一课题组的胡远来教授、匡建超教授、徐国盛教授、李德敏教授等再一次表示衷心地感谢。再一次向胜利油田的郑和荣、王永诗、杨耀忠等专家和同行的现场工作支持表示感谢。

本书是我在新疆油田分公司博士后工作站工作期间完成的，也是该工作站的成果之一，本书的出版得到了我的导师油田公司勘探处张义杰处长的悉心指导和审核，得到了人事处张建国处长、科技处徐洪德处长、研究院况军院长、王绪龙副院长、薛新克老总和勘探所张年富所长等的大力支持和帮助，在此一并表示感谢。

本书虽然是以潜山灰岩储层为例编写的，但是书中所用方法完全适用于碎屑岩储层的特征研究与预测，特作此说明。

限于作者水平有限，错误和不当之处在所难免，望广大同行批评指正。

作 者
2003 年 6 月

目 录

前 言

1 绪论	(1)
1.1 储层特征研究与预测的研究现状	(1)
1.2 研究的重点和难点	(4)
1.3 研究思路	(4)
1.4 取得的主要地质认识	(5)
1.5 采用的新技术和新方法	(6)
2 储层地质特征研究	(7)
2.1 区域地质特征概述	(7)
2.2 储层岩石学特征	(10)
2.3 储层岩溶和裂缝形成机制	(11)
2.4 储层类型识别	(16)
2.5 储层储集空间特征	(19)
2.6 裂缝分布的分形特征	(25)
3 储层溶蚀和裂缝特征的单井模式	(29)
3.1 溶蚀和裂缝的发育特征	(30)
3.2 溶蚀和裂缝特征的测井（及录井）评价	(35)
3.3 溶蚀和裂缝发育的控制特征参数	(40)
3.4 灰色模式聚类分析及产量预测	(45)
3.5 溶蚀和裂缝带单井模式建立	(50)
4 储层参数的遗传神经网络识别与预测	(52)
4.1 关于遗传算法	(52)
4.2 神经网络算法原理	(55)
4.3 遗传神经网络识别原理	(57)
4.4 遗传神经网络储层参数预测	(61)
5 储层参数的灰色过程模式识别与预测	(65)
5.1 灰色过程模式预测的数学原理	(65)
5.2 灰色过程模式预测	(74)
6 储层特征与预测综合研究结果	(90)
6.1 预测方法比较	(90)
6.2 储层特征综合评价	(91)
6.3 综合多种因素的有利含油区预测	(95)
6.4 结论	(97)
参考文献	(99)

1 绪论

国外一些盛产石油的国家都分布有碳酸盐岩的大油田，在世界已探明的油气储量中，碳酸盐岩储量规模（如中东石油储量）引起了人们的广泛关注。碳酸盐岩作为储层，已成为重要的勘探对象，是油气工业的重要研究目标。我国继 20 世纪 70 年代初在东部的华北任丘发现大型碳酸盐岩古潜山油气田之后，80 年代在西部的四川、陕西、新疆等地的碳酸盐岩储层中油气勘探中又有大的进展。我国已发现的碳酸盐岩油气储层大都是裂缝加岩溶型储层，因此，对这类储层的研究就成了焦点。

有关古岩溶储层的重要性在国内外早已引起高度重视，渤海湾含油气盆地对碳酸盐岩古潜山的油气勘探，也越来越明显地显示出古岩溶作用对储层的形成、发育和油气的聚集有直接或间接控制作用。特别是与不整合面有关的古岩溶碳酸盐岩储集层可以形成大型渗滤空间，是形成大中型油田的基本条件之一。

对于碳酸盐岩古潜山油气藏来说，由于其基质比较致密，一般都不会形成有效的储集层。只有在储层岩石裂缝和岩溶比较发育的区域，才能形成有利的含油气区。但是，裂缝和岩溶这两种主要的控制储层产能的物性参数，具有很强的非均质性，因此，对于这种类型储层的研究与预测难度较大。目前，国内外对于潜山类储层的研究还属于世界级难题。

本书应用现代储层研究的手段与方法，从基本地质条件出发，应用储层研究“点—面—体层次研究”的技术原则^[50,63]，充分发挥地质、地球物理、油藏工程、应用数学和计算机技术的多学科协同项目攻关特性，综合研究济阳拗陷中义和庄凸起的断块型古潜山储层地质特征，并应用灰色模式识别等先进技术方法进行储层横向预测。借助于先进的数学方法，利用三维地震资料，预测致密低孔低渗碳酸盐岩的溶蚀、裂缝分布和产能大小，目前还是一个新的研究课题。

1.1 储层特征研究与预测的研究现状

1.1.1 当前国外油气储层研究的五大趋势

1.1.1.1 对储层沉积学的研究日益从宏观向微观方向发展

(1) 岩性油气藏的勘探要求掌握沉积地质体的几何学特征 (Ravenne, et al., 1989; T. Dreyer, 1993)，即宏观非均质性的研究。

(2) 加强层内非均质性研究，以露头 and 成熟油田研究为基础建立层内储层非均质性的地质模型。

(3) 各种次生孔隙形成的成因机理也不断地有了新的见解和模式 (G. Schmmugan, 1986; I. O. Meshri, 1986; Scherer, 1987; R. C. Sardam, 1989)，为储层物性的预测和模拟提供了一定的依据，但不同成因盆地油气藏储层的次生孔隙定量研究和预测仍处在探索阶段。

1.1.1.2 对储层的描述和预测日益从定性向定量方向发展

(1) 为了对地下储集体的孔渗进行计算和预测,以解决油气生产的实际需要,不少学者对此进行了大量的研究工作 (M. Scherer, 1987; Schmoher, 1989; Robert, 1991; D. P. Edward, 1992),并提出了一些经验公式或数学模型,但往往公式中的一些参数在实际应用中难以或无法确定。

(2) 定量描述储层物性参数的三维空间展布是近年来油气藏数值模拟技术对储层研究提出的新要求。

(3) 定量描述和预测储集体在横向上的连续性或空间展布特征,即开展储层(随机)建模或模拟研究已成为储层地质学家近年来的重点攻关内容,这也正是为满足油田开发、加密钻井和扩边井确定的需要。比较沉积学是这一研究的基础,计算机技术(尤其图形工作站)是实现其目的的重要手段和硬件。

1.1.1.3 理论沉积学向应用沉积学发展并形成储层表征技术

(1) 第十三届国际沉积学大会、石油大会把储层沉积学和建立地质模型列为重点。

(2) 20世纪80年代后期储层地质学、开发地质学的迅速复苏和再度崛起,是造成这一形势的前提。

1.1.1.4 储层表征从单学科向多学科协同研究发展

从目前国际上对储层的研究来看,主要有三个研究内容或角度,其目的是从不同的侧面对油气储层的物性特征和空间特征进行研究:

(1) 为建立储层地质模型而大力开展露头储层和井下地质研究,已成为储层地质学新的研究范畴。

(2) 测井资料数字处理技术的发展为油气藏描述和储层模拟与验证提供了基础。

(3) 随着计算机技术的迅猛发展,储层地震勘探和模拟预测技术进一步发展与革新。

1.1.1.5 各种模拟方法和软件的不断涌现使储层的研究进一步计算机化

(1) 常见的储层模拟或随机建模方法主要有:转带法(turning bands method);协同克里格法/泛克里格法(Cokriging/universal Kriging);指示克里格法(indicator Kriging method);条件概率模拟(conditional probability simulation);蒙特卡洛法(Monte Carlo);分形几何法(fractal geometry);增强截断高斯法(enhance truncated Gaussian)。

(2) 模拟软件的种类繁多。

1.1.2 国内油气储层研究现状、问题及今后研究的重点

尽管储层地质学,尤其是地质模型的研究在某些方面已达到或接近国际水平,但我国储层研究总体上还存在着一些不足之处:

(1) 在手段上比较落后,在用计算机对地震和测井的处理手段及图形显示方面还存在着相当大的差距,目前主要是引进国外软件;另外地质解释的精度方面还相差甚远。

(2) 各学科联合作战方面,虽然大家都已经明确了地质、地震、测井、测试及计算机相结合的优越之处和必由之路,但联合作战方面尚很不足,特别是综合研究方面显得相当薄弱,主要问题是科研人员的知识面较窄和长期单学科独立作战的习惯和观念一时难以扭转。

(3) 在用计算机进行储层模拟和预测方面,研究力量相当薄弱,尤其是在储层模拟或随机建模中如何将地质描述转换为定量模型的研究还很不深入。这一点对于碎屑岩储层

是这样，对于碳酸盐岩储层更是如此。

(4) 在建立地质模型方面，还没有普及，许多储层地质工作者还陷在原来的模式之中，对各类模型的概念和建模思想了解得不够透彻，reservoir characterization 和 modelling 此二词尚未完全为人们所接受。不能把建模仅仅理解成为最终画一张模式图。

(5) 在建立地质知识库方面起步较晚，建立的标准地质剖面还很少，对于相似地质条件的类比性研究还不够重视。

1.1.3 国内潜山灰岩储层研究现状

目前已发现的国内潜山灰岩储层主要分布在渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地、塔里木盆地及四川盆地。由于各盆地的构造演化史、海相碳酸盐岩地层的发育时期、风化剥蚀期及油源岩等方面的不同，决定了它们所形成的潜山油气藏各具特点。

渤海湾盆地是华北地台中新生代块断解体过程中，形成的第三纪拉张断块盆地。陈霞等(1994)认为该盆地的油气储集层是沉积成岩作用叠合加里东期、印支-燕山期、燕山-喜马拉雅期构造作用改造形成的。在漫长的地史过程中，演化出三种类型五大套储集层，其中第一套燕山-喜马拉雅期不整合面附近奥陶系基岩古潜山则是华北地区新生界石油富集体。胡见义等(1990)在“渤海湾盆地地质基础与油气富集”一文中指出“渤海湾盆地是一个多断陷、多含油气层系和多种油气藏类型的大型含油气盆地，它的地质结构和成油规律与国外有些大型含油气盆地不同，具有自身独特的特点。在纵向上由断陷前期、断陷期和拗陷期等三套构造层系组成，在平面上具有多凸多凹和凸凹相间排列的分布特点。在油气藏分布方面，在不同凹陷或凹陷不同类型构造断裂带，油气藏和复式油气聚集(区)带有一定差异，但仍有一定分布规律”。

济阳拗陷是渤海湾盆地中的一个含油气拗陷，其中的潜山油田都是在反向断层切割的屋脊型断块山背景上形成的，又称“坡上山”潜山油藏，是潜山油藏的又一种类型。李春光等(1997)指出，“济阳拗陷共发现17个古潜山油气藏，它们存在于沾化、车镇和东营3个凹陷之中。多数分布其边缘，紧靠凸起的部位。济阳拗陷的古潜山油气藏均是下第三系沙四段、沙三段的烃类运移至潜山圈闭中聚集成藏。从油气藏的特点分析：有褶皱山油藏、断块山油藏和残丘山油藏三类。断块山油气藏是油气经断层通道运移至断块山圈闭中聚集而成，有六个，分布于东营、沾化和车镇凹陷，含油气层位均为奥陶系灰岩。

在海相碳酸盐岩储层发育影响因素研究方面，余家仁等(1998)认为储层中泥质白云岩与粗结构藻白云岩韵律性的岩性剖面，在纵向上储层与非储层交替出现，孔洞的发育顺层分布，形成同层渗透带；多次沉积间断构成多岩溶期，并有沿风化壳的溶蚀缝洞带及古水平岩溶带；构造应力产生断层和构造缝发育带，可形成断裂高渗带；成岩后生作用及储层演化经历了各种次生改造，形成现今的储层面貌。在岩溶学与碳酸盐岩地区油气普查勘探研究方面，曾允孚等(1996)、袁道先(1993)等指出：从岩溶学看来，古老致密碳酸盐岩中的油气储存空间或介质，如古潜山、溶孔、溶缝、溶洞等都属于一种岩溶形态，即岩溶作用的产物。

在用地震资料预测灰岩储层孔缝发育带的研究方面，李卫忠等(1996)根据灰岩储层的岩石物理学特征，提出了综合利用各种瞬时动力学信息、相对层速度信息及频率-时间谱扫描技术，预测灰岩储层孔隙-裂缝发育带的方法。该方法克服了利用单一物性参数进行储层预测的局限性和多解性，还可直观地识别同一灰岩储层中孔隙-裂缝发育带在横

向和垂向上的分布情况。汤长彪等（1991）认为利用地震资料预测灰岩储层孔缝发育带，是从地震资料中反演与灰岩孔隙、孔缝、含油气性有关的地震参数。然后依据储层的空间形态计算灰岩储层的平均吸收系数、振幅等参数的相对变化，预测孔缝发育带。

在古潜山有利含油区分布规律研究方面，唐飞等（1989）认为，古潜山油气藏距大断层愈近，储集条件愈优越，孔隙度越高，渗流条件越好，断层带是油气高产区块。余家仁（1987）依据任丘油田的实际资料，分析了碳酸盐岩储集层缝洞孔发育的影响因素及其分布规律，提出由溶蚀孔洞、构造裂缝、古风化壳、古水平岩溶带及沿隔层顶底板分布的岩溶带等五种缝洞孔发育带交织叠加，构成储集层连通网络，勾绘出碳酸盐岩油藏缝洞孔发育带的连通模式。潜山带储层在纵向上主要集中在潜山的风化壳，平面上主要沿断层分布。沿断层发育的奥陶系潜山是该区古生界潜山勘探的最有利目标。

1.2 研究的重点和难点

义和庄区块奥陶系古潜山油藏为裂缝岩溶型碳酸盐岩油藏，由于灰岩基质孔渗性能很差，无法产出高产油气，只有在储层中裂缝和岩溶较发育的部位，油气产能才能达到中—高产，这就造成了油气藏产能分布严重不均的勘探开发难题。这一难题是由于碳酸盐岩储层岩溶和裂缝分布的严重的非均质性造成的。因此，如何解决这个难题也是本次研究的重点。

为了解决这一难题，需要从寻找控制产能的主要地质因素出发，这自然就落实到寻找裂缝发育带以及和裂缝相伴的岩溶发育带这一核心问题上来。对于像义和庄这种碳酸盐岩储层，其裂缝和岩溶的发育具有多成因、多期次特征，裂缝和岩溶的形成及其分布所受控制的地质因素很多，这就使得在储层特征研究的基础上运用地震资料预测裂缝和溶蚀发育带同样具有很大的难度。

非均质性严重的储层特征对储层研究和预测提出了更高的要求，运用常规的方法，或单一的方法，其精度是难以达到准确预测储层的要求的，必须在掌握储层初始地质资料的基础上，运用新理论、新方法、新技术和新的测试手段来认识这类储层。

1.3 研究思路

对于像义和庄区块这种非均质性很强的、裂缝加岩溶型碳酸盐岩储层的研究与预测，应该建立在对其地质特征的深刻认识的基础之上，因此，从地质模型的建立出发，把握其主要的、基本的地质特征，采用针对性较强的方法技术去解决各个方面的问题，做到有的放矢。在储层溶蚀及裂缝描述和预测过程中，通过研究控制储层发育的各种地质因素（构造的、溶蚀的等），找到主要的控制因素及其作用方式，以这种作用方式及其结果为基础，就可以对储层进行横向预测。这种储层研究与预测方法能够把握储层空间分布的总体趋势，它提供了储层预测的主要方向。显而易见，这种建立在地质研究基础上预测是十分重要的，也是具有牢固的地质基础的，只要建立的地质模型是准确的，那么这种预测结果就是可信的。

储层研究的目的是为了建立储层岩溶及裂缝发育的地质模式，并在此基础上采用综合研究方法建立相应的预测模式，最终要明确哪里的储层发育较好、哪里的岩溶相对发育、哪里裂缝相对发育、哪里的储层含油气性较好等，直接为勘探开发提供预测井位。

1.4 取得的主要地质认识

本书针对裂缝岩溶型碳酸盐岩油气藏这种非常规油气藏的储层研究与预测问题，运用多种新方法，取得一些有意义的地质结论，在理论研究、技术方法应用方面作一些有建设性的工作，取得了一些地质新认识，主要包括：

(1) 由于义和庄区块的碳酸盐岩储层长期暴露接受风化剥蚀，再加上断层比较发育，可以发现有利油气储集带的分布具有这样的规律，即在断层的高部位或附近，油气井的产能比较高，而在断层的低部位或远离断层，油气井的产能比较低或者无产能。这个规律要在研究产能与岩溶和裂缝的密切关系、岩溶和裂缝又与断层的发育相伴生的基础上总结。

(2) 在应用提取的地震特征多参数进行储层物性及产能预测的研究中，发现应用灰色过程模式提取的某些特征参数与储层岩溶及裂缝相关性较好，在评价的区块中，产能以非线性和统计特征类的组合为好，溶蚀以统计和自相关特征类组合为宜，而裂缝则是非线性和自相关组合最佳。而研究实例区块的岩溶及裂缝分布主要与断层及岩溶和裂缝所处的构造部位等因素有关，因此，可以利用这些特征参数与控制产能的地质因素之间的关系，在地质建模的基础上，综合评价储层和预测有利含油区。

(3) 本书中尝试性地应用岩石导电效率参数对储层进行判别。裂缝是影响碳酸盐岩导电效率的主要因素：岩石中只存在裂缝时，其导电效率很高，若为水平缝或穿过井眼的垂直缝，其导电效率为 1；随着裂缝宽度的增大，导电效率很快增大。岩石中存在孔洞时的导电效率远小于存在裂缝时的导电效率，孔洞越大，导电效率越低，若为孤立孔洞，导电效率为 0。在研究中要考虑到裂缝的产状、裂缝充填情况以及单位体积孔洞个数、孔洞配位数和含油气情况，这些因素都将对导电效率有不同程度的影响。不穿过井眼的垂直裂缝，若没有与其他穿过井眼的裂缝相连，它对电流的传导将无贡献，其局部导电效率为零。孤立的或不连通的溶洞，对导电效率的传导亦无贡献，它们的导电效率为零。岩石中含有油气时，尤其是裂缝中含有油气时，导电效率将降低。

(4) 运用变尺度分形统计方法，统计了储层裂缝发育区平面分布的相似维数，理论和实际资料都证实该分维数可以表现裂缝平面分布的非均质性，并对平面上裂缝发育程度具有很强的定量描述能力。相似维数对于定量评价储层裂缝平面分布的非均质性和裂缝发育的程度，是一种实用性很强的非线性统计方法，对于裂缝带的平面分布应用了一种新的相似维数统计方法。裂缝发育的线性分布曲线表明，裂缝分布具有分形几何特征，裂缝发育带平面分布的相似维数统计结果表明，实例区块储油层的裂缝充填空间能力较差，裂缝发育程度不是很强，这与目前该油气藏的产能情况比较吻合。

(5) 本书首次把遗传神经网络识别技术应用到碳酸盐岩的储层参数识别中来。它是一种新兴的寻优技术，适合于复杂的、叠加的、非线性系统的辨识描述。神经网络算法是当前较为成熟的识别分类方法，但网络权值的训练一直存在着缺陷。利用 GA 的优点来克服 BP 算法收敛慢和易局部收敛的缺陷，同时与 BP 算法的结合，也解决了单独利用 GA 往往只能在短时间内寻找到接近最优解的近优解这一问题，引入 BP 算法的梯度信息将会避免这种现象。为此结合具体情况，在对遗传算法进行改进的基础上，本书采用了一种基于遗传学习权值的神经网络识别方法，取得了较好的效果。

(6) 灰色过程模式储层横向识别技术与以往的点模式识别有很大的不同，它是在点模式的基础上引入动态滑动提取法发展起来的，在某一地震道提取特征参数时是提取一系列的参数集，它比仅取一个平均值具有更好的三维地震特征表征能力。该方法还引进模糊理论与分形理论，使得对于裂缝等具有分形特征的物性参数的描述更具有实际意义。该方法基于过井处的已知井模式建立预测模型进行井间外推预测，模式井回判率达到百分之百，与已有钻井的产能情况吻合程度高，保证了预测的高精度。研究中首次运用该方法对于碳酸盐岩储层进行岩溶、裂缝发育带及产能预测，是预测方面的尝试性进展。

1.5 采用的新技术和新方法

在本书的研究实例中采用一系列新方法，主要包括：运用遗传算法和神经网络技术进行储层参数的横向预测；运用分形几何学研究裂缝平面分布规律；运用灰色系统理论进行未测试层段的聚类分析；运用灰色模式识别技术进行多参数的储层横向预测；尝试运用导电效率进行储层类型判别。

本书具有以下特色：

(1) 地质与物探的紧密结合。地质资料、测井资料和地震资料在对油藏的表现能力方面存在着精度和覆盖能力上的差别，运用岩心资料与测井资料建立二者之间的数学关系，可以完成储层参数的测井评价，用测井来约束地震资料，可以将储层参数准确地扩展为三维场，达到井间预测的目的。

(2) 多种数学方法的运用。储层研究的最终目的是达到对储层特征及其三维分布规律的认识，定量化描述过程中储层特征是以特征参数的形式来体现和进行信息传输的，各种参数之间的匹配也是基于数值运算来完成的，数学方法在这些过程中起着“桥梁”的重要作用。可以说，没有近代数学的发展，储层研究只能停留在对储层基本地质特征的“就事论事”式的文字性描述的水平，而不可能达到真正的预测。本书中充分体现现代储层研究的定量化、信息化特色，通过获取大量的储层参数，运用各种数学方法（包括数理统计学、地质统计学、非线性数学）对这些数字化信息进行处理，最终通过这些特征参数的空间分布规律来描述和预测储层，指导油气的勘探和开发。

(3) 理论与生产实际相结合。研究实例中运用传统储层研究方法技术的同时，尽可能多的使用新方法、新技术、新理论，但并不以方法的先进与否来评价其相对优劣，而是同研究实例义和庄奥陶系油气藏实际相结合，每种方法的运算结果都要同油藏实际进行对比，进行误差分析，达到限定误差的方法或误差最小的方法所得的结果才被允许进入下一流程，以保证储层研究的最终精度。所以，研究中不仅仅是对多种储层研究方法技术的一次练兵，其结果也可以用来指导奥陶系油气藏的勘探开发。同时，研究中对多种新方法的运用，对具有相似地质特征的碳酸盐岩裂缝性储层的描述具有较大的借鉴意义。

(4) 体现储层研究的层次性。储层研究的技术路线是有一定规则的。本书中研究的技术路线有一定的特色，在点—面—体的主路线指引下，穿插有多种次级技术路线，如地质模型—数学模型—预测模型的由定性到定量的技术路线，测井解释中的常规数学方法—非线性数学方法，地震参数横向预测中的常规单地震参数预测—反演单地震参数预测—多地震参数综合预测，以及支持主路线的岩心—测井—地震的研究顺序等。

2 储层地质特征研究

综合国内外碳酸盐岩油气藏储集层形成特点发现,碳酸盐岩储集层形成的受控因素主要有:古沉积相带、古气候、古地貌、古岩溶带;构造运动、区域应力场方向及形成的断层、裂缝系统和后期改造作用;后期沉积充填、垮塌堆积和后期沉积作用。

碳酸盐岩储层的形成大都与构造运动造成的地壳抬升及断裂活动有关。岩石是储层形成的先决条件。通过岩石学研究确定储层主要的岩石类型。通过观察岩心及进行岩石微观研究,确定储层的主要储集空间类型。

裂缝作为一种地质体,其发育有赖于其岩石载体的地质性质和载体所处的地质背景,其中岩石载体的性质是裂缝发育的内因,而地质背景则是裂缝发育的外因,两者共同作用的结果使岩石受力破裂。在基质岩性和大气淋滤条件相同的情况下,岩溶一般容易沿着裂缝发育。

运用变尺度分形统计方法,统计储层裂缝发育区平面分布的相似维数,理论和实际资料都证实该分维数可以表现裂缝平面分布的非均质性,并对平面上裂缝发育程度具有很强的定量描述能力。义和庄区块裂缝的相似维数小于1,说明裂缝发育区对二维空间的充填能力较差,一般来说,相似维数大于1时,裂缝发育区才有连片分布的可能性。

2.1 区域地质特征概述

碳酸盐岩储层的形成大都与构造运动造成的地壳抬升及断裂活动有关。地壳抬升使地层暴露地表造成风化剥蚀形成风化壳,断裂活动形成断层和裂缝。大气淋滤作用容易沿着裂缝进行使地层发育溶蚀缝或溶洞,地层溶蚀发育的地方又容易形成裂缝,这样溶蚀与裂缝相互匹配的结果就使得原来比较致密的碳酸盐岩变成了良好的储油气层。因此,在此有必要简述一下研究实例——义和庄区块的构造特征。

义和庄凸起位于济阳拗陷北部,其东、南两面与沾化凹陷相邻,北、西两面与车镇凹陷接壤(图2-1)。

义和庄潜山带的石油勘探始于1955年,1961年5月开始钻探。1972年10月沾11井奥陶系灰岩发现油气显示,试油获得日产油935 t高产,成为华北地区第一口潜山高产油井,由此拉开了济阳拗陷潜山油气藏勘探的序幕。

以盆地基地地层作为储集层形成的潜山油气藏是中国东部断陷盆地中重要的油气藏类型之一,受盆地内不同次级构造带控制,它们可以成带出现,形成“潜山油气藏体系”。与我国东部其他断陷盆地相似,济阳拗陷的构造演化特点决定了它具有较大的潜山油气藏潜力。

2.1.1 区域构造发展简史

古生代以后研究区的地质构造不仅十分复杂,而且存在有挤压、拉张等构造应力场作

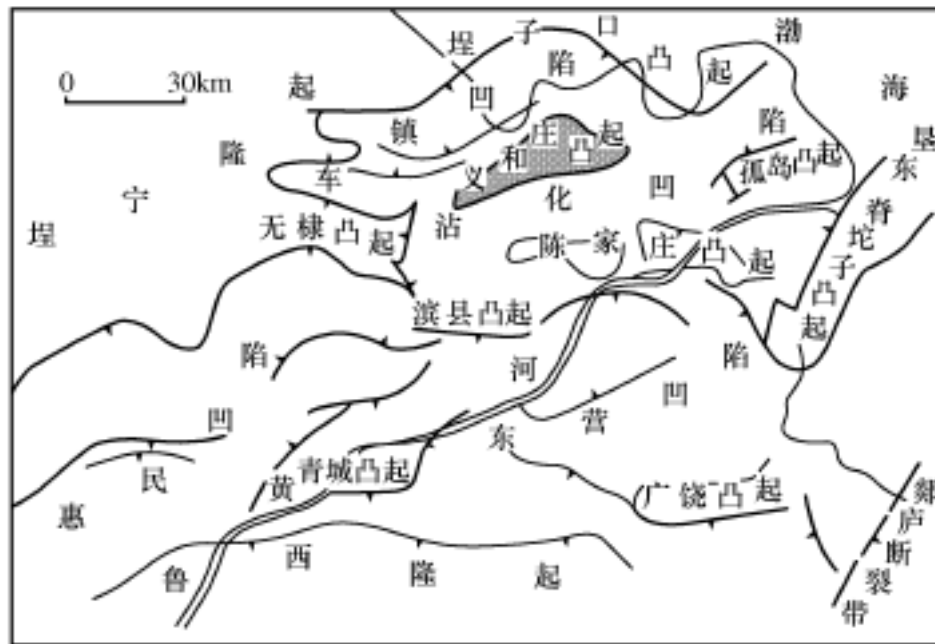


图 2 - 1 济阳拗陷地质结构略图

(据胜利油田地质研究院, 1997, 简化)

用, 这些作用必然要对地层中的裂缝和溶蚀产生影响。

(1) 古生代构造特征: 加里东初期, 本区与华北地台大体一致, 寒武纪—中奥陶世发育了广泛而稳定的滨 - 浅海相碳酸盐岩沉积。加里东晚期—海西早期, 华北地台整体抬升, 长期遭受风化剥蚀, 缺失上奥陶统、志留系、泥盆系和下石炭统。由于长期暴露地表, 使得寒武系—奥陶系地层不同程度地受到侵蚀, 形成溶蚀缝洞和裂缝发育的古风化壳。到海西晚期, 沉降作用使华北地台广泛接受了石炭系—二叠系海陆交互相沉积。

(2) 中生代构造特征: 中生代早、中时期, 扬子板块向北俯冲, 与华北板块相碰撞, 这一时期挤压褶皱虽然并不十分强烈, 但已有破裂和逆断层产生, 并在一些应力集中区块发展为推覆逆断层。而且这一时期挤压作用形成的背斜高部位或断块上冲盘, 因风化作用使得古生界遭受剥蚀, 残留地层厚度小或完全被剥蚀掉。

燕山晚期是华北地区构造拉张活动最强烈时期。这时, 华北盆地上地幔岩浆广泛沿薄弱带或断层侵入、喷发。在地壳对流作用下, 拉张活动达到高潮, 华北盆地进入断陷区, 产生大量新的拉张正断层。早期逆断层恢复为正断层。这一时期研究区以拉张正断层控制下的掀斜块断形式为主, 断凹中沉积了巨厚的中生界, 潜山构造得以基本形成。

中生代以来, 鲁西隆起区强烈拱升, 隆起两侧的济阳、苏北两拗陷则急剧下沉, 造成岩层的拉张破裂, 形成大量张性正断层。这种断层的倾向总是向着隆起的轴部, 地层区域性北倾, 而主要断层多为南倾, 产状相反, 构成一排排南断北倾的单斜断块山, 构成屋脊式潜山带, 义和庄潜山就是其中之一 (图 2 - 2)。

(3) 新生代构造特征: 进入新生代时期, 华北盆地又重新进入拉张时期, 喜马拉雅运动使潜山带继续发展并最后定型。

渐新世时期, 块体相对稳定、缓慢下沉, 沙河街组和东营组超覆在下伏不同时代地层之上。渐新世末期的运动, 使潜山带再次整体上升, 造成剥蚀。此后, 较大规模的块断运动基本结束, 潜山带定型。中新世开始, 潜山带又进入整体稳定下降阶段, 上第三系覆盖了所有潜山。

2.1.2 主要地层简介

济阳拗陷从古生界基地地层沉积以后, 到中侏罗世初始张裂以前, 经历了长达数千万

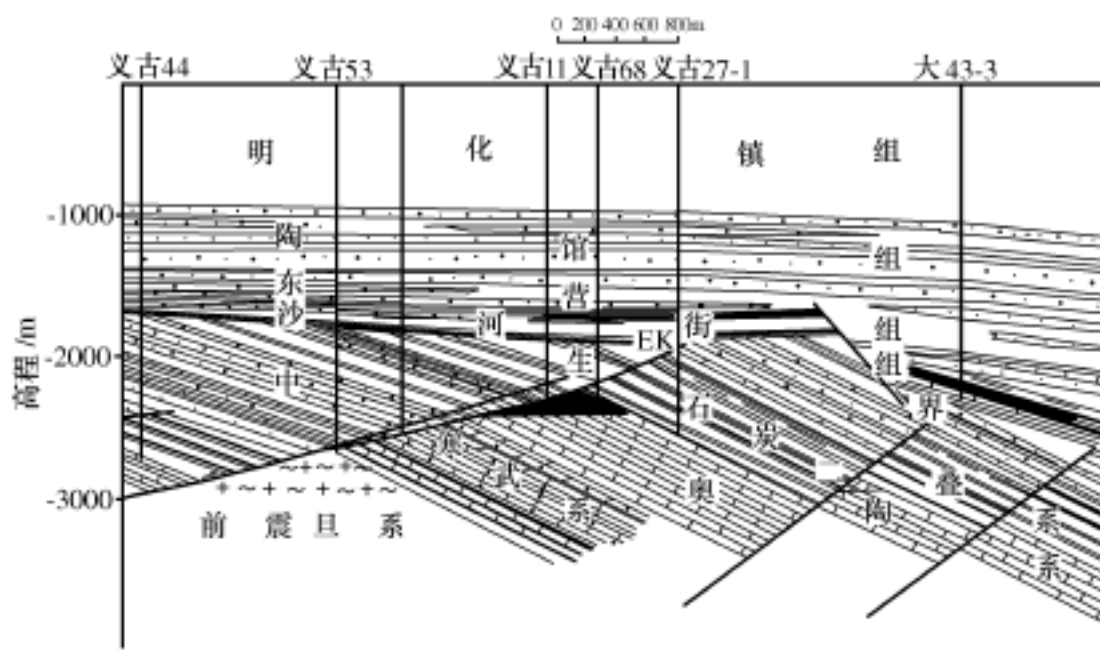


图 2 - 2 屋脊式潜山断块油藏剖面图

表 2 - 1 义和庄区块前第三系地层简表

界	地层			地层符号	地层厚度 m	岩性特征	电性特征 (自然伽马曲线)	
	系	统	组					
中生界				Mz	0 ~2500	上部灰色、灰黄色凝灰质砂岩，下部灰色泥岩，砂岩和含煤地层		
下古生界	奥陶系	中统	八陡组	O ₂ b	103	上部灰岩夹泥质灰岩白云岩，中部白云岩夹灰岩，下部白云岩、灰岩夹泥质白云岩	下部显示两个特别突出的高峰，上段曲线低平，仅具少数尖峰	
			上马家沟组	O ₂ sm	246	上部灰岩、白云岩、中部含燧石结核的灰岩，底部泥灰岩、泥质白云岩	曲线自下向上明显由高变低	
			下马家沟组	O ₂ xm	214	中上部灰岩夹白云岩，下部泥灰岩、泥质白云岩	自然伽马下段为明显的锯齿状，中上段低平，顶部有稀疏的高峰	
		下统	亮甲山—冶里组	O ₁ l ~O ₁ y	113	上部结晶白云岩，中部泥质白云岩，下部白云岩夹竹叶状白云岩	自然伽马较低平，局部有峰值	
	寒武系	上统	凤山组	3f	101	浅灰色结晶白云岩，泥质条带状灰岩	自然伽马值平，曲线无明显特征	
			长山组	3c	43	泥质条带状灰岩，竹叶状灰岩夹页岩	自然伽马低—中等，局部具峰值	
			崮山组	3g	36	灰岩、泥质条带状灰岩、页岩	自然伽马较高，从下到上曲线峰值较低	
		中统	张夏组	2z	158	鲕粒灰岩、普通灰岩	自然伽马低，曲线平直	
			徐庄组	2x	92	页岩夹灰岩，含海绿石砂岩，富含云母碎片	自然伽马很高，曲线呈块状	
			下统	毛庄组	1mz	76	页岩、灰岩、页岩富含云母碎片	自然伽马下低上高
				馒头组	1mt	61	上部页岩、灰岩、白云岩互层，下部白云岩夹页岩	自然伽马较高，呈尖峰状，从下向上曲线峰值增高
	太古宇			Ar		肉红色花岗片麻岩		

年的风化和剥蚀，多数地区石炭 - 二叠系残存分布，部分地区寒武系、奥陶系灰岩直接与下第三系接触。奥陶系潜山灰岩是本次研究的主要目标。

根据钻井资料，本区地层发育情况如表 2 - 1 所示。

太古宇：为一套巨厚的花岗片麻岩，成分以斜长石、钾长石为主，石英次之，含角闪石。太古宇顶面为不整合面。

古生界：包括下古生界寒武系—奥陶系海相碳酸盐岩沉积，及上古生界海陆交互的石炭 - 二叠系碎屑岩沉积。上下古生界之间为假整合接触，中间缺失上奥陶统一石炭统。下古生界顶面为长期风化剥蚀面，溶蚀缝洞发育，成为很好的潜山储层。由于风化剥蚀作用，顶部地层残余厚度不等。

2.2 储层岩石学特征

2.2.1 储层岩石类型

通过对研究区取心井岩心观察和薄片镜下鉴定，本区下古生界潜山各地层发育的岩石类型主要有：灰岩、白云质灰岩、灰质白云岩和白云岩。奥陶系和寒武系的岩石组合类型不尽相同。

(1) 奥陶系主要岩石类型：以灰岩类占优势，白云岩类次之，主要岩石类型有微晶 - 粉晶灰岩、亮晶砾屑灰岩、白云质微 - 粉晶白云岩、白云质含生物碎屑灰岩、微晶白云岩和粉晶白云岩据曾允孚分类（1996）其岩石学特征如下：

微晶 - 粉晶灰岩：岩石微 - 粉晶结构，常见纹层状构造。纹层由暗色泥质条纹和浅色灰质相间而成。岩石裂缝发育，局部含有少量生物碎屑。

亮晶砾屑灰岩：砾屑以次圆一次棱角状为主，分选较差，成分主要为微晶灰岩屑，胶结物为亮晶方解石，并具有二世代结构。

白云质微 - 粉晶白云岩：岩石微 - 粉晶结构，弱白云石化，局部含少量残余生物碎屑和陆源碎屑石英。

白云质生物碎屑灰岩：岩石中生物碎屑含量可达 45% 以上，生物碎屑主要有三叶虫、双壳等，生物碎屑具有一定的定向排列。胶结物主要为微晶和重结晶的亮晶方解石以及白云石化，白云石多呈半自形晶。

微晶白云岩：微晶结构，溶孔、微裂缝发育，被亮晶方解石充填或半充填。

砾屑白云岩：砾屑呈长条状，成分为极细晶白云岩，砾屑中见少量晶间孔和晶间溶孔。基质为细晶白云岩，晶间孔、晶间溶孔较发育。在部分晶间孔及晶间溶孔中充填粘土矿物。

(2) 寒武系主要岩石类型：寒武系中页岩较多，构成碳酸盐岩夹多层页岩的岩石组合。碳酸盐岩中以白云岩、灰质白云岩占优，主要有微 - 粉晶白云岩、泥质白云岩、含灰泥质白云岩和微晶灰岩。其岩石学特征同上。

2.2.2 岩溶岩发育类型

岩溶岩是指岩溶作用或因岩溶作用改造而形成的岩石。本区下古生界除发育上述几类

岩石外，由于岩溶作用强烈，因而发育了大量与岩溶作用有关的角砾岩。通过岩心观察和镜下薄片鉴定，可以识别出以下几种主要类型：

(1) 岩溶垮塌角砾岩：在岩溶作用过程中由岩石崩塌，就地堆积或短距离搬运而成。它充填于溶洞、洞穴和岩溶裂隙中，角砾呈棱角状，大小混杂，无分选磨圆。角砾成分与围岩成分相同，几乎全由碳酸盐岩碎屑组成。按其结构又可分为泥质支撑岩溶角砾岩和角砾支撑岩溶角砾岩两类。

(2) 填隙角砾岩：由大的构造裂缝或岩溶构造缝中充填角砾固结而成。角砾成分与围岩相同，为沿缝壁垮塌所至。角砾间充填方解石。这类角砾岩主要发育在渗流带的大型垂直溶缝和裂缝中。

(3) 网缝镶嵌状角砾岩：由网状裂缝切割分解灰岩或白云岩而成。岩石被裂缝分割成角砾状，裂缝被方解石和泥质充填。这类角砾岩常与岩溶垮塌角砾岩或基岩过渡。这类角砾岩主要是地下水沿裂隙岩溶扩大而成，其岩溶强度大大小于岩溶垮塌角砾岩。

(4) 洞穴沉积角砾岩：见于潜流带的水平溶洞中，由地下水流搬运的物质沉积而成。砾石成分复杂，常有磨圆现象，有的还见层理构造。

2.3 储层岩溶和裂缝形成机制

有关古岩溶储层的重要性在国内外早已引起高度重视，渤海湾含油气盆地对碳酸盐岩古潜山的油气勘探，也越来越明显地显示出古岩溶作用对储层的形成、发育和油气的聚集有直接或间接控制作用。特别是与不整合面有关的古岩溶碳酸盐岩储集层可以形成大型渗滤空间，是形成大中型油田的基本条件之一。我国著名沉积学家叶连俊先生曾指出^[80]：“我国的碳酸盐岩储层都与古岩溶作用有关。”

2.3.1 储层岩溶形成机制

岩溶作用是在岩石和水之间进行的，因此，岩石的透水性、可溶性和水的溶蚀性、流动性就成为岩溶发育的基本条件，此外，还有古气候、古地质构造、岩溶发育时间等条件。

目前，国内外学者对古岩溶作用的概念认识不一致（Choquette 和 James, 1985; Charles, 1988），我们的理解是：凡含有 CO₂ 的地下和地表水对可溶性碳酸盐岩的溶解、淋滤、侵蚀和沉积等一系列的综合的地质作用称为岩溶作用，其作用方式包括化学作用（岩溶和沉淀）和机械作用（流水侵蚀、重力崩塌和机械沉淀等），古岩溶作用既包括地质历史时期中发育的，且被后来沉积物所覆盖的风化壳岩溶，也包括了埋藏期发生的岩溶^[79]。本区块的岩溶主要是风化壳岩溶。

岩溶的发育程度与碳酸盐岩的暴露有关，本区下古生界潜山储层的形成与区域性岩溶有关，而区域性岩溶的形成与重要的海平面升降或构造活动造成大面积大陆暴露有关，常常是地层学中的主要不整合面。这些重要的大陆暴露过程通常都有很长的沉积间断，其结果是在暴露的碳酸盐岩地层中造成具有规模很大的地下洞穴系统，广泛侵蚀和大量岩溶残积物（参见岩溶水动力垂直分带图 2-3）。

2.3.1.1 岩溶分带及特征

按地下水流动态和岩溶特征，由古风化壳往下，可依次划分为地表岩溶带、渗流岩溶

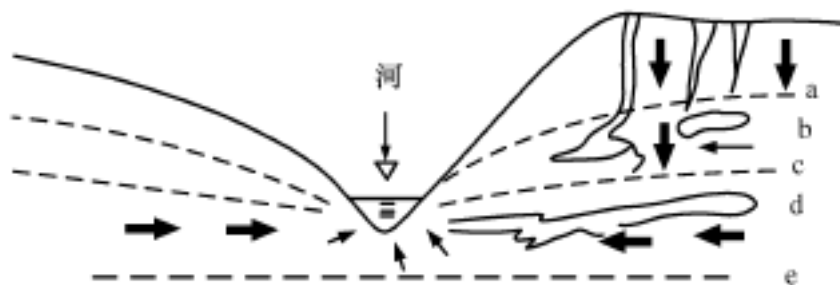


图 2 - 3 岩溶水动力垂直分带示意图

(据任美镔, 1987, 简化)

a—垂直渗入带; b—季节变动带; c—潜水面; d—水平流动带; e—深部缓流带

带和潜流岩溶带。

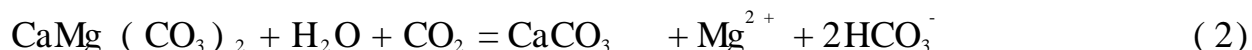
(1) 地表岩溶带: 位于地下水渗流带上部, 地表水向下渗流的过程中, 形成一些溶沟、溶缝、岩溶洼地和落水洞, 其充填物主要为地表残积物和洞壁塌积物。该岩溶段由于在接受上覆沉积后的再埋藏成岩过程中, 缺乏抗压支撑骨架而有强烈的压实和充填胶结作用, 岩溶期形成的孔隙不易保存而难以形成储层。

(2) 渗流岩溶带: 在渗流带, 其主要的特征是雨水、地表径流在重力作用下直接进入裸露的岩石中或者通过土壤向下渗入到岩石中, 如果该带发育有植被, 则大气水可以从其中获取更多的 CO_2 气体, 使其 pH 值进一步降低, 而岩溶作用更加强烈。在潮湿气候区, 在渗流带常常形成一些大的岩溶地貌如石芽、落水洞以及岩溶沟谷, 而在蒸发作用较强的情况下, 也可能发育方解石的沉淀作用, 尤其在渗流带的表层更是如此。因强烈的蒸发作用使得向下渗流的水反而向上蒸发回流, 导致了方解石的沉淀。因此, 渗流带是大气、水和岩石共同作用的一个复杂的化学反应地带。大气降雨量以蒸发作用的强度对该带的溶解和沉淀起着决定作用, 也就是说, 气候因素是控制渗流带发育与否的主要控制作用。在渗流带, 大气淡水向下运动的力是重力。因此, 在孔渗性能好的地方, 流动快, 并使得周围的水均向此地运动, 结果使溶解作用的发育程度在渗流带有很大差别。造成在裂缝发育的地方以及孔渗好的层段, 岩溶作用发育, 相反则岩溶作用不发育。

(3) 潜流岩溶带: 由于孔隙中全部充满水, 故所有的变化都是在水和岩石二相之间进行的, 其化学反应特征比较简单。潜流带的发育程度与地形、降水量以及周围供水区的大小有关。一般来讲, 潜水面不是一个平直的面, 而是随着地形起伏而起伏。此外, 由于季节的变化, 潜水面的位置是上下浮动的。如果在潜水带, 孔隙发育, 连通性好, 地下水的迁移速率大, 被溶物质可被很快带出溶解区, 则岩溶作用极为发育。相反, 原岩的孔渗条件不好, 地下水的迁移很慢或者停滞不前, 则可能形成一种动态平衡, 溶孔和溶缝就受到限制。如果原岩中发育石膏或者黄铁矿之类的矿物, 由于溶解造成 SO_4^{2-} 的出溶, 则明显增大水的岩溶能力, 而且其微量元素的变化则受到母岩的影响。

据前人对蒙阴盘东沟的朝阳洞等地实地考察绘制的岩溶洞穴剖面图, 可以清楚地划分出地表岩溶带、渗流岩溶带和潜流岩溶带 (图 2 - 4)。

无论是在渗流带或者潜流带, 其溶解—沉淀作用均可以简单地表示为:



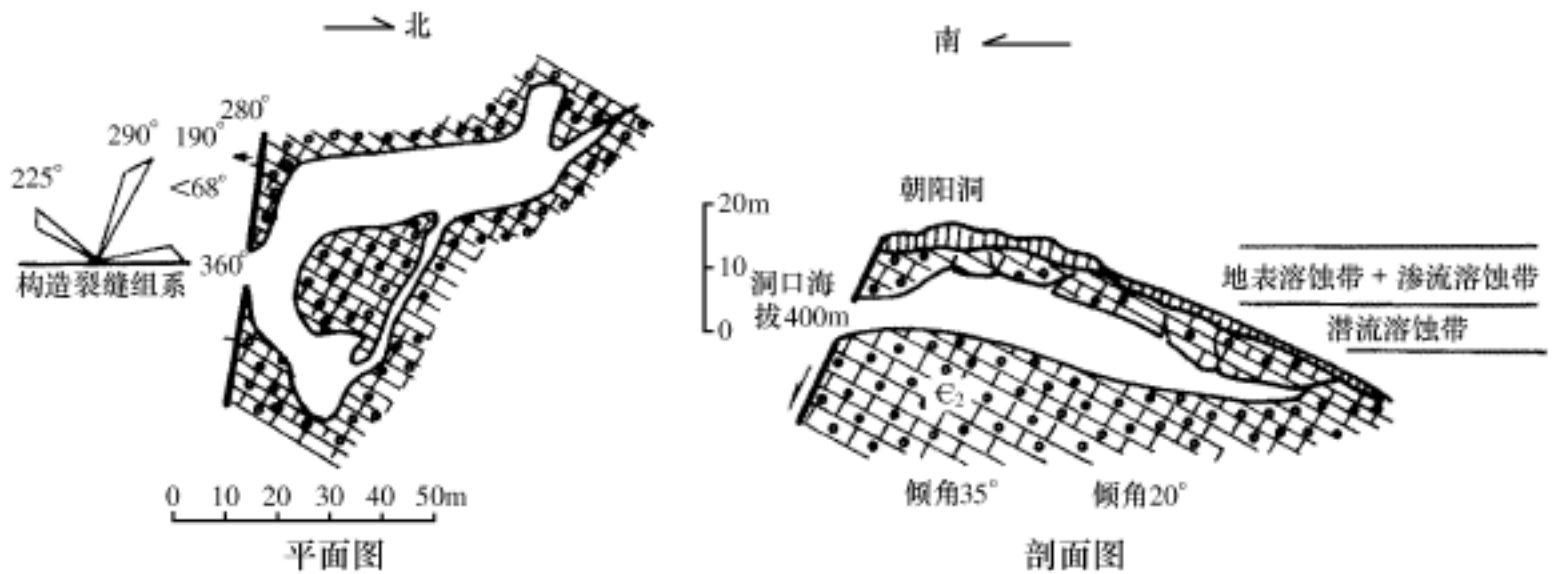


图 2 - 4 溶蚀洞穴的溶蚀分带

(据胜利地质研究院, 1987)

从方程 (1) 可知, 它表示了在大气淡水的作用下方解石的溶解, 方程 (2) 则表示了在大气淡水作用下白云岩中的岩溶与次生方解石的沉淀。这两种现象在古岩溶中都是常见的。方程 (3) 则表示有石膏存在时, 白云石的溶解和方解石的沉淀。

若按理论来计算, 渗流带和潜流带的深度可达几十米至上百米, 因此本区岩溶带可达上百米。这已被钻井资料所证实。

2.3.1.2 岩溶期次及特征

(1) 同生—近地表成岩早期岩溶作用及特征 (加里东早期): 沉积物沉积时, 由于受大气淡水和混合水的影响, 微晶白云岩、粉晶白云岩中的晶间灰泥被大气淡水岩溶而形成晶间溶孔。该期以选择性组构岩溶为特征, 由于在微晶、粉晶白云岩中大气淡水的循环是有限的, 很容易饱和, 所以这期岩溶作用也是有限的。

(2) 风化壳期岩溶作用及特征 (加里东晚期—海西早期): 古岩溶是在富含 CO_2 水溶液的作用下, 碳酸盐岩发生淋滤、溶解、垮塌、搬运以及再沉积等一系列地质作用的综合。加里东晚期—海西早期, 本区古生界长期暴露于大气之中, 遭受强烈的风化剥蚀、渗滤岩溶, 形成大量的岩溶角砾岩、溶洞、溶孔及溶缝。

(3) 浅埋藏期岩溶作用及特征 (海西晚期—印支期): 该期岩溶作用由上部含煤地层的酸性地层水向古风化壳侵蚀面顶部渗流所引起。这种酸性水向下渗透, 可形成一定的岩溶孔、洞、缝。但随着向下渗透浓度的增加, 水量减少, 水温逐渐升高, 水介质渐变为碱性, 岩溶作用大大减弱, 而矿物的充填增加。该期岩溶作用以纵向为主, 且具有上强下弱的特点, 主要发育在古风化壳的上部。

(4) 深埋藏期岩溶作用及特征 (燕山期及其后): 该期岩溶作用发生于海西期及其后的深埋藏成岩环境中, 为埋深大于 3 ~4 km 以下的地下热水或与有机质成熟脱羧基作用形成的有机酸性水对本区碳酸盐岩的岩溶。在深埋环境下, 由于温度高, 压力大以及二氧化碳分压大, 对白云岩溶解率比灰岩要大, 常常在构造破碎、裂缝及断裂发育地段岩溶作用增强, 形成较有利的储层, 发育孔、洞、缝。

综合国内岩溶储集层的特征, 可以发现这个规律, 好储集层和较好储集层类型都分布