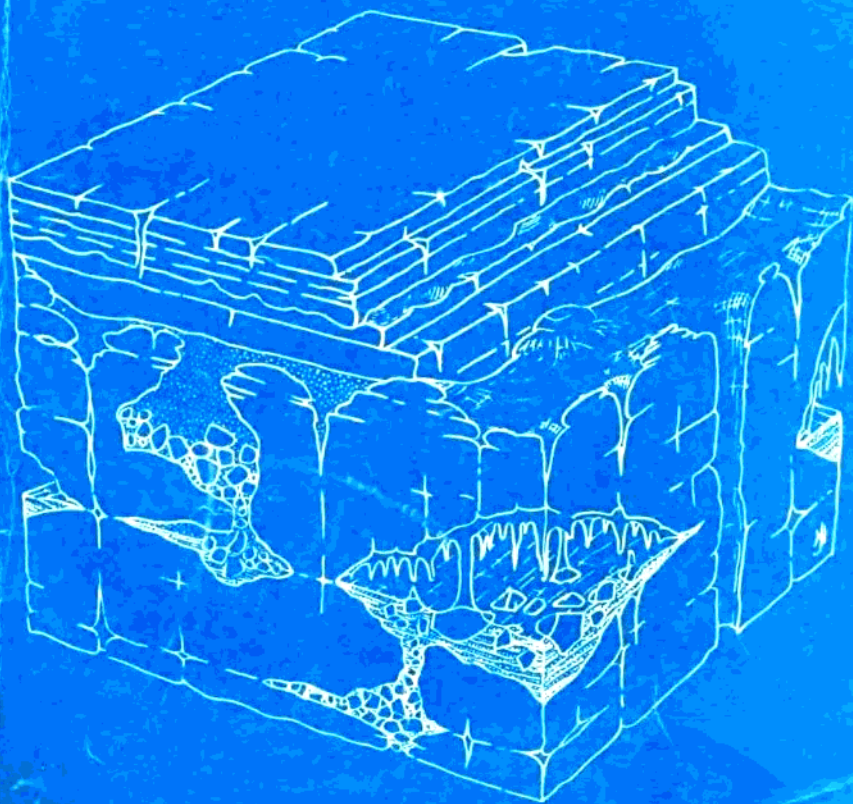


古岩溶与油气储层

成都地质学院沉积地质矿产研究所 译 编
长庆石油勘探局勘探开发研究院



成都科技大学出版社

内 容 简 介

碳酸盐岩储层的油气田常具有较大的储量与较高的产量,受到人们的广泛注意并竞相开展有关研究工作。虽然P.W.Choquette和L.C.Pray对碳酸盐储层的储集空间类型作过详细研究,但二十多年来侧重微观方面的探索较多,而涉及大型储集空间发育者却甚少。然而,国外一些高产油气井以及钻井过程中的大段放空,均已反映出与岩溶发育密切相关的大型储集空间是客观存在的。1987年, P.W.Choquette和N.J.James汇编了18篇有关古岩溶研究方面的论文(即《古岩溶》)。论文论证了若干著名油气藏, 包括曾以每小时单井产量超过千吨的Yates油田的二叠纪白云岩储集层与地史时期的古岩溶均有密切关系,并联系微观到宏观,对寻找有利储层提供方向,为油气储层的研究开拓了新局面。

为节省篇幅,翻译时对文章作了适当选择并对某些论文曾略作删节,并编写了有关古岩溶最新资料与油气储层的文章,全书约30万字,可供从事储层研究的高校教师、科研人员以及油田技术人员参考。

序 言

1985年，由 N·J·James 及 P·W·Choquette 召集和组织经济古生物学家及矿物学家协会，在美国科罗拉多学院召开了题为“古岩溶系统及不整合面特征和意义”的学术讨论会。会后对会议交流的论文进行了整理并由美国石油地质家学报AAPG于1987年出版了专辑。

James及Choquette 为专辑撰写的前言中提到，在过去的20年中，研究岩溶及有关岩溶成岩作用的速度简直呈戏剧性的增长，如水文学家、质地貌学家、地理学家、洞穴学家提供了很多现代岩溶的文献；石油地质学家及地球化学家在解释大气水环境内灰岩的复杂成岩构造、结构及水化学性质；经济地质学家在模拟铜、铁、铅等金属在地下古岩溶中的沉积。

本专辑全面地讨论了岩溶系统的形成过程、特征及地质意义，集中了不同领域内专家们的研究成果及现状，对碳酸盐岩中的油气勘探的实践及地质综合研究具有针对性和指导性的意义。

今年5月，成都地质学院沉积地质矿产研究所与长庆石油勘探局勘探开发研究院共同译编并由成都科技大学出版社出版了这本专辑。这是一本有价值的好书，对地质勘探、科学研究及教学工作者将起到开扩视野，吸取养分，提高水平的作用。特别对石油地质领域将有裨益。因为：

我国目前的油气勘探正向着新地区、新领域、新类型和新的深度延伸，如西北地区的塔里木、陕甘宁等大盆地、西南地区及大陆架海域海

相碳酸盐岩的油气勘探，从直接的显示和间接的推断已越来越显示其重要的地位和已经展示出良好的前景。碳酸盐岩具有独特的特征，它是原地形成的，沉积环境、气候及其变化，直接影响碳酸盐岩的沉积作用和成岩作用。碳酸盐沉积物沉积后的成岩作用如胶结作用、重结晶作用、白云岩化作用、缝合线化作用、风化淋滤作用、岩溶作用及多孔网络的形成，可以改变碳酸盐岩的沉积序列和特性，可以改变岩石组构和矿物成份而且可以产生新的组构和成份。因此，碳酸盐岩沉积后的成岩变化是控制油气田的形成、运聚、保存、富集和分布的主要控制因素之一，可直接影响碳酸盐岩中储渗空间的形成和分布。

近地表成岩早期及表生期的大气水成岩环境中渗流带、潜流带及混合水带的溶蚀作用是形成碳酸盐岩中次生孔隙的主要成因，特别与不整合面有关的古岩溶碳酸盐岩储集层中可以形成大型储渗空间。因此，系统的引进吸收这些新理论、新观点、新方法和积累的大量成果，在勘探实践中深入探索、了解、掌握地下的客观规律，将有助于指导油气勘探的实践活动并增强工作上的预见性，加速海相碳酸盐岩油气勘探的步伐，减少勘探风险，提高经济效益。

长庆石油勘探局 李德渊
高级工程地质师

1990.5.17

目 录

1. 总 论	4
2. 大气水成岩体系的地球化学特征及其在古岩溶 研究中的应用	17
3. 新墨西哥州卡斯巴德山洞洞穴碳酸盐的矿物成 分和化学成分的控制因素	35
4. 巴哈马的阿巴科湾的更新世古岩溶的全新世印迹	51
5. 早古生代地表和地下古岩溶——魁北克省明根群 岛中奥陶统碳酸盐岩	59
6. 俄亥俄州西部志留纪白云岩地表和近地表的古岩溶	72
7. 密西西比系麦迪逊灰岩的古岩溶地质	82
8. 新墨西哥密西西比石灰岩的古岩溶特征	91
9. 可作为古气候及演化标志的古岩溶和土壤——英国 南威尔士的石炭系研究	99

10. 得克萨斯州西部耶茨油田储集层中的圣安德烈斯 白云岩中的二叠纪岩溶溶洞及其他特征·····	106
11. 西班牙南部亚贝蒂蒂侏罗系中的古岩溶及有关的 远洋沉积物·····	121
12. 墨西哥白垩系埃尔阿布拉组有障壁岛的台地边缘 的沉积和成岩作用·····	130
13. 古岩溶与油气储层·····	142
14. 后 记·····	150

1. 总 论

岩溶是地球表面引人注目的地形,它奇特而复杂,有各式各样的盘旋地形,复杂而优美的洞穴,稀奇古怪的水系及各种塌陷构造,这些是在其它类型的地区很少见的。这些特征仅在地表和地下构造最明显,有一系列的宏观到微观的体系,目前对其组成体系的认识还相当有限。

文集的目的和重点

文集引用大量的实例阐明并解释地质时期的岩溶现象。对古岩溶的认识有赖于对现代岩溶体系的鉴别和对现代岩溶如何“化石化”的了解。因此,文集第I部分,讨论岩溶地形的发育、储存、改造和识别方面的问题,第II部分则论述从元古代到白垩纪,产于陆棚和碳酸盐台地的各种环境中的岩溶实例。

研究状况

许多世纪以来,具有洞穴体系和独特地形的岩溶地貌一直吸引着许多地质学者。早期的研究,多集中在如何认识各种岩溶地形的地貌学、水文学和岩溶的形成方面,在许多教科书中已有论述。

在过去的30年中,有些地质学者曾研究沉积碳酸盐的地层学和沉积学并对古岩溶的认识有所了解发展。开始于碳酸盐沉积物的大气水成岩作用的研究,Bathurst(1971和1975)及近年的Longman(1980)、Esteban和Klappa(1983)、James和Choquette(1984)等均曾作过综合分析的尝试。由于以下的因素,使人们对地质历史时期的岩溶认识不断加深:①广泛的现代岩溶研究(例如,Bogli,1980;Jenninys,1985);②对引起化学溶解的水文和化学作用过程精确的认识(例如,Haushan和Back,1980,Palmer,1984);③大量关于岩石-土壤-空气界面上的成岩作用及其特征的资料(例如,Esteban和Klappa,1983,及上述一些人);④已认识到,古岩溶,除了具有破坏性的特征外,也还有建设性的一面。它是阳离子和碳酸根离子结合形成局部洞穴堆积物和区域胶结作用的源泉(例如Meyers,1974和1978;Grorer和Read,1983);⑤最后,不断地意识到,以前曾归之于大气水成因的许多令人困惑不解的组构和构造,也可以在其它的成岩作用环境中形成。例如,海底和深埋藏环境(James和Choquette,1983和1984;Scholte和Halley,1985;Choquette和James,1987)。

虽然这些趋势非常令人鼓舞,岩溶和古岩溶受到碳酸盐沉积学家和石油学家们的重视仍然相对很少。传统的沉积学研究主要集中在描述碳酸盐沉积的组成,解释碳酸盐沉积的相组合和重塑碳酸盐沉积形成和古地理环境上。很自然,注意力就会集中在沉积构造、宏观特征和生物组成上,以及露头或岩心所记录的信息的解释上。另一方面,主要借助于岩石薄片观察

和地球化学方法研究成岩作用过程, 目的在于解释碳酸盐的变化历史, 这种研究主要集中在微观胶结物和小型的有组构选择性的孔隙上。

这种明显地忽视大范围的岩溶特征的一个原因, 可能在于岩溶本身所具有“消极的”溶解性, 尤其是在地下沿岩性边界形成层内溶蚀, 产生许多易于被误认为是地表岩溶的特征。从更小的规模上看, 还存在着如何区分古岩溶面和缝合线以及其它压溶现象的问题。古岩溶保存的局部的、较平坦的面, 与随后在海侵过程中的侵蚀面的区分也同样不容易。对发生溶解作用的时间通常也无把握, 所见特征是在宿主地层沉积后很快形成的还是现今地质作用的产物, 或是中间某个地质时期形成的, 简言之, 全面认识古岩溶还是有困难的。

另一个原因可能是, 碳酸盐岩岩石学家的“自然实验室”中所含有的可进去踏勘的洞穴很少, 并且保存下来的或以前形成的岩溶也不多; 即提供热带大气水成岩作用的中-晚更新世的碳酸盐。因为更新世绝大部分时间的海平面比现今海平面低很多, 结果, 更新世岩溶体系虽发育最广泛, 现也要被淹没。

最后, 随着高分辨率地震剖面 and 再处理技术的发展, 直到最近才认识了主要的岩溶不整合的区域分布和形态 (Fontuiue等, 1987), 在此以前, 曾以各种精度致力于重塑区域不整合, 并依赖于来自众多的钻井或露头剖面的资料, 随着改进的地震技术出现, 使传统的地层概念和方法已用地震-反射剖面——即“新地震地层学”(例如Vail等, 1977), 其中区域性性和跨区域的不整合是关键的要素 (Schlee, 1984)。

定 义

岩溶这一术语在此有更广泛的涵义, 它包括所有的成岩作用特征——宏观的与微观的、地表的与地下的, 这些特征形成于化学溶解和伴随的碳酸盐层系的变化过程中。在习惯上, 也包括充填在溶解空洞中的地下沉淀物(洞穴堆积)、塌陷角砾岩及沉淀在空洞底部或充填在孔隙中的机械堆积的“内部沉积物”以及地表石灰华等。

古岩溶的定义为通常被较年青的沉积物或沉积岩所埋藏的古代的岩溶(Walkden, 1974, Wright, 1982)。因此, 古岩溶包括残留古岩溶(过去形成的地形)及Jennings(1971)和Sweeting(1973)所提出的埋藏古岩溶(被沉积物埋藏的岩溶地形)。了解Esteban和Klappa(1983)提出的广义的岩溶是很有帮助的(许多碳酸盐岩石学家和地层学家都熟悉此定义), “岩溶是成岩作用相, 是陆地上暴露的碳酸盐体在各种气候和构造条件的印痕, 由大气水中碳酸钙的溶解和迁移作用所产生并控制形成可辨认的岩溶地貌”。岩溶和古岩溶可认为是近地表成岩作用形成的(图1-1)。

岩溶地形中沉淀的方解石可区分为下面三种类型:

(1) 洞穴堆积物: 指洞穴条件或直径大于50cm(即大到足以进行踏勘)的洞穴中沉淀成的沉积物;

(2) 胶结物: 指较小的孔洞中堆积的沉积物, 在组构控制的沉积孔隙中最普遍;

(3) 地表石灰华: 指从地表泉水中沉淀出的碳酸盐。

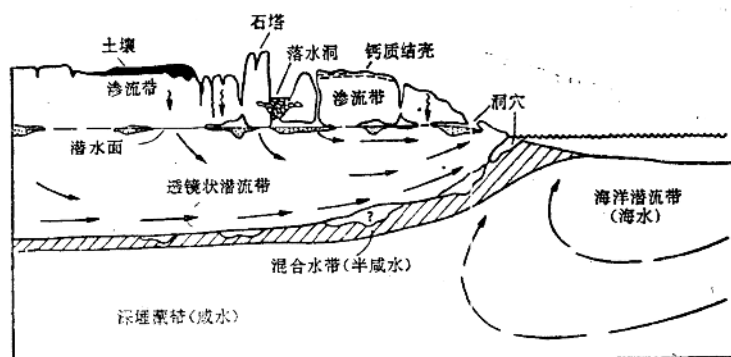


图1-1 近海区现代碳酸盐沉积物上发育的岩溶地形的一般要素及水文条件

岩溶形成的控制因素

岩溶特征和岩溶化的程度是受各种内外因素相互作用控制（表1-1）。

表1-1 影响岩溶区发育的因素

外部因素	
气候	降雨量和蒸发量 温度
基准面	高程和地形起伏 海平面或局部水体的高度
植被持续时间	
内部因素	
岩石学	矿物学 全岩纯度 组构和结构 层间厚度 地层渗透率 裂隙
构造和地层	地层产状 承压含水层或非承压含水层 构造通道

内部因素

内部因素中最重要的是,岩石成分、基质或地层的渗透率及提供地下水流动的裂隙和其它通道的联通情况。在岩石其它性质相同的情况下,大气水中石灰岩的溶解度要比白云岩的溶解度大几个数量级,石膏和硬石膏要比任何一类碳酸盐岩都更易溶解。在[石灰岩]中,与 CaCO_3 矿物的准稳定性相反的“成熟度”或稳定程度最为主要。在具有准稳定 CaCO_3 的碳酸盐与大气降水形成的地下水相接触处,文石的溶解会形成印模孔隙和其它形式的组构选择孔隙,并释放出 Ca^{2+} 和 CO_3^{2-} ,最终以低镁方解石胶结物的形式沉淀下来,矿物控制的这种变化(James和Choquette, 1984)可能产生新的孔隙,这些孔隙为岩溶成岩作用的组成部分,同时也有一些原生的孔隙被充填(Harrison, 1975)。

在胶结程度较差的碳酸盐砂或颗粒状碳酸盐暴露于地表处,地层渗透率高,可以引起地下水绕道或部分通过连通的裂隙沿颗粒骨架流动扩散。另外的作用,如地表沉积物淋溶成多孔隙的颗粒碳酸盐岩,潜水面以上发育的数量有限的洞穴,也是渗透率高的结果(图1-2)。

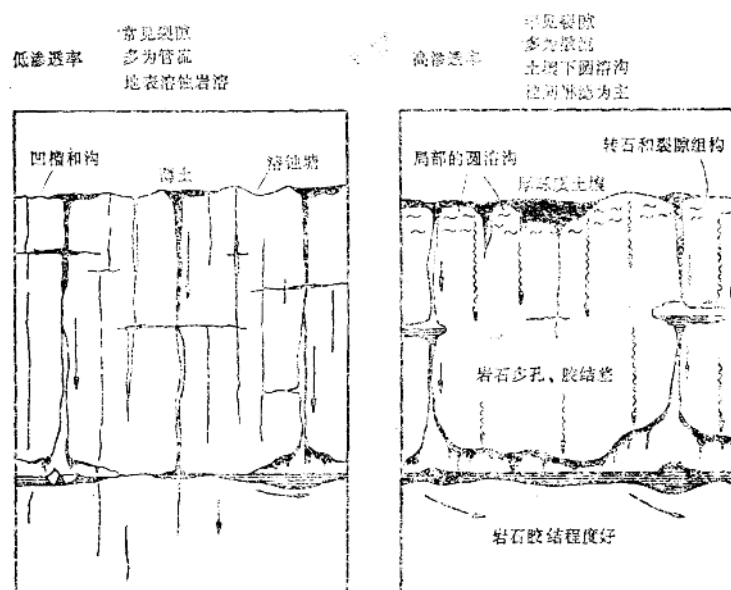


图1-2 地层渗透率对地表和地下岩溶发育的影响

低渗透率的碳酸盐岩可由局部石化到完全石化的泥灰岩,或者紧密胶结的颗粒灰岩,高渗透率的碳酸盐岩可以是胶结很差及或淋滤过的、分选很好的砂屑或颗粒灰岩。假设气候是温暖或潮湿的

在低渗透率的碳酸盐岩中,地下水很可能主要以管流的形式沿裂隙和层面运移。虽然对现存岩溶的研究主要强调大规模裂隙和裂隙控制溶解的重要性,然而在岩溶地形区,渗透性较好的碳酸盐岩很可能具有更广泛的小规模的溶解和其它蚀变作用。当溶解作用向深处发展达到

岩溶区潜水胶结的“根部”时，地层渗透率的影响就会减弱，裂隙对流动类型的影响起着更为重要的作用。

要形成各种错综复杂的岩溶地形如溶沟、凹槽和其它的石灰岩沟，大气水必须从岩石表面流走，而不能下渗到岩石中去。因此，岩石渗透率低为一必要条件，广泛的胶结作用、高的灰泥含量或由不透水的钙结层所组成的地面风化盖层可以促使岩石的渗透率变低（图1-2）。

在洞穴发育过程中，裂隙作为水流通道尤为重要。裂隙作用的重要是因为溶解——塌陷作用形成的裂隙网可以变成新的水流通通道。经溶解扩大的裂隙系统可以起着物质运移，将地表土壤和沉积物向下运移并补给能从洞穴中沉淀出洞穴堆积物的渗流水的作用。

外部因素

气候可能是最关键性的，当然植被、地形起伏和成岩作用基准面、暴露时间也都很重要。

在降雨量丰富和温暖的地区，蚀变作用迅速，形成发育良好的土壤和钙质红土、大量的落水洞及地下溶蚀塌角砾（图1-3）。在某些地区，发育着十分壮观的地形，如尖顶山、锯齿状的岭脊、石塔和峡谷以及实际上不透水的星散分布的封闭洼地。在具有温和或地中海型气候地区，岩溶和钙结层普遍发育，它们的形成和发展通常受季节性的成长时期的循环所控制。在由新生代砂屑灰岩组成的加勒比海群岛上，浅的落水洞和其它溶解洞穴非常普遍，其上覆盖着钙结层或被溶解破坏的钙层壳。一般地，沙漠地区岩溶不发育，只出现局部的地表溶蚀。在半干旱的温带气候区，钙结层非常普遍，这是因为这些地方偶而下雨和随后产生强烈蒸发所致，在寒冬气候区，虽然反应速率慢，岩溶仍很普遍，不仅有很好的地表岩溶，而且地下岩溶形成的深度可连续达到永久冻土带，无钙结层出现，但在土壤中的碎石面上有方解石沉淀（D. Ford, 1987）。

须知，形成钙结层和岩溶所要求的降雨量和蒸发量的比例略有不同。根据形成的温度，有人提出“岩溶相”和“钙结层相”（Esreban和Klappa, 1983）。有时，在相对较大的、具有明显的地形影响的低纬度岛上所观察的事实表明，在同一季节条件，这两种相不仅连续发育而且彼此毗连。

气候对暴露面以下的渗滤和潜水胶结也起着十分重要的作用。象波斯湾这样的干旱和半干旱的地区，胶结作用进行得非常缓慢。另外，波斯湾地区的侏罗纪碳酸盐储油层中胶结物普遍少见，Illiny（1967）等经研究后曾提出“气候效应”的概念。大气水胶结物类型的不同及数量的多少似乎与干旱地区的古岩溶有一定关系，与潮湿气候区恰相反，这种关系可以作为气候的灵敏指示剂。干旱气候条件下由成岩作用形成的胶结物，除了针状-纤维状的晶体和粗粒、含铁量低的块状潜水胶结物外，渗滤胶结物的含量往往很少。相反地，潮湿气候条件下形成的胶结物，渗滤胶结物和潜水胶结物分布广泛。其它一些因素，尤其是潜水面以上的水地形起伏及由其引起的水头的高低，也会起作用，因为它们影响地下水的流量及活力。

大气水带中的成岩作用基准面为一重要概念，一般与局部的水系及或海面一致。海平面变化的影响及略高于海面的宽广平坦的碳酸盐台地的剖面与渗滤和潜水成岩作用变化，现已有较好的了解。潜水面对洞穴体系发育的控制作用主要取决于，碳酸盐宿主岩中的通道（孔隙）系统的性质，在基质量多或地层的孔隙度和渗透率高，形成时间相对较“新”或

胶结程度较差的地层中，靠近潜水面处是许多洞穴首先发育处（图1-4）。渗滤带中也有洞穴体系发育，但主要延伸方向与潜水面近于正交，这种特征反映了这类洞穴的成因。在目前已发现的洞穴中，此类型的洞穴所占比例很少。在渗透性差或无地层渗透率，“成熟度”较高或广泛胶结的碳酸盐岩中，裂隙、断层和层理面是最有效的通道。在这些岩石中，洞穴的发育取决于潜水面的位置(D·Ford, 1987)，因此，洞穴的形成可以达到较大通道和地形起伏所控制的深度。在洞穴发育过程中，渗流带和潜流带及其间的潜水面处均可形成洞穴。一般无论地层渗透率的高低，随着洞穴体系的发展，地下水会绕过相对滞流的深部带改变方向。岩溶可以下蚀到大约接近当地地下水体高程的基准面，环绕潜水面处为洞穴最为发育带。

沿某些暴露于地表的碳酸盐台地的海岸有近似透镜状的混合带，其中发育洞穴体系，在大范围含水层中的内陆咸水带中，如佛罗里达南部的Biscayne含水层中的“漂砾带”，也可以形成洞穴体系。有人提出，现代潜水面以下数百米深的内陆含水层的下游形成洞穴的重要性。

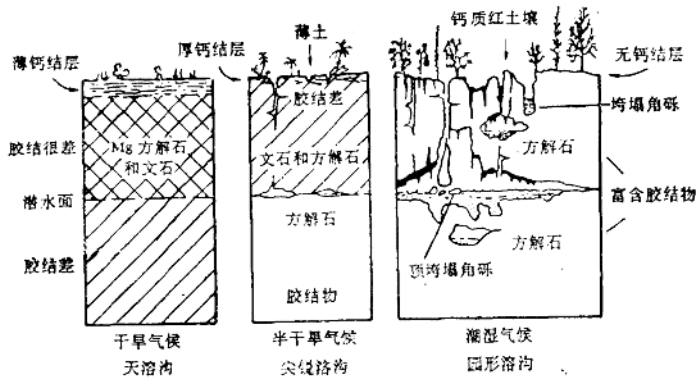


图1-3 与不同气候条件有关的常见的岩溶特征

(据James和Choquette修改, 1984)

一般岩溶或古岩溶的最大地形起伏取决于，开始暴露于地面时高于当地水体或海面原始高程（图1-4），此基准面控制着地表岩溶侵蚀的深度，但洞穴体系的发育深度常有变化，实际深度常在基准面以下（数百米）。邻近海的广泛分布的碳酸盐台地上，地形起伏受台地高程的限制，可达数十到数百米，台地中很低洼的岛屿和海岸带常仅数米。目前，佛罗里达和巴哈马群岛的更新世地表出露岩体表面只有较低起伏（ $10^0 \sim 10^1$ m数量级），这可能代表被埋藏的，具有较高起伏的古岩溶地形，在强烈隆起区，例如，中国东部、墨西哥和伯利兹的高大岩溶山区，目前的地形起伏是很大的，可达数百米或更多。这种现存岩溶地形所记录的时间可能有2或3个以上的数量——从 10^1 到 10^7 年以上，任何时候，地形和高程都是基准面以上的高度的函数。

在土壤和沼泽矿床中，植物腐烂产生的生物成因的 CO_2 对形成具有化学溶蚀能力，大气成因的地下水起着十分重要的作用。在多数的自然条件下， CaCO_3 的溶解和沉淀分别受水体

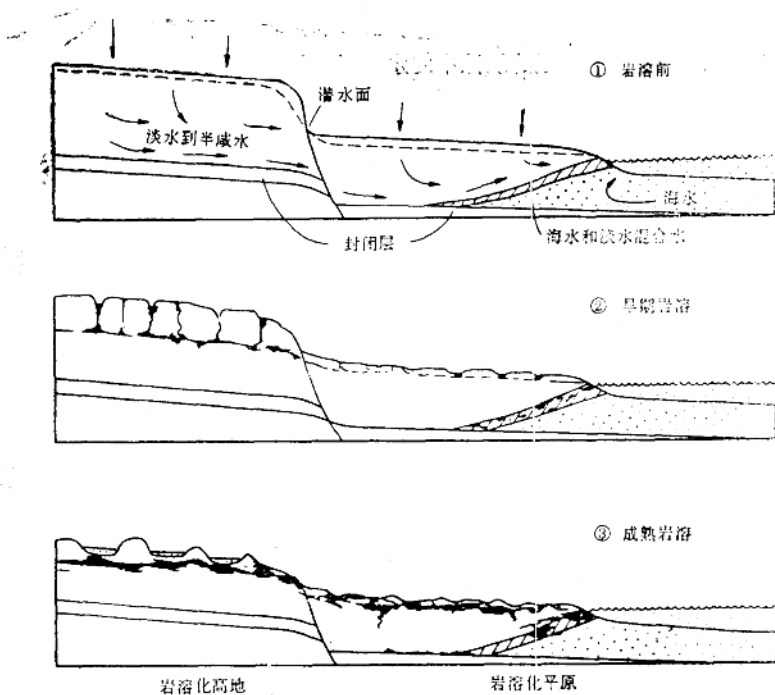


图1-4 岩溶基准面上高程的差异引起可能发育的各种岩溶地形的对比图

这些地形出现在与内陆高地相邻的微上升碳酸盐岩大陆架——现在已成为广阔的海岸平原。假定该地区各处具有相似的气候和其它因素，图中洞穴用黑色表示

内外 CO_2 流量的控制，并且溶解量与水中溶解的 CO_2 的分压 P_{CO_2} 成正比。生物成因的 CO_2 可以增加土壤气中的 P_{CO_2} ，典型地方可能增加大约 $10^{-2.0}$ 大气压，比大气中 CO_2 含量（ P_{CO_2} 大约 $10^{-3.6}$ 个大气压）高2个数量级，所以与土壤气成平衡状态的水体具有更强的溶解碳酸钙的能力。

文集第一部分内容概要：

一般岩溶特征和作用过程

地下岩溶

广泛的地下溶解作用是地质记录中普遍公认的岩溶化作用的一方面，这种作用的结果以洞穴和洞穴体系的形式出现。与这些洞穴有关的特征的地下通道的形状、规模、分布及形成顺序极为复杂。几乎所有的内外部因素都发生作用，形成许多不同的空隙。

早期的研究，强调控制这些特征发育的物理参数。近年来，随着对碳酸盐岩的认识不断

深化及使用的勘探技术更加完善,对洞穴形成机理的认识更清晰。

Ford 写的“碳酸盐岩中溶解洞穴体系的特征”综述了地下溶解作用。认为大多数可踏勘的洞穴体系均由大气水在地质体循环中形成。洞穴的形状是不可能完全预测的,因为原始通道相连通时,洞穴的发育受连通的裂隙中的水力梯度控制,而水力梯度方向的改变往往使这些裂隙复杂化。许多洞穴具多阶段的特征,分布在一系列不同的高度,呈现出浅的渗流形态,深的或混合的潜水形态。由富含 CO_2 的热水作用形成的洞穴,其形状为树枝或二维和三维迷宫式洞穴,在淡水和盐水混合的海岸带发育许多蜂窝状的洞穴,其几何形状是确定古岩溶洞穴原始成因的关键因素,唯对此似仍有异议。潜水剖面倾向于椭圆形,但也可以认为溶解度不同或因底盘的反应边形成作用而复杂化;渗流剖面呈狭谷形或梯形;两种剖面都可因溶蚀垮塌而改变或消失。

古岩溶可以根据洞穴和规模较小的溶解特征确定,可根据充填在各种大小不同的孔隙中的特征沉淀物来确定。在沉积物—岩石—水的系统中,一旦物质与淡水发生接触,就会产生特征的复杂的沉积物—岩石—水之间的反应。若为未经蚀变的各种碳酸盐矿物组成的沉积物,且其中有些碳酸盐矿物在淡水中不稳定,如文石和镁方解石,于是作用进行很快,并受有关矿物的相对溶解度控制。如果所有的矿物都是方解石或方解石石灰岩,则循环水的饱和状态即控制溶解和沉淀的类型。K.C. Lohmann 在“大气水成岩作用系统的地球化学类型及其在古岩溶研究中的应用”方面,概述目前对此系统的化学作用过程的认识,强调了沉积碳酸盐的微量元素和同位素的特征。了解在大气水作用下形成的岩溶对元素进入方解石矿物晶格的影响是最基本的前提。他强调了在特定地质时间内,已知大气水作用形成的地下水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 是大致不变的,但 $\delta^{13}\text{C}$ 可以变化很大,这取决于进入该系统的土壤气体的含量。因此,他拟定了一种概念——大气水方解石线,代表一种 $\delta^{18}\text{O}$ 实际上为常数, $\delta^{13}\text{C}$ 变化很大的类型。这条线可以作为基线,以此来区分不同大气水沉积物为特征的化学变化作用过程,这过程是从沉积物主要与水建立化学平衡变化到沉积物更多地与岩石建立化学平衡,这两种情况都沿液体流动线向下发展。从整个体系来看,作用过程将产生从矿物控制到水控制的变化,混合带中的沉积物似乎毫无离散的双曲线型倾向,而偏向于平行大气水方解石线,从地球化学的观点,洞穴沉积物可以与典型的渗流或潜水胶结物相区分,但与某些海相沉积物很相似。

洞穴堆积物

除了熟知的一些洞穴中的流石、滴石、洞穴聚合物、洞穴珍珠等外,规模较小的文石或方解石的沉淀物也很普遍。它们形成于洞穴底、洞穴塌陷角砾的表面或者塘内较老的洞穴堆积物的上面,以团块状、树枝状的块体、结节和瘤状产出。洞穴沉积物塘面基岩边缘倒悬生长或者形成最终沉淀于塘底的漂浮的晶体筏。在有空气充填的孔隙中,洞穴堆积物的形成取决于能否从滴水、泉水或无细流水中沉淀出来。流石和某些更大的滴石在古岩溶中,是可以辨别的,但保存下来的类型则可能十分完整,除非有较年青的沉淀物或沉积物将它迅速地覆盖并封存。

在L.A. Gonzalez和K.C. Lohmann的研究中,利用地球化学和岩石学方法,分析了世界上最大最有名的Carlsbad洞穴体系中的一个洞穴内的沉积物作为古岩溶沉积物的地球化

学对比。该洞穴体系中的方解石含有1.5到12.6摩尔百分比的 $MgCO_3$ ，且 Mg^{2+} 的含量与溶液中 Mg/Ca 比值呈非线性关系，而与溶液中 CO_3^{2-} 的含量呈线性关系。方解石-文石的同质多象受高的 Mg/Ca 比值的控制，最富 Mg 的方解石与文石一起沉淀或由此沉淀文石具有更高 CO_3^{2-} 浓度的水体中沉淀。水菱镁石和碳酸钙镁石的沉淀取决于液体中 Mg 的浓度和高 Mg/Ca 比值的条件下蒸发作用的强弱，而在中等 Mg/Ca 比值条件下可能会有原生白云石与方解石和文石有关的未饱和的溶液中沉淀出。

洞穴沉积物

古代洞穴中有多种多样机械侵位的沉积物。沉积物被淋滤到地下孔隙中的深度受许多因素的影响，包括：地下水体系的活力，它受补给量和水头的影响；“成岩基准面”的深度；沉积物的供给和与渗滤带和重力渗透带相关的位置（图1-1）。在Craig所描述的二叠纪古岩溶体系中，规模较大的不整合面以下10—20m的洞穴中充填有灰绿色的钙质泥岩，往下洞穴越走越小，小到只能在岩心中见到，这样的洞穴一般没有沉积物。虽然现存岩溶地形中的洞穴也反映出这种近地表的充填类型，但在降雨量丰富、地下水流量大的地区，洞穴体系淋滤的深度可能更大些。

岩溶角砾岩

有些古洞穴或部分古洞穴的周壁及底部有沉积物。其它许多古洞穴以产出角砾岩为特征，或兼具有这些特征。

岩溶角砾岩外表形态很多，内部成分变化也很大，难以统一的分类，但又确实表现出某些系统性，覆盖角砾岩（Mantling breccias）与不整合面共生在一起，以不规则的席状或块状充填在各种不同规模的低洼处。这种角砾岩，通常是塌陷的或残留于地表或近地表的棱角尖锐的围岩碎块组成的混合物，并混杂有土壤、淋滤土壤或沉积物。燧石角砾非常普遍，类似的角砾也充填在灰岩深沟和地表的其它裂隙中，并且形状不规则，有很大变化。角砾岩及其伴生体近似圆柱状到不规则块状，位于落水洞的下部，一般有较多的外来岩块。由于溶解-塌陷作用及错位，这种角砾岩的组成变化很大，有充填的“裂隙角砾岩”，也有被翻转、搬运过的碎屑组成的大孔角砾岩（Open-work breccias），以及土壤或沉积物作基质的土壤剖面角砾。角砾岩中的碎屑通常棱角尖锐，圆度差，几乎未经搬运，碳酸盐碎屑的岩性可以相同，或混杂，碎屑之间的沉积物或土壤呈红色或绿色。

洞顶塌陷角砾岩有不规则的洞顶和规则的洞底，并且剖面上呈近似板状的整合形状，一般表现出极差的分选性，既有直径达数米的岩块，也有来自地表的细粒沉积物。剖面或平面上呈复杂的网状或树枝状的角砾岩体可作为洞穴塌陷的特征。在长期暴露、出露完好的古岩溶角砾岩剖面中，无洞穴堆积或沉积的角砾岩大多为层内角砾岩。蒸发岩溶后的角砾的形状和特征变化很大，部分取决于渗滤带溶解或潜流带溶解。潜流带溶解形成板状层，这在怀俄明Maclison灰岩（密西西比系）顶部附近到处可见，Sando对这种现象曾作阐述，在风化壳剖面中，近地表的渗滤溶解是在通过蒸发岩序列现代水系的基准面上产生的局部塌陷。

岩溶角砾岩中可以产生几种类型的矿床，尤其是“密西西比河谷型”铝-锌-硫化物矿床。

地表岩溶

在岩溶地区可以形成一系列成岩作用特征。一定规模的岩溶上部为变化很大的地形和异常水系或现已不存在的水系。在岩石记录中很难将大的地形区分出,除非地表露头极好或者使用高分辨率的地震剖面(这种剖面能够反映古地表起伏的深度可达数十米至数百米深),或者对地下的情况控制得很好。

在出露好的地区,可以用不同的精度对大规模的地形进行填图,所用方法与记录不整合面上、下的层段厚度变化的地层学方法类似,两种情况获得的数据应大致在一个时间表面上,理想时应大致在一个沉积水平面上。无论填图范围如何均需大量的控制剖面。

小规模的地表岩溶或溶蚀现象在岩石记录中很难辨认,因为只是一种溶解现象。在垂向剖面中,明显地显出不规则的层理界面,只能在有露出好的地表,才可确定地表岩溶的类型和形状。

识别古岩溶的另一关键是了解具有许多溶解特征的地表岩溶地貌。现代岩溶地形区的地面是很明显的,若经埋藏,则可能失去其特有的特征,地面之上的沉积物标志可以作另外尚未被发现的古岩溶层位存在的标记。在从奥陶纪到全新世的岩石记录中与近潮汐作用和古露头层位共生的矿床中的黑色砾石的成因尚有争议。通常可归因于存在有机质。但E. A. Shinn和B. H. Lidz提出了新见解。由对加勒比海新生代和全新世石灰岩的实验研究,选择性变黑是由草的燃烧和森林火灾的瞬间加热所引起。这种变黑的作用也可以出现在潮下碎屑沉积中。

埋藏的岩溶

岩溶必须在埋藏条件下才能保存。原始沉积可能是大陆沉积,但地形通常被新沉积的海相碳酸盐沉积所覆盖,陆相沉积尚未被石化时,海侵可以产生广泛的改造并搬运到异地,并常与碳酸盐岩毗连。

在同一地区,K. A. Rasmussen和C. A. Neumann报道了对埋藏浅的岩溶地形的研究。阿巴科湾的碟形基岩表面近代才被淹没,形成浅的碳酸盐台地,里面保存有三种不同的同心带状的全新世到更新世岩溶不整合面,以台地深部中央保存最完好。该处的落水洞被泥炭和古土壤覆盖。

文集第二部分内容概要:

古岩溶地形实例

讨论古岩溶最关键的问题可能是,对识别真实的岩溶能追溯到多早的地质历史时期。C. Kerans和J. A. Donaldson的论文记述了前寒武纪完整的溶解、沉淀和沉积的系列,特别是岩溶角砾,与伴生的顶垂体、纹错成层的缝石质砾石构成的洞底沉积物、灰岩溶沟、纤维状流石、洞穴聚合物以及位于风化层之上的复合物。风化壳的三个发育阶段,即地表出露和潜水溶解阶段,碎屑沉积物的渗滤充填和流石沉淀阶段,最后为洞穴塌陷阶段,这三个阶段

反映潜水面位置逐渐降低。

北美稳定地块上的一个范围最大的跨区域不整合面，出现在中奥陶统的底面（Ross 等人，1982），它将Sloss的Sauk层序和Tippicanoe层序分开；Mussmann和Read（1986）详细讨论了该岩溶不整合面的范围及形成时间。

A. Desrochers和W. D. James在论文中，阐述了魁北克Mingan群岛的碳酸盐岩，识出两个大的古岩溶不整合面和众多的局部古岩溶地面，下部的古岩溶不整合面与跨区域的Sauk后断裂有关，为发育白云岩的广阔的岩溶平原，并有保存完好的溶解特征和小的溶洞，伴生的地下岩溶以小洞穴和岩溶角砾的形式出现；上部的古岩溶不整合面位于中奥陶世石灰岩中，表现出岩溶地形，地形表面有各样的溶洞，并受到淹没前的潮间侵蚀作用的改造。在小规模的、向上变浅的砂屑石灰岩旋回的顶部，也有局部古岩溶地层，这种短期的暴露形成快速石化和地表溶沟，随时间推移而逐渐加宽，最后演化成明显平整的表面。

W. J. Mussmann、I. P. Montanez和J. F. Read的研究论文，记录了这种分布广泛的地形的完整地质历史。不整合面的局部地方代表100Ma的时间，此区南部侵蚀地形起伏有100m以上，至沉积中心逐渐变为零。古岩溶包括地形高地、落水洞和向下延伸65m以上的洞穴以及向下延伸300m的层内角砾岩。落水洞中充填有角砾和砾石以及细粒的白云岩碎屑，层间整合的洞穴内含角砾、纹层状细粒白云石沉积，局部有亮晶胶结物。在不整合面以下200m的颗粒印模和粒间孔隙中有不具发光的方解石胶结物充填，系由分散流动的广泛的含水层中流动缓慢的氧化大气水中沉淀的。角砾岩主要由充填的白云岩碎屑和细粒白云石沉积的基质组成，主要是快速运移的管流洞穴水的溶解作用或者混合带溶解所成。埋藏时，压实作用使角砾岩层进一步破碎，在晚古生代气候温暖的条件下，含盐盆地的卤水的溶解作用，形成角砾周围的白云岩化晕圈，并在渗透性层内沉淀出靴状白云石和有关的硫化物。

C. F. Kahle将古代的岩溶地形与现代岩溶地形进行了对比研究，描述了地下的印模、晶洞、含有侵蚀碎屑的原地角砾、塌陷地层、溶解扩大的节理、内部沉积物、网状构造和皮布尔斯-洛克波特地层层内洞穴及其顶部的地表古土壤和落水洞。古地形起伏最大的地方可达3m，但一般要少于这个数字，通常地表为面状侵蚀的假整合，皮布尔斯-洛克波特地层顶部的潜育古土壤与现代潜育土壤十分相似，暗含着土壤的形成先于地面植被的发育。洛克波特地层沉淀期间的同生沉积断裂作用也可以形成局部岩溶不整合面，其特点为具有浅的地下晶洞、洞穴并被扇状钙红土和平整侵蚀面覆盖。

密西西比纪是地史期中首次大量出现的地面植被，伴随有真土的形成和淡水下渗。与此同时，当时的岩石在世界范围内产出大量的古岩溶和钙结岩。对Madison古岩溶的研究，恢复原先岩溶的地形，表明成熟期的地形起伏最大约70m，主要由三条大的河系和低的丘陵组成。推测有古含水层系存在，反映出有通过蒸发淋滤作用产生的平行层理的放射管流从怀俄明东南部的隆起处流失。古代溶解特征的分布受块断作用控制，而块断构造也形成局部的构造起伏。

R. H. Devoto对科罗拉多中部Leadville组（晚期密西西比纪）的古岩溶及有关矿床的研究，涉及有关的不整合及岩溶特征。识出在100—200m深的古岩溶谷附近的下伏泥盆纪和奥陶纪碳酸盐岩中的洞穴，也是受构造块体的运动所控制。

地下溶解溶洞内充填有角砾岩和碳酸盐岩。近不整合面处，有宾夕法尼亚纪的页岩和粘土，在岩溶内见有数百个铅-锌-银-重晶石矿床。V. J. Meyers则注意新墨西哥密西西比灰