

N.P. 詹姆斯 P.W. 肖凯



古岩溶

石油工业出版社



古 岩 溶

N.P.詹姆斯 P.W.肖凯

胡文海 胡征钦 等译

石油工业出版社

(京) 新登字 082 号

内 容 提 要

原书共两部分, 计 18 篇文章, 我们在此选译了有代表性的 10 篇文章。

第一部分包括 4 篇文章, 主要分析了现代岩溶的形态及古岩溶的形成机制, 并对溶洞的综合考察情况进行了介绍。第二部分包括 6 篇文章, 主要介绍了对古生界各种古岩溶研究的范例, 这些研究方法对于我们实际勘探工作有较大的借鉴作用。

本书可供石油勘探、地质科技工作者及有关院校地质专业师生参考。

Paleokarst

N.P. James P.W. Choquette
Springer-Verlag New York, 1988

古 岩 溶

N.P. 詹姆斯 P.W. 肖凯
胡文海 胡征钦 等译

石油工业出版社出版
(北京安定门外安华里二区一号楼)
石油工业出版社印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

787×1092 毫米 16 开本 16 印张 397 千字 印 1—1,200

1992 年 2 月北京第 1 版 1992 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-0650-2/TE·618

定价: 4.80 元

出版者的话

当前，塔里木盆地油气勘探工作正在加速进行，在古生界海相碳酸盐岩中，钻遇了高产油气流。虽然我国已经具有在陆相碎屑沉积岩中找油找气的丰富经验，也发现了一些在碳酸盐岩地层中寻找油、气的办法，但对后者还嫌不足。

众所周知，碎屑岩中的与碳酸盐岩中的油气藏，最大区别就在于二者的储集特性不同，碎屑岩多以原生孔隙为主，而碳酸盐岩储集岩主要为次生的孔洞、裂缝等。在塔里木盆地寻找碳酸盐岩油气藏时，虽然可以利用已有的在四川、华北就油区取得的初步经验，但这是很不够的，因而应该参考世界上其他国家在碳酸盐岩地区寻找油气藏的理论与方法。为此，推出本文集奉献给广大的读者。

本文集包括 10 篇文章，既有理论又有方法，既有对现代岩溶的分析，又有对地质历史时期中古岩溶的研究。了解古岩溶有赖于对现代岩溶系统的鉴别，根据将今论古的原则对古岩溶系统作出正确分析。本文集前 4 篇文章分析了现代岩溶地貌的发展、保存及改造过程，现代岩溶的典型特征及如何去认识它们。并给出了有代表性的现代岩溶的实例。后 6 篇主要分析了古生界的各种古岩溶，它对我们勘探塔里木盆地古生界碳酸盐岩油气藏将会起到一些启发。

在组织此文集的翻译过程中，石油科技情报研究所总工程师胡文海、副编审胡征钦等同志给予了大力支持，使本文集得以早日出版，在此表示诚挚的谢意。

前 言

我国的石油勘探和开发工作，在“稳定东部、加快西部”的战略方针指导下，“七五”期间，在新疆塔里木盆地以及其它地区，取得了重大进展。

塔里木盆地中已发现的油气田，具有其独特的条件，如油气藏多储于海相的古生界地层中，地处沙漠腹地、埋藏深，有的储层为与古岩溶有关的碳酸盐岩层等。油气藏的条件与我们所熟悉的东部地区各油田有较大的差异。

为了贯彻“经济建设必须依靠科学技术，科学技术工作必须面向经济建设”的基本方针，使科技情报工作更好地为石油勘探和生产服务，借鉴国外深层海相油气田勘探开发经验，就可以使我们少走弯路，得到好处。

为了对我国石油勘探的重点地区塔里木等盆地作好服务工作，我们和石油工业出版社共同组织了所内外的有关科技人员，作了专题文献检索、专题译文、专题报告翻译编辑工作，并考虑到这些译文和报告，对我国其它地区也有参考价值，特将译文公开出版、发行，供有关同志参考。

这套文集包括：《古岩溶》、《碳酸盐岩油气藏地震勘探译文集》、《裂缝性碳酸盐岩测井评价译文集》、《超深井试井试油技术译文集》等。

随着塔里木盆地、吐哈盆地油气勘探开发工作的进展，我们将继续与石油工业出版社合作编译出版有参考价值的文献，并希望广大读者给我们提出批评和建议，以便我们能把工作做得更好。

中国石油天然气总公司情报研究所

总工程师 胡文海

一九九一年一月

目 录

绪论.....	(1)
一、碳酸盐岩中溶洞系统的特征.....	(24)
二、大气成岩作用体系的地球化学模式及其在古岩溶研究中的应用.....	(59)
三、更新世古岩溶在全新世的印迹: 巴哈马群岛阿巴科湾.....	(83)
四、关于水成岩墙及裂缝填充物现代模式的综述和解释.....	(100)
五、加拿大西北部 Dismal lales 群元古界古岩溶剖面.....	(116)
六、早古生代地表和地下的古岩溶——魁北克省明根群岛中奥陶统碳酸盐岩.....	(133)
七、阿巴拉契亚地区奥陶纪 Knox 古岩溶不整合.....	(158)
八、俄亥俄州西部志留系 Lockport 和 Peebles 白云岩地面和地下的古岩溶.....	(178)
九、新墨西哥州密西西比灰岩的古岩溶特征.....	(205)
十、得克萨斯州西部耶茨油田圣安德列斯白云岩储集层中二叠系岩溶的 溶洞及其它特征.....	(227)

绪 论

Philip W. Choquette 和 Noel P. James

胡文海 译

岩溶作为地表的一种形态，不仅独特和复杂，而且非常出奇。其多处连通和旋卷的地形、复杂和精美装饰的洞穴、奇异的排驱系统和坍塌构造，在他种地貌中均极少类似。可是这些形态只是一系列地表和地下构造中的最明显部分而已，这些地表和地下构造，其规模可小至超显微型，其系统现在仅部分了解，是几乎完全由溶蚀所形成的非常特异的系统。

(一) 本书的目的和重点

本书致力于记录和解释地质史中的岩溶。然而，了解古岩溶有赖于对现代岩溶系统的鉴别，以及研究它们是如何成为“化石”的。因而本书中包括两部分，第一部分包括 7 篇文章，涉及岩溶地貌的发展、保存、改造和辨识；第二部分包括 11 篇文章，记录了包括从古生代到白垩纪各种陆棚和台地沉积中的古岩溶范例。

(二) 本学科的特点

几个世纪以来，岩溶地形，连同其洞穴系统和特殊的地貌，一直使研究地壳进程的学者着迷。早期大部分研究均是想了解这些形态的外貌、水力学和发展，在讨论理论和观察结果的无数著作中，均有完整记载（例如 Jennings, 1971 和 1985; Sweeting, 1973; Jakucs, 1977; Bogli, 1980; Trudgill, 1985）。

在过去 30 年里，对碳酸盐沉积的地层学和沉积学感兴趣的地质学家开展了对古岩溶的了解（例如 Roberts, 1966; Roehl, 1976; Bignot, 1974; Quinlan, 1972; Walkden, 1974; Sando, 1974; Meyers, 1974 和 1978; Read 和 Grover, 1977; Kobluk 等, 1977; Maslyn, 1977; Wright, 1982; Grover 和 Read, 1983; Arrondeau 等, 1985）。此了解是由于在大气水对碳酸盐沉积物成岩作用的启蒙研究中所产生。这两个紧密相关的领域中，Bathurst (1971 和 1975) 的工作，以及近来由 Longman (1980)、Esteban 和 Klappa (1983)、James 和 Choquette (1984) 等人试图进行的综合工作，将它们之间某些了解的线索拉在一起了。这种对地质史中岩溶现象理解的增长，是由于几个因素所引起：对现存岩溶的详细记录（例如 Bogli, 1980; Jennings, 1985）；我们对导致了化学溶蚀的水力学和化学过程了解的增进（例如 Thrailkill, 1986; Plummer 等, 1979; Hanshaw 和 Back, 1980; Palmer, 1984）；对岩石-土壤-空气界面间局部的成岩过程和形态有了大量的记录（例如 Esteban 和 Klappa, 1983 以及有关的参考文献）；对岩溶地貌除了是破坏性的形态外，也是局部洞穴沉积和区域胶结作用中阳离子和碳酸根离子的建设性来源，对这一认识有所增进（例如 Meyer, 1974 和 1978; Grover 和 Read, 1983）；最后是对很多使人迷惑的组构和构造，以往曾被认为是由大气水所造成，现在可以归之于其他的成岩环境，如海床和深埋的领

域,对此也有了更多的认识(例如 James 和 Choquette, 1983 和 1984; Scholle 和 Halley, 1985; Choquette 和 James, 1987)。

尽管有这些值得鼓舞的趋势,但相对来说,碳酸盐岩沉积学家和岩石学家对岩溶和古岩溶却很少注意。沉积学研究的传统是集中于记录碳酸盐岩的形成,解释它们各种相间的嵌镶关系,并且重塑它们的沉积和古地理环境。在这些方面,集中注意了沉积构造、大型的形态和生物组成,通常以很大的努力去记录从露头或钻井岩心所获得的信息。另一方面,对成岩作用的研究,在很大程度上是依靠薄片岩石学和地球化学来进行的,它们已揭示出碳酸盐岩的蚀变史,因而集中研究显微胶结物和小规模选择性组构的孔隙度。

对较大规模岩溶形态明显忽视的原因,可能是由于岩溶本身“负性”溶蚀的特点。特别麻烦的是层间溶蚀,它在地下沿着岩性界面形成,所造成的形态可能被误认为是地表岩溶。在较小规模上,想将古岩溶面和缝合线及其他压溶现象区分开来,就存在有问题(Walkden, 1974)。对保存的古岩溶地形中局部较平的表面,和古岩溶地表在以后的海侵中被夷平或受侵蚀被穿孔,要想将它们区别开来也非常困难。最后,经常不能确定的是,溶蚀是在什么时候发生的(Wright, 1982)?所观察到的形态是否于母岩沉积不久后就形成了?它们会不会是现代过程的结果?或许是在某个中间过程中发生的?总之,想辨识古岩溶会有成堆的问题。

另一原因可能是,碳酸盐岩岩石学家的自然实验室——热带地区中至晚更新世的碳酸盐岩,它们已提供了有关大气成岩作用的大多数信息,可是它们很少有能进入的洞穴和以前岩溶的遗迹。这是由于在更新世大部分期间,其海平面均低于目前的海平面,因而,即使是最广泛分布的更新世岩溶系统,现在也已全被淹没。

最后,对主要岩溶不整合的区域分布和形态辨识,只是在近期由于高分辨率的地震剖面 and 重新处理技术,才有可能实现(Fontaine 等最近的总结和参考文献, 1987)。在这一进展以前,想以任何规模重塑区域不整合,都要依靠大量钻井或露头剖面的信息。随着精细地震技术的出现,产生了将经典的地层概念和方法应用于地震剖面上的地层分析(例如 Sloss, 1963),即“新的地震地层学”(例如 Vail 等, 1977),其中,区域和区域间的不整合是关键要素(Schlee, 1984)。

(三) 定 义

本书中,岩溶一词用其广义,包括了所有成岩形态——宏观的和微观的、地表的和地下的,它们是在化学溶蚀过程中产生,并改造了有关的碳酸盐岩序列。按照惯例,岩溶也包括:地下的沉淀(洞穴沉积),它们可能改变了溶蚀空隙;坍塌角砾岩和机械沉积的“内部沉积物”,它们可能铺于空隙底部或充填了空隙;以及地表的石灰华。在本书中未考虑蒸发岩岩溶。

古岩溶在此处的定义为(参见 Walkden, 1974; Weight, 1982)古代的岩溶,它通常被年轻的沉积物或沉积岩所覆盖,因而同时包括有残余古岩溶(过去所形成的现代地貌)和埋藏岩溶(被沉积物覆盖的岩溶地貌);正如 Jennings (1971) 和 Sweeting (1973) 所定义的一样。对于使用此书的很多人来说,为很多碳酸盐岩岩石学家和地层学家所熟悉,并由 Esteban 和 Klappa (1983, p11) 所提出的这一“广义”可能会有帮助:“岩溶为一种成岩相,加添在暴露于大气中的碳酸盐岩体上的一种印迹,是由碳酸钙在大气水中的溶解和运移所产生和控制的,可在多种气候和构造条件下发生,并且产生出一种可加以辨识的地貌”。按

Roehl (1967) 的话来说, 岩溶和古岩溶实际上是一种暴露于大气中成岩作用的地貌, 具有一系列清晰的并且通常是可将其解释的形态 (图 1)。

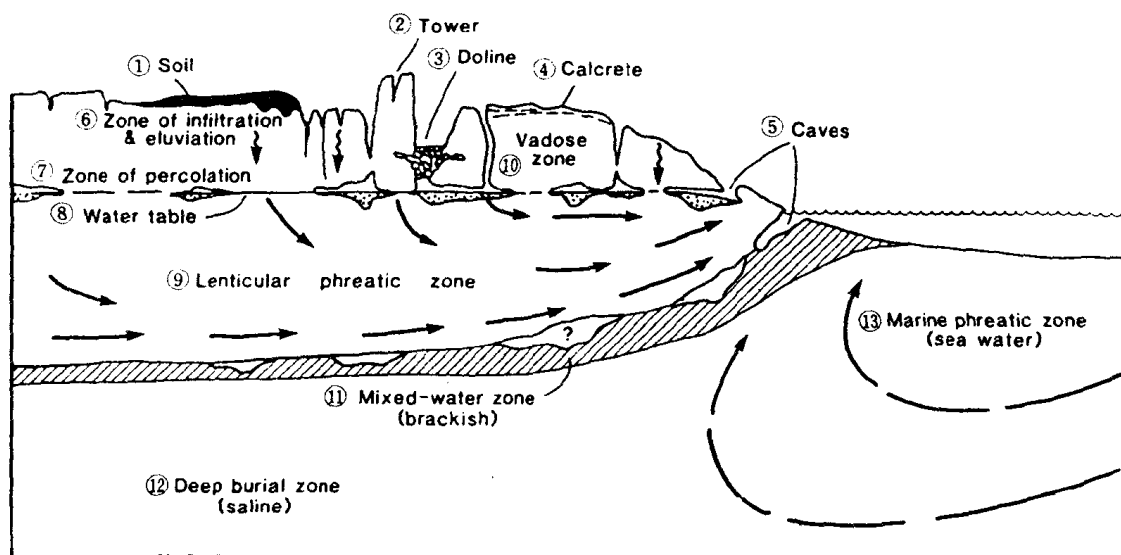


图 1 表明海洋旁新近沉积的碳酸盐岩上, 岩溶地貌发育的各有关单元和水力学的图解

①土壤; ②塔峰; ③落水洞; ④钙质壳; ⑤洞穴; ⑥渗滤和淋溶带; ⑦渗出带; ⑧潜水面; ⑨透镜状潜流带;
⑩渗流带; ⑪混合水带 (半盐水); ⑫深埋带 (盐水); ⑬海洋潜流带 (海水)

为了简化, 我们还将岩溶地貌中钙质沉淀的类型分为: (1) 洞穴沉淀, 在洞穴系统中的沉淀, 这些洞穴的直径大于 50cm (即大得足以进行勘察); (2) 胶结, 在较小孔洞中堆积的沉淀, 是沉积作用中最普通、受组构所控制的孔穴 (Choquette 和 Pray, 1970); (3) 地表石灰华, 地表泉水中的碳酸盐沉淀。

(四) 岩溶形成的控制因素

多种多样的岩溶形态和岩溶化的程度, 是内因和外因交互作用控制的结果 (表 1)。

1. 内因

其中最重要的是: 总的岩性、“基质”或层内渗透性、是否存在有裂缝或其他地下水的可能通道。当所有其他岩石特性都相同时, 石灰岩在大气水中的溶解度较白云岩要大几个数量级, 石膏和硬石膏均较上述两类碳酸盐岩更易溶解。在石灰岩中, “成熟度”或与 CaCO_3 矿物亚稳定性相反的稳定性最为重要。当具亚稳定形式 CaCO_3 的碳酸盐岩与大气地下水接触时, 霏石的溶解将造成印模的或其他组构选择型的孔隙度, 同时还释放出 Ca^{2+} 和 CO_3^{2-} 离子, 它们最终将作为低镁方解石胶结物而沉淀。矿物控制蚀变的这种特性 (James 和 Choquette, 1984) 可能会形成新的空隙, 以形成岩溶成岩作用地貌的一部分, 同时又堵塞了某些原生孔隙度 (Harrison, 1975)。

在胶结不好的碳酸盐砂或粒状灰岩暴露于大气中的地方, 所产生的地层高渗透率会造成地下水向多方向流动, 穿过颗粒组构, 绕过已有裂缝或仅部分利用已有裂缝。作为高渗透率

表1 影响岩溶地貌发展的因素

外因	气候	降雨和蒸发 气温
	基础水平	海拔和地形起伏 海平面或局部水体
	植被	
	延续时间	
内因	岩性	矿物 总纯净度 组构和结构 层厚 层渗透率 裂缝
	构造和地层	地层产状 承压或非承压水层 构造传导水情况

结果的其他过程还有：地表淋溶的沉积物落入多孔的粒状灰岩中，地下水面上洞穴的发展受到限制（图2）。低渗透率的碳酸盐岩在转运地下水时，似乎主要是通过裂缝和沿着层面流动。虽然对现有岩溶的大多数描述中，都强调了大规模空洞和裂缝控制的溶蚀作用的重要性，很可能在岩溶地形中，在渗透率更大的碳酸盐岩内，小规模溶蚀作用和其他蚀变效应是广泛分布的。在溶蚀作用深深地切入到岩溶地形潜流带胶结的“根部”时，对层内渗透率的影响就会降低，裂缝在流动状态中将会起更重要的作用。

形成错综的岩溶地表形态如沟、凹槽和其他的溶沟，雨水必须流走而不是渗入到岩石中去。发生这种情况时，需要有低渗透的地表，这可能由广泛的胶结作用、灰泥的高含量，或地表有不渗透的钙结层造成（图2）。

在洞穴的发展中，裂缝作为水流通道非常重要。裂缝的作用通常是“重复”发生的，由溶蚀、坍塌形成的小型裂缝网络会变成新的通道。溶蚀作用扩大了裂缝系统，作为物质搬运的营力，将地表的土壤和沉积物向下转运，并向渗流带提供渗出水，以在洞穴中形成沉淀。

2. 外因

虽然植被情况、最初暴露于大气中的地形起伏与成岩作用基准面间的关系，当然还有暴露的延续时间等都非常重要，但最关键的外因可能是气候。

在雨量丰富和气候温暖区域，蚀变过程迅速，造成良好发育的土壤和红土、大量的落水洞、以及地下溶蚀-坍塌角砾岩（图3）。在某些区域则形成特殊地貌，可能包括有尖峰、锯齿山脊、塔峰、峡谷、封闭的凹陷等，造成不可穿越的区域。在温暖的或地中海式气候区内，通常会发生岩溶和钙结层，但是它们的发育通常是季节性的或者属于一种长期旋回。在加勒比海岛上新生界的灰屑岩中，经常见到浅的落水洞或其他溶蚀洞穴，为钙结岩层所覆盖（James, 1972），或许相反，钙结层壳受溶蚀作用所淋滤，沙漠地区除地表局部的溶沟外，通常很少有岩溶出现。在温暖的半干燥气候下，常有钙结层，这是因为在偶然的降雨后由强烈的蒸发作用引起。在寒冷气候条件下，虽然反应速度缓慢，但岩溶却是常见的，地表岩溶

发育良好，地下岩溶的形成可一直延深到连续永冻带处，不存在有钙结层，但土壤中的碎屑上确有方解石的沉淀 (D.Ford, 个人联系, 1987)。

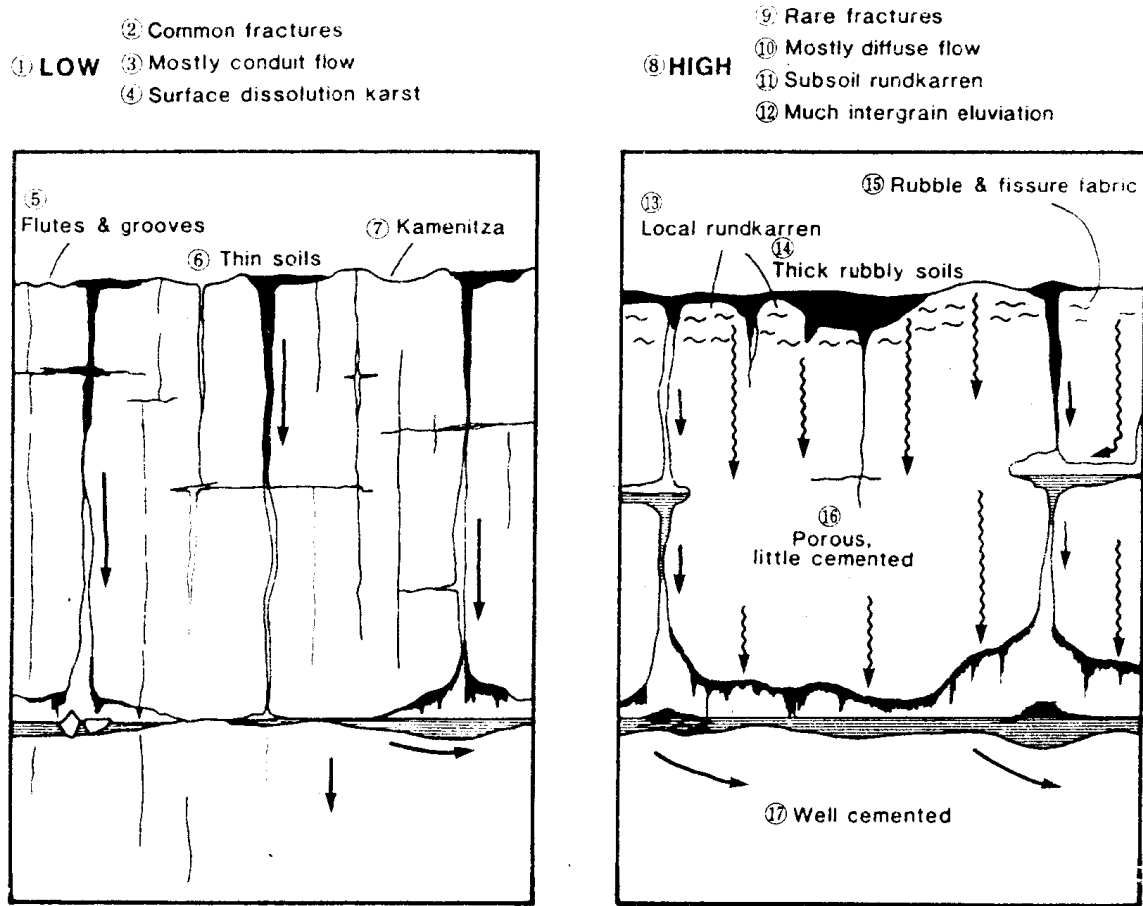


图2 不同的地层渗透率对地面和地下岩溶类型影响示意图

低渗透率的碳酸盐岩可以是部分石化至完全石化的灰质泥晶岩或胶结致密的粒状灰岩。高渗透率的

石灰岩可以是很少胶结和/或受淋滤、分选良好的灰质砂或粒状灰岩。假设为温暖或潮湿气候

①低渗；②普通裂缝；③多数为导管流动；④地表溶蚀岩溶；⑤溶蚀槽和沟；⑥薄土层；⑦溶蚀塘；

⑧高渗；⑨裂缝稀少；⑩多数为渗流；⑪亚土壤层圆溶沟；⑫粒间淋溶发育；⑬局部圆溶沟；

⑭含碎石厚层上；⑮碎石和缝隙结构；⑯多孔、胶结少；⑰胶结好

当认识到钙质壳 (Caliche) 和岩溶的形成，对降雨、蒸发、一定程度上还有温度等，需要有不同的结合，因而建议采用“岩溶相”和“钙质壳相” (Esteban 和 Klappa, 1983)。同时，对低纬度相对较大岛屿的观察，利用标准的地形反应，说明两种相不仅可以按序列发生，而且在同一季节内可以同时相邻发生。

在暴露的地表以下，于渗流带和潜流带的胶结作用中，气候同样起着重要的作用。当认识到在干燥和半干燥区域内 (如波斯湾区域) 胶结作用进展缓慢，例如，区域内的侏罗系碳酸盐岩储集层，通常很少有胶结物，使 Illing 等人 (1967) 认为是气候的影响。似乎干燥地区的古岩溶与潮湿气候下的古岩溶，在大气胶结作用的类型和丰度上均不一致——这也可以作为一个对气候的灵敏指标。干旱气候成岩作用的地貌，除针状纤维结晶和稀少的低铁块状

潜流带胶结物外，很少有渗流带胶结物。相反，潮湿地貌则有广泛的渗流带和潜流带的胶结物。其他因素，特别是地下水面以上的地形起伏和因此产生的水头情况，均将起作用，因为它们也影响了地下水的势头和产量。

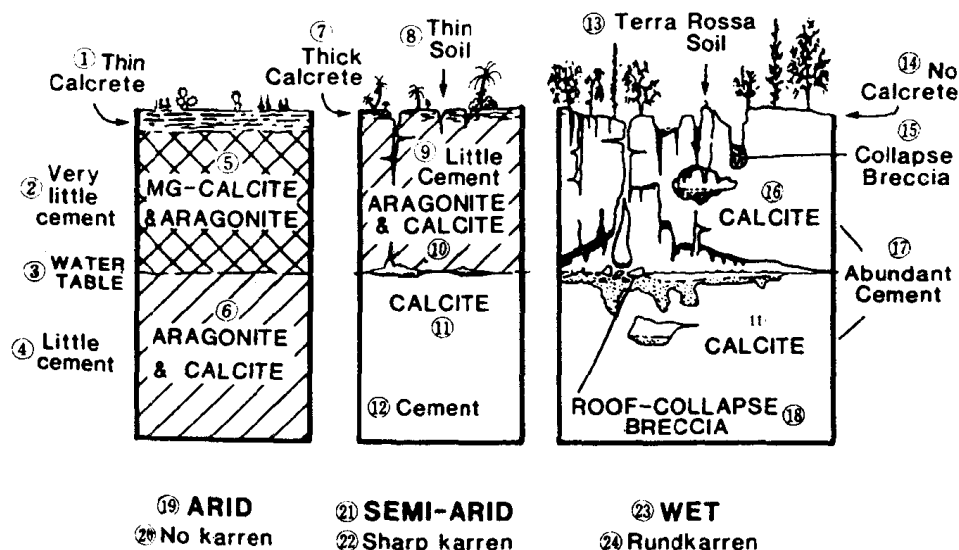


图3 与不同气候条件有关的普通岩溶形态示意图 (据 James 和 Choquette (1984) 改画)

- ①薄钙结岩; ②极少胶结; ③地下水面; ④胶结少; ⑤镁方解石和霏石; ⑥霏石和方解石; ⑦厚钙结岩;
⑧薄土壤; ⑨胶结少; ⑩霏石和方解石; ⑪方解石; ⑫胶结; ⑬红土; ⑭没有钙结岩; ⑮坍塌角砾岩; ⑯方解石;
⑰大量胶结; ⑱顶板坍塌角砾岩; ⑲干燥; ⑳没有溶沟; ㉑半干燥; ㉒尖溶沟; ㉓潮湿; ㉔圆溶沟

在大气带中成岩作用有一个基准面的重要概念，此基准面一般系与局部水系和/或海面相符的，这是在 Davis (1930) 和 Bretz (1942) 划时代著作中出现的。现在，对海平面变化的影响，由于对广阔低起伏的碳酸盐台地仅稍稍露出水面的情况，以及渗流带和潜流带成岩蚀变作用的对比等情况 (例如 Steinen 和 Matthews, 1973; Longman, 1980; James 和 Choquette, 1984) 已有更多了解，因此是重新斟酌这一概念的时候了。现在看来，导致洞穴系统发育的水平面本身的作用强烈地依赖于碳酸盐母岩所提供的传导 (孔隙) 系统的特性。在相对较新和/或胶结很少、基质或地层孔隙度与渗透率均高的地层中，地下水面附近一般将成为很多洞穴开始发育的地方 (图 1)。洞穴系统也于渗流带中形成，不管其起源如何，其主要长轴方向均垂直于地下水面，但已知洞穴中似乎只有一小部分是这种情况 (Bretz, 1942)。在更“成熟”和/或胶结很好的碳酸盐岩中，它只有很小的或没有地层渗透率，存在的通道将仅是裂缝、断层和层面，在这类岩石中，洞穴的发育将确定潜水面会在什么地方，而不是潜水面确定洞穴的所在 (D.Ford 私人联系, 1987)。这样，洞穴将在这些较大通道和地形起伏所支配的深度处发育，在发育过程中，它们自己将创造出渗流带和潜流带，并干扰地下水面。一般情况下，不管地层渗透率是高还是低，当洞穴系统发育，地下水将沿着它们而改变流向，穿过较深层带，然后变为相对停滞。岩溶地貌向下侵蚀至一基准面，约相当于局部水体的高程，最大的洞穴发育带将包括地下水面。

沿着海岸在某些出露的碳酸盐台地上，于准透镜状的混合带中也发育有洞穴系统 (如 Hanshaw 和 Back 等, 1984 和 1986)，在有大量含水层的内陆半咸水带中也可形成，如佛罗

里达州南部 Biscayne 含水层的“漂砾带” (Vernon, 1969)。内陆含水层下游, 在任何尚存潜水面以下数百米深度处, 洞穴形成的重要性, 已得到证实 (例如本书中的 Ford)。

一般讲来, 在一岩溶地貌或古地貌上可能的最大起伏, 是随最初在局部水体以上的高度而定, 或是随开始暴露于大气中时在海面上的高度而定 (图 4)。此基准面将控制地表岩溶侵蚀的深度, 但洞穴系统一般却含在其以下的不同深度处发育, 通常有较大的深度 (数百米)。在近海广泛分布的碳酸盐台地上, 其起伏通常将受到台地高程的限制, 它有可能达到数百米, 但这类台地在非常低的岛屿上和沿海岸部分时, 通常只有几米。佛罗里达和巴哈马更新统暴露于大气中的地面 (例如 Perkins, 1977; Beach, 1982) 现在起伏相对较低 (在 $10^0 \sim 10^1 \text{m}$), 但可能代表了被淹没的有较高起伏的古岩溶地貌。在强烈隆起区域, 如中国东部、墨西哥和伯里兹的巨大岩溶山岭, 现在的地形起伏非常大, 达到数百米以上。现存岩溶地貌所记录下的延续时间, 可能会有 2 至 3 个数量级——从 10^1 至 10^7 年以上, 其间任何时候它们的起伏和高程均为基准面以上高度的一个函数。

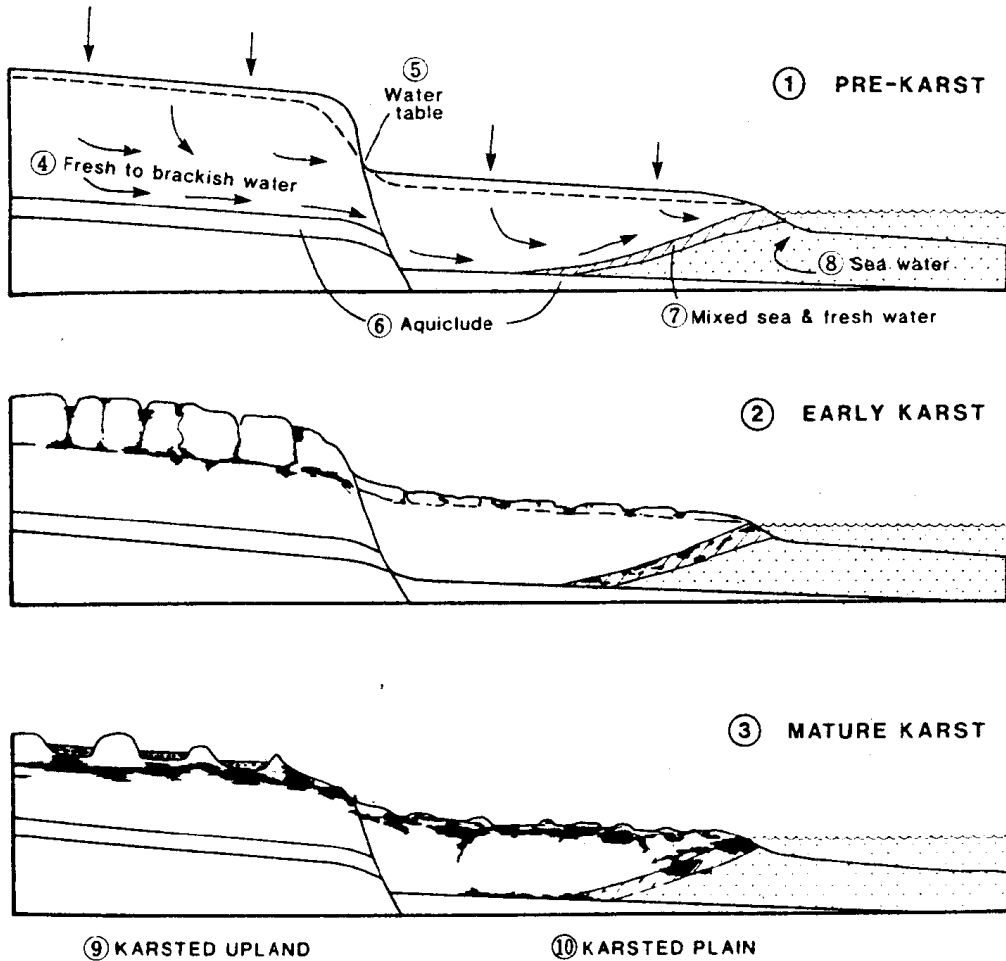


图 4 表示一微露出水面的碳酸盐陆棚示意图

呈现为与内陆高地相连的海岸平原, 由于在岩溶基准面以上的海拔高度不同, 可能发育成不同的岩溶地貌。

假设区域内的这两部分, 其气候条件及其他因素均类似。洞穴表示为黑色

①岩溶以前; ②岩溶早期; ③岩溶成熟; ④淡水至半盐水; ⑤潜水面; ⑥隔水层;

⑦海水和淡水混合区; ⑧海水; ⑨岩溶高地; ⑩岩溶平原

土壤和沼泽沉积物中,植物腐败后产生的生物成因 CO_2 , 是大气地下水具化学腐蚀性的重要原因, 在大多数自然情况下, CaCO_3 的溶解和沉淀是分别受 CO_2 进入或离开水体所控制的。溶解作用的增加是与溶于水中的 CO_2 的分压力 (P_{CO_2}) 成正比的。众所周知, 生物成因的 CO_2 一般使土壤空气的 P_{CO_2} 增加约 $10^{-2.0}$ atm, 较空气中的 CO_2 高两个数量级 (P_{CO_2} 约 $10^{-3.5}$ atm), 因而, 与土壤空气均衡后的水体, 具有较高的溶解碳酸钙的能力。

(五) 第一部分提要: 岩溶形态和作用的总况

1. 地下岩溶

在地质史中对于岩溶一般最容易加以识别的是其广泛的地下溶蚀作用、造成洞穴和伴生的孔洞。这些形体和联结它们的通道, 在形状、规模、配置和发育的序列方面都异常复杂。在这里, 差不多所有的外因和内因都一起配合起作用, 形成一个有千变万化的不同孔洞系统。

对这些形体的早期研究, 强调了控制其发育的物理参数。近年来, 当我们对碳酸盐与水作用的了解更加深入 (Runnels, 1969; Wigley 和 Plummer, 1976m; Bögli, 1980; Hanshaw 和 Back, 1980, Back 等 1984 和 1986), 勘探技术更加精密, 就揭示了洞穴情况的清晰情景。

由 D.Ford 写的本书第一篇文章, 题为“碳酸盐岩中溶洞系统的特征”, 为地下溶蚀作用的综合报导。似乎大多数可勘察的洞穴系统均是由大气水循环所形成, 而不受地质界限的约束。它们的几何形态并不是完全可以预测的, 因为它们发育的模式是受可穿透缝隙中的水力梯度所控制, 当最初的孔道被联通时, 梯度方向改变, 而变得更为复杂。很多洞穴都具有多期的形态, 有一系列的层位反映出渗流带的形态, 或是浅层、深层或混合的潜流带的形态。富含 CO_2 的热水所形成的洞穴呈现为树枝状分流系统, 或许当盐水和淡水在海岸带混合, 发育了很多蜂窝状洞穴, 形成二维或三维的迷宫。洞穴的几何形态是确定在岩溶地貌中一个洞穴最初成因的关键因素, 却似乎是模棱不清的。潜流剖面总是趋于椭圆, 却可能被不同的溶解度和坚硬的底板所复杂化; 渗流带横剖面类似于峡谷或不规则四边形; 二者均可能呈现为溶蚀壳状, 或许被崩解所修饰或毁坏。

古岩溶不仅是由洞穴和较小的溶蚀形体来加以确认, 也可由装饰了不同大小空洞内的沉淀物加以辨识。作为此系统特征的沉积物 (岩石) 与水之间的复杂反应, 在这些沉积物与淡水一经接触即已开始。如果它们是由不同碳酸盐矿物组成的未经蚀变的沉积物, 其中有的成分在淡水中是不稳定的, 那么这一过程会很迅速, 并受有关矿物的相对溶解度所控制 (James 和 Choquette 著, 矿物控制的蚀变, 1984)。如果它们全部是方解石或方解石灰岩, 那么循环水的饱和状态就控制了溶蚀和沉淀的类型 (James 和 Choquette 著, 水控制的蚀变, 1984)。K.C.Lohmann 在他题为“大气成岩系统的地球化学模式和它们在上古岩溶研究中的应用”的评论文章中, 勾绘出了我们目前对这一系统化学特征的了解情况, 其重点是碳酸盐沉淀中的痕量元素和同位素特征。如果我们想知道与古岩溶有关的沉淀的意义, 那么在大水影响地貌中的不同部位时, 了解有关元素进入方解石晶格的控制因素就是一个基础。Lohman 重新强调了这一点, 即在一个地区的一个特定的地质时期内, 其大气地下水中的

$\delta^{18}\text{O}$ 主要是一个衡量, 而 $\delta^{13}\text{C}$ 则随与该系统有关的土壤气的数量可能有很大的变化, 因而他将与大气水有关的方解石线定义为: 基本具有衡定的 $\delta^{18}\text{O}$ 和变化的 $\delta^{13}\text{C}$ 可作为一基线, 使不同大气水沉淀的化学变化特征均可加以鉴别。当整个系统成熟, 由矿物控制的过程变为由水控制过程时, 沉淀物的化学成分随着流体向下倾方向流动, 其大多数将由与水的平衡变为与岩石的平衡。在混合带中的沉淀物似乎并不呈现为不连续双曲线的混合趋势, 而是成平行于大气水方解石线的分枝。按地球化学基础, 可将洞穴沉淀与典型的渗流带或潜流带胶结物分开, 但它们却很类似于某种海相沉淀。最后应提起注意的是, Lohmann 强调, 在解释古代沉淀以前, 重要的是应检查所有地球化学和组构的标准。

2. 洞穴沉淀

除了常见的石笋、石钟乳、洞穴米花、洞穴真珠等形式外 (Moore 和 Sullivan, 1978; James 和 Choquette, 1984), 较小的不太特殊的文石和 / 或方解石沉淀也很常见。这些沉淀以结核状分枝体、团块和结核的形式, 在洞穴水坑底板上、坍塌块体上或水坑中较老的洞穴沉淀上形成。它们沿着水坑的表面呈板状、架状、镶边状和屋檐状而发育, 或作为漂浮的结晶筏最后沉到底板上。在充满空气洞穴中的沉淀, 其形状是随它们是从点滴、喷射或毛细管流等不同水流情况而定, 在古岩溶中可辨识出较大的石钟乳和石笋, 但一些较纤细的类型, 除了它们能很快地被较年轻的沉淀或沉积物所覆盖和封闭外, 它们是不容易被保存的。

L.A.Gonzalez 和 K.C.Lohmann 在他们的文章“对洞穴沉淀碳酸盐岩——新墨西哥州 Carlsbad 洞——矿物和组成的控制”中, 利用地球化学和岩相学的技术, 分析了世界上最大和最有名洞穴之一中的沉淀。此报告对洞穴系统是一有价值的综合分析, 使用它可对古岩溶沉淀的地球化学进行比较。Carlsbad 洞穴中的方解石含有 1.5 至 12.0% 克分子量的 MgCO_3 , Mg^{2+} 离子与流体中 Mg/Ca 的比率呈非线性的依存关系, 却与流体中 CO_3^{2-} 呈线性关系。方解石-文石多形晶是受与文石同时沉淀的最富含镁的方解石使 Mg/Ca 比提高所控制, 或是从沉淀文石的 CO_3^{2-} 浓度还要更高的水中生成。水菱镁矿和碳酸钙镁矿的沉淀, 是在提高了 Mg 浓度和 Mg/Ca 比的流体中极度蒸发而成, 而原生白云石却是在 Mg/Ca 比中等、可能含方解石和文石均不饱和的流体中沉淀而出。

3. 洞穴沉积物

在本书的研究文章中用图表示了在古代洞穴中发现的各种机械充填沉积物。沉积物经淋滤可进入地下空洞中的深度依多种因素而定, 包括地下水系统的能量, 它又依赖于水的重新补给量和水头; 成岩作用基准面深度; 沉积物的供应; 与渗滤带和重力渗漏带的相对位置 (图 1)。Craig 在本书中所描述的二叠系古岩溶系统, 在主要不整合面下, 上部 10~20m 中的洞穴充填了绿灰色粘土质碳酸岩泥晶岩, 其下, 溶蚀洞穴很小, 可用取心法取出样品, 孔洞中一般无沉积物。虽然现存岩溶地貌中的洞穴也表现出这种近地表的充填, 但在雨量丰富地下水流很大的区域内的洞穴, 可能会充填到很大的深度。

4. 角砾岩

当某些古洞穴中或洞穴的一部分出现了沉淀, 其底板上充填了沉积物; 另外的一些却以角砾岩为其特征, 或单独, 或与这些形体共同存在。

岩溶角砾岩的外形和内部组成, 其差异如此巨大, 只能进行一般分类, 但也的确表现出某种系统性 (图 5)。覆盖角砾岩是与不整合共生的, 呈不规则席状或片状, 充填了不同规模和起伏的地形低处。这种角砾岩通常为地表或近地表母岩的坍塌物或残积, 为带尖锐棱角碎片的混合物, 与土壤、淋溶土壤或沉积物掺混在一起, 燧石角砾较普遍。在地表, 类似的

角砾岩可能充填了岩沟和其他开启部位，并且具有多种多样的不规则形式。角砾管和其共生体，系沉降洞或落水坑以下大致为柱状至不规则的形态，通常含有较多的错动和推撞的块体，其周界为溶蚀坍塌后补位的地层。这类角砾岩所包括的范围，可以从充填“裂缝”的角砾岩至开口广阔、具旋转和错位碎块的角砾岩，至以土壤或沉积物为基质的土壤剖面角砾岩。碎块通常为尖锐棱角，很少有磨蚀或错位的痕迹。碳酸盐碎块可能都是属于同一岩性，也可能是混合的。碎块间的沉积物或土壤可能是淡绿色的。

洞穴顶板坍塌角砾岩顶板不规则，底板规则，大致平坦，剖面上显示为整合形态，一般情况下分选极差，大者直径超过数米。和细粒沉积物一起从地面携带下来。砾岩体在剖面上或平面上呈现为复杂的网格状或树状时，就可被怀疑为洞穴坍塌成因，在一个长期暴露的古岩溶砾岩剖面中，如果没有沉淀或沉积物，那它们很可能属于层内角砾岩。蒸发岩溶蚀角砾岩在外形和特征上也表现为极度多变，这部分是看溶蚀作用是发生在渗流带或潜流带而定。Sando 所描述的（本书中；还可参阅 Roberts, 1966; McCaleb 和 Wayhan, 1969; Sabdo, 1976）怀俄明州 Madison 灰岩（密西西比系），靠近其顶部分布广泛的平板状“单元”，似乎就是由潜流带的溶蚀作用所产生。靠近地表，在风化剖面渗流带中的溶蚀作用会造成局部塌陷。在现代水系通过蒸发岩地区时，经常会在基准面以上发现这种情况。

岩溶角砾岩被认为是几种矿产的母岩，特别是“密西西比峡谷型”铅锌的硫化矿床（Ohle, 1980; Aacqueen, 1982; Kyle, 1983; Kisvarsanyi 等, 1983; Rhodes 等, 1984）。D.F.Sangster 在他的文章“在碳酸盐岩中角砾岩成为铅锌矿的母岩”中，提出了关于这种假设的证据，并指出流行的两种假说：（1）浅层岩溶角砾岩产生后，在埋藏时交代矿床进入角砾岩；（2）在没有大气水参与的情况下，稍早一些的矿床本身的溶蚀热水岩溶导致了溶蚀坍塌。从地质证据看，似乎大气水岩溶假说应用最广泛。

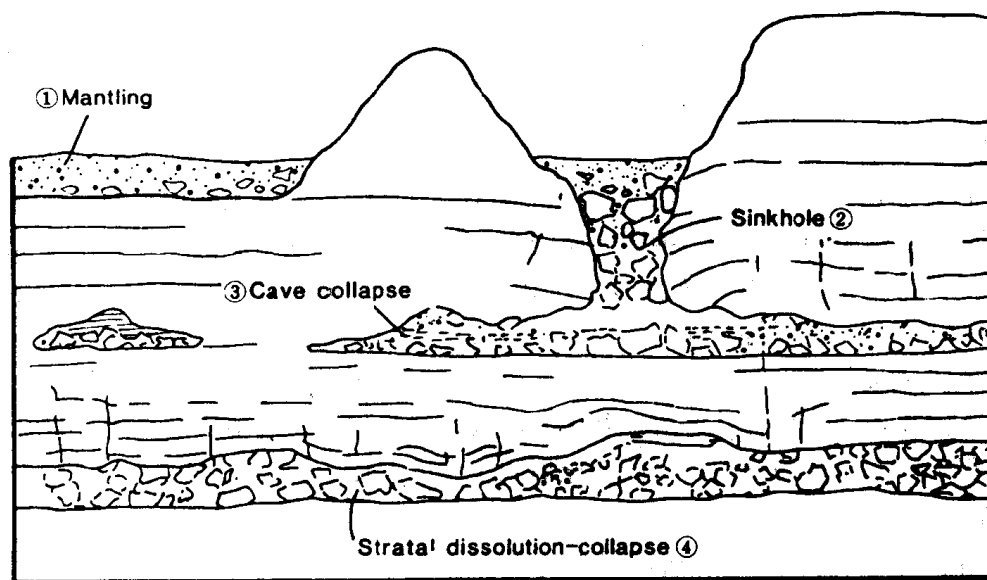


图5 岩溶地貌中，地表和地下角砾岩的一般类型示意图

①覆盖层；②落水洞；③洞穴坍塌；④层内溶蚀垮塌

5. 地表岩溶

在岩溶地貌中, 可以产生很多成岩的形态 (见 Roehl, 1967; Esteban 和 Klappa, 1983; James 和 Choquette, 1984)。顶部是巨大多变的地形和异常水系, 或不存在水系。除非地表露头异常良好或有高分辨率的地震剖面, 可查出几十或几百米的古地形起伏, 或许在一个地区有特别多的钻井能控制地下情况外, 在岩石记录中很难区分出大型的地貌情况, 在可疑的不整合面上一定层段中, 利用熟悉的地层学方法, 记录其厚度变化, 在露头很好的地区, 可以用不同的精度, 作出大比例尺的地貌图来。作图的基准面应该接近一个时间界面, 理想的应该接近一个沉积时的水平面, 不管是在大区内勾绘古岩溶面的轮廓, 或是在小区内对古岩溶面详细作图, 此方法均需要大量的控制剖面。

正如上面所概述的, 小规模的地表岩溶或溶蚀残余体, 在岩石剖面中很难加以辨认, 因为它只是一种溶蚀现象。在垂直剖面中, 它呈现为不规则的层面接触, 所以只有在露头良好的地表, 才能比较有把握地确定地表岩溶的类型和形式。

具有千变万化形态的地表岩溶地貌, 是辨识古岩溶的另一关键。在现代岩溶地貌中, 这些表面特征可能很明显, 但埋藏以后却可能失去其可加以辨识的特点 (Wright, 1982; Walkden, 1974)。然而, 在这些表面以上覆盖的沉积物, 有可能提示出这里存在有一个用其他方法不可能知道的古岩溶层。在与潮缘和古露头层有关的沉积物中, 从奥陶纪至全新世, 存在有黑色的卵石 (Strasser, 1984)。关于这些碎屑的起源有一些争论, 虽然岩石变黑一般都认为是含有有机质的原因, 但对这一物质的起源和组合却是有争议的 (Ward 等, 1970; Barthel, 1974; Esteban 和 Klappa, 1983)。在 E.A.Shinn 和 B.H.Lidz 的文章“变黑的石灰岩卵石: 不整合在地表时的火情”中提出了对这种卵石起源的一种创新的看法, 根据他们对加勒比地区新生界及全新统灰岩的研究经验, 其结论是: 有选择性的变黑是由于草类的迅速升温 and 森林火灾所致。当他们建议将此作为一种替代的假说时, 他们强调说, 在潮下带环境中也可能发生变黑, 因而在解释这类碎屑时, 必须要小心。

6. 被淹没的岩溶

为了得以保存, 岩溶必须被掩埋。虽然原始沉积物可能是陆相的, 可是其表面通常可能被新近沉积的海相碳酸盐沉积物所覆盖。由于陆相沉积物一般并未石化, 海侵可能广泛地将其再造和转移, 经常的结果是在岩石剖面中出现并列的碳酸盐岩。

在被淹没的岩溶系统中, 其海相碳酸盐岩的特征, 在现代海洋中很少有记录。P.L.Smart、R.J.Palmer、F.Whitaker 和 V.P.Wright 等在他们的文章“水成岩墙和缝隙的充填: 对某些现代范例的考虑和评论”中, 向着记录的方向前进了一步。他们概括了在“水成的”岩墙和缝隙充填中, 其发生、发展和沉积作用中的重要因素。作为一个现代的例子, 他们描述了对巴哈马“兰洞”沉积物的初步研究成果。

对同一区域内, K.A.Rasmussen 和 C.A.Neumann 在他们的文章“更新统古岩溶在全新统中的印迹: 巴哈马的阿巴科湾”中, 描述了最近对浅埋藏岩溶的研究结果。阿巴科湾为一浅碳酸盐岩台地, 最近其具碟形凹陷的基岩面被淹没, 保存了三种不同的全新统/更新统岩溶不整合面的同心带。在台地中心深部位, 岩溶落水洞被泥炭和古土壤所覆盖, 此面保存得最好。在进入中心凹陷的斜坡上, 堆积并保存有薄钙质壳层, 这是因为沉积作用的初期存在有盐质解离的条件, 造成了局限的底栖生物。然而, 在上部宽阔边缘的岩溶面却被生物所强烈侵蚀, 大多数精细的溶蚀刻痕均已被除去。此研究充分证明, 岩溶面在形成以后很快就可能被改造的这种隐蔽的但却是重要的途径, 并且明确指出, 对这种表面需要有更多的研究。