

国外裂隙-岩溶水研究

(上)



地质部情报研究所

一九八一年十二月

前 言

裂隙-岩溶水研究，在现代水文地质领域中，具有相当重要的意义。近年来，国外关于这方面的研究，无论在理论或者实际应用方面，都取得了不少进展。

本专辑内容共包括五个方面：（1）裂隙-岩溶水的水文地质背景；（2）裂隙-岩溶水流的特征；（3）裂隙-岩溶水的地球化学原理及同位素研究；（4）裂隙岩层的地下水动力学；（5）裂隙-岩溶水资源评价及合理开发。

为了便于学术交流，对一些岩溶基本词汇需要统一认识。本专辑根据国际水文地质学会岩溶分会公布的岩溶术语作了汉语编译，同时还附录七种外文解释。

我国是一个多山的国家，裂隙-岩溶水分布比较广泛，它和国民经济发展中日益增长的供水、工程建设和矿山开发等问题有着密切的关系。因此，选择了近年来部分有代表性的文献编译成册，供从事水文地质、环境地质、工程地质、给水排水、水利工程以及地理工作者们参考。

由于时间仓促，水平有限，缺点、错误在所难免，敬希指正。

编 者

1981年12月

目 录

1. 国外基岩裂隙水的研究动向	(1)
2. 岩溶区水文地质学和水文学	(6)
3. 岩溶和地质构造对碳酸盐含水层中水的循环和渗透性的影响	(20)
4. 岩溶区的地理分布	(33)
5. 工程洞穴学的基本任务	(35)
6. 岩溶区地下水流动态	(43)
7. 裂隙岩石水文学的评价方法	(56)
8. 岩溶水动态预报的前景	(64)
9. 深部岩溶中的水动态	(68)
10. 岩溶汇水区迳流预测模型	(79)
11. 环境同位素用于水文地质的原理	(90)
12. 肯塔基中部岩溶地下水渗流的同位素研究	(102)
13. 地球化学原理、同位素方法以及人工示踪剂在岩溶水文学上的应用	(108)
14. 碳酸盐含水层系演变的主要地球化学作用	(127)
15. 区域性碳酸盐类含水层系的水文地质研究	(144)
16. 层状沉积岩地下水的化学演变	(156)
17. 确定层流对洞穴发育过程影响的方法	(158)
18. 地下水的放射性——预测岩溶发育程度的标志	(163)
19. 裂隙多孔介质中的水流	(164)
20. 裂隙岩层的贮水性质	(177)
21. 在非承压裂隙含水层中流向单井的水流	(182)
22. 裂隙岩层中地下水流的流体动力学	(195)
23. 非均质含水层中井的水力学	(208)
24. 土壤和裂隙岩石中水流的基础理论	(241)
25. 合理开发岩溶水的当前问题	(258)
26. 裂隙-岩溶含水层地下水开采储量评价方法的特点	(269)
27. 裂隙-岩溶含水层中进行试验抽水及其整理方法的特点	(290)
28. 裂隙及岩溶-裂隙地下水源地开采储量的勘探和评价实例	(312)
29. 裂隙岩层中地下水开采储量的评价	(371)
30. 裂隙交点对水流的影响效应	(373)
31. 洞穴滴水强度遥控观测装置	(375)
32. 岩溶术语汇编	(379)

国外基岩裂隙水的研究动向

从世界范围而言,赋存于基岩裂隙中的地下水分布十分广泛,尤其以碳酸盐岩和玄武岩较为突出。在苏联,1260个城市中有768个城市利用基岩裂隙水和裂隙-岩溶水来解决供水问题。在加拿大科迪耶拉地区,岩溶面积约为17500平方公里,其中蕴藏的地下水资源,据估算可达 $70\text{米}^3/\text{秒}$ 。美国的夏威夷州,在玄武岩中大量开发地下水,仅檀香山管区在1968年已达到 $2\text{米}^3/\text{秒}$ 。此外,如美国的佛罗里达州、南斯拉夫的第纳里克山区、意大利的亚平宁山区、西德北部地区、法国中部高原和马赛以及土耳其北部地区等,都在大量开发裂隙-岩溶水,并且给这些地区的经济发展带来了很大的效益。

裂隙岩层地下水的研究,不仅对于供水问题,而且在工程勘察及矿山开发方面,都有着十分重要的意义。近年来,国外基岩裂隙水的理论研究及其应用,皆已取得不少新的进展,以下特分五个方面介绍:

一、裂隙岩层地区的水文地质背景

在裂隙岩层地区,地下水的赋存受地质构造、地形、地层层位、水文地质史以及其他因素的影响。其中,地质构造是导致裂隙岩层地下水循环的主要因素之一,但不是直接和唯一的因素。虽然裂隙岩层中地下水的渗透能力和裂隙、空隙及洞穴的发育有关,但是水流的渗透率是由以下诸因素确定的。

(1) 岩石的可溶性。碳酸盐岩石的主要矿物成分为方解石和白云石,它们比广泛分布的岩浆岩和变质成因的硅酸盐矿物要容易溶解。而石膏和硬石膏又比碳酸盐矿物容易溶解,但比起石盐和钾盐来溶解度要小得多。

(2) 碳酸的存在。方解石和白云石几乎不溶于水,只有含碳酸的水流才对矿物表面具有侵蚀作用。同样,硅酸盐矿物的溶解需要消耗氢离子,而在土壤带中氢的主要来源仍然为碳酸。在地下水位以下,由于 CO_2 得不到补充, H^+ 或者 CO_2 的消耗都造成 H_2CO_3 减少,以致 CO_2 分压力减小。

(3) 气候温暖和雨量充沛。一年四季的降水能使土壤覆盖层保持一定的湿度,并且地面植被得到发育。在有机物质的氧化作用下,产生大量的 CO_2 ,使入渗地下的水有可能在土壤带得到大量的碳酸。因此,地下水在地下运动伴随着对岩石矿物的溶解,同时水循环也变得积极起来。

(4) 岩石的裂隙和孔隙。由于岩石都不同程度经历了固结作用,在粒间孔隙缩小的同时形成(原生的)节理或裂隙。所以,岩层的渗透性能是在地下水循环及其对(原生)节理或裂隙表面的溶解或扩大条件下造成的。

(5) 裂隙岩层的地形和构造背景。岩石的溶解作用需要有一定的地质环境和构造条

件，它要求岩层靠近或位于地表，使其处在地下水积极活动带内。这样才能补给充分，排泄通畅。当然，排泄基准面，象沿海地区的海平面、内陆地区的大江大河，都和相应的构造运动有关。当裂隙岩层因受褶皱或断裂的影响，使地下水流产生停滞时，水循环和溶解作用同样也受到限制。

(6) 土壤盖层。因为土壤带是制造碳酸的主要场所，所以没有土壤覆盖的地层，入渗水的侵蚀能力比较低。就灰岩而论，往往在岩石表面形成一层硬皮以抵抗水的侵蚀。

根据大量的研究资料，认为地质构造是了解裂隙-岩溶发育必不可少的条件，但是裂隙地下水的赋存和地质构造的型式之间并不存在一种简单的依赖关系。同样，在评价诸如向斜、背斜、单斜、断层和褶皱这些构造与地下水的关系时，仍然无法作出恰如其分的归类。譬如，拿断层来说，它可以把含水层错开，阻止地下水的侧向运动，有时也可起水的通道作用，把地下水汇聚一起沿断层走向流动。

二、裂隙岩层中地下水流特征

裂隙岩层和孔隙介质的区别，在于前者是非均质物质，系成岩作用以后持续地质作用和水流作用的结果。所以，裂隙岩层中水的活动场所主要位于节理和裂隙之中，描述的要点包括：(1) 裂隙的分布密度和均匀程度；(2) 裂隙发育随深度的变化；(3) 裂隙受溶解作用而达到的扩张程度。

从水文学观点看来，裂隙岩石和孔隙介质有所不同，前者的特征为：(1) 由于地层的褶皱和断层造成局部的露头区接受地下水补给。另外，由于各种岩层具有不同的裂隙分布特征，所以某些水文边界和岩层边界有关；(2) 裂隙岩层的储水能力相对要小些，虽然某些岩溶化碳酸盐岩具有较大的洞穴，但多位于潜水面以上部位，只是在洪水期才充水；(3) 对裂隙岩层的导水性还不可能作出简单而明确的描述；(4) 当裂隙岩层的上面覆盖松散沉积物时，形成所谓的二元结构，这在评价水资源时应予注意；(5) 裂隙岩层在裂隙不发育的地段，潜水位不是连续的，许多地方呈现阶梯状。

从水动力学观点看来，裂隙岩层通常自上而下可以分为四带：(1) 非饱和带，又称上部带；(2) 水位上下波动带，又称过渡带；(3) 地下水积极活动的饱和带；(4) 地下水缓慢活动的深部带，即下部带。在过渡带，地下水流的方向随时间周期性地由垂向流变为水平流。岩石溶解作用或岩溶发育最强烈的带应该位于第3带。

目前，处理裂隙岩层地下水流有两种趋向：(1) 裂隙岩层被认为是一种具有连续介质性质的统一体，所以裂隙和溶洞的大小和位置的差别均不予考虑；(2) 裂隙岩层被认为是一种按几何规律分布的裂隙系统，彼此分离，所以裂隙大小、形状和位置都在考虑之列。

因此，裂隙岩层的近代渗流理论正沿着这两条相应的途径发展。

三、裂隙岩层的水文地球化学和同位素研究

在天然条件下，地下水在地层中渗透，始终和岩石矿物相接触，就此产生水和矿物之间的化学反应。地下水化学成分的变化是一种自发的或不可逆的化学反应，严格地受水文地质

和水文化学条件所控制。

裂隙岩层的矿物组成大体可分三类：一类是结晶岩，包括岩浆岩和变质岩。由于石英的溶解度很低，因此，主要是铝硅酸盐矿物在起作用，其中以长石类和云母类矿物的分布对地下水影响最大。另一类是碳酸盐岩，包括灰岩和白云岩。由于地质上的成因关系，有这类岩系时常伴随出现石膏层或石盐层，自成一套系统。余下其他岩层，如冰川沉积层、层状沉积岩层以及其他碎屑堆积，因其物质来源和母岩及沉积环境有关，但又不外乎以上两类，所以介于上述两类之间，称为过渡类型。

从地下水运动路径看来，水的流动受水文条件、地层分布和地质构造等因素的影响。根据物理化学和化学热力学理论，水和岩石矿物间的相互作用还受下述化学定理的约束，它们包括质量守恒、能量守恒、质量作用定律、吉布斯相律、扩散迁移、氧化还原反应、化学计量反应与非化学计量反应以及固溶体现象等。

所以，地下水化学类型在空间上的分布以及随时间的演化趋势，实际上是上述各种条件限制下的化学反应结果。反之，根据地下水化学成分的变化，可以结合地质条件来推断所处的人文地质环境。在五十年代，曾流行过苏联切包达耶夫的水化学分带学说。切氏根据上万个水样分析，认为所有地下水都有向着海水成分的发展趋势。但从近代水文地球化学理论来看，这种分带仅仅是一种经验，并非原理，因为例外情况屡见不鲜。

环境同位素是天然环境中客观存在的同位素，人类对其浓度的分布和变化是无法控制的。目前，在裂隙水研究中用得比较成熟的同位素有稳定同位素氘和氧-18以及放射性同位素氚和碳-14。自然界的环境同位素，随空间和时间有一定的分布规律和变化规律。六十年代初期，国际原子能委员会在世界气象组织协助下，开始对全球降水的同位素浓度进行了系统的长期观测，从而摸清了雨水中同位素的分布和变化规律。由于氘、氧-18和氚都是以水分子的形式存在，地下水化学成分的变化对其影响不大，实为前者是溶剂，后者是溶质之故。而地下水主要由降水补给，所以同位素成分也就成了一种良好的示踪剂。

在理想条件下，环境同位素对地下水可以提供以下信息：（1）任意空间位置上地下水的相对年龄；（2）地下水的平均流速和流向；（3）水在地下水系统中的平均存留时间；（4）渗流场的平均渗透系数；（5）含水层各向异性的分布状况；（6）地下水系统中某点的地下水年龄；（7）补给要素的空间和时间分布；（8）地下水系统的规模；（9）地下水质的均匀程度或混合程度。

环境同位素不仅是理想的示踪剂，还可以通过同位素的质量平衡来评价水资源的数量，目前已经提出了许多种数学模型，其中以活塞模型和混合水库模型的应用较为广泛。

另有其他一些同位素，如硅-32、铀- 234 /铀- 238 ，氮和硫的应用，近年来也有所发展。然而，还需在实际工作中摸索一段时间，始能臻至完善。至于人工投放的示踪剂，一般只适用于小规模的工程建设和局部地段，不宜用于区域地下水流的研究。

近代裂隙岩层中水文地球化学和同位素研究，总的看来解决了以下三方面的问题：（1）地下水化学类型在不同地理位置和不同岩层地区的分布状况；（2）鉴别出水溶液化学的控制性反应和反应速度；（3）了解地下水系统的物理性质，包括地下水补给来源、补给面积和运动速度，等等。

四、裂隙岩层的地下水动力学

根据克内贝尔等人(1956)的资料,世界上有236个主要的生产油田提供了石油总储量的82.5%,而其中41%赋存在裂隙岩层中。有些储层进行了流体流动状态的分析研究,包括得克萨斯西部的斯普拉贝里油田、伊朗西南的马斯吉德·苏莱曼和哈夫特·克尔油田、委内瑞拉马拉开波区的拉帕斯和马拉油田、西西伯利亚低地油田、苏联奥伦堡气田以及斯涅别林斯基气田。研究结果表明,原生致密基岩中的流体流动渗透率一般较低,介于0.001到0.5毫达西(1达西=1000毫达西=0.85米/天)之间,裂隙的渗透率则在几个毫达西到几个达西之间,原生岩石的粒间孔隙率在2到27%之间,而裂隙所占的孔隙率尚不到1%,一般在0.1—0.4%。所以把一个裂隙岩体看作两个截然不同的部分:致密的原生岩块和相互连接的裂隙,它们具有各自的孔隙度和渗透率。裂隙岩石的传导性质几乎完全和裂隙的存在有关,而传导流体的储存空间则与原生岩块的粒间孔隙度有关,裂隙控制了岩体中流体的压力分布和流体的流动状态,而岩块的孔隙度则控制了流体的储存性质。

1960年巴伦布拉特等人对裂隙岩石中流体的动力学进行了研究。他们把岩石孔隙和裂隙重叠一起作为连续介质来考虑,这与过去的传统渗流理论是不大相同的。在空间每一个点上都存在两个流体压力,分别代表该点附近孔隙和裂隙中流体的平均压力。这样,裂隙带的输水是在裂隙中不同点的流体压力差作用下进行的,而储量的变化(水交换)是在岩块孔隙和相应位置裂隙的流体压力差作用下进行的,就此构成一个完整的渗流场。

为了便于研究,把上述裂隙和岩块的特性都存在的情况称作裂隙-孔隙岩层或“双重孔隙度”介质,而把另一种特殊情况,即岩块孔隙近似为零的情况称作纯裂隙岩层。在此基础上发展了“双重孔隙度”介质中的可压缩流体的渗流运动,包括承压水流和非承压水流。博尔顿和斯特雷索瓦近期又对由规则的水平岩块和裂隙组成的裂隙岩层中的渗流理论提出了新的见解。

在岩溶区,经常见到广泛发育的地下溶洞和暗河。在许多情况下,由于这种空隙的渗透能力特别强,因此在分析水流运动时,对通过孔隙较小物质的渗透也就忽略不计,而把重点放在研究空隙中的水流运动。因此,水力学家们把局部的不成系统的空隙往往看作在自由水面或压力作用下的一个输水管道系统,并且用常见的圆状管道系统来模拟野外的裂隙通道,从而展开水动力学的研究。这方面的研究内容,包括管道弯曲形状及内壁粗糙度等因素的变化对管内紊流或层流运动的影响。

纵观当前裂隙岩层水动力学的研究,尚局限于局部地段的水文地质参数确定。由于裂隙岩层的不均质性以及断层、充填物质和构造型式等因素造成的复杂边界条件,使得许多野外试验数据的解释往往出现很多困难,究其原因实系问题的多解性所致。

五、裂隙水资源评价及合理开发

近年来,在裂隙岩层地下水研究的基础上,根据地下水的勘查工作和具体的供水工程,积累了大量宝贵的经验。这些经验都是在经济上支付很大的代价才换得的,所以它对水文

地质工作者说来是很有参考价值的。这方面的经验有：

(1) 提出最大限度开发岩溶含水层的原理和方法，并强调采用地下工程的控制系统来进行合理开发和调节水流的动态；

(2) 提出正确解释水源地的地质-水文地质环境是评价地下水开采储量的最初和必要阶段。在此基础上，合理地选择地下水开采储量的计算图式和方法，包括水动力学法、水力学法、水平衡法以及水文地质比拟法；

(3) 总结了抽水试验中“双重孔隙度”介质效应的分析、抽水试验过程中附加补给的判别和数据处理以及边界对水位变化过程线的影响，特别对定水头边界，提出了使用“补充层”法；

(4) 讨论了含水层的不均匀性。对剖面上裂隙随深度的变化可以结合分层测定参数来评价。对复杂含水层的不均匀性进行了分类，含水层参数可以通过数理统计方法加以处理和评价。另外，对裂隙-岩溶含水层抽水试验方法的选择进行了探讨，提出了需要注意的事项，包括观测孔布置方法、抽水时间的安排及干扰试验等；

(5) 介绍了在不同水文地质条件下勘探和评价地下水开采储量的方法及其特点。同时，还以实例详细说明复杂条件下水源地的类型及不同方法计算地下水开采储量的原则，包括方法的选择依据、方法介绍及决定储量数值的基本要素分析。

最后，从国外已发表的文献述评来看，“岩溶”一般系指可溶岩（主要是碳酸盐岩石）被水溶解，在地表形成诸如石林、峰丛洼地等，地下发育落水洞、溶井及地下暗河等一些独特的自然形态。从广义上讲，“岩溶”这个术语已包括可溶岩在岩溶化过程中的任何阶段。

岩溶在德语中称“karst”，该词来自印欧语系的“kar”，意思是岩石；又来自斯洛文尼亚语的“kras”，为南斯拉夫碳酸盐岩典型裸露岩溶区使用的术语。“Carsus”来自意大利地名“Carso”。术语“krs”是塞尔维亚·克罗地亚语的“岩石”或“石头”。因此，“karst”（喀斯特）一词几经历史演变，在国际上（如法、英、西、意、俄、南斯拉夫等语）已经成为一个具有特定概念的专门术语。我国“岩溶”一词似乎还不能包括其全部涵义，因此，可以考虑恢复“喀斯特”这一国际上通用的术语。

(王维勇、王瑞久编写)

岩溶区水文地质学和水文学

作者: H.E. 格兰德、P.E. 拉莫里奥克斯

提 要

许多碳酸盐岩石都以在地表具有诸如裸露岩石、溶斗以及地面河川稀少等这类岩溶现象为其特征,在地下则具有洞穴和水面很低等现象。地层倾角平缓的高原岩溶区是一种与有些地区已经大幅度上升过的、构造复杂的岩溶区截然不同的类型。本章描述岩溶区渗透性的发展以及水位和河水流量的特性,并对岩溶区的水文学原理作了评述。

前 言

许多研究人员在岩溶地区的工作已增进了对岩溶地区水文学的总的认识。似乎可以说,岩溶地区比其他地区往往具有更特殊的水文特性。例如,大股的泉或涌泉,降水量很大的地区内的局部缺水,地表河流的消失和复现,以及地下水在大空隙中的渠道化作用等,这些都是下面有碳酸盐岩石的地区所常见的现象。所有这些岩溶特征以及其他特征,都在近几年内研究到了一定深度,使首先对岩溶区的许多神秘性已不复存在。然而还需要继续工作,以取得关于岩溶区水文学的许多方面的共同了解,并解决与岩溶区水文学有关的问题。

考虑到本报告的目的,对岩溶区水文地质学的许多重要方面都只能简略地谈谈。例如,岩溶地区中存在着许多的地质背景和许多不同的水文条件。希望将来能对岩溶区水文地质背景着手进行系统分类,以便可以做出比较系统的分析。

首先要考虑的也许是岩溶区的动态的性质,不仅岩溶区的水文是动态的,而且岩溶区的地质也是动态的。水的循环和岩石的溶解之间的协调关系——循环越快,溶解越强——是一种导致一系列地质变化的趋势,诸如地下水位的逐渐降低,洞穴的逐渐扩大以及岩溶区地形随时间的变化等。这种动态变化在恢复地质史及水文史方面有重要作用。

本报告包括岩溶地区水文学的一些原理,这些原理可以帮助将一般情况与岩溶地区特殊背景和条件联系起来。这些原理和归纳是许多国家的许多研究者研究出来的,但是还没有得到应有的充分运用。重要原理的继续发展和提高是将来的目标。

1. 构造背景和岩溶现象的发育

碳酸盐岩石地区内地质构造对岩溶现象的发育以及对水的运动的重要性是很少被忽视的。实际上,对岩溶现象和碳酸盐岩石水文学的描述大多数都提供了关于所描述地区构造

背景方面的一些有意义的资料。然而，复查一下这些描述性的报告并不能发现这样一种简单的依赖关系，例如背斜、向斜和单斜等就会具有各自不同的岩溶特征和水文特征。构造与岩溶现象缺乏对应关系的情况说明：碳酸盐岩石中岩溶现象的发育以及地下水的出现和运动的情况是受地质构造、地形、气候、地层层位、水文地质史以及其他因素的互相关联的影响。

使岩溶作用发育并使溶蚀作用进展而形成洞穴，就必须具备：（1）有富含二氧化碳的水可以补给本系统，（2）有足够的渗透性（或许呈裂隙），以便水在岩石中运动，（3）水要能从本系统中排出。显然，在大多数碳酸盐岩石沉积所在的咸水环境和掩埋的海水环境中，并不具备岩溶化作用及溶蚀作用的条件。因此，构造条件或区域构造条件是造成碳酸盐岩石从沉积环境移动到岩溶化环境中的主要原因。在下面一章里，M. 科马蒂纳将着重讨论许多岩溶地区——例如阿尔卑斯——的地壳运动历史，并说明这些复杂构造对岩溶发育的关系。导致岩溶化作用的构造涉及到隆起，下面就谈一谈隆起的三种类型及实例：

（1）由海平面下降或轻微构造活动造成的略微升高的平原：有些碳酸盐岩石自从沉积以来已略微升高到海平面上，它们上面很少有或没有沉积物可以被侵蚀剥离，现在是离海很近的碳酸盐单斜平原的露出部分。例如，澳大利亚南部的纳拉巴尔平原和墨西哥的尤卡坦半岛北部。俄罗斯中部的高原及地台上的许多岩溶区都属于这一类。

（2）大隆起区：许多裸露的碳酸盐岩石大大高出海面，它们的位置是由于构造活动造成的。构造的变化范围是从简单的单斜区，如在波多黎各，到复杂的褶皱断层区，如在阿尔卑斯和地中海附近的一些地区。

（3）碎屑覆盖层的拱起和侵蚀区：许多碳酸盐岩石出露在构造穹拱和背斜的地表上，那里的上覆碎屑岩已被侵蚀掉。碳酸盐岩石从岩溶化很普遍的这些穹拱向外并向下倾斜到其他岩石下面。例子有密苏里州的欧扎克区和肯塔基州的岩溶区，两处都在美国。

评价构造在各种类型地区的重要性的一种好方法就是，联系上层遗留的水文系统来观察地质结构。水文系统对一个具体的构造背景是活跃的和重要的吗？如果下列各组条件之一适用的话，回答就可能是否定的：（1）补给条件不好，（2）排泄条件不好，（3）本系统中的渗透条件不好，（4）本系统中的水头落差不大。

水文系统活跃的例子可举阿尔卑斯山和邻近的欧洲部分受构造扰动过的碳酸盐岩石，那里出现过超出早期海下沉积环境之上的大隆起，并且那里还出现过河流的强烈下切，如法国南部的凡尔登峡谷；在这些条件下，河谷中就存在着优越的排泄机会，地下水流大概也具有很大的水头落差。相反，美国的大量碳酸盐岩石都位于河面以下，而且这些地区当中有许多地区地势都很低，至少用阿尔卑斯的标准来看是如此；在这些条件下，水流不能从地面迅速排泄，结果，水的循环受到了限制，岩溶化作用也受到了限制。

在潜水面的条件下，渗透性最强的带一般在循环和溶蚀强烈的带内发育形成，这一带通常恰好就在潜水面下面。地形和碳酸盐在地下位置是重要的；容许至少有中等循环条件，并且受常年河流所切割的碳酸盐岩石往往易于发育形成溶蚀空洞而增强循环。假设有好的排泄系统，并且假设水有化学侵蚀性，那么，有些水的循环和有些溶蚀就可能出现在一个区域的主河面以下几百米深处；可是，在深度很大处，这种条件不如不良循环和有限溶蚀的条件常见。构造地质情况是非常重要的，但不是在于作为独立的实体，而是在于就地形和补给-

排泄条件而论。

在地势起伏大的碳酸盐岩石区域，如在阿尔卑斯山的某些部分，潜水面的界限不很明确，饱和带可能低于山顶几百米。

在复杂的构造背景中，当碳酸盐岩体很薄并被别种岩石一段段间隔开时，其水文情况常常同周围岩石的相似。在这些条件下，(a) 排泄，(b) 通过岩石的运动，或 (c) 补给的某些情况，大概要受到很大限制，以致使碳酸盐岩石并不作为单独的水文连续体在起作用。这种里面水循环太微弱使岩溶发育受到限制的小隔段，应当与那种碳酸盐岩石的宽度在潜水循环系统中可以有好多英里的大隔段区分开。在碳酸盐以大隔段形式出现的地方，如在高原岩溶区，岩溶水文的许多特征都可能显现出来；这种水文情况将大大受到局部岩溶特征的影响，还将间接受到相邻岩石的水文特征和地形特征的影响。

假如在这个地区露出的部分里岩溶化作用不受限制的话，则有溶洞的岩石就可能终于被侵蚀作用所破坏，而埋藏的碳酸盐岩石部分则将不受岩溶化作用和水迅速循环的影响。暴露于大气的条件相同，并不能产生相同的岩溶化作用。除非有一种或几种有利于岩溶作用的因素受到了局部限制，否则，在河流长期暴露的地区或其他排泄带里，渗透性和岩溶化作用的发育就将比在近期暴露的地区里更强。

区域构造对渗透性和岩溶化作用发育的控制一般是可以预测的，相比之下，有些局部的构造控制作用则是隐蔽的、不清楚的。关于裂隙在已固结的岩石中的分布已经了解得很多，这些裂隙在大多数情况下，就代表可能发育成为大的溶蚀空洞的初期渗透性。线条状和其他地面表现提供出关于岩石中裂隙面一般产状的线索。但是，我们的知识还没有进步到对每个裂隙和每个溶蚀空隙的确切位置都已了解的地步。

对岩溶地区水文学的了解，第一步要依靠对地质构造和环境的各个方面的考虑。下列各项应当列入考虑范围：

构造特征

1. 近似水平的岩层
2. 升高的沿海平原或高原
3. 有约略平行的山梁的沿海平原—单面山
4. 破裂穹窿
5. 倾斜中等到陡峭的岩层
6. 背斜
7. 向斜或构造盆地
8. 复杂的：有断层和褶皱的
9. 其他
10. 无盖层
- 盖层透水
11. 薄的
12. 厚的
- 盖层相对不透水
13. 薄的

14. 厚的

岩溶岩石的厚度

15. 0—5 米

16. 5—15 米

17. 15—110 米

18. 大于 100 米

岩石的性质

19. 块状的, 纯的

20. 块状的, 不纯的

21. 薄层的, 纯的

22. 薄层的, 不纯的

岩石的渗透性

23. 原生的

24. 次生的 (节理、裂隙、溶蚀通道)

构造对水流的影响

25. 阻碍

26. 加强

27. 使大大改变方向

28. 相对是不重要的

29. 不明

大多数岩溶工作者现在认识到, 关于构造背景的描述, 对于了解岩溶的发育是必不可少的。这一点从一本关于北半球重要岩溶区的书里, 在对各国岩溶区的描述中对构造给予的注意上就显示出来了。

2. 碳酸盐岩石中渗透性的发展

关于碳酸盐含水层能够被“发展”的这个思想需加以考虑, 因为引起渗透性和发展阶段变化的因素可以对评价这类含水层的特性提供线索。

洞穴空隙形成的方式已由许多人研究过了。洞穴和其他大空隙的存在取决于下列因素, 其中所有这些因素必然全都有利于碳酸盐岩石通过溶解作用发展其渗透性:

1. 可溶性岩石——方解石 (CaCO_3) 和白云石 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 代表碳酸盐岩石的大部分, 它们比分布广泛的、火成的和变质成因的硅酸盐矿物更易于溶解在天然水中。

2. 有碳酸存在——方解石和白云石几乎不溶于纯水中, 但是, 在含有碳酸的水沿着矿物表面流动的地方, 这些矿物就受到了化学侵蚀。二氧化碳和水的这种结合就同方解石起反应而形成重碳酸钙, 这是一种可在溶液中被移去的可溶物质。土壤带有助于使水中增多游离的二氧化碳, 因而有助于增强溶解作用。

3. 降水量——一年四季经常降雨以保有土壤覆盖层和植被的潮湿地区, 乃是碳酸盐岩石被溶解的理想环境。在降水量很低的地方, 地下水循环的机会或者说溶解的机会以及溶解物

质被移去的机会是很少的。

4. 碳酸盐岩石中的空隙——许多地区可透水的碳酸盐岩石都显示经历过一套固结作用、失去其间隙的孔隙度以及随后形成节理或裂隙的历史。渗透性的大部分是通过地下水的循环作用并通过溶解作用使节理扩大而发展成的。甚至很小的节理也能被显著地扩大，只要水能通过其中流动。节理的分布就是未来的渗透性能够发展达到的那种程度的一个因素。

5. 碳酸盐岩石的地形的和构造的背景——溶解作用所必需的地质环境和构造条件，造成碳酸盐岩石位置靠近地表因而处在循环系统中，使水能向这种岩石补给并从中通畅地排出。使水不能从中通畅排出的埋得太深的碳酸盐岩石不能发展成大的空隙。呈条带状夹在其他岩石之间的受褶皱和断层影响的碳酸盐岩石，往往使其中水的循环和溶解作用受到限制。很少碳酸盐岩石是全部处于良好循环系统中的，因此，在每个地区中，由溶蚀作用而发展成的渗透性都存在着很大的空间差异。

6. 土壤盖层——没有土壤盖层的碳酸盐岩石比有土壤盖层的碳酸盐岩石往往更能抵抗物理的和化学的侵蚀作用。

了解水流型式的变化对于了解碳酸盐岩石渗透性的发展是必不可少的。碳酸盐岩石中水流的调节已由 R. F. 罗兹和 M. N. 西纳科里(1941, p.794) 以及 A.C. 斯温纳顿(1949, p.665) 精辟地描述过了。他们和其他许多人一样指出，良好的水循环以及伴随的溶蚀作用往往在饱和带顶部附近发展成良好的渗透性；这种良好的渗透性转过来又会减缓潜水面的梯度，并在未饱和带中造成相对高的渗透性。在泉水附近，在出现水流集中的地方，溶蚀通道就会被加宽。溶蚀通道向上游方向逐渐发展。因此，较大的空隙只要处在地下水循环系统中（低于地下水面），往往就会逐步兼并较小的空隙而扩大。直到出现夺水现象前，泉水的流量可能增大。夺水现象主要是在地下，它是在地下通途发展成形成并且在比先所利用的位置更低的位置被利用的时候和地方出现的。地下通途总是趋向于更低的排泄点，即趋向于最陡的总体梯度。当大空隙的规模增大时，渗透性在空间的分布就变得不成比例了。

岩溶水的动态特征是明显的，但对地形的以及岩溶地区本身的不够明显的动态变化方面却一般都没有评价。溶斗及溶洼地的发展可能说明整个岩溶区地形会被降低到老年型平原；在一定条件下，有这种类型的背景出现；但在许多情况下，岩溶基准面（在滨海区即海平面，在内陆区即大河面），将随着溶斗的发展而一同降低。除高地地形下降以外，由于渗透性的增加（溶蚀空隙的扩大），以及排泄点的下降接近基准面，潜水面也下降了。因此，在许多情况下，在（1）河水面，（2）潜水面，（3）地面等三方面的下降当中，存在准动力的平衡状态。其结果可能是，含水层的上部逐渐转移到非饱和带，而下面则有差不多相等的一部分碳酸盐岩石被溶蚀掉，并转变成为含水层状态。

出现在饱和带中的动力变化并不是孤立的，而是同未饱和带中的洞穴发育以及地表上某些形式的地面沉降有关系。这些变化当然是由于岩溶化作用，也就是在碳酸盐岩石暴露于循环的地表水和地下水的地方起作用的各种过程引起的。岩溶地形的发展阶段对这个讨论是有意义的，因为这些阶段反映下面含水层中渗透性已经发展达到的程度。某些在一定意义上与岩溶发展阶段有关的、可看到并可辨明的岩溶特征也同渗透性和其他水文条件有关。壮年期岩溶地形一般是分布广泛的。对岩溶地形演化的了解，将导致进一步地了解碳酸盐岩石含水层中渗透性的发展情况和分布情况。

由岩石的溶解造成的岩溶现象可分为以下两类：（1）延伸到地表以下不超过几米的表面现象；（2）影响地面以下岩石的渗透性和水的循环的岩溶现象，比如象溶斗、溶蚀竖井以及地下的溶洞。可溶性岩石中大多数天然的水平洞穴通道都是在不同的水平面上形成的，如果饱和带（潜水带）中的水在这些水平面上循环的话。当潜水面随着基准面的下降而倾斜时，洞穴就被暴露在包气带（渗流带或未饱和带）中，并且受到这个带中水的循环所改造。渗流带中洞穴的这些变化使得一些调查者认为，由岩石中溶解而成的洞穴是在潜水面以上产生的。饱和带以上水的循环也使得一些调查者相信，碳酸盐岩含水层中并没有饱和带，也没有潜水面。

溶斗、溶蚀竖井以及有关的现象一般主要都是在包气带中由溶解和侵蚀形成的。控制渗透性发展的一个重要因素就是当碳酸盐岩石暴露在雨水中时岩石表面的条件。盖有一层土壤或其他渗透性较强而可溶性较弱的覆盖层的碳酸盐岩石的表面比裸露的灰岩更有利于溶斗的发展。进入透水性覆盖层的水，向下往下伏的碳酸盐岩石渗漏，而不是在岩石表面上流走。而且，当水穿过土壤层向下再穿过碎屑覆盖层往下伏的碳酸盐岩石渗漏时，水的侵蚀性也变得更强烈了。当覆盖在碳酸盐岩石上面的溶解性较差的岩石中包含有抗侵蚀的层组——比如象肯塔基州的波次维耳组或赛普列斯砂岩——时，就会有一条或几条溶蚀陡崖形成。陡崖因溶蚀和侵蚀而后退，遗留下一个溶斗平原。溶蚀陡崖和造成的溶斗平原出现在河流将水平的或略微倾斜的碳酸盐岩石揭露出来的地区，就象在美国佐治亚州的东南部，在德国的蒙斯特兰德盆地以及法国的巴黎盆地那样。溶蚀陡崖也出现在层序很厚的碳酸盐岩石与较难溶的岩层形成互层并且地质构造上是暴露于侵蚀作用之下的地区，就象在佛罗里达州的一个大型构造穹拱——奥卡拉隆起上的情况一样。在覆盖碳酸盐岩石的可溶性差些的岩层是未固结的并且是有渗透性的地方，一旦地表河流切穿覆盖层，将碳酸盐岩石暴露出来，并成为渗漏到石灰岩里去的水的出口时，岩溶作用就开始了。随着岩溶作用的进展，许多地表河流都可能潜入地下，这是欧洲大部分高原岩溶地区中常见的现象。

在碳酸盐岩石是近于水平的或缓倾斜的，并有渗透性较好而可溶性较差的覆盖层——例如：波多黎各的“被盖砂”——的地方，当河流切穿覆盖层，并成为由于水从地表经过覆盖层向下流入碳酸盐岩石而在灰岩中发展成的循环系统的排泄区时，岩溶现象就可能在整个地区开始形成。当循环系统已有足够的溶蚀作用可在饱和带的上部形成侧向溶蚀通道后，溶斗就将在整个地区发展起来。另一方面，在碳酸盐岩石是被一层象砂岩之类的耐侵蚀的岩层所覆盖的地方，溶斗首先沿着切穿灰岩上面的覆盖层的河流形成。这便是当可溶性差些的覆盖层中的水向下流入灰岩时，形成溶蚀陡崖的循环系统的开端。当溶蚀陡崖后退时，溶斗和垂直的溶蚀竖井便沿着溶蚀陡崖发展起来。最年青的溶斗一般都是沿着溶蚀陡崖分布的，距溶蚀陡崖越远，溶斗的年龄也越老。溶斗平原上不但留有溶斗和溶蚀竖井，而且还留有溶蚀残余物、园丘或溶斗之间的小山（图1）

除了在自然条件下形成的溶斗外，有些被未固结的沉积物所充填的老溶斗可能重新张开，而有些新溶斗还可能由于从灰岩中排水或抽水使其中地下水水位下降而产生。地表的洼地可能表示那里是有老溶斗的地方，如佛罗里达州湖区里的某些部分的情况。然而，在有些地区，地表覆盖物下面的老溶斗或洞穴并没有什么迹象；例如，在河谷或冲积平原中，具有老溶斗或其他溶洞的岩溶面可能已被冲积物覆盖起来了。

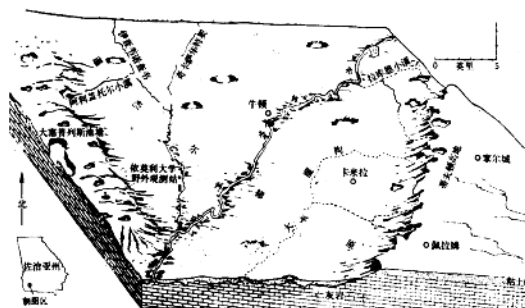


图 1 佐治亚州贝克和米切尔县的弗林特河谷的立体素描图。
落夫顿高地下面的粘土属于霍索恩组，而道夫梯平原下面的
粘土代表霍索恩组的下塌块以及原来的灰岩层的不溶性残积物

在那些因有地下水排泄进去的常流河的下切作用而使基准面向下变动的地区，还没有被地表物质所阻塞的溶斗及溶蚀竖井可能对饱和带以上的侧向溶蚀通道是敞开的。然而，在有其他变化引起饱和带上升的地方，则灰岩中的潜水面就可能上升到或超过在包气带中形成的溶斗的底。在基准面有大幅度上升的地方，例如在更新世时期的沿海地区，在更新世海面位置低的时期内延伸到现在海面以下许多英尺的溶斗和溶蚀竖井，此刻都被淹没在现今的饱和带里面了。

在某些循环系统中，比如佛罗里达州和佐治亚州东南部第三纪的主要自流含水层，基准面的上升已引起饱和带大为上升，因而使含水层以往在更新世海面位置低的期间在潜水面条件下的那一部分，在现今的基准面条件下，此刻成了自流含水层。在有些地区，如佛罗里达州中部，向自流条件的改变已引起水大大上升而通过溶斗流出，并形成泉水，包括那些大的石灰岩泉，比如，“银泉”以及远离海岸的海底泉。溶斗、溶蚀竖井及其他垂直的空隙增加了碳酸盐岩石在垂直方向上的水力渗透性，而侧向的溶蚀通道和其他空隙则增加了水平方向上的水力渗透性。水的一些深部运动可能出现在现今的循环系统已在里面使古岩溶渗透带中的运动重新开始的含水层中。

岩溶地区中补给区与排泄区的关系在很大程度上决定着侧向溶蚀通道或空隙的类型。这些通道的大小和多少将取决于许多因素，其中有：（1）补给区的条件；（2）进入补给区的水量；（3）岩溶岩石的溶解度；（4）当常流河使排泄区降低时，基准面下降的速度。在常流河切穿碳酸盐岩石进入下面的不透水层的地方，这个不透水层就成了那个循环系统的局部基准面。

在排泄区是大致沿着一条直线分布的地方，比如象海岸线或河谷，侧向的溶蚀通道就往往是大致互相成平行的，并且与排泄线成直角。然而，在排泄区并不形成大体上是直线的地方，溶蚀通道就可能具有某些其他的型式，如可以由洞穴中的溶蚀通道来说明的情况。补给区和排泄区之间水的运动方向不仅受节理的影响，而且还受其他地质构造的影响。不论在水平的还是在褶皱的碳酸盐岩石里，洞穴通道都可能在一个以上的水平面上出现。在构造控制是沿着一组垂直节理的地方，如果补给区与排泄区的关系在不同的水平面上是相同的话，不同的水平面在通道型式上就将互相吻合。

在岩溶系统暴露于大海的沿海地区内，如在地中海区，海平面就是岩溶地下水排泄入海的控制因素，并且是基准面。在一定的海面条件下，水从岩溶岩石中排泄的最大深度取决于淡水水头和咸水水头的关系，是由岩溶系统暴露于海水的深度来确定的。更新世期间海面的波动引起淡水循环带中相应的位移。在海面位置较低的时期，循环和溶蚀作用在略低于现今海面的带中是强烈的。因此，在许多沿海地区，都有大的岩溶空隙延伸到现今的海面以下。在接近现今海面的带中，总体渗透性是高的这个事实，导致许多海岸岩溶地区的潜水面仅仅稍高于海面。淡水带可能很薄，而咸水则可能在海面以下只有几米处就出现了。因此，海平面的最后一次重要的上升，在海岸岩溶地区中造成了水的方面的一些难题。

以上有关渗透性发展的讨论主要适合于中等地形起伏地区及具有中度土壤覆盖量的地区。在地形起伏相当大的岩石裸露型岩溶区，比如在法国、意大利以及南斯拉夫的大部分地区，溶斗和其他塌陷构造就可能比较少见，在这些岩石中，水很快就进入裂隙，并且轻易地就流到下面许多米的在河谷里的排泄地点。渗透性的发展在很大程度上是通过裂隙的扩大实现的。

3. 岩溶地区的潜水面

当碳酸盐岩石是在地表或十分接近地表因而处于地下水的循环系统中时，可以设想有潜水面存在。若岩石几乎不透水时，则潜水面就可能是局部不连续的或者不存在。

水位在空间上和时间上的变化性质对于理解岩溶区水文情况是一个主要的考虑项目。潜水面的位置是重要的，因为：

1. 潜水面一般地决定了循环和溶蚀作用最强的带。
2. 潜水面有助于确定水流的总方向、水力梯度以及补给区和排泄区。
3. 关于潜水面的资料可以导致关于一般渗透程度的资料。
4. 潜水面的位置局部地指出洞穴充气或充水达到的范围。

地形条件同渗透条件的结合以重要的实际方式控制着潜水面的位置。下面的一般论述构成了用于有效综合的基础：在地势差别大同透水的碳酸盐岩石相结合的地方，就出现了在地表以下很深的潜水面，而接近地表或位于地表的潜水面则出现在（1）地势差别不大同相对不透水的碳酸盐岩石相结合的地方，（2）地势差别不大，在岩溶基准面接近地表的地方，如在尤卡坦半岛北部。渗透性有大幅度的局部变化，在碳酸盐岩地区是常见的；这些变化控制着潜水面，有助于地表河流的消失而进入地下河道或进入落水洞，并且有助于这些河流在其他地点的重现，即“复活”。

在地表覆盖物具有潜水面地方，这个潜水面在位置上可以局部同下伏碳酸盐岩石中的水位相互交替，造成水穿过渗透性不同岩层的局部的垂直运动。在水位有很大差异同良好的垂直渗透性相结合的地方，就有大量的水在运动。岩溶地区的湖水面是不是代表（a）地表覆盖层中的潜水面，（b）碳酸盐岩石的水位，还是代表（c）有粘土铺底的溶斗中的积水，可能需要进行一些观察和测定才能确定。

碳酸盐岩石中潜水面的季节性变化幅度常常是很大的。希腊依蒂-德尔法地区有一口井，水位从潮湿的冬季下降了50多米。墨西哥北部的碳酸盐含水层，水位的季节性变化达20—80米，受个别降雨补给影响几乎是立即见效的。V.A. 赞兹（1951, p.277）报告说，牙买加北海岸上马撒·布雷河谷里灰岩中的水位波动，在平常的旱季和雨季之间，大约有10米。在马撒·布雷河谷以及南斯拉夫许多大的蚀谷或坡立谷中，潜水面的位置在旱季时低于最低的地面，在雨季时则上升形成溪流，而在极端潮湿的季节，甚至形成大湖。图2显示坡立谷边缘碳酸盐岩山地底下地下水位的巨大季节性变化，并表明地下水在雨季向邻近的一个盆地运动，而在旱季则向另一个盆地运动。造成季节性地下水位大幅度变化的控制因素就是岩溶地区的渗透能力强，与其他许多地区的中等的或很差的渗透能力截然不同。特大暴雨带来的大量的水很快进入到岩溶地区的充气洞穴里，很快到达饱和带，并引起潜水面的上升。由一次暴雨造成的潜水面的上升在饱和的碳酸盐岩石的比较不透水的部分里，可能高达10米之多，而在同样的碳酸盐岩石十分透水的带里，则可能不到1米。因此，对岩溶含水层中水位波动的评价，应当包括对渗透性的巨大差异的了解。

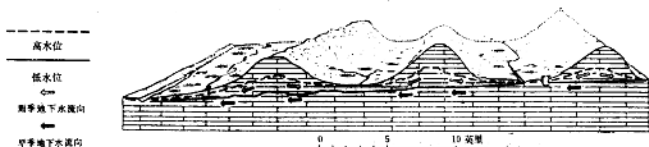


图2 坡立谷型岩溶化碳酸盐岩地区剖面图。
表示地下水面的季节变动，由渗透性的差异造成的潜水面剖面的不平坦以及旱季里山脊下面地下水的转向（H. E. 格兰德和 V. T. 斯特林费尔德，1971）

4. 河水流量特性

对岩溶化作用原理的了解以及对碳酸盐岩地区水文地质结构的了解，为评价河流特性提供了有用的基础。

岩溶地区的渗透性，不论是在未饱和带还是在饱和带，都有其特有的分布情况，这个情况在控制河水流量方面是个主要因素。洞穴非常多、透水性非常强的未饱和带，往往使大部分岩溶地区的潜水面降低到地面以下，从而又导致常流河很稀少。大的干流往往具有高的底流，因为当水面降低到某些支流的河面以下后，地下水还继续朝干流排泄，而这时，支流便干涸了。旱季地下水分水岭离开大的干流向外移动，引起某些流域面积的暂时扩大，并引起地下水作为某些高地底下的潜流的运动，如图1所示。未饱和带的渗透性之高往往使洪