

地质科技资料选编（四十一）

国外岩溶研究

（探 测 方 法）

中国地质科学院情报所

一九七八年四月

为了配合 1978—1985 年全国科学技术发展规划重点项目：“我国岩溶分布发育规律及其改造利用”的研究，我们编译了“国外岩溶研究”（探测方法）。

在岩溶研究中，查清溶洞和地下河系是十分重要的。近十年来，国外正在探索应用各种方法，包括地球物理和同位素等方法，探测地下岩溶分布规律。本专辑选译了部分国外岩溶研究方法文献，供从事岩溶研究工作的同志参考。

在编译过程中，得到了北京市地质局水文地质一大队、国家地质总局岩溶地质调查队和水文地质工程地质技术方法研究队、广西水文地质大队等单位有关同志的协助，在此一并致谢。

中国地质科学院情报所

一九七八年四月

目 录

(一) 岩溶水文学和水资源系统研究的新方法.....	(1)
(二) 岩溶地层中水量流失和水循环的确定方法.....	(7)
(三) 关于近地表洞穴的地震调查.....	(11)
(四) 利用电磁波法探测岩溶地层中的洞穴.....	(16)
(五) 对地下河进行地表定位的物探仪器.....	(23)
(六) 利用电容法测量水位.....	(30)
(七) 利用地质炸弹确定地下岩溶河道的空间位置.....	(43)
(八) 岩溶水研究的同位素方法.....	(51)
(九) 利用示踪剂确定岩溶地下河和反应.....	(69)
(十) 勘测小型地质空间和人工空洞的重力垂直梯度法.....	(81)

岩溶水文学和水资源系统研究的新方法

1. 岩溶含水层和汇水带调查

调查人员在研究岩溶地区水问题的时候,都以一个学科和几种学科的环境观点来进行探讨。这与其他水资源环境方法,如水文气象学(或大气水文学)、大陆地区地表水水文学、雪、冰和冰川水文学等方法是一致的。在历史上,某些学科的专家开创了环境研究,在他们最初发现的意义来说,岩溶作为一种环境是各种有科学研究意义课题的一种源泉。在岩溶化灰岩和白云岩地层(通常简称岩溶)地区,由于岩溶地表的独特形态,大河流的消失和再现以及类似的岩溶现象给人以深刻印象。地理学家和地貌学家最初发现这些地区可以作为一个专门的研究范围。因而,他们开始了有意义的岩溶调查。不久,他们就同地质学家结合起来,因为没有地质描述和归纳,就不可能有效地研究岩溶。后来,他们又同生物学家、地球物理学家以及其他地学的专家们结合起来,因而近百年来岩溶研究得到了广泛发展。为了解释水流在岩溶地层中的某些现象,必须要用水力学知识。在最近30—40年,水力学内容已经进入地球物理调查方法中去。从前,对地质学和水力学来说,岩溶水文调查是一种比较次要的附属方法,因而有些受到忽视。

为了解释岩溶某些地质方面的内容,水文地质方法已成地质调查的一种主要推动方向。但是,正如敏泽尔所定义的那样,水文学的其他领域,即大地水文学,对岩溶水资源研究说来,是最后进入的新学科。

2. 岩溶水调查的系统方法

岩溶含水层,大型的地下暗河系统以及岩溶汇水带,都可采用系统分析方法,即输入—反应—输出的方法来进行很好研究。在研究岩溶地层对入渗水如何反应的大地水文学问题中,基本上用两种方法。传统的方法是建立一种物理模型,用确定了反应形式,即一个已知的水量输入如何转而产生水量输出这一特性来研究一个环境。因为要求全面了解和描述岩溶含水层和地下暗河系统是极为困难的,除非大范围应用物探方法,否则难以完成。同时还需对该系统做出大量的假定,甚至有些带有推测性,所以岩溶系统的物理模型只显示出相对简单的效果。不能指望这种方法在将来有可能或者会给出重大的科学和实际的研究结果。然而,系统分析,特别是在系统鉴别和参数估算方面应用数理统计方法,对于取得可靠结果来说具有较好的前景。一般说来,通过对岩溶地层(含水层,暗河系统,复杂汇水带等)输入和输出量变化的数据测量,可以确定出系统反应的特性。

由于岩溶系统的输入部分主要以降水的区域和时间分布的形式出现,所以与此有关的进入岩溶系统的入渗水有效部分具有较大误差。在系统分析中,人们不能完全了解三个因素(输入,反应,输出)中的两个因素。输入只能部分地了解。对于产生这种反应的系统也了解很少。输出大体上容易通过对集中的出流量用系统测量和观测得到,所以这部分因素一般是清楚的。因此,鉴别反应的最优化,在考虑输入数据中不同类型误差以及输出数据中测量

误差的同时,必定还要补充环境本身的有关知识。对岩溶系统特性能够产生某种信息的任何物探方法,结合到输入—反应—输出方法中,对鉴别系统反应来说是有益的。

利用系统方法,有两个问题总是(也应该是)在岩溶系统分析之前给予解决。首先,必须确定(至少应近似)已知岩溶系统的汇水面积。在岩溶地区,有关透水和不透水地层的地质、水文地质以及大地水文学的知识肯定是有用的。为了确定地下分水岭或岩溶系统集水区的水量,有必要做一些物探工作。其他问题是查清地下的水流方向,以及在小的或大的落水洞处流入地下的集中入流和以岩溶泉形式出露的集中出流之间的连通关系。当前,不同种类的示踪剂在确定流向和连通关系方面的应用已有相当发展。岩溶研究开始时采用岩溶地貌调查,后来才增加地质和水文地质的内容,最后又应用水力学原理来阐明岩溶系统中的水流现象,这个过程是符合逻辑和历史发展的。但是,大地水文学调查需要将该系统作为整体理解成入渗下去的降水部分和以岩溶泉形式出露的大型露头集中的出流部分。根据各种学科对环境的基本理解,现代水文学或大地水文学的系统方法(而不是物理模型)在应用上非常引人注目,显然这是一种逻辑的发展。这种输入—反应—输出方法可能是目前在岩溶系统水文调查中最有前途的方法,并可从两个方面着手:(1)加强对有关降水量和入渗水量的了解;(2)加强对岩溶系统各个方面的了解,以能补充有关输入和输出方面的知识。直接的问题是总的(完全)出流量等于总的(完全)入流量。因此,入渗作用的区域和时间分布,可以用积分来验算,以便与完全的出流量相对应。从大地水文学观点出发,一些地质、地球物理和水文地质调查,对获取有关输入和输出信息的补充知识是必要的。而主要困难在于缺乏一些很好发展的并适于处理这类问题的系统鉴别方法,也就是说,输入不完全了解,输出可以完全了解,系统本身可以了解一部分,尽管这三种信息分属不同的误差来源。按照作者的意见,在三个因素中两个不清的条件下,为了确定第三个因素,发展系统鉴别技术是必要的。上述确定方法属于这类条件,即只有一个因素得到很好了解,而其余二因素只是部分了解且都存在不同程度的误差。这些条件对大地水文学方法在分析岩溶系统反应的发展中提出了有争议的问题。由于岩溶含水层、暗河系统和汇水带的输入、系统性质和输出的某些特性,可以期待某些新的系统分析将有助于系统分析的进一步发展。

3. 岩溶水文学特征

一个提出来的逻辑问题是,与其他地表水和地下水水文环境相应,具岩溶地区特点的水文学,特别是大地水文学的特征是什么?利用对入渗水的延缓反应,不透水面对有效降雨输入的快速反应和低孔隙度含水层的缓慢反应之间的区别是很容易找出的,并常常在实践中找到。陡峭的不透水面对有效降雨的反应过程线,具有急剧上升和比较大的峰值,以相对短的时间到达峰顶并有快速的退水。传统的低孔隙度含水层的反应过程线具有一个比较小的峰值,并需相对长的时间到达峰顶,以及长时间而缓慢的退水。在很多情况下,岩溶地层的反应水文过程线处在上述两条过程线之间。岩溶地层在孔隙度方面可以有很大的差异,从最大型的地下暗河到最小的岩石裂隙和粘土层孔隙。同样,在岩溶地层中存在着各种类型的水流:毛细水流,从毛细水流到层流的过渡型,层流,从层流到紊流的过渡型以及紊流(低于临界和高于临界值的两种)。岩溶的水文反应是几种类型的反应过程线的组合,可以有各种过渡的型式。大型地下暗河及其扩大部分(洞穴),通过的水流不论具自由表面或者压力下的流动,都具有这样一种反应过程线,其反应比较快,但比陡峭不透水面的反应要慢些。其

他反应是指孔隙度较小的地层，例如沉积有砂和粉砂的细颗粒物质，岩石裂隙以及接近普通低透水含水层反应过程的其他物质。最后，在地下的细小裂隙、粉砂质和粘土质沉积物，使岩溶地层产生十分缓慢的反应过程。因此，在岩溶系统中，无论强调快速的、中速的、中慢速或十分慢速的反应过程，总的反应过程线不是在不透水面反应和低透水含水层反应之间，就是接近上述两种反应。图1大体上表示出上述的概念，图2表示出岩溶含水层或地下暗河系统对入渗雨水的反应过程线的常见组合。这种描述仅限于概念性的，其目的是表示出岩溶单元的水文过程线通常是十分复杂的。在岩溶区常常可以发现有两个峰值或多个峰值的单位水文过程线反应，表明该系统的不同地区，相应在不同时间到达峰顶和有不同的峰值，并当合成时，就会产生这些复杂的单位水文过程线。这种反应曲线的复杂性也可用来解释或补充其他关于系统结构和性质的有用信息。

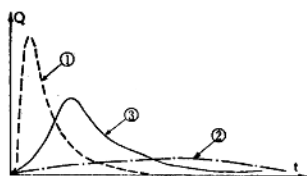


图1 单位水文过程线形态中岩溶系统反应的区别：

- (1) 陡峭不透水面的快速反应；
- (2) 普通低透水含水层十分缓慢的反应；
- (3) 岩溶含水层和地下暗河系统的中速、快速至缓慢的反应

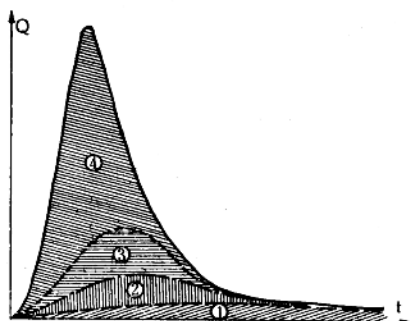


图2 岩溶含水层或一个地下暗河以及岩层裂隙系统的单位水文过程线反应图示：

- (1) 细小的裂隙和粘土—粉砂沉积物十分缓慢的反应；
- (2) 粉砂和砂的沉积物和中等大小裂隙的缓慢反应；
- (3) 砂—砾石沉积物和中等大小裂隙的中速、快速至缓慢反应；
- (4) 大型地下暗河及其扩大部分的快速反应

一个岩溶地下系统是由处在同一环境中相互重叠和交织的不同的次一级系统所组成。因此，岩溶系统的三个主要特征是：(1) 瞬时或者单位水文过程线的中等规模峰值和中段时间的反应；(2) 反应的水文过程线是由许多具各种性质的单根水文过程线组成，每一单根过程线反映出不同类型的孔隙度、渗透性以及水流动态的反应；(3) 不同类型反应的过程线，它的次一级系统在空间上被充分交织在一起，而占总空隙的比例在整个系统上是不同的。

此外，岩溶系统的性质与其他大地水文环境相比，无论是它的天然状态或从污染观点来看都有着重大的区别。岩溶水的快速流动部分经常把地表的有机物和其他污染物直接携带到泉水中。而另一方面，这些水的长期滞留部分使得岩溶水的硬度大大增加，特别是在分布灰

岩和白云岩地层的地区。

4. 为更好地鉴别岩溶系统的反应而联合使用水量和水质的变化资料

系统方法，在输入和输出水量已清楚了解的地方，可以有效地应用于岩溶含水层和地下暗河系统。但是，如果水质变化有可能同水量的输入和输出部分结合起来，那么可以取得有关岩溶环境新的知识。若将有关输入及输出的水质和水量变化的信息适当结合起来，并用系统分析鉴别岩溶含水层、地下暗河和汇水带的反应，可以得到关于这些系统的更多知识。这种反应不仅可用足够的精度来估算，而且还可更多地了解岩溶系统水文地质性质的类型和结构。因为在系统分析中，把有关输入和输出的水量和水质变化的信息结合起来不是一件简单的事，特别是岩溶大地水文学及其信息的复杂类型，这就需要发展新的系统鉴别方法。众所周知，流出来的岩溶水温度、其矿物成分、二氧化碳含量、pH值以及岩溶水的其他水质变化，总是可以告诉我们一些有关岩溶环境的情况。所以，利用岩溶水输入和输出的水量和水质的变化，鉴别系统反应特性的新方法研究在岩溶水文学和大地水文学领域内是一项值得研究的课题。笔者相信，今后有关岩溶大地水文学知识的进一步发展，在很大程度上取决于对岩溶水系统比较好的了解和描述。因此，利用地质、地球物理和其他方法，根据传统水文地质调查得到的信息，通过把水量—水质，输入—反应—输出方法用于岩溶水系统可以进行充分的补充和（或）检查。

在岩溶的出流处，特别是这些出流以泉的形式出现时，应经常对岩溶水的水质变化进行测量。这里，温度、pH、化学分析变化、硬度、生态特性、放射性以及其他一些变化都可能是有用的。一种把待解决问题的分离方法是选出一些水质变化的观测资料，而这些变化又能产生关于系统反应和结构的信息。同样，在入渗后立即测量进入地下岩溶环境的水质也是有可能的。

水质变化测量结果的解释常常是片面的和推测的。也就是说，温度、CO₂、pH、化学组分以及其他水质指标的平均值和变动是怎样解释并与岩溶环境的特性相联系，所有这一切都是假设的。因此，单从水质变化的观点来看，有关岩溶地层的大地水文学特点的结论常常具有推测性。已经得到发展的数学系统鉴别方法，其中水量和水质变化不仅同时用于确定岩溶系统反应的最佳信息，而且也可了解岩溶系统的特性，它代表了一种客观的而不是臆测的解释方法。

5. 地下岩溶系统中侵蚀和沉积的连续过程

化学、物理和生物因素的联合作用，使灰岩和白云岩地层中的侵蚀和沉积成为一种连续时间的过程。流入地下岩溶系统的水，携带有悬浮物质和河床沉积物，尤其是当小溪和河水直接流入比较大的落水洞时更是如此。从一个岩溶系统流出的泉水，可能携有相对少量的沉积物，这些含砂量对全部携入地下的固体物质来说，通常是不足计的。在岩溶系统中，砾石、砂、粉砂、粘土和重碳酸钙的沉积随时都在发生。这些物质将空隙填充，而同时地质和地球物理过程，化学或物理—化学—生物的侵蚀过程又不断地造成新的空隙。地表侵蚀的变化和输送到岩溶系统的沉积物，使得侵蚀和沉积作用处于不稳定过程。由于可溶的固体岩石不断被松散沉积物所替代，地下岩溶系统内的空隙总容积随时间而增加。所以，主要大地水文学的问题是被细颗粒物填充的空隙是否在水的储存中起有积极作用，是否在岩溶系统中能传导对入流水的反应。在岩溶中或岩溶上面充填有松散沉积物的这些空隙具有重要的关

系，这里需要适当方法来解决许多实际的、水文学的、大地水文学的以及水资源的问题。

在岩溶系统上面和岩溶系统内沉积有各种地表和地下沉积物，它在水资源工程方面的意义如下：

(1) 这些沉积物内的蓄水空间可能有着重要的水文联系。

(2) 水的传导和这些沉积物的位置及成分有关。

(3) 在岩溶地层中打井取水之成败，取决于是否迁见粗颗粒物充填的空隙和裂隙发育岩石。

(4) 每当通道或其他地下洞穴迁有充填松散沉积物时，就会出现一些实际问题。

(5) 岩溶地区地面水库水的流失，在很大程度上受充填松散沉积物的空隙影响，由于水的渗漏一般随时间而增大，这是因为在一个高的压力梯度下，这种充填物质很容易被孔隙—介质水流所潜蚀。

(6) 水质受到水在这些松散沉积物空隙中滞留时间的影响。

6. 岩溶空隙充填物以及沉积在岩溶系统上面的沉积物对持续水流的影响

在解释长期干旱季节里仍有很大持续水流从岩溶地层中流出时，当前有一种误传的假定，认为这是巨大的地下岩溶暗河和空洞在雨季充水的结果。这种概念与保持低水流量的地表湖泊、水库和河流系统是类似的。虽然大规模的空隙不是一个可容忽视的蓄水因素，但有关持续水流的最可能解释却是原生的一些空隙类型，即岩石的裂隙和沉积在岩溶系统内及其上面的细颗粒沉积物。在雨季，岩溶系统中的高压水头以及流过地表沉积物的洪水，使大量的水入渗到充填有细粒沉积物的这些空隙和细小的岩石裂隙中。由于位置、透水性和孔隙度的不同，所需的充水时间也不相同。在低水流期间，由于岩溶系统内及其上面承受的压力相对低一些，水可以从空隙里缓慢地排出。空隙越细小，充水和排水所需的时间也越长。所有空隙的分级导致这些岩石裂隙和充填沉积物的蓄水和传导能力的不同分级。对雨季和旱季交替出现的岩溶平原沉积物来说，这种概念可用图解法表示在图3中。在岩溶平原，要确定一个具有潜在蓄水的总容量，只要计算上覆在岩溶化岩石面上沉积层的总蓄水容量就够了。这一容量常常等于甚至超过总的持续退水流量，该流量相当低水流量排泄时间和无限大之间的积分。显然，所有这种潜在的蓄水空间是不变动的，在某种意义上，空隙的无水 and 排水时间不足使其在蓄水容积调节中成为整体的变化。而且，某些空隙部分长期充满着水。

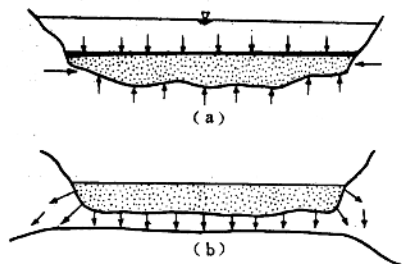


图3 沉积在岩溶系统上面沉积物的效应；

(a) 雨季伴随有细小空隙的充水，压力水位与洪泛岩溶平原(Polje)的基准面接近；

(b) 旱季时，蓄存水向承压水位低的位置排泄

同样,和地表细颗粒沉积物质一样,填充了的地下空隙起有类似的蓄水作用。由于在雨季和旱季之间压力水位变幅较大,所以有效的蓄水容量(以空隙总容积的百分比计)可能比同类型地表沉积物要大些。

7. 岩溶地区的水资源

岩溶地区与其他地区相比,在水资源开发、保护和控制方面具有某些特点。为了说明岩溶水资源的某些特点,仅概括六个主要方面如下:(1)岩溶化地层中的水库修建;(2)岩溶带上修建大型堤坝;(3)岩溶地层中或其上面修建其他建筑结构的特点;(4)供水;(5)污染控制;(6)洪水控制。

水库 在岩溶地区,和水库有关的主要问题是水的渗漏。在大多情况下,通常需要大量的调查和勘探工作量。为了使岩溶范围的水库不渗漏,需要大量投资来进行帷幕灌浆。大家知道,世界上建在岩溶地区的几座大型水库,由于防渗在经济上无能为力,因而这些水库从未蓄水加以应用。有些水库是在严重渗漏中运转的。因此,当不时地听到刚建成的大型水库就经历大量水的漏失时,并不使人感到惊奇。尤其糟糕的是,这种漏失量常随时间而增大。

堤坝 在岩溶地区修建堤坝不仅要考虑坝基结构,而且特别要考虑坝下和坝肩周围的渗漏问题。建在灰岩和白云岩岩溶化地层上的堤坝,比建在其他类型地层上的要多,它需要进行大量的勘察与灌浆工作。问题在于,岩溶区的岩石裂隙和古河道常常可能充填有粉砂和粘土,当水库和下游河水位之间存在足够高的水压梯度时就会发生潜蚀。因此,这就需要开挖掉大量的细颗粒物质并用永久性材料来替代。此外,在岩溶区常有这样的情况,帷幕灌浆仅仅作为临时的拦水墙。这些帷幕的动力演变需要不断地监视、观测和各种类型的研究,并需不时地进行某些补充性灌浆。

其他建筑 为了建筑许多地下工程,需要在岩溶地层中掘进,如隧道、洞室、地下电站和泵站等,常常会迁到充填有细颗粒松散物质的大型裂隙、断层、古洞穴和暗河。水的侵入是一种最常见的事故。在岩溶灰岩和白云岩地区修建筑物,从岩石阻力来看具有理想的条件,然而松软的岩石却容易开挖并修整成地下空间。所以,要在这些地层中修建工程,水的问题仍需极为注意,有时需要修建十分费钱的工程。

供水 岩溶地区的供水存在几个问题,其中最重要的问题是在哪儿和如何找出水来。当水可利用或者找出时,在有明显的雨季和旱季的降雨变化的地区,供水也会有很大的波动。有关供水的进水口,水处理厂,输送管线和蓄水池的建筑,所有这些都有岩溶地区的特点。

污染控制 污染控制正在成为岩溶系统水资源的最现代和最重要的一个方面。岩溶系统容易遭受永久性或半永久性的污染,在较短时间内是难以清除的。现代的工厂企业和都市地区正在成为许多岩溶系统永久性和半永久性污染的一个威胁。

洪水控制 当具低水位的地下通道,其容纳水流的容量比进入这些平原的入流量要小时,就会在大型封闭的岩溶平原上发生洪水。这种水流容量的增大可能意味着上游平原洪水的排放,但也可能对下游平原和河谷是一个威胁。在某些岩溶地区,利用地下暗河和空隙比较大的和临时的容量来滞留洪水,可以有效地控制洪水。

8. 结论

由于岩溶地区的水文学问题,特别是大地水文学和水资源问题的复杂性与特殊性,需要

有新的研究方法。现有系统分析方法的延伸以及新的发展，需要适合岩溶地区的特点。可以期待，以推测假说为基础的水文地质推理的适用范围将进一步加以限制，并被系统鉴别和解释的客观结果所替代或补充。

(译自：《Karst Hydrology and Water Resources》

1976；作者：Vujica Yevjevich)

婉 喻校

岩溶地层中水量流失和水循环的确定方法

由于所研究介质的复杂性和缺乏有效的调查手段，岩溶地带地下水循环的研究和岩溶构造中水文地质迳流参数的确定，一般是比较困难的。

如果把通用的调查手段和放射性示踪技术结合在一起，并且这种现象按模式来进行研究，同时试验数据也能得到适当解释的话，那么岩溶地层的水文地质现象是可以认识的。

根据一个简化了的假设，可以假定流入量（水流部分或全部进入地下）与下游某处的流出量（在地表以泉或地下河的形式出露）是相关的。

初步研究后，可以确定起始流量 Q_0 、最终流量 Q 、平面距离 L 、以及这两点之间的水位差 H （见图 1）。

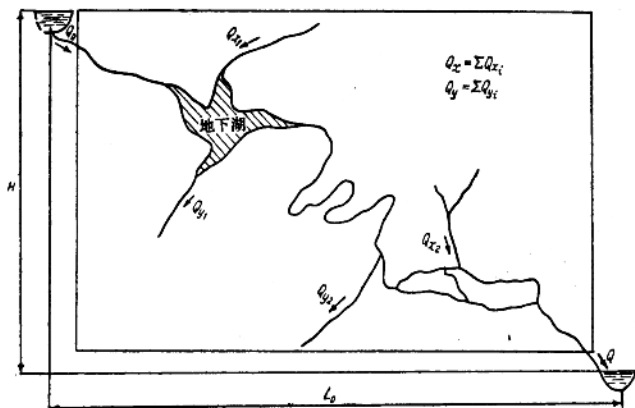


图 1 岩溶地区的横断面图

水文地质学的研究可以确定岩溶内的储水容积 W_1 ，地下湖的存在及其容积 W_0 ，地下支流的存在及其流量 Q_s ，起始流量中水量流失为 Q_0 ，示踪剂的运移时间 t ，地下水流速 V ，迳流性质，支流的存在以及虹吸现象等。

计量考虑 在岩溶地带需要非常高的示踪剂含量，因为这里流量相当大并在地下存在很大的储水库容导致示踪剂稀释和弥散。

在这种条件下，要用能测定很低浓度的设备。在有流速计的条件下，当流速计的 R_{min} （流速的最小值）等于标准偏差的两倍时

$$R \geq 2\sigma_R$$

最小检测浓度为

$$C_{min} = \frac{2}{S t^*} \left(1 + \sqrt{1 + 2 F t^*} \right)$$

式中 S 为仪器的灵敏度， F 为背景值， t^* 为背景计数时间。

如将示踪剂注入点取作坐标原点，沿 y 和 z 方向上由于示踪剂密度的差及其沉淀，示踪剂弥散可以忽略不计，这样，水流中的示踪剂扩散方程可以简化为

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \bar{u} \frac{\partial c}{\partial x},$$

式中 D 为实际扩散系数， x —示踪剂运移距离， $\bar{u}$ —水流平均线速度， c —示踪剂浓度。以 M_0 表示注入的示踪剂总量，可以写出上述方程在河流横断面面积上的一个特解

$$c = \frac{M_0}{2 \Omega \sqrt{\pi D t}} e^{-\frac{(x - \bar{u} t)^2}{4 D t}}$$

依照惯例， $R_{min} = 2\sigma_R$ ，所有超过 C_{min} 水平的测量值具有95.5%的概率。

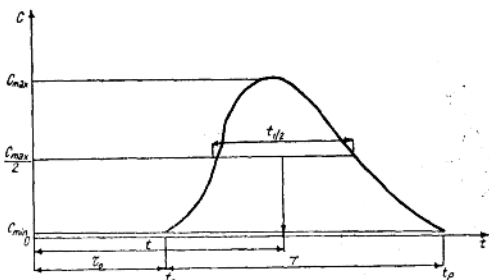


图2 测量断面中示踪剂浓度对时间的理论变化曲线

t = 示踪剂通过时间； $T = t_f - t_0$ = 测量时间间隔；

t_0 = 示踪剂注入和初次显示的时间间隔

总的浓度在0.955以内的空间分布可表示为

$$C_{0.955} = \Omega \int_0^x c dx$$

弥散云的长度为

$$X = 3.06 \sqrt{D t}$$

根据太勒的意见，在紊流中示踪剂扩散情况下，关于示踪剂浓度超过 $0.5 C_{max}$ 值的测点的水动力弥散距离为

$$\frac{x_1}{2} = 1.66 \sqrt{D t}$$

在这个测点上，可以遵循

测量时间确定浓度分布（图2）。假定在测量时段中为稳定流，其结果有

$$T = 1.85 t_{1/2}$$

应当指出，在紊流中浓度分布是一条以时间 t 为对称的高斯曲线。

从曲线 $C(t)$ 的分析可以取得非常重要的资料。例如，高斯曲线点出了通过地下“导管”

型通路的紊流。假如曲线形状不同（不对称或加阔），不论水流是层流还是地下暗流都会迁到引起明显弥散的含水层。假定暗流迁到一个地下湖或通到一个持水容积为 W_o 的洞穴。在这种情况下，曲线 $C(t)$ 会有图 3 中给出的那种形状。若已知曲线的最大值并假定为紊流，根据示踪剂通过测点得到的时间间隔 T ，就可绘出理论上的弥散曲线。时间差 T_o ，即示踪剂在地下湖中被稀释和弥散，并由此缓慢地再运移所耗费的时间。

$$T^* = t_1 - t_o - T,$$

式中 t_o 为示踪剂在测点出现的时间， t_1 为消失的时间。

如果已知流量 Q ，可以估算出地下湖的容积。

$$W_o = QT_o^*$$

如果暗流在地下分叉，就不再满足初始条件。假如证实有新的支流，并线速度保持不变，那么只有雷诺数发生变化。若要每个通道中保持紊流，现有通道的个数不能超过如下比值

$$Re(\text{单个通道})/Re(\text{临界的})$$

广泛分布的通道和支流的网络将确定为一种层流和与紊流不一样的弥散。在山区，水位差很大，水流几乎都是紊流，其不规则性主要归因于水体，而不是地下支流。如在地下，主要暗流分叉成几支次一级的暗流，并且出露之前又汇合一起，曲线 $C(t)$ 因为示踪剂质点无共同通路而出现几个极大值（见图 4）。

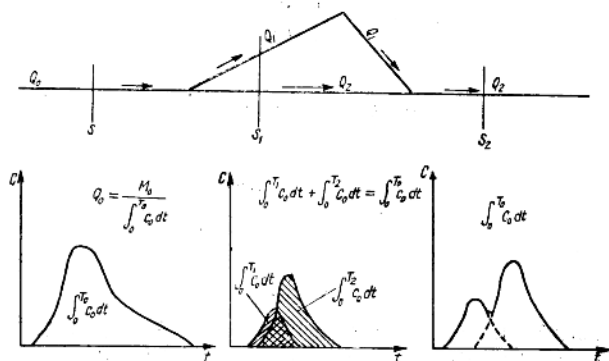


图 4 地下起始水流的几个支流曲线 $C(t)$

如果其中某一支流穿越一个地下湖，曲线就如同图 5 中所绘的那样，示踪剂浓度的变化出现有三种假定的测量剖面。

图 5 中的最后一组曲线，当假定存在一个地下湖时，它和图 4 中的曲线类似。

在第一种情况下，认为水流速度很高，甚至可以穿越地下湖，部分示踪剂发生稀释，尔后再运移。因此，地下水体中可能不是全部水量都包括在浓度的交替之中，故假定容积 W_o 会

有一个最小值。

当存在几个死通道 (cul-de-sacs) 时, 曲线 $C(t)$ 具有几个等距的极大值。

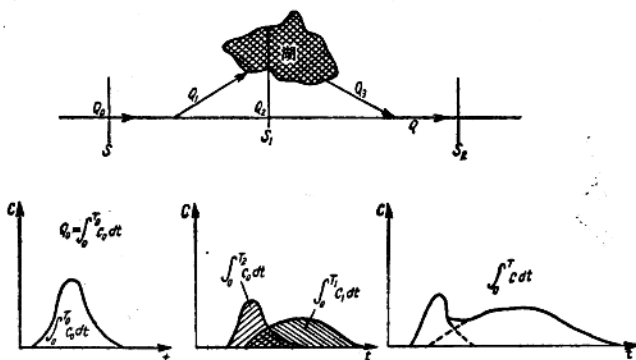


图 5 支流之一穿越地下湖时的曲线 $C(t)$

若假定一个管状系流, 可用克莱顿及韦布得出的关系式, 根据已知数据分别确定出曲线 $C(t)$ 的参数:

$$t \pm \approx \frac{9 t^{1.288}}{L^{1.1034} \sqrt{g H Q^{3/2} \pi^{-3/2}}}$$

又:

$$T \approx 16.5 (g H Q^{3/2} \pi^{-3/2})^{0.125} \frac{t^{1.488}}{L^{1.103}}$$

并推导出

$$v = \sqrt{6.92 \cdot 10^{-4} \frac{H t Q^{3/2}}{(t_{1/2})^4}}$$

而流水管路的平均半径为

$$r = \sqrt{\frac{Q T}{\pi L}}$$

示踪剂数量复原 假定在一个截面内取一个单元平面 dS 并在该平面内取点 A 。通过该平面的流量为 dQ 。假设沿测点的出流量处于稳定状态。如果 T_A 是放射状云雾通过横断面 dS 的时间, c 是示踪剂在 t 时刻通过单元平面 dS 的单位浓度, 那么在时间间隔 T_A 内穿越单位平面 dS 的示踪剂数量为

$$m = \int_0^{T_A} dQ c dt = dQ \int_0^{T_A} c dt$$

假定 T 为示踪剂穿越横断面 S 上所有 A 点的时间段上限, 在时间段 T 内通过横断面 S 的示踪剂总量为

$$M = \int_s \int_0^T dQ c dt$$

若假定 $\int_0^T c dt$ 与横断面中 dS 单元位置无关, 并考虑到在注入点及取样点之间没有测不到的示踪剂损耗, 上述方程可写作

$$M = \int_0^T c dt \int_s dQ = Q \int_0^T c dt$$

在原位置测定情况下, 并假定一个计算速度 R , 则

$$M = \frac{Q}{S} \int_0^T R dt = Q \frac{N}{S}$$

(译自: 《Radioactive Tracers in Hydrology》, 1972.)

婉 喻 校

关于近地表洞穴的地震调查

前 言

据文献记载, 人们试图发明一种切实可行的地球物理方法, 从地面来探测和圈定地下洞穴, 至今尚不足十年的历史。这种尝试超越了地球物理勘探方法的广阔范围。虽然大多数尝试都略有成效, 但著者们总的一致认为, 传统的地球物理方法对解决这个问题来说已再不能胜任了。

沃特金等人(1967)和加德森、沃特金(1968)曾报导过一系列地震试验, 这些试验显示出用于探测洞穴的新方法。通过在玄武岩中一些洞穴、冲积层中核弹坑以及碳酸盐岩石中落水洞上所进行的实际观测, 他们发现在这些地下洞穴附近的介质中, 强烈的余震一直持续到震源引爆后四秒钟。这种相对强烈的扰动是近乎周期性的, 并且显示出共振所具有的特点。所以他们称这种现象为“洞穴共振”。

这种地震现象迄今既还没有理论解释, 也没有做过系统的试验研究。缺乏对此共振场的时间和空间特征的精确描述, 必然会妨碍理论上的解释。因此, 系统研究的试验资料对于理解这一现象和发展合适的勘探手段是必要的。为此, 针对一个已知的、并经过仔细勘测过的近地表洞穴进行地震研究。本文阐述初步阶段的试验结果。

试验布置

所调查的洞穴系统称为“教堂式洞穴”(Cathedral Caverns), 它位于密苏里州利 斯 布尔市以南约 5 英里的地方。图 1 是该洞穴系统的略图。被调查的系统的主体部分称为“教堂式洞室”。这个洞室的形状为扁球体, 短轴和长轴分别为 30 英尺和 40 英尺。洞室的中心位

于地下约 145 英尺。在其西北方向的单一洞口构成这一封闭洞穴中洞室的唯一出口。

如图 1 所示，沿着从洞穴中心在地面上的投影为起点的伸向西南方向的剖面线上，以 5 英尺间距设置三分量地震计。位于洞穴中心投影处的地震计位置标为 0 号测点，沿着与剖面在 16 号测点垂直相交的直线上，放置震源，该震源距剖面线约 45 英尺。

仪器和野外工作方法

用 S-6000 型三分量短周期地震计测量地面运动速度。测量结果记录在 7001 型调频记录器上。最后这些资料以 1 毫秒取样速率进行数字化，并用 IBM360-50 数字计算机进行分析。资料采集系统的频率响应曲线从 2 到 200 赫有着固定的增益。

在 24 个地震测点上取得资料，但是这些测量结果不是同时获得的。由于记录器只有三个数据通路附加一个波至标记，因此用在同一地点分别进行 24 次爆炸的方法取得这些资料。

三分之一长的黄色炸药棒被用来做为爆炸震源。将炸药棒放置在一个距地面三英尺深的、充有松散砂子的洞穴中。所有的 24 次爆炸都在同一洞中引爆。开始，用小药量多次爆炸来使洞的四壁压实。这样做的目的是为了消除产生横波，正常情况下横波是不能再现的。炸药被一个直径为 5 英尺并压上 1000 磅砂子的金属盖罩起来。

为判断再现性对资料作了比较，结果证明了震源具有合理的再现特性。为了加强显示从震源来的直达波和从洞穴来的续至波，震源布置成非纵排列。

地质情况

洞穴处于相对均质的白云岩中，白云岩夹有薄层的砂页岩。白云岩向下延伸到埋深为 1500 英尺的基底杂岩。在此断面中有着未知的良好水平反射层。白云岩被 10—15 英尺厚的砂土覆盖。在测区中欧扎克统 (Ozark) 地形是典型的不平并且有中等程度的起伏。

试验结果

图 2 表示了 24 个测点中 21 个测点的三分量资料。此图中向右的垂直偏移表示地震计向下运动。纵向偏移表示沿着以洞穴中心在地面上投影为起点的径向线上的运动。其向右偏移

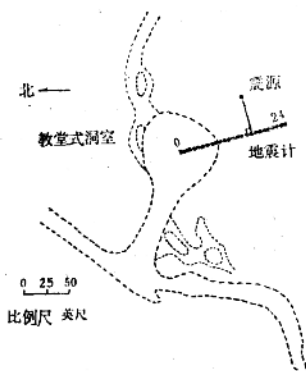


图 1 “教堂式”洞穴系统和地震计排列平面图

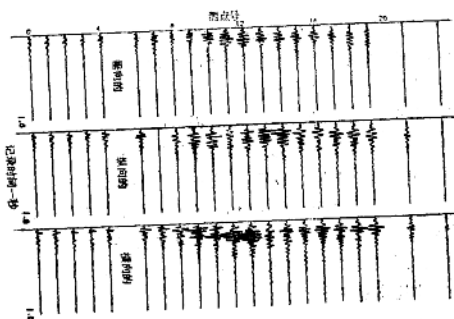


图 2 三分量时间曲线。横向测量结果平行于洞穴的边界

相应于在离开洞穴方向上的水平运动。向右的横向偏移表示垂直于径向线向着震源这边的水平运动。

资料分析的主要目的是分出那些与洞穴有关的地震波至，它们与那些没有洞穴，正常产生的波至是不同的。为了这个目的，对被精选的记录上的质点运动轨迹特征进行分析。图3表示了一个典型的分析。在此图中，在测点12所观测到的各种地震波至已被分出并且按时间顺序表示。根据实测的各个速度分量的时间曲线，测点12的资料在图4中表示成展开图。

将图3的质点轨迹曲线采用各种不同的放大倍数表示在图4中，放大倍数用符号 M.F. 表示。在此图中 U_p 和 CAVE 表示地震计的垂直和水平方位上的分量。向着震源这一边的横向运动用符号 (T) 表示。在每条时间曲线末端的箭头表示时间增加的方向。

参看图4，主要的地震波至按时间次序表示。对每个可分辨的地震波至为了达到确定产生

它的地点或区域这一主要目的，进行了各测点之间的对比。在图4a中主要波至看来是在测点8侧面附近的洞顶反射横波。作为解释过程的具体说明，图5表示了在0，4，8和12号测点上所收到的该波至，图6表示了用水平分量传播方向的三角交会方法所解释的发生点。这个波至看来实质上是水平极化波，但是如图4b所示，紧接着来的波至是更一般性质的横波，看来它的发生点也在洞顶上。

图4c表示一个不是来自已知的洞的边界就是直接来自震源的波至。图4d和4e是来自震源的直达瑞雷波，它的后面是处于震源一方位面上的SH波(图4f)。

图4a—4f一系列地震波构成了每一张记录的主要特征，它取决于震源—洞穴—地震计所排布的相对位置。如所预料的那样，随着震源位置的变动，引起记录的前部分十分剧烈变化。除了图4a和4f的SH波至外，所有的波至都是行波并且包含有大幅度的垂直运动。但是下一个波至，图4g，十分清楚地表现出与记录前部分所出现的典型能量传播方式不同的现象。这一波至几乎没有垂直分量，仅在剖面有限范围内出现，并且看不出有传播的特征。根据初步的研究，这个波至看来与震源的位置关系不大。

对于图4g的波至，主要的SH型波质点运动，是垂直于从洞穴中心位置投影画出的径向线。这一运动看来精确地指向洞穴并且仅出现在剖面的有限范围之内，实际上，测点11和12在这一记录时间上仅表示明显的能量。这两个测点之间的中点的极坐标角约 22° ，这个角是从通过“教堂式洞室”中心的垂直轴进行度量的。

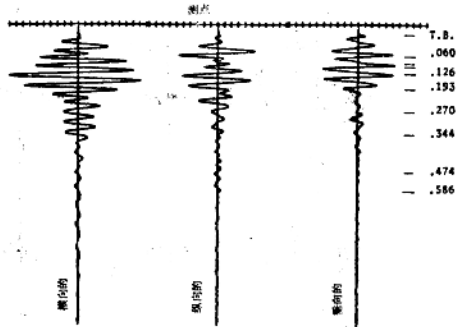


图3 测点12的质点轨迹

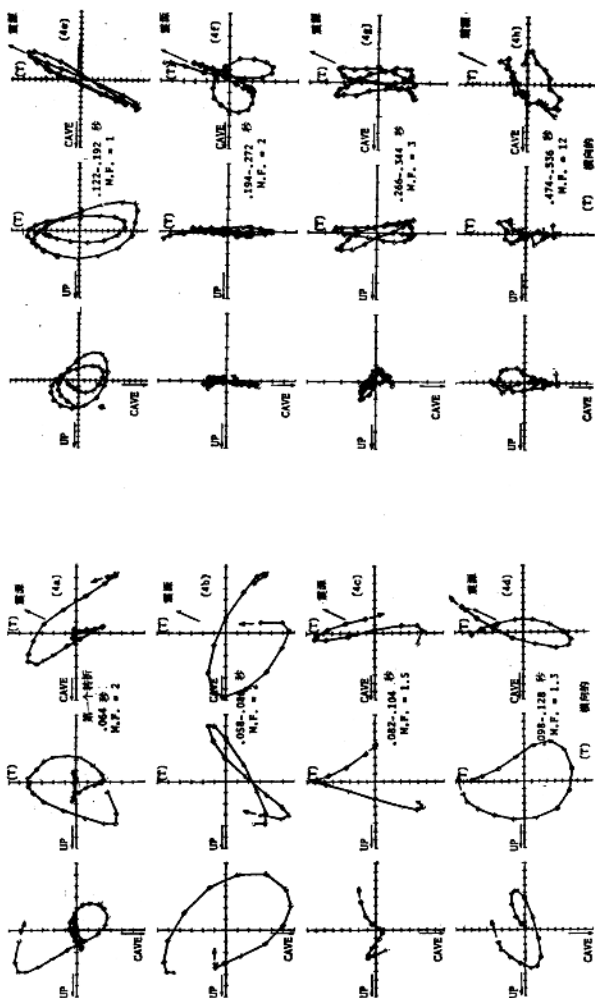


图 4 测点 12 三分量数据。横向测量结果平行于洞穴的边界