



物探方法在岩溶勘查中的应用综述

刘 崧

(中国地质大学应用地球物理系, 武汉, 430074)

摘 要 简要介绍了岩溶勘察中常用物探方法的基本原理和技术, 并举例说明其在岩溶地区进行水利水电工程地质勘察、岩溶地下水寻找、环境保护和溶洞探测时的有效性。

关键词 岩溶 物探方法 工程地质勘察 地下水 环境保护 溶洞

岩溶是一种潜在的地质灾害, 会危及建筑物、水库、矿山等的安全, 引起地面沉陷, 破坏环境。另一方面, 岩溶水是一种丰富的水资源, 溶洞则可以在发展旅游业、储集业等方面发挥作用。因此, 在可溶岩石(主要是碳酸盐岩)分布地区进行工程建设、国土整治、环境保护、水资源和矿产资源的开发与利用以及旅游资源的开发时, 都需要对岩溶进行勘察, 弄清其发育情况和分布规律。

在进行岩溶勘察时, 由于岩溶在空间上发育的不均一性和岩溶水文地质条件的复杂性, 仅靠传统的地质学方法难以得到满意的结果。如果在用地质学方法进行岩溶勘察的同时, 合理地应用物探方法, 就能够得到比较满意的结果, 甚至能解决一些地质学方法无法解决的问题。

1 岩溶勘察中的物探方法

岩溶体(指发生岩溶化的那部分岩体)与围岩间常常有一种或多种明显的物性差异, 构成了用物探方法勘察岩溶的物质基础。物探方法是通过探测岩溶引起的物理场的异常现象来勘察岩溶的。它不仅可以在地面测量, 而且可以在地下测量(例如在钻孔中、隧道中或其间)以及地下(钻孔、隧道等)与地面之间测量, 以勘察所研究空间的岩溶分布。目前, 岩溶勘察中常用的物探方法主要有电法、地震法、微重力法、射气法和地球物理测井等(本文中不论述与地球物理测井有关的问题)。岩溶常常沿断层、破碎带发育, 用物探方法探测断层和破碎带以间接探测岩溶, 可能比直接探测它们更容易^[2]。物探方法探测岩溶的有效性主要取决于岩溶与围岩的物性差异、探测深度、分辨率和信噪比。

1.1 电法

电法勘察岩溶的物质基础是岩溶体和围岩间的电性差异, 主要是导电性差异。完整的碳酸盐岩层电阻率一般都较高, 当其中发育岩溶时, 如果溶蚀空间充填的是空气, 岩溶相对围岩具

第一作者简介: 刘崧, 男, 1938年2月生, 教授, 主要从事电法勘探理论及物探方法在工程勘察和“直接找油气中的应用研究工作”
收稿日期: 1996-09-05 编辑: 曲梅兰

有高电阻率,是高阻体;如果充填的是水或沉积物,则相对围岩为低阻体^[2]。不论哪种情况,它们都是适合电法探测的对象。正因为如此,电法已成为勘察岩溶的最主要的物探方法。

相当长时间以来,勘察岩溶时最常用的电法勘探方法是电阻率(电剖面法和电测深)法。进行测量时,除常用的温纳、对称四极等装置外,为了提高分辨率和探测深度,还常采用一些特殊装置,如三电位(Carpenter)装置、聚焦装置等^[2~5]。电磁法勘察溶洞的效果与电阻率法类似,但不需要接地,也不会像电阻率法那样可能受到电极附近不均匀体的干扰,而且具有高效率、低成本的优点,所以近十年来发展很快,有逐渐代替电阻率法之势^[2,3,6~8]。无线电波透视法可以用来探测钻孔间、隧道间以及它们和地面间的岩溶分布。层析成像技术的应用,更能准确地确定岩溶在研究空间的分布^[9~11]。在岩溶发育区探测渗漏带,确定地下水的动向(流速和流向)以及地下水和地表水的补给关系等方面,自然电场法有其特殊的效果^[12]。

1.2 地震法

地震法勘察岩溶的物质基础是岩溶体和围岩传播地震波速度或吸收系数的差异。地震波在致密碳酸盐岩石中传播较快,吸收系数也较小。碳酸盐岩被溶蚀的空间不论充填的是空气、水,还是沉积物,岩溶体的地震波速相对围岩都要慢得多,其吸收系数也要大得多。

因为岩溶的上界面不是地震折射面,所以折射波法一般不能用来探测岩溶,该方法成功应用的报道极少^[2,3]。岩溶的上界面虽然是一个良好的反射面,但反射波法的成效仍然不大。其主要原因是,当入射能量的波长大于岩溶体直径时,就很少有能量反射回地面。使用高频震源(例如电火花震源)并与数字平均地震仪和近代数据处理技术相结合,可能会明显改善这种状况^[2,3]。跨孔地震法通过测量旅行时或地震能量幅值,可以快速、容易地确定岩溶在钻孔间的分布。采用层析成像技术,不仅能更好地确定岩溶的分布,而且可以评价岩体条件^[2,3,10,11]。使用地面—钻孔地震法,可以勘察钻孔周围一个圆锥形空间内的岩溶分布,其最先进的形式是垂直地震剖面(VSP)法。该法还可以确定岩石中的断裂和各向异性,并可以确定多种动弹参数^[2,3,13,14]。

1.3 重力法

在勘察岩溶时,尤其是在地形平坦地区,重力法得到了广泛的应用。岩溶被溶蚀的空间无论是充填空气、水还是沉积物,相对围岩都是低密度体,这是重力法勘察岩溶的物质基础。在勘察时,最好采用微重力仪进行微重力测量,并且要仔细校正地形影响,此外,还要考虑地表沉积物厚度、岩相变化以及潜水面起伏等因素的影响。除在地面进行测量外,也可以在隧道、坑道中进行,以勘察其周围的岩溶分布。这时受地面起伏的影响小,分辨能力高,还可以作为三维传感器,进行大体积岩石原位密度测定^[12,13,15]。

1.4 射气测量

致密碳酸盐岩中的岩溶或断裂破碎带(与岩溶发育有关)往往成为地下水或气体运移的良好通道和储存场所。岩溶带中的射气向上迁移,尤其是通过断裂破碎带迁移,常常会在上方土壤中形成线状射气异常,从而可以通过对这些射气异常的探测来勘察其下岩溶的存在^[12,16]。

2 物探方法在岩溶勘察中的应用

在碳酸盐岩层分布地区,在进行工程地质勘察(尤其是水利水电工程地质勘察)和岩溶地下水的寻找时,物探方法应用得相当广泛。此外,在与岩溶有关的灾害的预测和防治,环境保护和监测以及岩溶工程处理的质量检测等方面,物探方法已经得到了有效的应用,并具有广阔的

应用前景。下面我们举例来说明物探方法在这些方面的应用。

2.1 在岩溶发育地区水利水电工程地质勘察中的应用

2.1.1 水库蓄水能力评价 印度阿萨姆邦某地为修建水电站,拟在乌荣河床上建筑一条 45 m 高的大坝,把 28 km² 的乌荣盆地变成水库。由于该盆地及其东边相邻的莱朗盆地中广泛分布着出露的或隐伏的灰岩并且灰岩中有岩溶发育,需要对水库的蓄水能力作出评价,以弄清水库蓄水后库水是否会通过溶道流到莱朗河谷中去。为此,投入了电阻率法测量。物探人员在已知的相邻两个溶洞上进行了对称剖面法和联合剖面法测量。由于溶洞中充填的是空气,它相对围岩是高阻体,对称剖面法视电阻率剖面曲线在两个溶洞上分别呈现两个高阻异常。联合剖面法的 ρ_a^A 、 ρ_a^B 曲线则是把这两个溶洞作为一个高阻直立层反映,而不能独立确定它们。因此,决定用对称剖面法进行剖面测量。通过电阻率测深,选定了几个合适的电极距,在 21 条剖面上进行了多极距的剖面法测量。结果,确定了库区岩溶和断层的分布,一些异常已为钻探所证实。

为了确定引起异常的岩溶的发育方向,在异常中心进行了环形测深(图 1)。结果表明,浅部分布有 NE 方向的岩溶,但是深部的岩溶则受 NW—SE 方向的构造(区域性节理系统或断层)控制。该区域剖面法测量得到的异常也大都沿 NW—SE 方向排列,也说明了构造对岩溶地层的控制。测区中的异常大多数都在拟建库区的西部,东部几乎没有。这并不表明东部不存在岩溶,而可能是由于物探发现的一条南北方向的断层的存在,使东部灰岩上有较厚的页岩覆盖,岩溶埋藏较深而不为电剖面法所反映。该断层使得东边的页岩和西边的灰岩以断层接触,从而在很大程度上限制了库水往东边的朗莱盆地渗漏,这对于保障水库的蓄水能力有极其重要的意义^[17]。

2.1.2 坝基岩溶探测和帷幕灌浆效果检测 我国清江隔河岩水利枢纽坝基为寒武系灰岩,岩溶发育并存在断裂和夹层,工程地质和水文地质条件复杂,需要进行防渗处理。为了查明坝址岩溶、断裂和夹层的分布并对灌浆效果进行检测,利用灌浆孔进行了电磁波法或地震法跨孔测量,并用层析成像技术进行数据处理和解释。LW 1—LW 5 孔间断面灌浆前、后的电磁波法视吸收系数(β_v)的层析成像结果表明,经灌浆处理后,岩溶引起的异常已基本消失,说明灌浆后岩体性状得到了明显改善,灌浆效果显著。在另一坝块上进行了地震法跨孔测量,也取得了成功。14W 坝块 14W 2—14W 4 孔间灌前、灌后地震波速度层析成像结果对比表明,整个断面的岩体性状在灌浆处理后有了改善^[10]。

在我国东风电站水库,岩溶防渗处理是关键问题。为了查明岩溶的分布,在该电站右岸

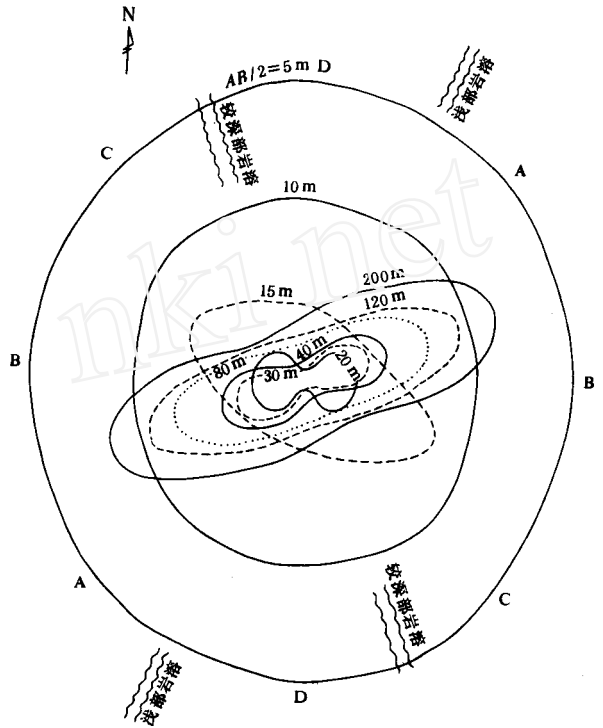


图 1 G₂ 异常的视电阻率极形图^[17]

Fig 1 Polar diagram of apparent resistivity, anomaly G₂,
Um rong basin, A ssam

915 m 高程灌浆廊道的灰岩中用 LCR—D 96 微重力仪进行了微重力测量。微重力测量探测到了一个溶洞,但从地质上看,由于廊道内毫无迹象,施工的地质人员对此推断持怀疑态度。但事隔一月后,该溶洞底部塌陷,证实了物探人员推断的正确^[1]。

2.2 在寻找岩溶水和勘察水源地时的应用

2.2.1 寻找岩溶水 牙买加西班牙女王盆地是一个灰岩型冲积盆地,它发育于某岩溶地区北部边缘的第三系白色灰岩地层中。在该地区为发展甘蔗种植业,需要寻找地下水源。地质学家们经过研究后,认为白灰岩地层的某些部位可能是很好的含水层。因此,需要确定已有的水文地质资料和白灰岩的电阻率测量值之间的关系,以评价电阻率法在该地区寻找基岩含水层的实用价值。为此目的,在约 78 km² 的面积上进行了电阻率测深工作。电阻率测深采用的是三电位装置,根据这种装置的电测深曲线可以计算出一组 $C(s)$ 参数(s 是相邻电极间的距离)。按 $C(s)$ 值偏离数值 1 的大小可以评价横向电阻率变化或地形变化对温纳装置视电阻率观测值的影响,从而确定,哪些温纳测深曲线可以直接按层状大地测深曲线解释;哪些温纳测深曲线经过对一些测量数据进行校正后可以按层状大地的测深曲线解释;哪些不能解释。对能按层状大地测深曲线解释的温纳测深曲线的解释结果与得到的测井资料很吻合。解释结果得到的该地区含水层电阻率值和给水度之间的关系如图 2 所示。

不难看出,两者间呈线性关系,图中的直线是用最小二乘法拟合得到的线性趋势关系。这表明含水层电阻率是一个质量指标。该图可以用来评价该地区内将来可能进行电阻率测深地点的可能给水度。应指出,当电阻率很高时,这一线性关系就不可能存在,因为只有致密灰岩才会有很高的电阻率,而含水的破碎灰岩不会有很高的电阻率^[5]。

2.2.2 勘察水源地 在我国昆明吴家营岩溶地下水源地,研究勘探区含水层岩溶发育程度及规律,对水资源后期开发时必须考虑的诸如岩溶塌陷等环境地质问题和评价含水层及其富水性,均有重要意义。为此,物探工作者对全区进行的对称四极电阻率测深结果进行了深入研究。为了确定岩溶发育深度,他们根据钻孔资料和电测深数据,用统计的方法,得出了岩溶发育深度 H 和电极距 $AB/2$ 之间的关系

$$H = 0.731(AB/2) \quad (1)$$

为了研究岩溶的发育程度,他们根据钻孔资料统计得到的平均渗透速度和岩溶率将钻孔剖面划分为 A (强岩溶发育)、B (中等岩溶发育) 和 C (弱岩溶发育) 3 个带,然后将其与孔旁测深曲线对比。结果发现,不同发育段的视电阻率 ρ_a 值和 $AB/2$ 之间呈现不同的线性关系,而且这种关系因地段的地质条件的不同而有两种分布。这样,他们统计出了不同岩溶发育程度的 ρ_a 与 $AB/2$ 的关系(表 1),从而根据全区的电测深资料,绘制出了该区碳酸盐岩顶板下不同深度的岩溶发育程度分布图。为了对岩溶进行综合评价,采取按(1)式求得各岩溶发育段的厚度,对整个岩溶发育深度求平均视电阻率的方法,

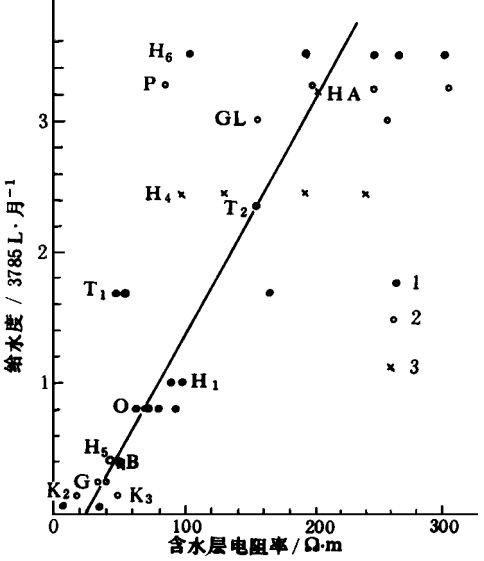


图 2 给水度和含水层电阻率间的线性关系^[5]

Fig 2 Linear relation between yield and resistivity of aquifer

K、G、B、O、H、T、GL、P、HA 分别为地点缩写; 1. 已知流量的产水钻井; 2. 未知流量的产水钻井; 3. 尚未打钻的地点

表 1 不同岩溶发育程度 ρ_a 与 $AB/2$ 关系统计表

Table 1 Statistical relationship between ρ_a and $AB/2$ for different intensification of karst formation

岩溶发育 程度分级	模 型	ρ_a 与 $AB/2$ 分布 对应钻孔	a	b	f_s (统计检验)	R (相关系数)	显著性
强 (A)	$\rho_a = a + b \frac{AB}{2}$	Z ₂₀ Z ₃₃ Z ₄₈ Z ₅₆	28.455 529	0.617 354 6	446.95	0.965	高度显著
		Z ₆₈ Z ₆₉ Z ₇₁					
		Z ₅₁ Z ₁₈ Z ₂₇ Z ₂₆ Z ₄₄ Z ₅₅ Z ₅₇ Z ₆₀					
中等 (B)	$\rho_a = a + b \frac{AB}{2}$	Z ₄₈ Z ₄₆ Z ₆₉ Z ₇₁	58.362 303	0.538 688 4	160.15	0.965	高度显著
		Z ₁₉ Z ₂₄ Z ₅₇ Z ₆₁					
弱 (C)	$\rho_a = a + b \frac{AB}{2}$	Z ₃₁ Z ₃₃ Z ₄₈ Z ₄₆	78.701 094	0.368 499 5	64.03	0.884	高度显著
		Z ₅₅ Z ₅₆ Z ₆₉ Z ₇₁					
		Z ₁₅ Z ₁₈ Z ₂₄ Z ₂₆ Z ₂₇ Z ₃₇ Z ₅₅ Z ₅₇ Z ₁₉					

得到岩溶发育程度分区图^[18]。应当指出,这种评价方法带有一定的片面性,因为影响视电阻率值的因素很多,不仅仅是岩溶发育程度,这也是该文作者承认的。看来,采用解释得到的岩溶层的真电阻率或近似值来评价比较合理,这需要进一步研究。

2.3 在岩溶发育区环境保护和岩溶地质灾害预测中的应用

对岩溶发育强度的评价和监测,对于防治岩溶区的化学污染、保护环境和预测岩溶地质灾害,均有着重要意义。

在前苏联的奥卡河岸上距河约 2 km 处有一个大的化工厂。由于发生了未曾预料的情况,工厂的硫酸产品有一部分渗入了地下溶道中,加强了对含石膏岩石的溶蚀作用。结果,这些岩石中的岩溶层增大:已有的溶洞变得越来越大,并出现了新的溶洞。这些溶洞相互连通,在岩层中形成了许多溶道,溶解物就沿这些溶道流入了奥卡河。为了评价污染和环境破坏的程度,有关人员对于岩溶过程随时间的发展情况进行了研究,采用的是在不同的时间(t_1 , t_2)进行地面电阻率剖面测量和河水电阻率测量的方法(图 3)。溶道在视电阻率剖面图上表现为低阻异常,并且后期(t_2)的测量结果与早期(t_1)相比,低阻异常范围变宽,幅值变大,说明溶道截面积在扩大。河水

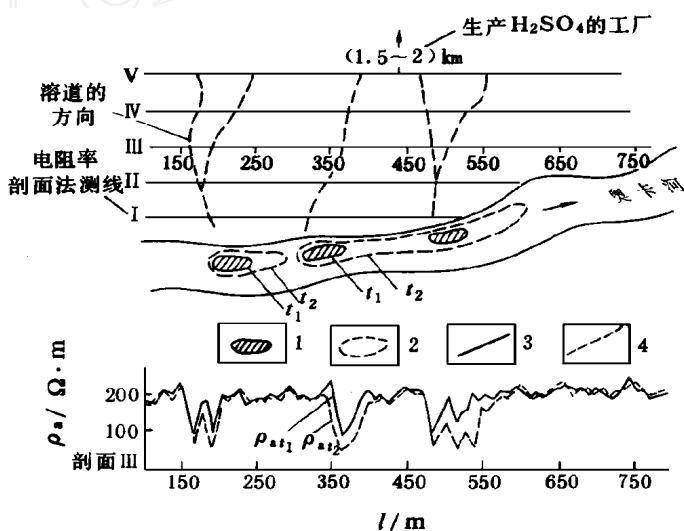


图 3 奥卡河岸某化工厂附近用电阻率法根据地面测量和水电阻率测量评价岩溶层的溶蚀速度的结果^[19]

Fig 3 A ssessment of the intensification of karst formation based on the data of surface and water resistivity observations in the vicinity of a chemical plant on the shore of Oka River

1. 前期(t_1)测量的低电阻率水的边界; 2. 后期(t_2)测量的低电阻率水的边界; 3. 前期(t_1)测量的视电阻率剖面曲线; 4. 后期(t_2)测量的视电阻率剖面曲线

电阻率测量结果也表明,作为河水中的溶解物指示河水中低电阻率带的范围随时间有了明显的增加。这些结果表明,渗漏的硫酸对环境有严重的污染和破坏。因此,工厂设计了专门的建筑物来解决这个问题^[19]。

美国北卡罗来纳州威尔明顿附近的一段铁路干线路基时常出现由岩溶造成的沉陷甚至崩塌。为了查明岩溶分布,有关人员采用了以地质雷达为主、地震折射波法和微重力法为辅的综合物探测量,取得了成功。为了对该段地面塌陷进行预测,他们计划每隔半年进行一次地质雷达的重复测量^[12]。

2.4 在寻找溶洞时的应用

在德国布瑞伦附近的一个粘土充填的溶洞中曾挖到过蜥蜴类禽龙属等化石,它们在充填层中是作为白铁矿保存下来的。为了查明该溶洞的分布,有关人员在挖掘地点西边以 10 m 线距进行了几条收发距为 50 m 的水平线圈电磁剖面法测量^[6]。据此圈定了溶洞延伸部分的轮廓(图 4),这已为其后的钻探所证实。此后又进行了中梯装置的激电法测量,所得视电阻率的等值线平面图也表示于图 4。显然,电磁法圈定的洞壁与这些等值线相切割,该处钻孔 No. 6 打到了砂层。由于砂中的粘土已被冲洗到了溶洞中,造成了充填物电阻率的增高,但这部分对电磁剖面曲线影响不大,根据拐点仍能很好确定洞壁。

以上列举的物探方法在勘察岩溶时的几个应用实例表明,物探方法在解决这些地质问题时是卓有成效的。但是,也应当强调,物探方法是一种间接手段,只有与地质学方法紧密结合,方法的投入才有依据,成果的解释才会有明确的地质内容。物探方法能补充传统地质学方法中的直接方法(如钻探、槽探、硐探等)的不足。从某种意义上讲,它们可以看成是这些方法的内插和延展。物探方法的合理应用,可以大大减少这些直接方法的工程量。此外,物探方法的应用,还可以解决一些传统地质学方法难以解决或无法解决的问题,例如检测工程处理质量和预测岩溶地质灾害等。可以预料,随着物探方法理论与技术的发展以及在勘察岩溶方面的应用研究的深入,物探方法勘察岩溶的地质效果将会不断提高,其应用领域也会不断地得到拓展。

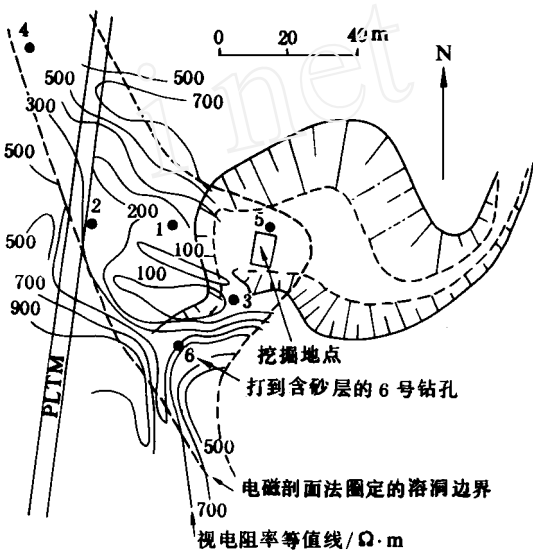


图 4 电磁剖面法圈定的含蜥蜴化石的溶洞轮廓、激电法视电阻率等值线平面图及钻探验证结果^[6]

Fig 4 The configuration of the wall of the saurian-bearing karst cave traced by EM method, the isolines of the apparent resistivity of IP method and the drilling results

参 考 文 献

1 邹成杰,张汝清,光耀华等. 水利水电岩溶工程地质. 北京:水利电力出版社,1994
2 McCann D M, Jackson P D, Culshaw M G. The use of geophysical surveying methods in the detection of natural cavities and mineshafts. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 1987, 20: 59- 73
3 McDowell P W, Hooper J W, Barker R D et al. Engineering geophysics, report by the geological society engineering group working party. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 1988, 21: 207- 271

- 4 M ilitzer H, Rosler R, Losch W. Theoretical and experimental investigation for cavity research with geo-electrical resistivity methods *Geophysical Prospecting*, 1979, 27: 640- 652
- 5 V incenz S A. Resistivity investigation of limestone aquifers in Jamaica *Geophysics*, 1968, 33: 980- 994
- 6 V ogelsang D. Examples of electromagnetic prospecting for karst and fault systems *Geophysical Prospecting*, 1987, 35: 604- 617
- 7 李淑莹. 低频电磁法在岩溶地区的应用. *中国岩溶*, 1983, 2: 171—181
- 8 戴定璇, 丁进, 马昌今等. 瞬变电磁法在工程地质勘察中的应用. *物探与化探*, 1995, 19: 385—390
- 9 L iu L izhen, Zhang Ziling, He Jianwen et al Application and development of electromagnetic wave tomography in karst exploration *Proceedings of the IAH 21st Congress: Karst Hydrogeology and Karst Environment Protection*, 10- 15 October, 1988, Guilin, China: 750- 757
- 10 李张明, 熊永红, 刘润泽. 钻孔综合物探新技术在隔河岩工程应用研究. *长江科学院院报*, 1993, 10(3): 37—42
- 11 李张明. 电磁波层析成像技术在溶洞探测中的应用. *中国岩溶*, 1995, 14: 372—378
- 12 吴其斌. 物探方法在岩溶地质调查中的应用. *国外地质勘探技术*, 1993, (2): 1—8
- 13 朱光明. 垂直地震剖面. 北京: 石油工业出版社, 1988
- 14 Omnes G Logs from P and S vertical seismic profiles *Jour. Petroleum Technology*, 1980, 32: 1843- 1849
- 15 Butler D K. Microgravimeter techniques for detection and delineation of surface cavities *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. Knoxville, Tennessee: University of Tennessee, 1991. 179- 216
- 16 王建平, 宋汉周. X 径迹法探测岩溶水库渗漏带的初步应用. *勘察科学技术*, 1990, (3): 62—64
- 17 Dutta N P, Bose R N, Saikia B C. Detection of solution channels in limestone by electrical resistivity method *Geophysical Prospecting*, 1970, 18: 405- 414
- 18 孟奇猛, 李庆仁. 物探资料对昆明吴家营水源地岩溶发育研究的有效性. *中国岩溶*, 1992, 11: 307—317
- 19 Ogilvy A A, Bogoslovsky V A. The possibilities of geophysical methods applied for investigating the impact of man on the geological medium. *Geophysical Prospecting*, 1979, 27: 775- 789

A SUMMARY OF THE APPLICATION OF GEOPHYSICAL METHODS TO KARST EXPLORATION

L iu Song

(Department of Applied Geophysics, China University of Geosciences, Wuhan, 430074)

Abstract In this paper, the principles and techniques of geophysical methods commonly used for karst exploration are briefly introduced. Several examples are illustrated to show the effectiveness of using geophysical methods in karst areas for hydraulic and hydroelectric engineering geology investigation, karst groundwater exploration, environment protection, as well as karst cave detection.

Key words karst, geophysical method, engineering geology exploration, groundwater, environment protection, karst cave