| 第39卷 第5期 | 中国岩溶               | Vol. 39 No. 5 |
|----------|--------------------|---------------|
| 2020年10月 | CARSOLOGICA SINICA | Oct. 2020     |

韩凯,梁永平,严良俊,等.综合物探调查晋祠断裂对晋祠泉流域岩溶水控制作用效果分析[J].中国岩溶,2020,39(5):745-752. DOI:10.11932/karst20200511

# 综合物探调查晋祠断裂对晋祠泉流域 岩溶水控制作用效果分析

韩 凯<sup>1,2</sup>,梁永平<sup>2</sup>,严良俊<sup>1</sup>,梁东辉<sup>2</sup>,申豪勇<sup>2</sup>,唐春雷<sup>2</sup>

(1.长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室,武汉 430100;2.中国地质科学院岩溶 地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室,广西 桂林 541004)

摘 要:研究晋祠断裂特征及其对晋祠泉流域岩溶水的控制作用,可为晋祠泉流域岩溶水运移规律 的分析提供依据。本文利用可控源音频大地电磁法(CSAMT)、音频大地电磁法(AMT)、大地电磁 法(MT)和大功率充电法等物探方法对晋祠断裂西南段断裂特征及其对晋祠泉流域岩溶水控水作用 进行调查与研究。研究结果显示,晋祠断裂西南段走向北东一南西,倾向南东,倾角自浅至深由大变 小,断裂带宽约250 m,影响深度大于1 km;晋祠断裂南东侧存在相对阻水地层,致使大部分岩溶水 未进入太原盆地,推断该断裂为张性导水断层;在西山山地存在两个与晋祠断裂平行的岩溶水强径 流带,其宽度在150~300 m之间。岩溶水通过晋祠断裂和强径流带对下游补给。

关键词:晋祠断裂;综合物探;控水作用;强径流带

**中图分类号**:P631;P641.7 **文献标识码**:A

文章编号:1001-4810(2020)05-0745-08 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



#### 0 前 言

自上世纪70年代始,由于大规模开采岩溶地下水、煤矿开发、降雨减少等原因,使晋祠流域地下水水位持续下降,晋祠泉水在1994年断流,生态环境恶化<sup>[1-2]</sup>。为了使晋祠泉复流,恢复流域生态环境,调查研究晋祠泉流域晋祠断裂特征及其对晋祠泉流域岩 溶水控制作用,是分析晋祠泉流域地下水水位下降、泉水断流原因以及遏制生态环境恶化等问题非常重要的一个手段。

晋祠断裂位于山西太原盆地的西部,沿太原市 西山边展布,是控制太原盆地与太原西山山区之间 的边界断裂,故也称为西山山前断裂。该断裂北起 太原市大井峪,南端止于交城断裂,长度25km左右。 结合地质资料及地球物理资料研究结果显示,该断 裂为倾向南东的张性断裂,断距最大处可超过 1000 m,在晋祠泉以北的断裂构造由两条呈平行阶梯状分布的断裂组成,走向为北北东向;在晋祠泉以南的断裂构造呈单一断裂结构,走向为北东向<sup>[3-7]</sup>。 晋祠断裂控制着断裂带北西侧寒武系一奥陶系碳酸 盐岩中岩溶地下水的运移,因此分析其空间分布特 征及其两侧岩性结构对了解岩溶水运移规律是十分 重要的。

地球物理勘查技术是解决上述问题很有效的手段之一,前人已在工作区内开展过地球物理测量,并获得了晋祠断裂的一些地球物理资料<sup>[3,8]</sup>,但是受技术方法的限制,并未给出准确的断裂带空间分布特征及碳酸盐岩富水带分布位置。本文采用可控源音频大地电磁法(CSAMT)、音频大地电磁法(AMT)、大地电磁法(MT)和大功率充电法等综合地球物理方法,结合地质资料对上述问题进行了调查研究,取得了明显效果。

基金项目:中国地质调查局地调项目(DD20160242);中国地质科学院基本科研业务费专项经费资助项目(YYWF201640)

第一作者简介:韩凯(1987一),男,助理研究员,主要从事地球物理方法应用研究。E-mail:hankai@karst.ac.cn。

收稿日期:2019-10-17

#### 1 工作区地质概况

工作区位于晋祠泉与平泉之间的牛家口村南侧,横跨太原盆地与西山山地,太原盆地地形为山前 堆积、洪积倾斜平原,地形平坦,坡度小于5°,高程在 790~800 m;西山山地地表起伏剧烈,沟谷纵横,高程 在900~1 100 m之间。盆地和山地之间地形陡峭,形 成断层三角面和断层崖地貌特征。

太原盆地地层以第四系黏土层为主,厚度普遍 在数百米,局部可厚达2000m。西山山地中出露地 层为二叠系砂页岩,下覆地层为石炭系砂页岩、寒武 系一奥陶系碳酸盐岩。

太原盆地巨厚的第四系沉积层形成晋祠泉流域 的相对阻水边界,西山山地的寒武系一奥陶系碳酸 盐岩岩溶地下水在受到太原盆地沉积地层阻挡后, 沿晋祠断裂带呈北东一南西向径流,形成良好的导 水通道,在水文地质条件适宜地区,便会出露泉水, 沿晋祠断裂分布的晋祠泉和平泉均是如此形成,同 时断裂带附近的沉积地层受到断裂另一侧岩溶地下 水的补给,形成岩溶地下水富水带。

## 2 物探方法选择与应用

#### 2.1 方法选择

为了了解晋祠断裂的空间分布特征和断裂带两 侧岩性结构特征,确定晋祠断裂对晋祠泉流域岩溶 水的控制作用,本文勘查测线需横跨太原盆地和西 山山地,太原盆地中覆盖层厚度巨大且视电阻率值 较低,西山山地中的岩溶水主要分布在埋深几十米 至200多米之间的寒武系一奥陶系碳酸盐岩中,普通 的浅层地球物理方法的探测深度无法达到探测目 的,同时测区内地形起伏剧烈,所以采用电磁法探测 是较好的选择<sup>[9-11]</sup>。考虑到测区内电磁干扰严重的 情况,利用多种地球物理方法可获得更加可靠的结 果,故本次探测采用可控源音频大地电磁法 (CSAMT)、音频大地电磁法(AMT)、大地电磁法(MT) 和大功率充电法等综合方法进行探测。

根据现场物性测量结果统计,测区内第四系土 层为低阻,其视电阻率普遍小于100Ω·m;碎屑岩的 视电阻率在10~1000Ω·m之间,属于相对高阻特 征;完整碳酸盐岩的视电阻率为n×(10<sup>3</sup>~10<sup>5</sup>)Ω·m, 为高阻特征,含水或裂隙发育的碳酸盐岩的视电阻 率在400~1000Ω·m之间,属于相对高阻特征。可据 此视电阻率特征结合地球物理探测结果和地质资料 对地层及岩溶水富集带进行划分。在断层的附近往 往会存在地层的错动,导致断层两侧视电阻率的急 剧变化或形成低阻断层破碎带,所以可依据断层附 近视电阻率的变化特征判断断层的位置及特征。

#### 2.2 方法特征及组合

CSAMT法是利用人工源进行频率探测的一种电磁法,探测频率在10000 Hz~1 Hz之间,并且具有抗干扰能力强的特点。AMT法和MT法为天然源电磁法,本次AMT法的探测频率为100000 Hz~10 Hz,MT法的有效探测频率为320 Hz~0.001 Hz。

CSAMT法可解决1000 m以内的地质问题,AMT 法针对浅层地质结构的分辨率相比CSAMT更高,MT 法的探测深度要大于CSAMT,可以探测深部地质结 构,对AMT和MT两个方法的测量结果进行联合反 演,可以得到分辨率更高、探测深度更大的二维视电 阻率断面图。为了更详细地了解断裂特征和岩溶地 下水强径流带特征,在工作区内选取干扰因素较少 的L2线进行了AMT法和MT法的联合探测。

大功率充电法是通过对泉或井中的岩溶水进行 大功率供电,在地表对发射的电场信号进行测量,从 而可在较大范围内对地下岩溶管道平面位置或岩溶 水强径流带进行定位和追踪<sup>[12-13]</sup>。在断层附近及岩 溶水的富集区,大功率充电法可获得电位的"极大 值"异常及电位梯度的"零值点"异常,可据此确定断 层及岩溶水富集区的位置及范围。

#### 3 数据采集及处理

#### 3.1 测线布置

测线的布设及测点坐标采用华测T5北斗RTK设备定位,定位误差在0.1m以内,完全满足工作要求。由于测区位于太原市周边,电磁干扰严重,为了达到更加精确探测的目的,故选择受电磁干扰较小的晋祠镇牛家口村一蚕石村一带布设测线,共布设测线3条,测线点距10m,方位角为321°,其中L1线长度2750m,L2线长度3000m,L3线长度2950m,L1线与L2线相距550m,L2线与L3线相距1.4km。测线布置图如图1所示。

由于L1线沿公路布设,电磁干扰严重,会严重影响AMT法和MT法的探测结果,L3线的地形条件较差,观测难度较大,故L1线和L3线选择抗干扰能力



图1 测区地质信息及物探测线布置图

 Fig. 1 Geological information and layout of geophysical survey lines in the study area

 Q4-全新统黏土
 Q3-上更新统砂土
 P2s-上石盒子组泥岩、砂岩
 P1x-下石盒子组页岩、砂岩
 P1s-山西组页岩
 C3t-太原组砂岩

 C2b-本溪组砂岩
 O3f-峰峰组灰岩
 1-断层
 2-公路
 3-河流
 4-测线
 5-充点电
 6-泉
 物探剖面

较强的CSAMT法进行探测;L2线的电磁干扰因素较少,且地形条件较为合适,故选择利用CSAMT法、AMT&MT法和大功率充电法进行综合探测。

#### 3.2 数据的采集与处理

本次 CSAMT 法探测点距为 20 m, 每个测点观测 频率 28 个, 观测时间为 30 min, 发射电流最大 18 A, 发射偶极 AB 长度为 1.2 km, 与测线的距离分别为 7.9 km、8.5 km 和 9.9 km, 数据均无明显的近场 效应。

AMT法的探测点距为20m,电极矩长度为20m, 每个测点的采集时间为20min。MT法共布设了7个 测点,分别位于L2线160m、330m、530m、730m、 1150m、1530m和1700m处,MT采集时间均大于 8h,可查明深部地质结构。

在对SCAMT、AMT和MT数据进行处理时,需要 通过人机交互的方法对数据噪声进行压制,提高数 据的质量,还需要结合地形变化及地质资料对静态 效应进行辨别并校正,把处理后的数据利用平滑模 拟反演法进行数据反演。

大功率充电法的供电点选取在距离L2线1.3 km 的蚕石村岩溶井中,该岩溶井位于晋祠断裂带上,供 电电流为26A,测量点距为10m。电位测量无穷远 布置在垂直测线1 km左右的无干扰地方,电位梯度 测量偶极长度20m。

为了提高大功率充电法实测数据的异常识别能力,本文对电位及电位梯度数据进行了Fraser滤波, 该滤波算法是由Fraser提出的一种低通平滑算子,其 实质是利用滤波算子使数据的拐点或"零值点"变为 极值点,更加易于区分,该滤波算子表示为:

 $f_{n,n+1} = (M_{n+1} + M_{n+2}) - (M_n + M_{n-1})$ 

式中:*f*<sub>*n,n+1</sub>为滤波后数据,数据记录点在n和n+1之*间;*M*<sub>*n-1</sub>~<i>M*<sub>*n+2</sub>为相邻4个点的原始数据。图5*为电位和电位梯度数据滤波前后数据对比图。从图5中可以看出,在利用相邻四个点进行Fraser滤波后,电位数据的滤波结果曲线与原始电位梯度曲线在形态</sub></sub></sub>

上和异常特征上是一致的,仅是符号相反,说明对电 位进行滤波处理没有必要;对电位梯度滤波结果显 示,电位梯度曲线中的"零值点"异常变成了滤波后 的极大值异常,叠加在数据上的一次场影响被大大 地削弱了,有效异常突出,所以结合滤波前的电位曲 线和滤波后的电位梯度曲线可以很好地对大功率充 电法进行异常识别。

## 3.3 质量控制

为了获得可信的探测结果,在野外进行了仪器的标定和一致性测量,并对数据进行了检查测量。 其中获得AMT法和MT法检查点9个,CSAMT法检查 点42个,大功率充电法检查点47个,分别占总观测 点的9.26%、10.1%和6.5%。 经计算,仪器的一致性均方误差为2.22%;AMT 法和 MT法的原始数据和检查数据平均相对误差为 5.59%;CSAMT法的原始数据和检查数据平均相对 误差为2.54%;大功率充电法电位、电位梯度观测的 原始数据和检查数据平均相对误差为2.03%。

# 4 综合地球物理探测结果

#### 4.1 可控源音频大地电磁法(CSAMT)

CSAMT法得到反演结果如图2所示。从图2可 以看出,L1~L3线CSAMT法探测结果呈现出相似的 电性结构特征,剖面的小号点段均呈现出低阻特征, 大号点段基本以高阻特征为主,地表存在明显的低 阻层。



其中在L1线的CSAMT法探测结果等值线断面 图上,低阻区和高阻区分界面在地表位于700 m 左

右,随着深度的增加,分界面逐渐向小号点倾斜,表现为断层的特征。在160~700m之间的地表层为低

阻的第四系覆盖层,下覆的相对高阻层为破碎基岩。 在700~2740m之间,电性结构在纵向上分为三层, 其中地表的一层呈现出高阻和低阻相间分布特征, 厚度在50~200m之间,该层对应石炭系、二叠系的碎 屑岩;中间层为均匀的连续低阻层,视电阻率值普遍 在200Ω·m以下,该层的的底界面在850~1050m和 1500~2000m段呈现出明显的下凹特征,其底界面 最低处的海拔高程在500m左右,该低阻连续层对应 含水量较丰富的裂隙碳酸盐岩;最下面一层呈现出 明显的高阻特征,视电阻率值普遍在500Ω·m以上, 该层对应岩石相对完整,是含水量较少的碳酸盐岩 地层。

L2线和L3线的CSAMT法探测结果等值线断面 图特征与L1线在结构上是相似的。其中断层出露地 表的位置分别位于L2线的700m和L3线的800m附 近;L2线断层右侧的中间低阻层底界面下凹位置分 别位于880~1100m、1350~1550m和1800~2100m 段;L3线断层右侧的中间低阻层底界面下凹位置分 别位于1100~1400m和1900~2350m段。

把这三条线的异常特征进行相连,可以看出共 有三个连续的异常带,分别为经过L1线700m、L2 线700m和L3线800m附近的F1断层异常带;经过 L1线850~1050m段、L2线880~1100m和1350~ 1550m段和L3线1100~1400m段的I号碳酸盐岩 地层富水异常带,该异常带底界面最低处的海拔高 程在500m左右;经过L1线1500~2000m段、L2线 1800~2100m段和L3线1900~2350m段的II号碳 酸盐岩地层富水异常带,该异常带底界面最低处的 海拔高程在300m左右。

#### 4.2 音频大地电磁法(AMT)和大地电磁法(MT)

从图3中可以看出,AMT和MT联合反演结果相比CSAMT法的分辨率更高,探测深度更大,可以很好地分辨出断裂的位置、影响宽度和深度,也可以清晰地显示出碳酸盐岩强径流带的位置。



Fig. 3 Contour profile of apparent resistivity from 2D joint inversion of AMT and MT data for line L2

在图 3 中,断裂带发育的地表位置在 650~900 m 之间,海拔高程为 200~800 m,呈近直立发育,高程在 200 m以下断裂带的倾角逐渐变小,断裂带的影响深 度超过 1 km。在其左侧地表存在一个电阻率值极低 的低阻层,厚度在 100~300 m之间,与盆地中的地表 第四系覆盖层对应;覆盖层下方的高阻体属于石炭 系一二叠系的碎屑岩,碎屑岩是受断层切割而形成。 在断裂带的右侧地表同样存在一个高阻和低阻相间 分布的地层,与地表碎屑岩地层对应;在地表碎屑 岩地层下方,水平位置 1 100~1 500 m段低阻异常带 最低发育深度可达高程 500 m左右,1 700~1 500 m段 低阻异常带,最低发育深度高程为 600 m左右,异常 带的视电阻率值在 200 Ω·m以下,推测这两个异常 带对应岩溶地下水富集带,两个异常带之间被高阻 碳酸盐岩隔离开,并不连通。

结合地质资料和L2线 AMT 法和 MT 法的探测

结果,绘制出了L2线的地质解释图(图4),从图中 可以看出断裂带内存在两个断层面,一个断层面位 于碎屑岩和碳酸盐岩的分界面,另一个断层面位于 碳酸盐岩内部。由于断裂带的存在,在碳酸盐岩地 层内部形成一个富水的裂隙带,具有较强的导水作 用,由于断裂带左侧的石炭系一二叠系碎屑岩地层 具有阻水作用,所以在断裂形成的裂隙带中赋存的 岩溶水无法越过断裂,进入盆地的第四系覆盖层 中,仅在地表碳酸盐岩地层和第四系覆盖层直接相 接的位置会有少量岩溶水对第四系覆盖层进行补 给,补给的前提条件是岩溶水的水位要高于石炭系 一二叠系的碎屑岩"阻水墙"。另外,在图中的880~ 1550 m之间存在一个岩溶地下水富集带,其发育最 深处高程500m,推测地质层位大致为上马家沟组下 部;平面上在测线的1800~2100m之间同样存在一 个岩溶地下水富集带,发育深度高程为650m左右。



Fig. 4 Geologic interpretation profile of line L2

#### 4.3 大功率充电法

从图 5a 中可以看出,在原始电位曲线上 100~ 550 m段,曲线呈均匀上升状态;在 550~600 m之间, 曲线快速上升,在电位曲线上表现为"陡坎";在 600~880 m之间曲线再次均匀上升;在 880~1040 m 之间是曲线的第一个高异常段,在1 030 m处出现一 个极大值点;在1 040~1 100 m之间,曲线出现短暂的 下降;1 100~1 390 m之间是曲线的第二个高异常段; 曲线在1390m后开始进入持续下降段。从滤波后的 电位梯度曲线图5b可以确定两个显著的极大值异 常点,即590m处和1040m处;另外在1100m处和 1360m处也存在两个极大值异常点,说明这是充电 法主要异常点。结合原始电位曲线和滤波后的电位 梯度曲线异常特征,可以推断,在550~600m段、880~ 1040m段和1100~1390段均为碳酸盐岩富水段,其 中在590m、1040m、1100m和1360m处为岩溶水集 中点。





# 5 结 论

(1) 晋祠断裂带依次经过L1线的700m、L2线的700m和L3线的800m附近,走向北东一南西,倾向南东,倾角自浅至深由大变小,断裂带宽度约250m,断裂的影响深度要大于1km;

(2)由于晋祠断裂的西北侧为富含岩溶水的寒武系一奥陶系碳酸盐岩地层,南东侧为阻水的石炭系一二叠系砂岩地层和第四系黏土层,大部分岩溶水无法通过阻水地层进入太原盆地而赋存于断裂带内的碳酸盐岩破碎带中,并沿断裂进行运移。由于

晋祠断裂南东侧阻水地层对岩溶水的阻挡作用,故 沿晋祠断裂带出露晋祠泉和平泉等岩溶大泉;

(3)除了断裂带内存在的岩溶地下水富集带,山前还存在有两个与断裂平行的岩溶地下水富集带, 其宽度在150~300 m之间,分别为:经过L1线880~ 1050 m段、L2线880~1100 m和1350~1550 m段和 L3线1100~1400 m段的I号碳酸盐岩地层富水异常 带,该异常带底界面最低处的海拔高程在500 m左 右;经过L1线1500~2000 m段、L2线1800 m~2100 m 段和L3线1900~2350 m段的II号碳酸盐岩富水异 常带,该异常带底界面最低处的海拔高程在300 m左 右。经过大功率充电法验证,位于L2线的880~1040m 段和1100~1390m段为岩溶水的集中运移带。这些 岩溶地下水富集带可能是连接晋祠泉水与平泉间的 岩溶地下水强径流带。

**致谢:**感谢评审专家对本文提出的宝贵修改意见,对参与野外 数据采集工作的韦吉益、庞振旺、文杰一并致以诚挚的谢意。

#### 参考文献

- [1] 梁文彪,李洪建,杨彩云.太原盆地边缘地貌与新构造运动及 其意义[J].山西大学学报(自然科学版),2000,23(2): 178-181.
- [2] 赵伟丽. 平泉与晋祠泉的关系以及晋祠泉复流的可能性分析 [J]. 山西水利科技,2013(4):83-84.
- [3] 程新原,张大卫,赵小全,等.山西太原晋祠断裂活动性的初步研究[J].山西地震,2003(3);49-51.
- [4] 杨承先.太原盆地构造格局及其与地震活动水平的新认识[J].华北地质矿产杂志,1996,11(2):226-232.
- [5] 孙建芳.地球物理勘探技术在晋祠泉修复研究中的应用[J].

山西水利科技,2015(4):59-64.

- [6] 关英斌,李海梅.太原地区构造格局及其演化[J].辽宁工程 技术大学学报(自然科学版),2001,20(1):32-35.
- [7] 李时毓,施树江.对太原盆地活动性断层分析[J]. 勘察科学 技术,1987(2):41-45.
- [8] 赵永贵,蔡祖煌.岩溶地下水系统的研究:以太原地区为例[M].北京:科学出版社,1990.
- [9] 韩凯,甘伏平,陈玉玲,等.柯街断裂北段的结构特征及地质 意义研究[J].地球物理学进展,2015,30(1):70-76.
- [10] 陈玉玲,韩凯,陈贻祥,等.可控源音频大地电磁法在岩溶塌 陷勘察中的应用[J].地球物理学进展,2015,30(6):2612-2622.
- [11] 韩凯,甘伏平,梁永平,等.音频大地电磁测深法揭示的北京 西山霞云岭--长操逆冲断层地下构造特征及其意义[J].地质 论评,2015,61(3):645-650.
- [12] 韩凯,郑智杰,甘伏平,等.利用多源大功率充电法定位复杂
   岩溶含水通道的方法[J].吉林大学学报(地球科学版),2016,46(5):1501-1510.
- [13] 韩凯,陈玉玲,陈贻祥,等.岩溶病害水库的渗漏通道探测方法:以广西全州县洛潭水库为例[J].水力发电学报,2015,34 (11):116-125.

# Control of the Jinci fault on karst water in the Jinci spring basin revealed by integrated geophysical surveys

HAN Kai<sup>1,2</sup>, LIANG Yongping<sup>2</sup>, YAN Liangjun<sup>1</sup>, LIANG Donghui<sup>2</sup>, SHEN Haoyong<sup>2</sup>, TANG Chunlei<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 2. Institute of Karst Geology, CAGS/ Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR&GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China)

**Abstract** Research on characteristics of the Jinci fault and its controlling effect on karst groundwater in the Jinci spring region. This work conducted such research by surveys using geophysical methods including Controlled Source Audio Frequency Magnetotelluric (CSAMT), Audio Frequency Magnetotelluric (AMT) and Magnetotelluric (MT). Results show that the southwest section of the Jinci fault strikes in NE–SW direction, dipping SE at angles becoming smaller from shallow to deep subsurface. Its width is about 250 m with influence depth over 1km. In the southeast side of the Jinci fault, relatively water-resistent strata makes most karst water failed to migrate into the Taiyuan basin, inferring the fault is a tensional water conducting fault. There are two karst water strong runoff zones parallel to the Jinci fault in Xishan mountains, the width of which is between 150 m and 300 m. Karst water supplies downstream area through the Jinci fault and strong runoff zones.

Key words Jinci fault, integrated geophysical prospecting, water controlling effect, strong runoff zone

(编辑 张玲)