

doi: 10.2029/gc20220317

黄理善, 侯一俊, 陈远荣, 敬荣中, 王建超, 赵毅, 李学彪, 裴超, 曾友强, 曾晖. 2022. 基于物探-化探技术快速精确定位评价城市及周边隐伏断层——以广西桂林市临桂区为例[J]. 中国地质, 49(3): 929-942.

Huang Lishan, Hou Yijun, Chen Yuanrong, Jing Rongzhong, Wang Jianchao, Zhao Yi, Li Xuebiao, Pei Chao, Zeng Youqiang, Zeng Hui. 2022. Rapid and accurate positioning concealed fault using geophysical and geochemical techniques in cities and surrounding areas——A case study of Lingui District, Guilin City, Guangxi [J]. *Geology in China*, 49(3): 929-942(in Chinese with English abstract).

基于物探-化探技术快速精确定位评价城市及周边隐伏断层——以广西桂林市临桂区为例

黄理善¹, 侯一俊², 陈远荣³, 敬荣中¹, 王建超¹,

赵毅¹, 李学彪¹, 裴超¹, 曾友强¹, 曾晖¹

(1. 中国有色桂林矿产地质研究院有限公司, 广西 桂林 541004; 2. 自然资源部信息中心, 北京 100830; 3. 桂林理工大学 地球科学学院, 广西 桂林 541006)

摘要:【研究目的】城市及其周边地区隐伏断层构造的探测对城市建设和经济发展具有重要影响而引起人们重点关注, 根据城市的地质背景及人文条件要求, 采用适宜的方法是对隐伏断层能否快速精确定位的关键, 同时探测方法须具有经济快速、绿色环保及强抗干扰能力等特点。【研究方法】以广西桂林市临桂区为例, 为快速精确定位被第四系覆盖的隐伏断层 F_1 , 依据该区的地质背景和地表景观特点, 采用了可控源音频大地电磁测深法(CSAMT)、土壤汞气测量、氦气测量等物化探综合方法。【研究结果】经试验发现低电阻率异常与土壤汞气、氦气高值异常高度吻合, 推测多方法异常重合的部位为隐伏断层的位置, 而经钻探查证, 揭露到了隐伏断层构造及丰富的地下水, 为该区寻找与开发深部地下水提供了依据。【结论】显然 CSAMT、土壤汞气测量和氦气测量是实现桂林市及周边地区隐伏断层快速精确定位的技术组合, 也为其他地区隐伏断层的探测工作提供了参考。

关键词: 隐伏断层; 可控源音频大地电磁测深法; 汞气测量; 氦气测量; 水文地质工程; 城市地质调查工程; 桂林
创新点: 采用地球物理、地球化学多方法在城市及周边开展隐伏断层快速探测, 互相验证、最大限度减少人文干扰的影响; 土壤汞气和氦气测量具有经济、快速的特点, 对深部隐伏断裂构造反映明显。

中图分类号: P631; P632 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)03-0929-14

Rapid and accurate positioning concealed fault using geophysical and geochemical techniques in cities and surrounding areas——A case study of Lingui District, Guilin City, Guangxi

HUANG Lishan¹, HOU Yijun², CHEN Yuanrong³, JING Rongzhong¹, WANG Jianchao¹,
ZHAO Yi¹, LI Xuebiao¹, PEI Chao¹, ZENG Youqiang¹, ZENG Hui¹

(1. China Nonferrous Metals (Guilin) Geology and Mining Co., Ltd., Guilin 541004, Guangxi, China; 2. Information Center,

收稿日期: 2019-11-28; 改回日期: 2020-03-27

基金项目: 广西科技基地和人才专项“东南亚地区金属矿找矿靶区快速评价技术集成与推广平台建设”(桂科 AD17195022)与广西自然科学基金项目“瞬变电磁法中激电信号的识别与分离研究”(2015GXNSFBA139201)联合资助。

作者简介: 黄理善, 男, 1985 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事物化探方法应用与研究; E-mail: 627006527@qq.com。

Ministry of Natural Resources, Beijing 100830, China; 3. College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541006, Guangxi, China)

Abstract: This paper is the result of hydrogeological survey engineering.

[Objective] The detection of concealed fault structure in the city and its surrounding areas has an important impact on urban construction and economic development, which has attracted people's attention. According to the geological background and human conditions of the city, the key to the rapid and accurate location of concealed fault is to adopt appropriate methods, which must have the characteristics of rapid economy, green environmental protection and strong anti-interference ability. **[Methods]** Taking Lingui District of Guilin city as an example, in order to quickly and accurately locate the concealed fault F1 covered by the quaternary system, according to the geological background and the characteristics of the surface landscape of the District, a comprehensive geophysical and geochemical exploration method, such as CSAMT, soil mercury gas measurement, radon gas measurement, is adopted. **[Results]** It is found that the low resistivity anomaly is highly consistent with the high value anomaly of soil mercury gas and radon gas, It is speculated that the location of the multi method abnormal coincidence is the location of the concealed fault, and through drilling verification, the concealed fault structure and rich groundwater are exposed, which provides a basis for the search and development of deep geothermal water in this area. **[Conclusions]** It is obvious that CSAMT, soil mercury gas measurement and radon gas measurement are the technical combination to realize the rapid and accurate location of concealed faults in Guilin and its surrounding areas, and also provide reference for the detection of concealed faults in other areas.

Key words: concealed fault; CSAMT; mercury gas measurement; radon gas measurement; hydrogeological survey engineering; urban geological survey engineering; Guilin

Highlights: The rapid detection of concealed faults in cities and surrounding areas is carried out by using multiple methods of geophysics and geochemistry, which can verify each other and minimize the influence of human disturbance, it is obvious to the deep concealed fault structure.

About the first author: HUANG Lishan, male, born in 1985, master, senior engineer, mainly engaged in the application and research of geophysical and geochemical exploration methods; E-mail: 627006527@qq.com.

Fund support: Supported by the Guangxi Science and Technology Base and Talents Special Project "Integration and Promotion Platform for Rapid Evaluation Technology for Metal Ore Prospecting Targets in Southeast Asia" (No. Guike AD17195022) and the Guangxi Natural Science Foundation Project "Recognition and Identification of Induced Electromagnetic Signals in Transient Electromagnetic Method Separation Research" (No. 2015GXNSFBA139201).

1 引 言

当前,中国的城市化建设高速发展,对城市的地质工作要求也越来越高。在城市地质工作中,隐伏断层是研究的重要对象之一,它关系到城市地质灾害防治、基础设施建设、地下热水资源开发利用及城市规划等方方面面,因此,对城市及周边地区隐伏断层的探测具有重要意义。

隐伏断层的探测方法很多,常用的地球物理方法有:高密度电法、音频大地电磁测深法(AMT)、可控源音频大地电磁测深法(CSAMT)、瞬变电磁法(TEM)、地震法、地质雷达、高精度磁测、重力测量等。常用的地球化学方法有:壤中汞气和热释汞测量方法、土壤氡气测量、放射性勘探方法。然而不同地质背景、地形地貌、岩石物理特性、岩石与土壤

地球化学特征,直接影响着各种方法的探测效果。在实际的勘探工作中,依据当地实际的地质背景,有针对性地联合使用适宜的多种物探或化探方法,互相印证,既可因地制宜,又可克服单一方法的局限性,提高地质解释的准确度、精确度。而针对城市及其周边地区建筑物多、地表覆盖率高、电磁干扰大、污染物多等特点,其探测方法还须要求安全、经济、快速、绿色环保及有较强的抗干扰能力。

2018年,桂林市成为国家首批进入可持续发展议程创新示范区的三座城市之一,按照《中国落实2030年可持续发展议程创新示范区建设方案》要求,将实施自然景观资源保育、生态旅游、生态农业、文化康养等行动,统筹各类创新资源,深化体制机制改革,探索适用技术路线和系统解决方案,形成可操作、可复制、可推广的有效模式,对中西部多

民族、生态旅游地区实现可持续发展发挥示范效应,为落实2030年可持续发展议程提供实践经验。

在此良好政策背景下,桂林市及其辖区的城市建设进入了一个崭新的阶段,启动了一批以地下热水资源勘查与开发利用为重要内容的生态旅游或文化康养项目。然而,桂林市及周边地区的断层多为隐伏断层,地表无法观测到断层位置,如果单只按地质的推断进行深部钻孔的布置,有可能会因断层位置定位不准而造成勘查风险。

本文以桂林市临桂区某康养项目的地下热水勘查为例,该项目位于桂林市临桂区北部的广西桂林—柳州大断裂带上的长蛇岭断层 F_1 中部,经水文地质调查发现,其具有形成断裂型热储的条件,开发、利用其深部地热水资源,对当地旅游发展、康养文化建设等具有重要的意义。但长蛇岭断层 F_1 在车头村一带大范围的被第四系或农田覆盖,为了对该区的隐伏断层 F_1 进行精确定位,并兼顾其他断层的探测,本文从研究区的实际地质背景出发,筛选适合的物化探测试方法,试图通过该项目探测方法的有效性试验,并依据验证情况及工作成果分析,建立一套适合于桂林市及周边地区隐伏断层快速精确定位的方法体系,为开发桂林城市地下热水资源提供技术支撑,同时也为中国西部地区城市及周边地热资源开发提供技术参考。

2 研究区地质背景

研究区位于桂林市临桂新城北部郊区,距离临桂新城中心约6 km,构造上位于广西桂林—柳州大断裂带上,该大断裂为活动性断裂,如图1所示。出露中泥盆世至早石炭世海相地层,由老到新为中泥盆统(D_2)、上泥盆统(D_3)、下石炭统(C_1)。中泥盆统(D_2)分布在工作区北部,划分为下部信都组(D_{2x}),岩性为砂岩和泥岩,上部罗富组(D_{2l})岩性为深灰色泥质灰岩、泥灰岩、疙瘩状灰岩。上泥盆统(D_3)有两种不同的岩性岩相,分界线大致在 F_1 断层附近西北部,下部地层称榴江组(D_{3l}),以黑色薄层状硅质岩、硅质泥岩为主,夹少量页岩;上部名为五指山组(D_{3w}),为一套浅灰—灰白色中厚层—厚层状扁豆状灰岩、泥质条带状灰岩; F_1 断层东南部全部相变为灰岩,为融县组地层(D_{3r}),浅灰、灰白色厚层块状灰岩,其厚度大于500 m,该组常被侵蚀溶蚀成

为小平原和农耕区等较为平坦的地形地貌。下石炭统(C_1)在区内广泛分布,全区岩性岩相基本一致,统称鹿寨组,鹿寨组下段(C_{1z^1})下部数米是黑色炭质泥岩夹少许灰岩透镜体,上部为黑色薄层状硅质岩、硅质泥岩夹泥岩,有时夹细砂岩;鹿寨组上段(C_{1z^2})主要为黑色炭质泥岩,偶夹硅质岩。

区内褶皱较平缓,断层发育,构造线呈北东—南西走向,中西部有一个由多条半环状断层和一个穹窿构成旋扭构造。褶皱有车头村背斜、高速路向斜、麒麟圩背斜和车头村西部穹窿,车头村背斜位于工区东南部车头村—凤穴村一带,是个近似箱状较宽阔的背斜,长大于4 km,宽约1 km,西北翼被 F_1 断层破坏,东南翼完整,轴向北东—南西轴线在北部分叉,轴部出露上泥盆统融县组浅色灰岩,并且被侵蚀溶蚀成农耕平原;高速路向斜紧挨车头村背斜并与之平行,背斜东南翼即向斜的西北翼,轴部为下石炭统鹿寨组上段炭质泥岩,东南翼倾角 $15^\circ \sim 40^\circ$,其规模与车头村背斜相似;麒麟圩背斜位置在工区北部,作北东—南西向展布,往北东延伸出区外,背斜长大于1.5 km,宽约1.0 km,两翼大致对称,倾角 $30^\circ \sim 40^\circ$,轴线弯曲,向西南倾伏,轴部出露中泥盆统信都组,翼部依次为中泥盆统罗富组、上泥盆统榴江组和五指山组。

研究区内有8条不同方向和不同性质的断层, F_1 断层规模较大,从东北向西南斜穿工区而过,两端向区外延伸,局部出现分支,倾向北西,倾角 $60^\circ \sim 85^\circ$,上盘下石炭统鹿寨组下降,下盘上泥盆统融县组上升,显示出正断层性质,东北段断距约1000 m,西南段断距为500~600 m,在区外凤穴村西北650 m处,断层带上有达百余米宽强烈硅化现象,在车头村西偏南500 m小山包旁侧见 F_1 断层从此通过。上盘鹿寨组下段硅质岩、泥岩与上泥盆统融县组灰岩断层接触,其间有十多米浮土掩盖。 F_2 、 F_3 、 F_4 、 F_5 断层分布在工作区中西部,呈弧形半环状包围车头村西部穹窿构成旋扭构造,4条断层均被侵蚀成低凹谷地; F_6 断层走向南北,其南段穿插进穹窿构造,并且被侵蚀成曲折低凹的狭窄谷地,似属撕裂张性断层; F_7 、 F_8 断层呈北西—南东走向,二者大致平行,相距600~700 m,地形上为宽阔水沟和农耕谷地。

根据区域地质资料分析认为,车头村地区的地质构造条件有可能生成两种地下热藏,即断裂(断

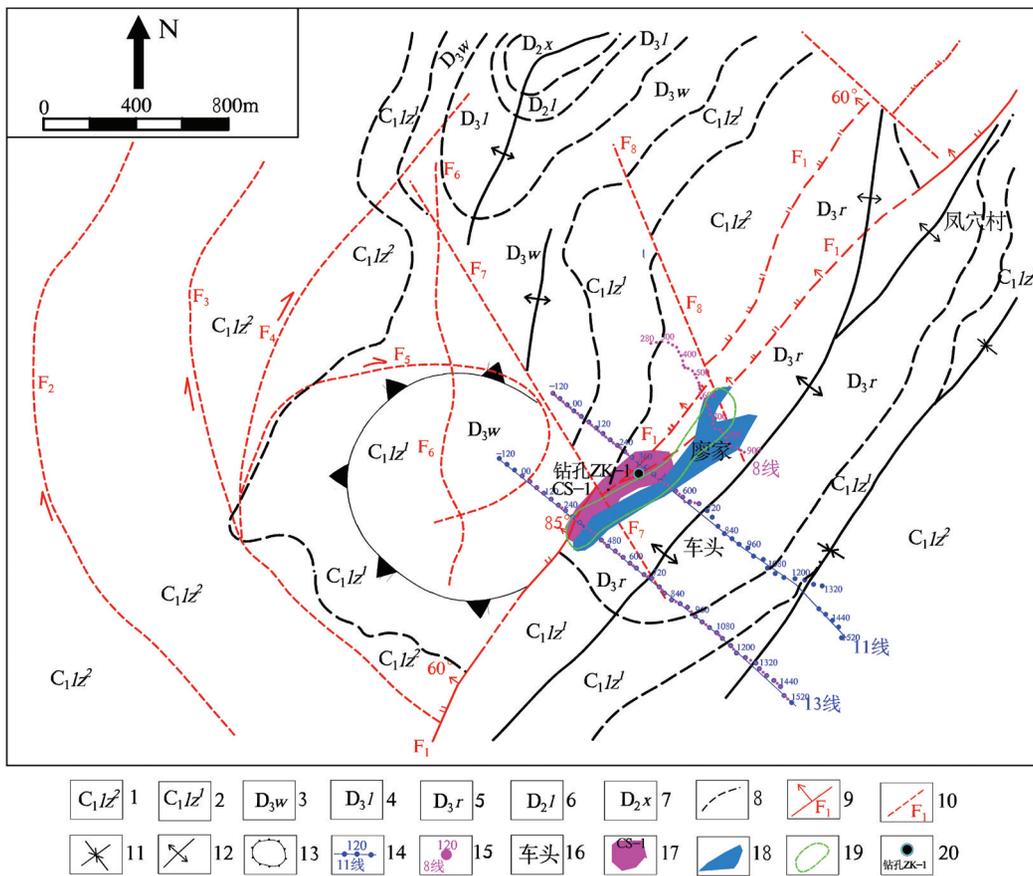


图1 研究区地质概况及物化探综合图

1—下石炭统鹿寨组上段;2—下石炭统鹿寨组下段;3—上泥盆统五指山组;4—上泥盆统榴江组;5—上泥盆统融县组;6—中泥盆统罗富组;7—中泥盆统信都组;8—地质界线;9—实测断层及产状;10—推断断层;11—向斜;12—背斜;13—穹隆构造;14—物探CSAMT测线及测点;15—土壤氡气和汞气测线及测点;16—地名;17—物探CSAMT低阻异常;18—土壤汞气异常;19—土壤氡气异常;20—钻孔及编号

Fig.1 Geological survey and comprehensive map of geophysical and geochemical exploration in the study area

1—Upper member of Luzhai Formation of Lower Carboniferous; 2—Lower member of Luzhai Formation of Lower Carboniferous; 3—Upper Devonian Wuzhishan Formation; 4—Upper Devonian Liujiang Formation; 5—Upper Devonian Rongxian Formation; 6—Middle Devonian Luofu Formation; 7—Middle Devonian Xindu Formation; 8—Geological boundary; 9—Measured faults and occurrence; 10—Inferred faults; 11—Syncline; 12—Anticline; 13—Dome structure; 14—Geophysical CSAMT survey line and survey point; 15—Soil radon and mercury survey line and survey point; 16—Place name; 17—Geophysical CSAMT low resistivity anomaly; 18—Soil mercury anomaly; 19—Soil radon anomaly; 20—Borehole and number

层)型热藏和层控型热藏:(1)断裂型热藏主要分布在较大的F₁断层带内,如果该断层向下切割地壳的深度在1000~1200 m,可能生成40~45℃的地下水,超过1500 m,可以获得超过45℃以上的地下水;(2)层控型热藏分布在工作区西部,即深海相地层区,该区上泥盆统榴江组硅质岩,坚硬但易碎,易扭曲形成小褶皱,于是生成许多大小不一的层间裂隙、节理、虚脱构造等自由空间,其可以储藏地下水或冷水,成为含水地层,热藏的温度跟含水地层的储藏深度成正比;工作区西部榴江组硅质岩在地下埋藏深度一般在200~300 m,最深在西部边缘车

渡村一带可达400~500 m,由于埋藏不深,其水温约在25~33℃。

F₁断层是生成断裂热藏的主要断层,古代曾经有过较强的地下水活动,并且留下硅化、矿物重结晶等遗迹,断层切割地壳的深度由西南往东北,由小变大,从数百米至千余米。按照桂林地区地温增温率(2.8℃/100 m)计算,该断层带在地下300 m至千余米之间,可以生成25~47℃中低温热水;超过1500 m,可以获得超过45℃以上的地下水。F₇断层是近于直立的张性断层,切割地壳深度达千米左右,亦可以生成45~47℃地下水,其他断层亦有生

表1 物性参数统计
Table 1 Statistical table of physical parameters

岩、矿石名称	电阻率/($\Omega \cdot m$)		极化率/%		备注	
	变化范围	几何平均值	变化范围	几何平均值	电性特征	采集位置
硅质岩	2500~30000	4600	1.5~2.7	1.7	高阻低极化	钻孔岩心标本
(断层)角砾岩	350~8500	750	2.5~3.7	2.7	中低阻低极化	地面标本
灰岩	3000~35000	6500	1.5~2.9	2.2	高阻低极化	钻孔岩心标本
炭质泥岩	50~1500	250	4.4~10	7.7	低阻高极化	钻孔岩心标本
泥岩	1500~22000	2500	1.1~3.4	2.9	中阻低极化	钻孔岩心标本
浅灰色灰岩	2500~18500	4500	1.5~3.3	2.3	中阻低极化	钻孔岩心标本

成断裂型热藏的条件。上泥盆统榴江组硅质岩含水层,厚100~200 m,面上分布很广,是生成层控型热藏的主要地层,因其上覆盖层薄,埋藏浅(300~500 m),热水温度大约是25~33℃。

前述各条断层带和榴江组含水层,在地下相互交织构成地下水网络,彼此之间,具有一定的水力联系。桂林地区雨量丰沛,年降水量在1800~1900 mm,大量的降水对地下水的补给十分有利。大部分断层带地形低凹狭长,有利于接收汇集大气降雨,无论断裂型热藏还是层控型热藏均接受大气垂直降水补给,然后通过地下水网互相连通补水。

由上述可知,要开发利用深部热水资源,查明断层构造的特征是关键。从图1看出,由于覆盖面积大,无法获得详细、准确的地质信息,研究区内的地质界线、断层构造等基本画为虚线,此外,研究区地处村庄、高速公路等强电磁干扰区,这些因素均给断层的探测工作造成了一定困难。在探测方法的选择上,也需要采用的方法具有一定的穿透力和抗干扰能力。

3 断层构造探测的地球物理、地球化学依据

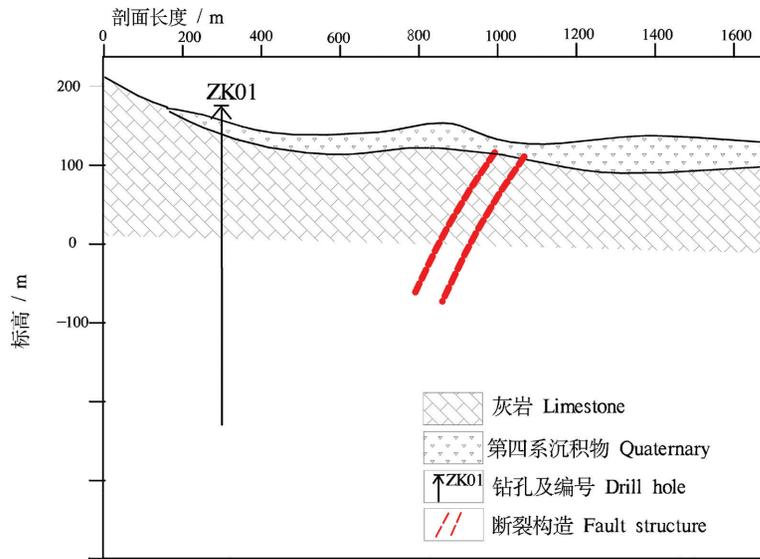
地球物理物性差异及地球化学元素异常是探测方法选择的依据。研究区岩石标本的极化率和电阻率参数如表1所示。区内以灰岩岩性为主,电阻率范围为3000~35000 $\Omega \cdot m$ 、几何均值6500 $\Omega \cdot m$,极化率几何均值为2.2%,表现为高阻低极化特征;当灰岩含炭质较高、泥化较强时,电阻率变低,常见值分布范围为100~300 $\Omega \cdot m$,极化率急剧增大,几何均值为7.7%,属于低阻高极化特征;破碎带的硅质灰岩、灰岩若含水,亦表现出相对低的电阻率。测区位于

高阻灰岩地层,断层构造带一般矿石破碎、富含水等因素,其电阻率较小,表现为中低阻特征。不难看出,区内各类岩石电性差异明显,具备开展电法或电磁法的物性前提。

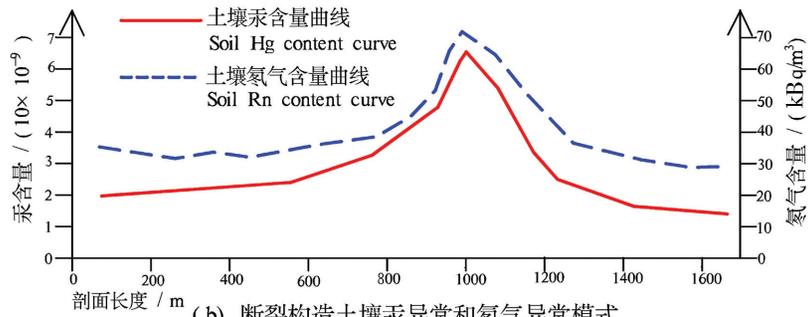
前人的研究表明,土壤汞和氡气异常是一些断层构造存在的显著标志。汞是一种亲硫元素,在热液阶段以自然汞和汞化合物的形式存在于Cu、Pb、Zn、Mo、Fe等的硫化物中,或伴随挥发性组分扩散、渗滤到岩石和矿物的裂隙或包裹体中,形成汞的原生分散晕。在表生条件下,金属硫化物通过氧化还原反应将所含的汞以单质汞或汞的卤化物形式释放出来,同时在地下温度和压力升高的情况下,汞伴随着水蒸气或地下水从岩石裂隙向地表迁移,最终被断层或矿床上方的围岩、土壤介质(黏土矿物、铁锰胶体、有机质等)吸附,形成土壤中汞气。汞气测量则是研究这些被土壤颗粒吸附的汞蒸气或其衍生出的化合物形成的分散晕特征。一般在硫化物发育的地区,断裂带内的汞含量一般比围岩高0.5到2~3个数量级。

放射性元素Rn在形成和衰变中产生辐射是氡气测量的基础,在构造中,Rn易溶于水且容易附着于岩石表面,随地下水的上升不断搬运到地表富集,形成局部的氡气高异常区。岩石破碎,孔隙度增大、地温增高将促使Rn的迁移速度加快,在地表借助氡气测量就可以探测到数百米深的断裂构造,因此氡气测量被大量应用于探测基岩裂隙水和断裂构造,且具有简便、灵活、快捷的特点。

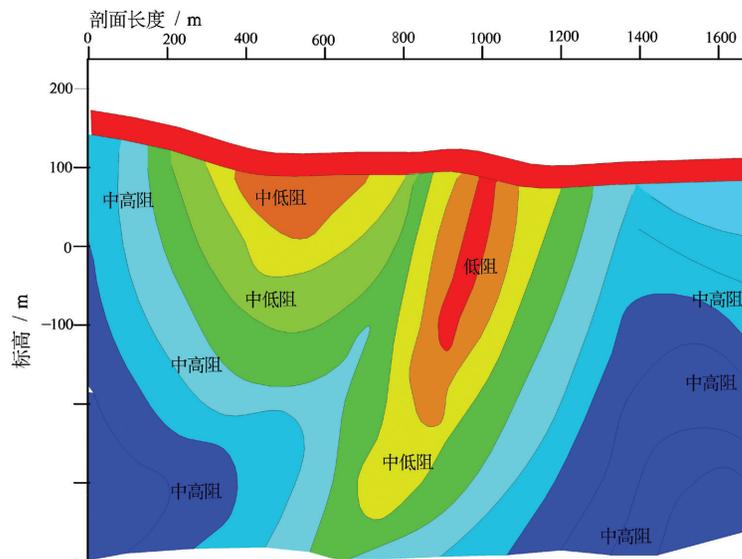
基于研究区上述地质背景以及前人的工作经验,确定选用抗干扰能力强的地球物理CSAMT法、土壤汞和氡气测量作为本研究区隐伏断层快速精确定位的探测试验方法,并建立了桂林地区断裂构造带的地



(a) 断裂构造典型地质剖面图



(b) 断裂构造土壤汞异常和氡气异常模式



(c) 断裂构造大地电磁测深理想电性模型

图2 断层构造的地球物理、地球化学异常模式

Fig.2 Geophysical and geochemical anomaly patterns of fault structures

球物理、地球化学异常模式,如图2所示。

4 遴选的物化探工作方法简介

4.1 CSAMT法

CSAMT法的测量布置图如图3所示,通过有限长接地导线电流源(A、B)向地下发送不同频率的交变电流,在地面一定范围内(一般为趋肤深度 δ 的3倍距离以外)测量正交的电磁场分量,计算卡尼亚视电阻率(式1)及阻抗相位(式2),达到探测不同埋深地质目标体的一种频率域电磁测深方法。该方法有较强的抗干扰能力,工作效率较高,探测深度范围大(一般1~2 km),横向分辨率高,可以穿透高层,广泛应用于金属矿产、地热资源等勘查。

$$\rho^{E_x/H_y} = \frac{1}{5f} |E_x/E_y|^2 \quad (1)$$

$$\varphi^{E_x/H_y} = \varphi_{E_x} - \varphi_{H_y} \quad (2)$$

式中: ρ 为电阻率, $\Omega \cdot m$; f 为频率, Hz; E_x 为 x 方向的电场强度, mV; H_y 为 y 方向的磁场强度, nT; φ^{E_x/H_y} 为阻抗相位; φ_{E_x} 为电场相位; φ_{H_y} 为磁场相位, 单位均为 mrad。

研究区的 CSAMT 工作频率为 1~8192 Hz, 供电偶极子长度 $AB=1000$ m; AB 偶极子中心与测线中心偏差 $<15^\circ$, 收发距 R 最小为 8 km, 最大为 11 km; 基本电流大于 6 A, 1024 Hz 以下频率电流大于 8 A。供电线使用耐高压、大电流的电缆线, 供电极则

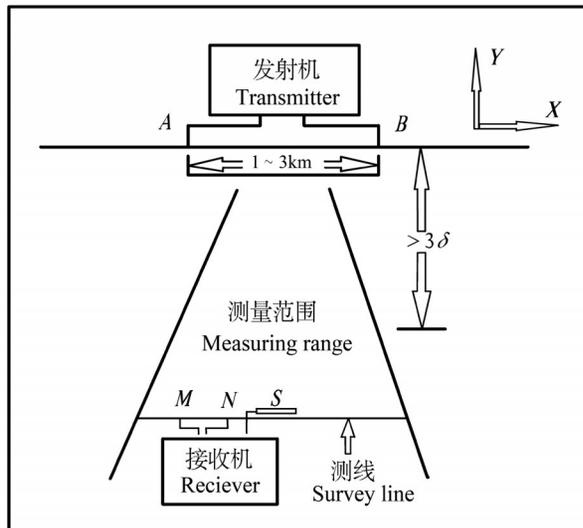


图3 标量CSAMT测量布置平面示意图

Fig.3 Graphic diagram of scalar CSAMT survey layout

将大张铝箔置于挖好的坑中埋好,并将盐水浇于其中。接收系统采用一个磁道带两个电道测量方式,测量电偶极子长度 $MN=40$ m,接收电极使用不极化电极,稳固地置于土中 20~30 cm,并浇入盐水。观测数据叠加次数约 32~16384 次,数据离差 $SEM < 20\%$ 时,方可认定为可靠数据,并将其记录。遇到民用电线时,电场干扰小,磁场干扰较大,磁场场强和相位出现畸变点,此时参考临近测点的磁场数据对视电阻率重新进行计算,由于测区地层岩性变化不大,所有测点的磁场数据变化也不明显,该方法在一定程度上可以解决人文电磁干扰的问题。

图4为研究区内11线180~300 m号点的视电阻率曲线,曲线平滑,数据质量高。

4.2 土壤汞气测量

土壤汞气测量又称热释汞测量,以热释法系统地测量从天然物质(土壤、岩石、单矿物及水)中释放出来的各种赋存状态汞为研究对象的地球化学勘查工作。研究与各种勘查目标物(矿、地热田、油气田、隐伏构造等)有关各种赋存状态汞含量异常和热释曲线特征,可得出寻找矿产、地热田、油气田、隐伏构造的标志。土壤热释汞已成为寻找盲矿和在运积物覆盖区找隐伏矿、隐伏构造、油气田、地热田及古墓的有效方法。王国华等(2002)、张建伟等(2010)、曾旭等(2016)、李伟等(2017)和陆丽娜等(2018)利用土壤汞气测量对隐伏断裂构造和隐伏矿产进行探测,取得了良好效果,为本次工作提供一定的参考。

4.3 氦气测量

氦气测量是射气测量的一种,它是用测氦仪测量土壤空气、大气和水中氦及其子体浓度的一类方法。氦气测量是指用射气仪测量土壤、水或大气中氦浓度的过程。长期的实践证明,断裂带及其附近地区存在气体释放及气体异常现象,而且这种现象是长期的,这就意味着断裂带附近岩土体具有较高的可渗透性和孔隙度,断裂带则充当了地壳气体释放的通道。因此断裂带附近的异常气体浓度值要比其他地区高,目前可研究的异常气体种类繁多,而氦气作为一种常见的放射性惰性气体,易于快速测定及观测应用。刘春来等(2011)和文龙等(2013)利用氦气测量结果较准确地对隐伏断层进行了定位和推断,也取得了较好的地质效果。

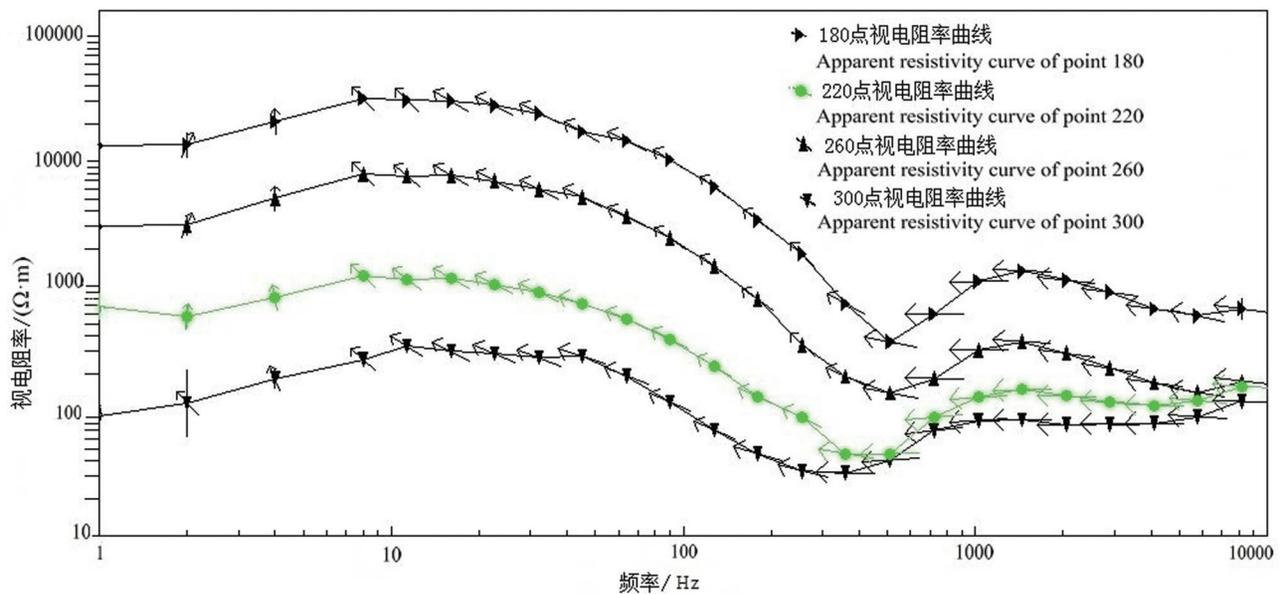


图4 标量CSAMT卡尼亚视电阻率曲线
Fig.4 Scalar CSAMT Kania apparent resistivity curve

5 隐伏断层的物化探异常特征分析与推测结果验证

重点研究区位于车头村西北部500 m,地形平坦,全部为第四系覆盖,周围零散分布一些民房、小厂房等建筑,地质观测极为困难。布置了11线、13线两条详细勘查剖面,实际工作布置如图1所示。根据物性测试及已知断层的试验结果,测区中主要存在两种中低阻异常因素:(1)构造破碎带——电阻率值一般低于 $1000 \Omega \cdot m$,并呈倾斜带状延深,与断裂型热储关系密切,一般的断层构造沿低阻带或高阻—低阻的分界线展布,这些低阻带或高阻—低阻的过渡带是本次测深工作的主要探测目标;(2)炭质灰岩、泥岩——物性测试结果显示,炭质灰岩、炭质泥岩均具有低阻特征,当其具有一定规模时,可以引起明显的低阻异常。

5.1 11线物化探异常特征分析

11线位于车头村西南,测线方位角 130° ,测线长度1600 m,CSAMT测深电阻率剖面及推断如图5c所示,根据电阻率形态可以圈定1处中低阻异常,编号为D11-1,位于剖面-120~360 m范围内,电阻率值低于 $8500 \Omega \cdot m$,异常不连续,近似直立,异常上部宽,下部窄,延深至标高约-1300 m,延深约1400

m。该异常位于下石炭统鹿寨组第一、第二岩性段及上泥盆融县组(D_3r),地形相对平坦,地表为农田覆盖(图5a)。根据电性异常形态,推测D11-1异常是地层中炭质泥岩、泥岩、裂隙构造与断层 F_1 的综合反应,推测断层 F_1 的地表投影位置位于360 m号点附近,沿着高阻—低阻的过渡带延深,直至标高-1300 m。

土壤汞气异常特征(图5b):土壤汞气含量背景值为 25×10^{-9} ,整个测线出现2处汞异常,分别在剖面400~520 m和1320~1400 m位置,异常最小值为 50×10^{-9} ,异常最大值达 120×10^{-9} ,是背景值的2~4倍,实测数据见表2。

氡气异常特征(图5b):氡气含量背景值为15 kBq/m³,整个测线出现2处氡气异常,分别在剖面400~480 m和1260~1360 m位置,氡气异常最小值为25 kBq/m³,最大值达50 kBq/m³,是背景值的2~3倍,实测数据见表2。氡气异常出现的位置与土壤汞气异常的位置大致一致,推测异常均为断层构造引起。

综上,推测断层 F_1 的地表投影位置位于400~440 m号点,沿着高阻—低阻的过渡带(D11-1低阻异常右边缘)延深,北西向倾斜,地表至标高-400 m,倾角约 70° ,标高-400 m至标高-1300 m,断层倾角

表2 11线、13线汞与氡气含量测试结果
Table 2 Test results of mercury and radon in lines 11 and 13

样品 顺序	线号- 点位号	汞含 量/ 10^9	氡气 含量 /(kBq/m ³)	样品 顺序	线号-点 位号	汞含 量/ 10^9	氡气 含量 /(kBq/m ³)	样品 顺序	线号-点 位号	汞含 量/ 10^9	氡气 含量 /(kBq/m ³)	样品 顺序	线号- 点位号	汞含 量/ 10^9	氡气含量/ (kBq/m ³)
1	11-(-120)	17.37	13.4	29	11-440	27.36	52.5	57	11-1320	87.1	44.1	85	13-920	79.23	21.8
2	11-(-100)	9.85	11.7	30	11-460	76.64	55.6	58	11-1360	56.8	53.5	86	13-960	60.79	21.2
3	11-(-80)	4.28	9.8	31	11-480	98.50	59.5	59	11-1400	23.8	33.8	87	13-1000	31.67	19.9
4	11-(-60)	9.92	9.6	32	11-500	95.83	60.8	60	11-1440	23.9	20.5	88	13-1040	36.32	13.9
5	11-(-40)	9.47	8.7	33	11-520	35.31	65.2	61	11-1480	30.4	5.3	89	13-1080	46.21	12.0
6	11-(-20)	19.17	8.4	34	11-540	28.83	53.5	62	13-00	16.80	27.3	90	13-1100	65.95	11.2
7	11-0	12.03	9.3	35	11-560	4.51	23.0	63	13-40	6.16	24.6	91	13-1120	20.64	11.0
8	11-20	10.48	9.4	36	11-580	7.47	9.9	64	13-80	12.15	23.5	92	13-1140	32.77	10.9
9	11-40	18.16	10.9	37	11-600	54.53	8.2	65	13-120	12.10	24.0	93	13-1160	14.94	10.7
10	11-60	26.36	11.7	38	11-620	48.40	10.1	66	13-160	9.75	25.1	94	13-1180	14.38	10.4
11	11-80	23.67	12.9	39	11-640	41.87	8.2	67	13-200	20.11	26.2	95	13-1200	36.04	9.8
12	11-100	16.39	12.6	40	11-660	57.13	9.5	68	13-240	10.27	28.4	96	13-1220	40.01	9.6
13	11-120	31.01	9.3	41	11-680	53.64	53.64	69	13-280	26.21	38.2	97	13-1240	44.36	9.3
14	11-140	9.57	8.0	42	11-720	22.00	13.4	70	13-320	304.00	51.6	98	13-1260	28.37	9.6
15	11-160	14.87	5.5	43	11-760	23.80	6.6	71	13-360	577.04	53.7	99	13-1280	22.73	14.7
16	11-180	28.31	4.3	44	11-800	25.20	10.7	72	13-400	343.54	55.4	100	13-1300	27.27	19.9
17	11-200	44.26	3.0	45	11-840	22.50	13.8	73	13-440	61.16	38.5	101	13-1320	67.65	28.9
18	11-220	11.96	3.7	46	11-880	21.20	16.5	74	13-480	77.42	28.1	102	13-1340	45.77	45.1
19	11-240	25.95	7.4	47	11-920	31.70	16.5	75	13-520	12.33	22.4	103	13-1360	105.66	39.3
20	11-260	25.47	11.8	48	11-960	30.40	15.3	76	13-560	27.55	21.0	104	13-1380	521.82	32.5
21	11-280	33.85	13.0	49	11-1000	27.81	16.1	77	13-600	92.44	20.8	105	13-1400	25.67	28.9
22	11-300	13.40	11.8	50	11-1040	25.22	22.4	78	13-640	45.37	20.2	106	13-1420	52.73	20.7
23	11-320	13.26	9.1	51	11-1080	31.73	16.4	79	13-680	64.13	19.9	107	13-1440	43.50	16.4
24	11-340	5.80	6.8	52	11-1120	26.52	19.2	80	13-720	63.59	20.1	108	13-1460	46.13	14.7
25	11-360	47.85	4.1	53	11-1160	31.82	23.4	81	13-760	65.97	20.5	109	13-1480	106.97	13.1
26	11-380	43.70	16.5	54	11-1200	48.97	25.1	82	13-800	54.40	20.7				
27	11-400	27.01	20.1	55	11-1240	47.52	17.0	83	13-840	17.68	21.0				
28	11-420	23.56	26.7	56	11-1280	76.51	11.5	84	13-880	38.80	22.1				

相对变直立。在西南方向的13号线240~400 m位置,亦出现了低阻、汞气和氡气三种异常重合,该综合异常也是与断层F₁密切相关。

5.2 13线物化探异常特征分析

13线位于车头村西南,与11线平行,测线方位角130°,测线长度1600 m,CSAMT测深电阻率剖面及推断如图6c所示,其形态及特征与11线的D11-1异常相似。根据电阻率形态可以圈定1处中低阻异常,编号为D13-1,位于剖面-120~360 m范围内,电阻率值低于1500 Ω·m,异常不连续,异常北西向倾斜,延深至标高约-1200 m,延深深度约1400 m。该异常位于下石炭统鹿寨组第一岩性段和上泥盆五指山组,地形属于坡地(图6a),根据电性异常形态,推测D13-1异常是地层中裂隙构造发育和断层F₁

的反应;异常形态间接反映了构造的形态、规模和延深情况。推测断层F₁大约在剖面320号点附近,沿D13-1低阻异常边缘延深,北西向倾斜,倾角约70°,延深深度超过1400 m。

土壤汞气异常特征(图6b):土壤汞气含量背景值为25×10⁻⁹,整个测线出现2处汞异常,分别在剖面280~440 m和1320~1400 m位置,异常最小值为50×10⁻⁹,异常最大值达600×10⁻⁹,是背景值的2~24倍,实测数据见表2。

氡气异常特征(图6b):氡气含量背景值为15 kBq/m³,整个测线出现2处氡气异常,分别在剖面280~480 m和1280~1400 m位置,氡气异常最小值为25 kBq/m³,最大值达48 kBq/m³,是背景值的2~3倍,实测数据见表2。氡气异常出现的位置与土壤

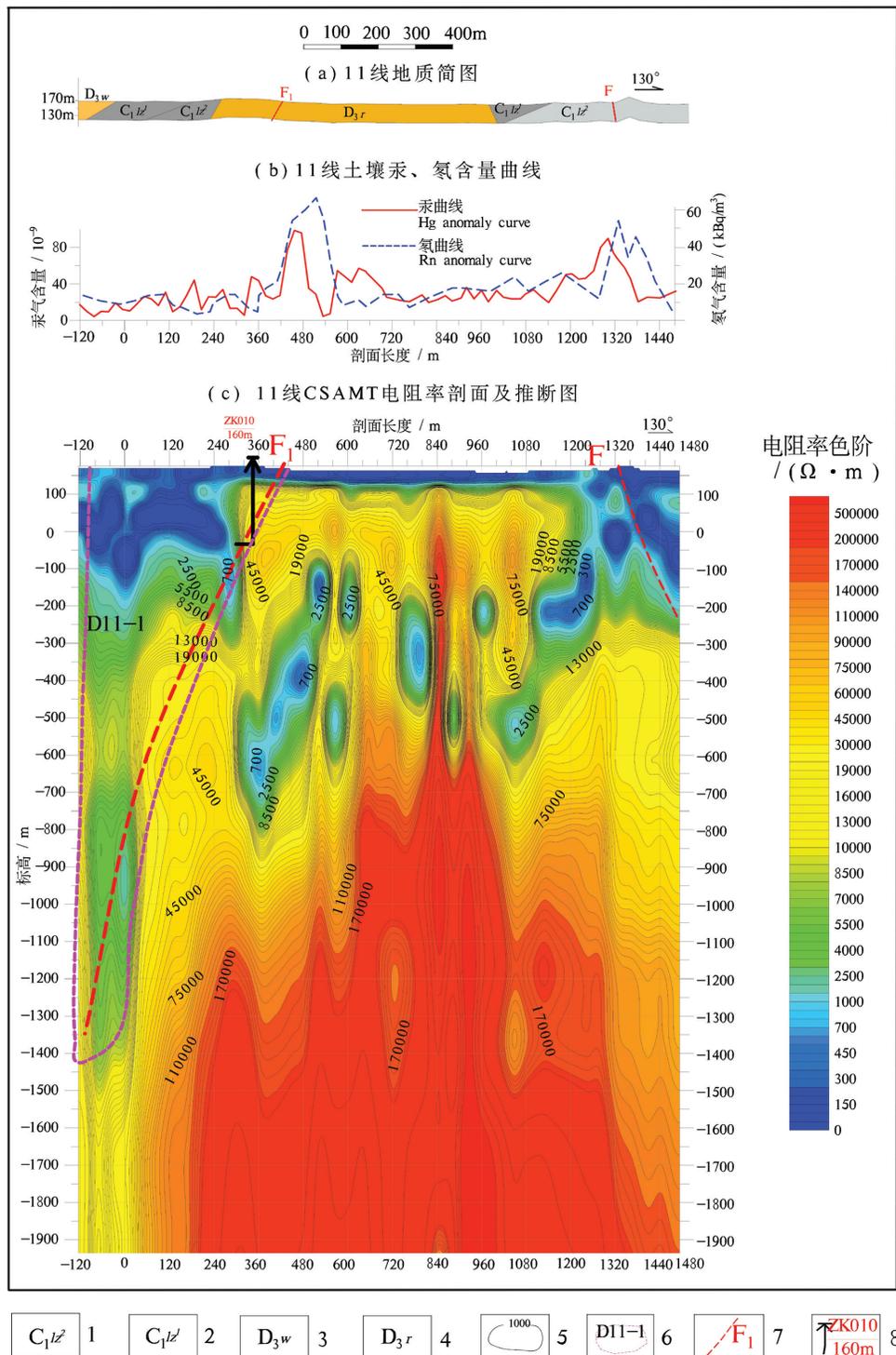


图5 11线物化探综合异常及推断图

1—下石炭统鹿寨组上段;2—下石炭统鹿寨组下段;3—上泥盆统五指山组;4—上泥盆统融县组;5—物探CSAMT电阻率等值线;6—物探CSAMT低阻异常范围及编号;7—推断断层;8—钻孔编号及钻孔深度

Fig.5 Comprehensive anomalies and inference maps of geophysical and geochemical prospecting for Line 11

1—Upper member of Lower Carboniferous Luzhai Formation; 2—Lower Carboniferous Luzhai Formation; 3—Upper Devonian Wuzhi Mountain Formation; 4—Upper Devonian Rongxian Formation; 5—Geophysical CSAMT resistivity isoline; 6—Geophysical CSAMT low resistivity anomaly range and number; 7—Inferring faults; 8—Bore number and depth

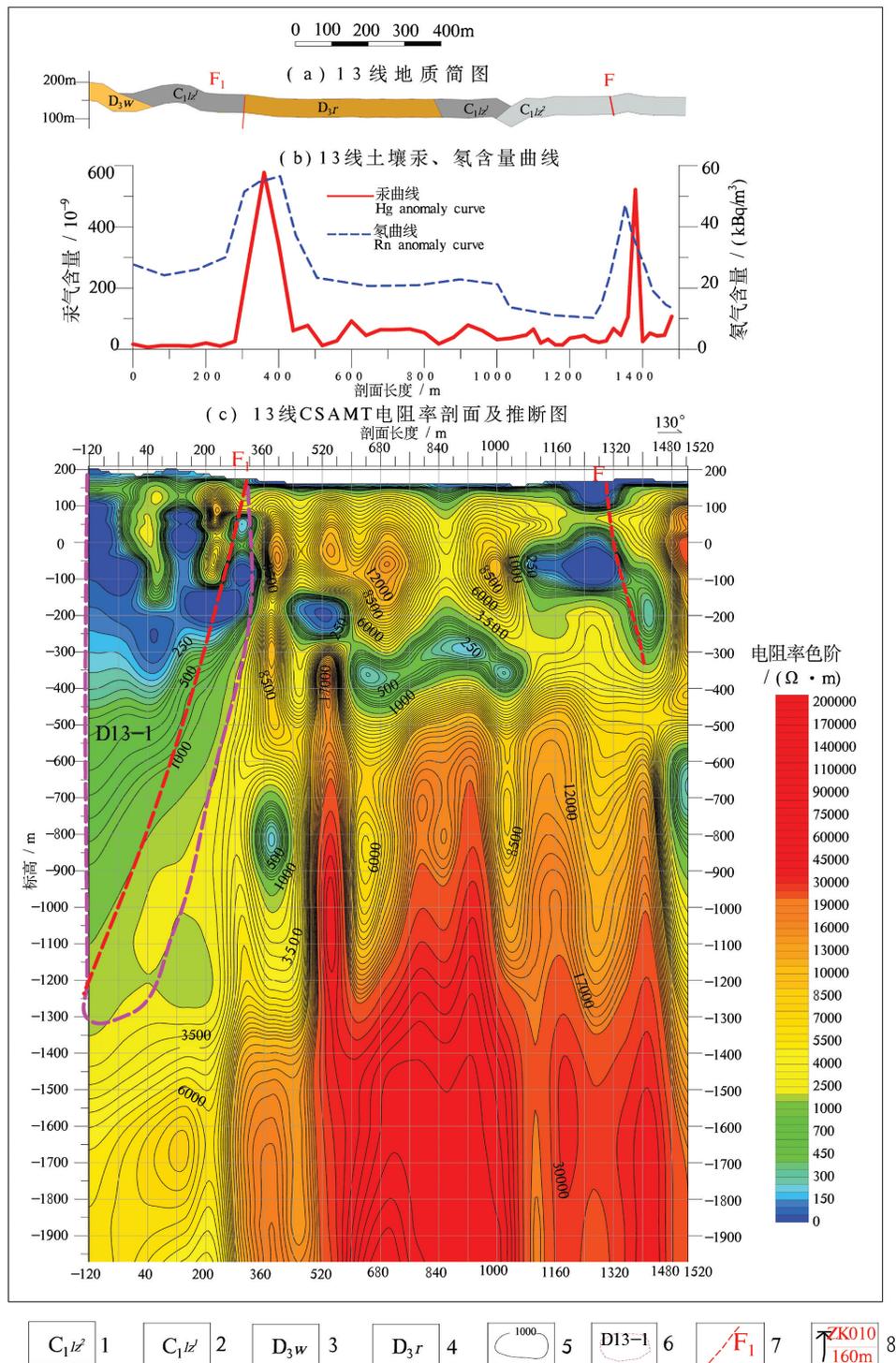


图6 13线物化探综合异常及推断图

1—下石炭统鹿寨组上段; 2—下石炭统鹿寨组下段; 3—上泥盆统五指山组; 4—上泥盆统融县组; 5—物探CSAMT电阻率等值线; 6—物探CSAMT低阻异常范围及编号; 7—推断断层; 8—钻孔编号及钻孔深度

Fig.6 Comprehensive anomalies and inference maps of geophysical and geochemical prospecting for Line 13
 1—Upper member of Lower Carboniferous Luzhai Formation; 2—Lower Carboniferous Luzhai Formation; 3—Upper Devonian Wuzhi Mountain Formation; 4—Upper Devonian Rongxian Formation; 5—Geophysical CSAMT resistivity isoline; 6—Geophysical CSAMT low resistivity anomaly range and number; 7—Inferring faults; 8—Bore number and depth

汞气异常的位置几乎一致,推测异常均为断层构造引起。

综合11线和13线2条剖面的成果,推测断层 F_1 的地表投影位置位于11线的400~440 m号点至13线的280~360 m号点的区域内,沿着高阻—低阻的过渡带(低阻异常右边缘)延深,北西向倾斜,地表至标高-1200~-1300 m,倾角约 70° 。

5.3 推测结果验证

为检验工作效果,在11线360 m号点进行了浅部钻孔验证,钻孔深度160 m,在孔深140~145 m见到了构造角砾岩和破碎带,验证了断层 F_1 的存在。断层 F_1 含水量大,是一个导水通道和储水空间,该钻孔出水量为 $50\text{ m}^3/\text{h}$ 。钻孔160 m范围内不同深度的地温梯度有明显的差异,其地温梯度范围为 $2.5\sim 4^\circ\text{C}/100\text{ m}$,平均值为 $3^\circ\text{C}/100\text{ m}$,具有较高的增温率,若钻孔深度超过1500 m,可以获得超过 45°C 以上的地下热水,为保障测区地下深部热水的温度提供了客观的数据和科学依据,亦为桂林地区找深部地热水提供了参考。

6 结 论

通过对桂林市临桂区隐伏断层的探测方法试验及对各探测方法联合推测结果的钻孔验证工作,得出如下结论:

(1)依据研究区的实际地质背景出发,选择合理的物化探方法,是快速精确预测隐伏断层的成功关键。

(2)就桂林市周边地区而言,CSAMT法、土壤汞气测量和氦气测量的综合物化探方法,是一套隐伏断层的快速精确定位可行、有效的方法组合,它们为该地区寻找隐伏断层、寻找深部热水提供了参考。

(3)桂林市及周边的隐伏断层一般具有电阻率低阻异常(或高一低阻过渡带)、土壤汞气和氦气高值异常的特征,多种异常重合的部位,大概率的是隐伏断层的位置。

(4)在城市及周边地区隐伏断层的探测过程中,地球物理和地球化学方法各有优势,在大比例尺工作中,地球化学方法在平面上对隐伏断层的定位较准确,而地球物理方法在地下深部对断层的圈定较直观,两者结合使用,发挥各自优势,可最大限度提高地质解释推断的准确度。

References

- Chen Changjing, Liu Shengbo, Huang Lishan. 2019. 3D inversion of gravity under audio frequency magnetotelluric method (AMT) constraint: A case study of the concealed rock mass in the northern margin of Yuechengling rock mass[J]. Progress in Geophysics. 34(4): 1391-1397(in Chinese with English abstract).
- Dong Haogang, Lu Tao, He Wanshuang, Li Yiyong, Zeng Min. 2016. Quaternary activity of Shawan fault in Pearl River delta[J]. Geology in China, 43(5): 1803-1813(in Chinese with English abstract).
- Fu Guangming, Huang Jintiao, Liu Yang, Li Xiaobing, Chen Guoyu, Huang Yi. 2019. Multi-electrode resistivity method and CSAMT method in geothermal exploration of Babei area in Huichang County, Jiangxi Province[J]. Geology in China, 46(4): 927-936(in Chinese with English abstract).
- Hong Zenglin, Zhang Yinlong, Zhou Yang. 2019. Research on the modes of occurrence and application of geothermal resources in the middle and deep layers of the piedmont area in southern Guanzhong Basin[J]. Geology in China, 46(5): 1224-1235(in Chinese with English abstract).
- Huang Lishan, Hou YiJun, Yang Hong, Wang Jianchao, Zhao Yi, Zhang Li. 2015. CSAMT data interpretation by fine processing and constraint inversion in the porphyry copper deposit[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 39(4): 817-822(in Chinese with English abstract).
- Huang Lishan, Jing Rongzhong, Pei Chao. 2016. Geophysical characteristics and deep prospecting prediction of Xinjiang Zhaosu Aerqieletawu Pb-Zn deposit[J]. Mineral Resources and Geology, 30(6): 955-963(in Chinese with English abstract).
- Li Fu, Wang Yonghua, Wu Wenxian. 2009. The application of the EH-4 electromagnetic imaging system to the detection of concealed structure[J]. Geology in China, 36(6): 1375-1381(in Chinese with English abstract).
- Li Hong, Yu Jianbao, Lü Hui, Xiao Pengfei. 2017. Gravity and aeromagnetic responses and heat-controlling structures of Xiongshan geothermal area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 41(2): 242-248.
- Li Hongwei. 2018. Deep electrical characteristics and identification of ore controlling faults system of Anba ore section in the Yangshan gold-ore belt of Gansu province[J]. Progress in Geophysics, 33(5): 1919-1926(in Chinese with English abstract).
- Li Qiaoling, Lei Xiaodong, Yang Yong, Yang Quanhe, Li Chen, Guan Wei, Sun Jiefu. 2019. A study of flow path in Yuquanshan area of western Beijing based on integrated geophysical technology[J]. Geology in China, 46(2): 346-358(in Chinese with English abstract).
- Li Wei, Liu Cuihui, He Genwen. 2017. The application of soil mercury survey method to the exploration of concealed mineral

- resources in Yinnao, Yudu area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 41(5): 840–845(in Chinese with English abstract).
- Li Zhimin, Zhang Jin, Tian Qinjian, Zhang Junlong, Tu Hongwei. 2009. A discussion on the development model of the concealed fault along the Huangshui River in Xining[J]. Geology in China, 36(6): 1245–1250(in Chinese with English abstract).
- Liang Shengxian, Zhang Shengye, Huang Lishan, Sun Shichao. 2012. The powerline interference in the magneto– electrotelluric exploration[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 36(5): 813–816(in Chinese with English abstract).
- Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli, Wang Guiling. 2013. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. Geology in China, 40(1): 312–321(in Chinese with English abstract).
- Liu Chunlai, Tuo Xianguo, Huang Lianmei. 2011. The deduction of the strike of the geological concealed fault based on underground radon measurement[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 35(2): 226–229(in Chinese with English abstract).
- Liu Jinghua, Wang Zhuwen. 2005. Division scheme of the geological mapping units in shallow cover areas based on ground integrated geophysical methods[J]. Geology in China, 32(1):162–167(in Chinese with English abstract).
- Lu Lina, Yang Ming, Li Jing. 2018. The application of soil– gas mercury detection to the Xiadian fault zone[J]. Geology and Exploration, 54(1): 112–120(in Chinese with English abstract).
- Meng Guangkui, He Kaiming, Ban Tie. 1997. Study on activity and segmentation of active fault using measurements of radon and mercury gases[J]. Earthquake Research in China, 13(1): 43–51 (in Chinese with English abstract).
- Qi Bangshen, Feng Chengjun, Tan Chengxuan. 2019. Application of comprehensive geophysical– drilling exploration to detect the concealed North Boundary active Fault Belt of Yanqing– Fanshan Basin in Sangyuan town, Beijing–Zhangjiakou area[J]. Geology in China, 46(3): 468–481(in Chinese with English abstract).
- Sun Bo, Li Tonglin, Li He, Wu Liang, Zhu Cheng. 2015. Study on the sounding of CSAMT[J]. Progress in Geophysics, 30(2): 836–839.
- Wang Guohua, Jiang Jingye, Dong Yong. 2002. The application of soil mercury vapor survey to the prospecting for concealed ore deposits in West Tianshan high and cold mountain areas[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 26(5): 372–375.
- Wen Long, Liang Bi, Wang Quanwei. 2013. Radon survey and fault activity in concealed faults on the chengdu plain[J]. Acta Geologica Sichua, 33(3): 257–261(in Chinese with English abstract).
- Xia Xunyun, Li Yi, Wang Shenlong. 2013. The application of csamt exploration to detecting urban concealed faults[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 37(4): 687–691.
- Xu Jianyu. 2016. The application of seismic method to the investigation of active faults in urban shallow Quaternary sediment area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 40(6): 1103–1107(in Chinese with English abstract).
- Yao Daoping, Xu Yixi, Zhang Yonggu. 2009. The application of geochemical method to surveying urban concealed faults[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 33(5): 548–551(in Chinese with English abstract).
- Zeng Xu, Chen Yuanrong, Lin Libao. 2016. The feasibility of applying integrated hydrocarbon and mercury method to ore prospecting in alluvial coverage area[J]. Geology in China, 43(2): 607–616(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianwei, Zhao Quansheng, Guo Xiuyan. 2010. The Liaocheng– Lankao fault and its mercury and radon anomalies[J]. Geology in China, 37(5): 1419–1425(in Chinese with English abstract).
- Zhang Kai, Lin Niantian, Nie Xikun, Tian Gaopeng, Wang Xiaodong. 2019. Strategies of anti–jamming data acquisition and processing for exploration of deep goaf based on controlled– source audiomagnetotellurics[J]. Progress in Geophysics, 34(5): 2119–2127(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei, Wang Guiling, Liu Feng, Xing Linxiao, Li Man. 2019. Characteristics of geothermal resources in sedimentary basins[J]. Geology in China, 46(2): 255–268(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曾旭, 陈远荣, 林立保. 2016. 烃汞综合气体测量法在冲洪积覆盖区找矿的可行性探讨[J]. 中国地质, 43(2):607–616.
- 陈长敬, 刘圣博, 黄理善. 2019. 音频大地电磁测深(AMT)约束下的重力三维反演应用研究——以越城岭岩体北缘隐伏岩体为例[J]. 地球物理学进展, 34(4):1391–1397.
- 董好刚, 路韬, 何万双, 黎义勇, 曾敏. 2016. 珠江三角洲沙湾断裂带第四纪活动性研究[J]. 中国地质, 43(5):1803–1813.
- 付光明, 黄进调, 刘阳, 李晓兵, 陈国玉, 黄艺. 2019. 高密度电阻率法与CSAMT法在江西会昌县坝背地热勘查中的综合探测[J]. 中国地质, 46(4): 927–936.
- 洪增林, 张银龙, 周阳. 2019. 关中盆地南部山前中深层地热资源赋存特征及应用[J]. 中国地质, 46(5):1224–1235.
- 黄理善, 丁汝福, 敬荣中. 2016. 新疆昭苏阿尔恰勒他乌铅锌矿床地球物理特征与深部找矿预测[J]. 矿产与地质, 30(6):955–963.
- 黄理善, 侯一俊, 杨红, 王建超, 赵毅, 张力. 2015. 斑岩型铜矿床带条件约束的CSAMT数据精细处理和反演解释[J]. 物探与化探, 39(4):817–822.
- 李富, 王永华, 吴文贤. 2009. EH–4电磁成像系统在隐伏构造探测中的应用[J]. 中国地质, 36(6):1375–1381.
- 李弘, 俞建宝, 吕慧, 肖鹏飞. 2017. 雄县地热田重磁响应及控热构造特征研究[J]. 物探与化探, 41(2):242–248.
- 李宏伟. 2018. 甘肃阳山金矿带安坝矿段深部电性特征及控矿断裂系统的识别[J]. 地球物理学进展, 33(5):1919–1926.
- 李巧灵, 雷晓东, 杨勇, 杨全合, 李晨, 关伟, 孙杰夫. 2019. 北京西郊玉泉山地区岩溶水强径流路径地球物理分析[J]. 中国地质, 46(2):346–358.
- 李伟, 刘翠辉, 贺根文. 2017. 壤中汞气测量在于都营脑隐伏矿产勘

- 查中的应用[J]. 物探与化探, 41(5): 840-845.
- 李智敏, 张进, 田勤俭, 张军龙, 屠泓为. 2009. 西宁湟水河隐伏断裂发育模式探讨[J]. 中国地质, 36(6): 1245-1250.
- 梁生贤, 张胜业, 黄理善, 孙士超. 2012. 大地电磁勘探中的电力线工频干扰[J]. 物探与化探, 36(5):813-816.
- 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 王贵玲. 2013. 中国地热资源及其潜力评估[J]. 中国地质, 40(1):312-321.
- 刘春来, 庾先国, 黄连美. 2011. 地下氦气测量推断隐伏断层走向[J]. 物探与化探, 35(2): 226-229.
- 刘菁华, 王祝文. 2005. 地面综合物探方法在浅覆盖区地质填图单元的划分研究[J]. 中国地质, 32(1):162-167.
- 陆丽娜, 杨明, 李静. 2018. 土壤气汞探测在夏垫断裂带的应用研究[J]. 地质与勘探, 54(1): 112-120.
- 孟广魁, 何开明, 班铁. 1997. 氦、汞测量用于断裂活动性和分段的研究[J]. 中国地震, 13(1): 43-51.
- 戚帮申, 丰成君, 谭成轩. 2019. 京张地区延矾盆地北缘活动断裂带桑园镇隐伏段综合地球物理及钻孔地层剖面研究[J]. 中国地质, 46(3):468-481.
- 孙博, 李桐林, 李鹤, 伍亮, 朱成. 2015. 可控源音频大地电磁测深法勘查深度研究[J]. 地球物理学进展, 30(2): 836-839.
- 王国华, 蒋敬业, 董勇. 2002. 利用壤中汞气测量在西天山高寒山区寻找隐伏矿的研究[J]. 物探与化探, 26(5): 372-375.
- 文龙, 梁斌, 王全伟. 2013. 成都平原隐伏断层氦气特征及断层活动性判别[J]. 四川地质学报, (3): 257-261.
- 夏训银, 李毅, 王身龙. 2013. CSAMT 在城市隐伏断层探测中的应用[J]. 物探与化探, 37(4): 687-691.
- 徐建宇. 2016. 地震方法在城市浅覆盖区活断层调查中的应用[J]. 物探与化探, 40(6): 1103-1107.
- 姚道平, 许仪西, 张永固. 2009. 地球化学方法控制性探测城市隐伏断层[J]. 物探与化探, 33(5): 548-551.
- 张建伟, 赵全升, 郭秀岩. 2010. 聊城—兰考断裂及其土壤汞、氦气异常[J]. 中国地质, 37(5):1419-1425.
- 张凯, 林年添, 聂西坤, 田高鹏, 王晓东. 2019. 用于深部采空区探测的可控源音频大地电磁法抗强干扰数据采集及处理策略[J]. 地球物理学进展, 34(5): 2119-2127.
- 张薇, 王贵玲, 刘峰, 邢林啸, 李曼. 2019. 中国沉积盆地型地热资源特征[J]. 中国地质, 46(2):255-268.