

音频大地电磁法在山南邱多江地区地热勘查中的应用

王虹霖, 张荣明*, 谌旭辉, 邱东, 索晓凯

中国地质调查局应用地质研究中心, 四川 成都

收稿日期: 2022年8月10日; 录用日期: 2022年9月8日; 发布日期: 2022年9月14日

摘要

在传统含义中, 只有对环境污染少、排放少的能源才能被称作清洁能源。人们利用较好的清洁能源之一的地热资源就是其中最典型的代表。作为可再生的能源, 开发利用地热资源已越来越受到很多国家的重视, 特别是能源紧缺的国家和地区。西藏自治区山南市邱多江地区地热资源丰富、开发潜力大。而物探手段具有效率高、成本低、适应强等优点, 为查明工作区地热资源深部储量, 此次主要利用音频大地电磁测深(AMT)在山南市邱多江地区进行地热资源勘察, 在对工区地形、地质条件进行分析的基础上, 利用音频大地电磁测深进行反演, 结合当地地热资源及地质条件, 对图件进行分析解译, 查明勘察区内地层岩性分布、岩溶裂隙发育带等取得较好应用, 为当地后期开发地热资源提供了可靠的物理勘探基础, 同时也证明了在地热资源勘查中, 音频大地电磁测深法的有效性。

关键词

音频大地电磁测深, 地热勘查, 邱多江

Application of Audio Magnetotelluric Method in Geothermal Exploration in Qiuduojiang Area, Shannan

Honglin Wang, Rongming Zhang*, Xuhui Chen, Dong Qiu, Xiaokai Suo

Applied Geology Research Center, China Geological Survey, Chengdu Sichuan

Received: Aug. 10th, 2022; accepted: Sep. 8th, 2022; published: Sep. 14th, 2022

Abstract

In the traditional meaning, only energy with less environmental pollution and emission can be

*通讯作者。

文章引用: 王虹霖, 张荣明, 谌旭辉, 邱东, 索晓凯. 音频大地电磁法在山南邱多江地区地热勘查中的应用[J]. 自然科学, 2022, 10(5): 790-801. DOI: 10.12677/ojns.2022.105091

called clean energy. Geothermal resource, one of the better clean energy sources, is the most typical representative. As a renewable energy, the development and utilization of geothermal resources has been paid more and more attention by many countries, especially those countries and regions with energy shortage. Qiuduojiang area in Shannan City, Tibet Autonomous Region is rich in geothermal resources and has great development potential. Geophysical prospecting has the advantages of high efficiency, low cost and strong adaptability. In order to find out the deep reserves of geothermal resources in the work area, this time, audio magnetotelluric sounding (AMT) is mainly used to survey geothermal resources in Qiuduojiang area, Shannan City. Based on the analysis of topographic and geological conditions in the work area, audio magnetotelluric sounding is used for inversion, and the maps are analyzed and interpreted in combination with local geothermal resources and geological conditions. Finding out the lithology distribution and karst fissure development zone in the survey area has achieved good application, which provides reliable geophysical basis for local geothermal resources development in the later period, and also proves the effectiveness of audio magnetotelluric sounding method in geothermal resources exploration.

Keywords

Audio Magnetotelluric Sounding, Geothermal Exploration, Qiuduojiang

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着近年来祖国经济的蓬勃发展,以及国家对绿水青山环保理念的高度重视。人们对清洁能源和可再生能源等话题探讨更加的激烈。但是,地热资源作为一种综合性矿产资源,其特点是用途广、作用多,作为清洁资源被越来越多的人所青睐。在青藏高寒地区地质条件复杂,地热资源丰富、分布广、储量大,开发前景利用广阔。确定温泉深部热源所在位置并开发利用,不仅保障当地农牧民生活用水,旅游观光资源合理开发的同时也为当地百姓创收增收,提高居民生活水平,在国家稳边固边的战略背景下贡献地质力量。

在众多的勘探方法中,音频大地电磁测深(AMT)法能有效的识别断层、构造及岩体与边界等地质要素。覃田赐[1]等人对江西丰城的地热进行研究,发现音频大地电磁法能够很好的划分出地下热储层结构和通道,确定热储断裂带位置及盖层、热储层的埋深及空间分布情况;闵刚[2]等人对四川广元浅层地质调查中,利用 AMT 方法能有效识别出深部断层构造,圈出与围岩具有电性差异的岩体及地层边界;朱丽丽[3]等人在泸沽湖地区利用 AMT 很快的确定热储断裂带位置及盖层、热储层的埋深及空间分布情况。相较其他的物理手段音频大地电磁具有明显的优势,即采用天然场源没有近场效应影响,多次叠加性噪比高,并且整体仪器轻巧方便,便于携带效率高等优势。近年来,音频大地电磁测深法作为一种成熟的物理勘查手段,在各地的地热勘察中都取得了较为理想的效果[1] [2] [3],也为本次地热勘察物探方法选择提供了借鉴。

本文在充分搜集前人资料的基础上,利用 V8 多功能电法工作站,在重点区域采用音频大地电磁测深(AMT)法对 2000 米以浅的范围进行重点解剖,基本查明了测区内地下热储及与热储有密切联系的断裂构造在平面及地下空间的分布情况及展布形态,为进一步开展后续钻探作业提供了物探依据。

2. 工作区地质背景与物性特征

邱多江乡地处邱多江地堑内，山南地区最高雪山雅拉香布和亚堆扎拉山东面山脚，境内高山峡谷多，地堑的走向总体 15°~20°。工区位于地堑南部，主要为低缓的丘陵或台地。工区内主要的水系大致为南北走向，并属于雅鲁藏布江和隆子雄曲的支流[4]。

2.1. 构造地质特征

工区整体海拔在 4400 m 左右，其海拔最高的山属雅拉香波雪山，海拔在 6600 m 左右，并被当地人奉为神山。工区内有断层发育，主要地层为古生界曲德贡岩组(Pt3Cq)的大理和千枚岩及钙质板岩等。元古界亚堆扎拉组(Pt1y)变质的黑云斜长片麻岩及二云石英片岩等。上三叠统涅如组(T3n)的岩屑石英砂岩夹粉砂质绢云板岩[5]。邱多江地堑横切了雅拉香波片麻岩穹窿偏东的一侧，并且地堑的西缘主边界断裂带受到早先存在的片麻岩穹窿体影响，造成断裂带呈现南东东方向的形态，由上反映出邱多江地堑形成在片麻岩穹窿构造之后。根据前人的调查资料[6]，邱多江地堑为一半地堑式盆地，主边界断裂为地堑西缘高角度右旋走滑正断层，控制着地堑的形成和演化。地堑东缘推测有一条平行于主边界断裂的正断层。地堑内次级断层在测区内的展布情况，因第四系覆盖较厚，情况未知。

2.2. 工作区地下水特征

工区内地下水主要类型为基岩山区地下水和第四系松散岩类孔隙地下水，受地形地貌、地质构造、水文天气及地层岩性等因素的相互影响，其补给、径流和排泄情况分别如下：

- 1) 基岩山区地下水主要为层状和块状岩裂隙地下水等，主要的补给方式为大气降雨；径流方式则主要沿着构造裂隙及断裂构造带向底部侧向运移；排泄方式分为补给山前第四系松散类孔隙地下水、蒸发及阻水带聚集成泉三种[7]。
- 2) 第四系松散岩类孔隙地下水。主要补给为大气降雨及基岩山区地下水侧向补给；径流方式在重力作用及地形的双重影响下由高到低侧向运移；排泄方式为蒸发及补给河流两种。

2.3. 物性特征

因音频大地电磁测深法(AMT)和结果解译的基础是建立在岩矿石的电性差异及其特征之上的[8]，所以针对工作区的电性特点，最终通过收集区内综合资料和采用 MT 首支电阻率统计的方法完成了对电性层的标定，通过以上方法初步明确了勘查区的地球物理特征(见表 1)。

Table 1. Statistical table of electrical characteristics of exploration area
表 1. 勘查区电性特征统计表

地层	代号	首支电阻率	小四级	主要岩性	电性特征描述
		$\Omega\cdot m$	$\Omega\cdot m$		
第四系	Q	44.11	39.81	砂土、砾石	低 - 中阻层
三叠系	T	749.18	767.70	砂岩、板岩	中阻层
元古界 - 寒武系	Pt	1049.59	884.43	片麻岩、片岩	次阻层
元古界 - 岩浆岩	γ	13833.20	10605.74	花岗岩	高阻层

由上表可以看出, 勘查区内可大致分为 4 个电性层, 第一电性层为第四系, 为低 - 中阻层; 第二电性层三叠系, 为中阻层; 第三电性层为元古界 - 寒武系, 为次高层; 第四电性层位元古界和岩浆岩, 为高层。主要岩性分别为砂土砾石、砂岩板岩、片麻岩片岩及花岗岩[9]。因地下水比围岩的电阻率低, 存在较大的电性差异, 所以为本次音频大地电磁测深法(AMT)提供了较好的物理基础。

3. 音频大地电磁数据采集与处理

3.1. AMT 方法简介

音频大地电磁测深法(AMT)与大地电磁测深法(MT)的原理和工作方法大致相同, 区别在于各自使用的频率范围和浅部地质体分辨率的高低不同[8]。它是频率域交变电流法, 采集频段 400 Hz 到 20,000 s, 基于导体中不同频率的电磁波具有不同趋肤深度的原理, 测量地表由高频到低频的地球电磁响应序列, 进行相关的数据处理和分析, 得到大地由浅到深的电性结构, 进而研究地下岩矿石电阻率分布规律的一种物探方法[10]。

场源为大地电磁场(天然场), 主要由太阳风与地球磁层、电离层之间复杂的相互作用, 以及雷电活动等这些地球外层空间场源引起的区域性, 乃至全球性的天然交变电磁场, 互相叠加在一起, 形成一个非常复杂的电磁振荡, 当大地电磁场入射到地下时, 一部分被介质吸收衰减, 另一部分带有反映地下介质电性特征的电磁场信息反射到地面, 通过仪器对反射的电磁场信号进行接收, 即采集到关于地下介质电性分布的信息[10][11]。在过去的几十年应用里, 音频大地电磁法已经在方法理论或技术设备上都变得更加成熟, 因其采用天然场源, 并且设备轻便便于携带, 适用于各种复杂地形等优点, 在地下水资源勘察、油气资源勘察和工程隧道勘察等方面得到广泛应用。

3.2. AMT 剖面布置及数据采集

本次物探工作是围绕寻找地下热储及与热储有密切联系的断裂构造而开展的。根据前人实测地质图上断裂带的大致位置、水系分布情况及工作区实际地形条件, 图 1 为本次物探工作测线布置, 总体原则为“突出重点, 循序渐进”。首先在测区内, 以温泉出漏点为中心, 垂直构造方向布置 11 条 NW315°走向的剖面(L1-L11), 线距 200 米, 点距 50。

音频大地电磁数据采集主要采用加拿大凤凰公司(Phoenix)生产的 V8 多功能电法工作站, 观测参数为 Ex、Ey、Hx、Hy, 由于野外工作地形条件较好, 绝大部分测点均采用图 2 所示的十字型装置[12]。根据相关技术规范要求, 同时为保证数据采集质量, 在正式施工前对仪器及磁探头进行标定、一致性及平行实验等一系列工作。在重点勘察区进行了采集增益、采集时长、电极距长度、接地电阻大小及远参考实验。通过对实验数据的分析研究, 考虑到数据的精度及工区干扰情况和施工效率问题, 决定确定采用 x4 增益、66 分钟采集时长、20 米的电极距的数据采集方案。质量检查统计结果视电阻率均方相对误差和相位均方相对误差小于 5%。根据相应实验结果显示, 符合相关规范要求, 说明所有投入使用的仪器性能良好, 数据采集质量可靠。

3.3. 音频大地电磁数据处理

AMT 资料的处理分为三大步骤, 其一为时间序列的预处理, 其二为干扰频点的识别、剔除与圆滑, 其三为一维和二维反演。

首先是时间序列的预处理, 利用 SSMT2000 软件对原始采集文件的采集时间进行检查, 确保各台仪器之间的重叠时间段大于 1 小时。把采集的时间序列进行傅立叶变换, 并且同时选择的采集数据须与傅立叶变换频率参数相同; 再对每个测点文件进行傅立叶变换运算, 由时间序列计算出频率 - 电阻和频率

- 相位的 **crosspower** 数据。其次是干扰频点的识别、剔除与圆滑利用 **Mteditor** 软件对每个测点进行仔细的处理，重点识别跳点、干扰点和误差较大的点等。**图 3** 是部分点位频点处理前后对比，整体原则：剔除明显的跳点；剔除误差棒过大的点；剔除相位反向的点；保持单频点下的整体数据趋势；保持所有频点下的整体数据趋势。

对于处理不掉的跳点在后期处理过程中根据曲线整体趋势进行平滑处理。数据的圆滑处理是预处理后的数据利用 **WINGLINK** 软件进行的。**D+函数圆滑法**、**数值圆滑法**和 **sutarno 相位一致性法**这三种是处理大地电磁视电阻率和相位曲线的圆滑方法，其过程的实质是一种滤波[13]。在处理前针对不同圆滑方法的效果进行了数值试验，以确定最佳的圆滑方法。

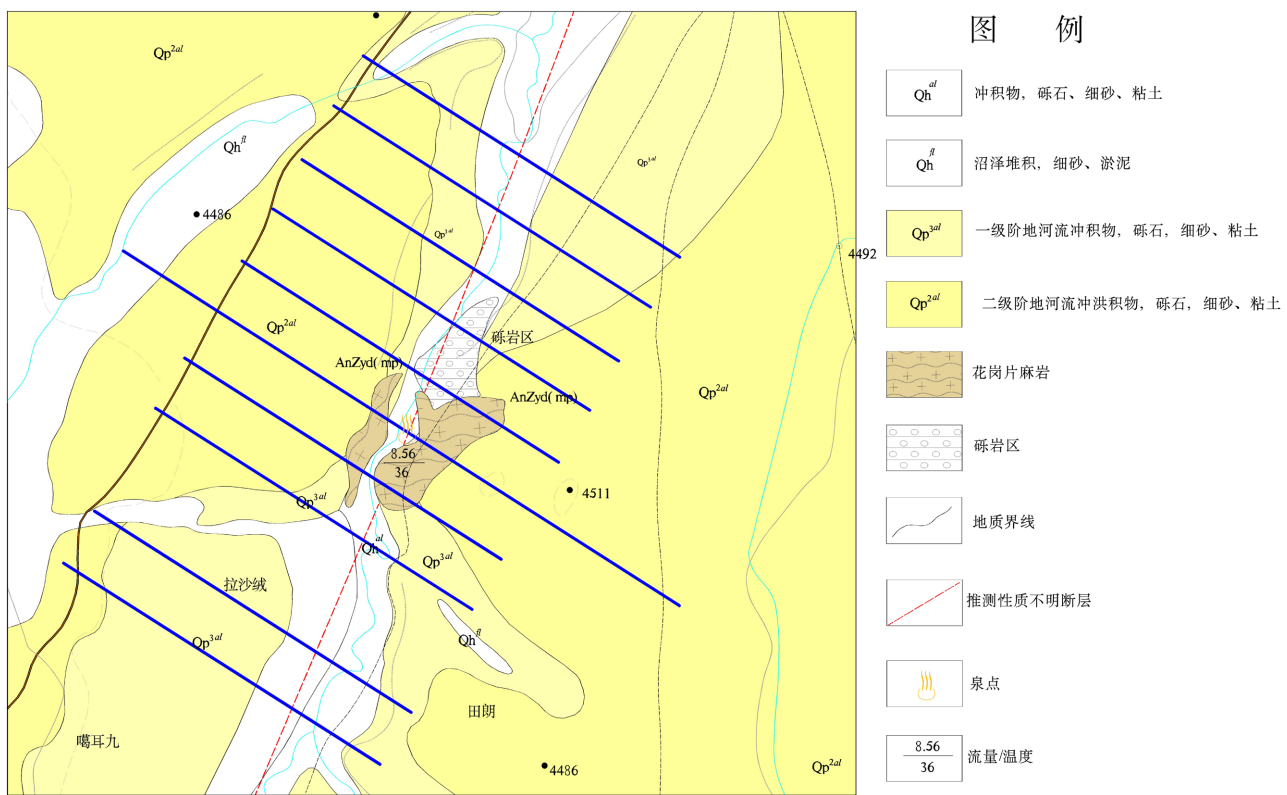


Figure 1. Regional geological map of Qiuduojiang area and AMT survey line layout
图 1. 邱多江地区区域地质图及 AMT 测线布置

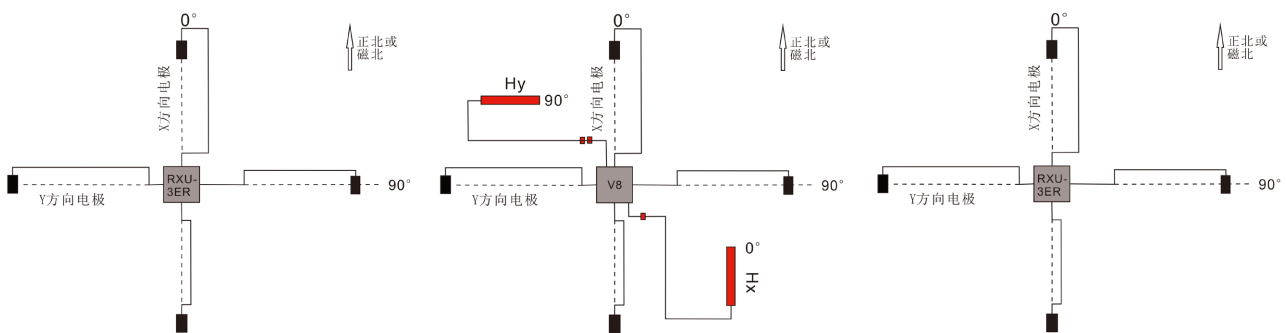


Figure 2. Schematic diagram of measuring device
图 2. 测量装置示意图

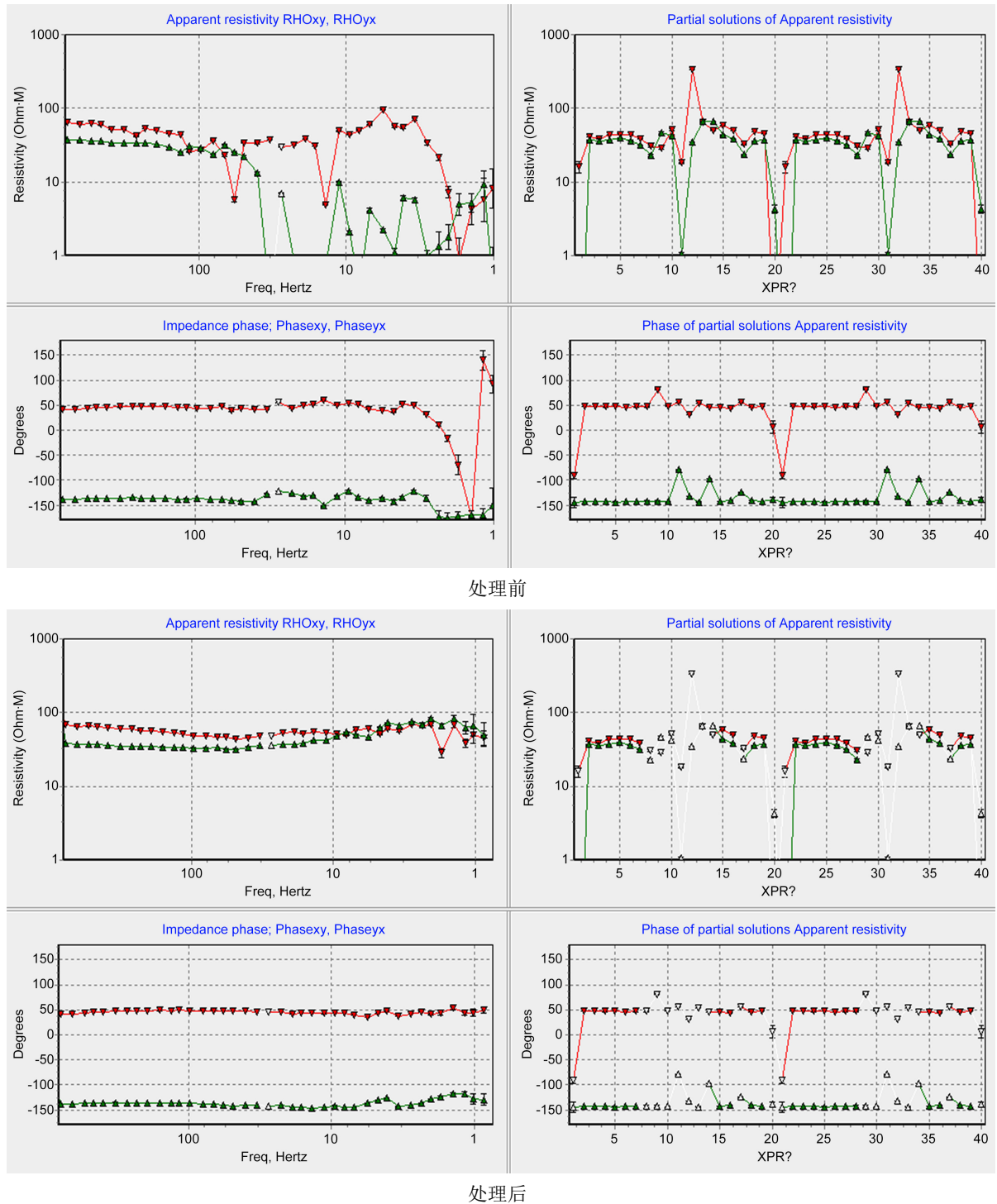


Figure 3. Comparison of frequency points before and after processing
图 3. 部分频点处理前后对比图

根据图 4 显示, 最逼近原始曲线的是数值圆滑法, 其次为 D+函数圆滑法。而 sutarno 相位一致性法效果最差, 之所以会出现这种情况, 可能是其假设的阻抗函数在实际数据中不符合其最小相位的要求。而最接近原始曲线的数值圆滑法则是没有物理假设的前提下直接进行的低通滤波。sutarno 相位一致性方

法和 D+函数圆滑方法仅仅在高频部分数个频点有所区别,重点的低频段区别不大。考虑到后期的一维拟合问题,因此使用 D+函数圆滑。

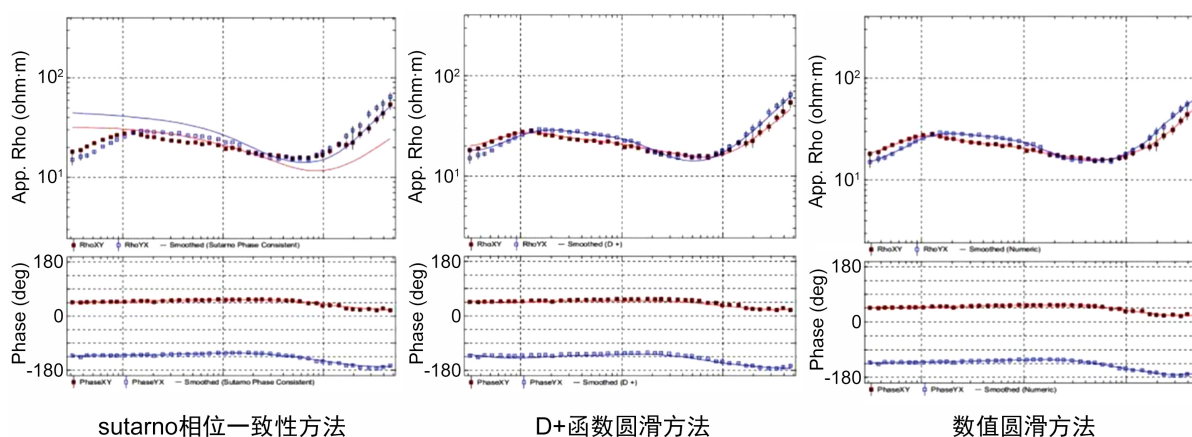


Figure 4. Comparison of effects of different smoothing methods

图 4. 不同圆滑方法效果对比图

在对音频大地电磁数据进行二维反演前,必须要先确定剖面工区的构造走向,并将 AMT 数据旋转与构造走向方位一致,后再将 AMT 数据分解成 TE/TM 两组独立的极化模式,最后通过二维反演获取较准确的电性结构信息。图 5 所示,在 AMT 的全频段(0.001~1 s)电性主轴方向的分布规律比较一致,玫瑰图中具有明显的优势主轴方向,可以判定在此频率段内,主轴方向为北东 60°左右,即为构造走向方向北东向 60°左右。利用二维非线性共轭梯度算法在采取不同的模式参数进行了反演,发现 TM 模式中频率和相位各占 50%的情况下,TE 模式中参与反演的频率和相位数据占比是影响最终效果的关键。如图 6(a) TE 模式下频率和相位各占 50%,呈现出“挂面条”状态;图 6(b) TE 模式下频率占比 20%,相位占比 5%,呈现出地层相对平缓的状态;结合地质资料分析,图 6(a)的结果与实际相吻合。由此可见,TE 模式下频率和相位的数据占比情况对最终反演结果的影响是巨大的。

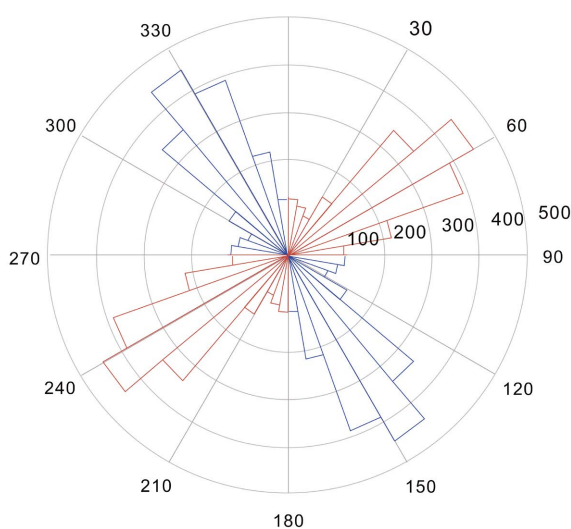
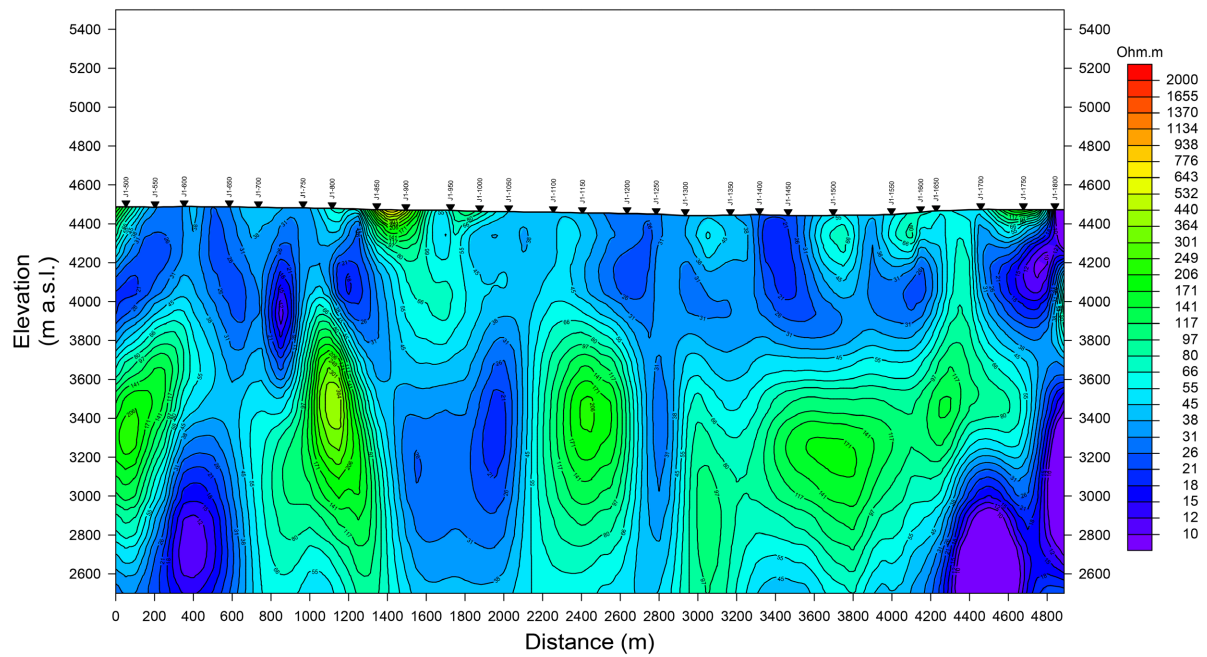
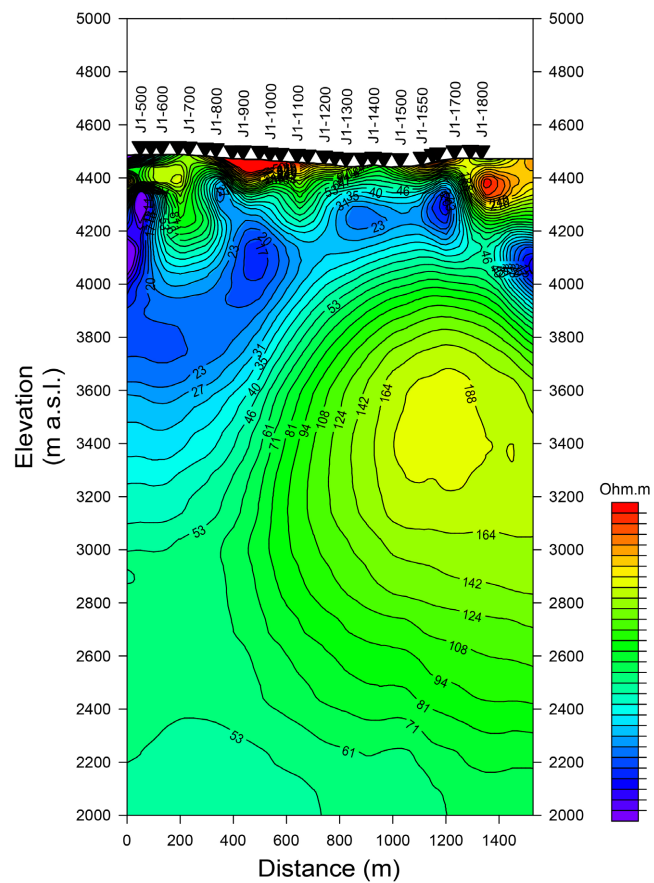


Figure 5. Rose diagram of 0.0001~1 s phase tensor

图 5. 0.0001~1 s 相位张量玫瑰图



(a) 频率和相位数据占比各 50%



(b) 数据占比频率 20%、相位 5%

Figure 6. Inversion comparison chart of frequency and phase ratio**图 6.** 频率、相位占比反演对比图

最后为反演，主要思路为利用 OCCAM 对视电阻率进行一维反演，了解工区大致的电性结构特征，在此基础上将一维反演的结果作为二维反演的初始模型，再利用带地形的非线性共轭梯度法进行二维视电阻率反演[14]。纵观全区一维反演结果，大部分测点为 4 层结构，少部分为 3 层结构。图 7 所示的 1 号点为低-次高-低-高的特征(KH 型)，2 号点为逐渐升高的特征(AA 型)，3 号点为高-低-次高的特征(H 型)，4 号点为低-次高-低-次高的特征(KH 型)。一维反演误差绝大部分在 2%~5%之间，少量在 6%~8%之间。二维反演将一维反演的结果作为反演的初始模型。为了避免边界效应，东西各扩边 1000 米，深度扩边至-1500 米。横向上保证每个测点均有单独的网格控制，纵向上由浅至深逐级稀疏，深部保证 50 米的一个单独网格控制。首先进行 5 次迭代，对于拟合误差过大的点，进行静态矫正后，重新进行反演，大部分迭代 100~200 次即可。拟合误差 2%~4%之间。

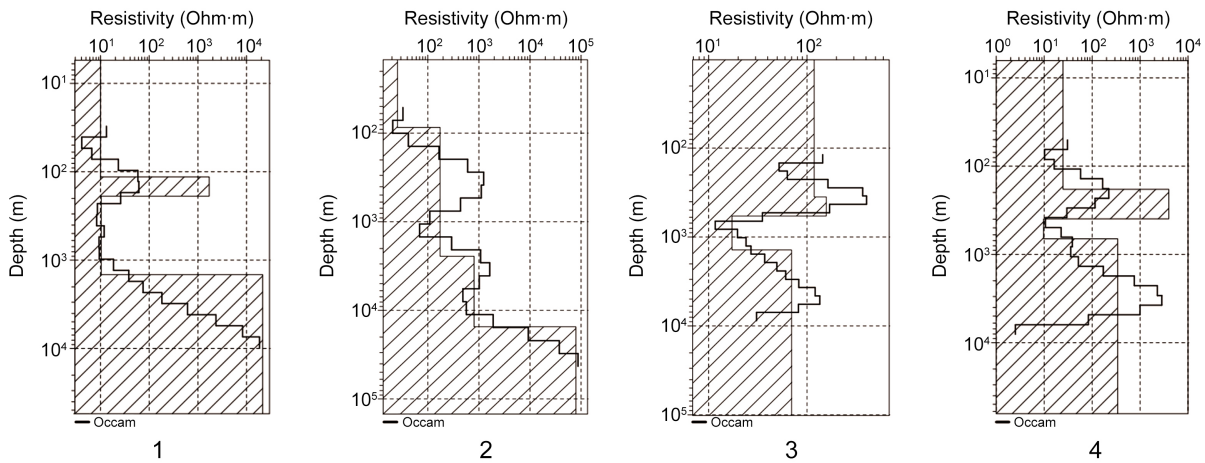


Figure 7. One-dimensional inversion results of typical survey points
图 7. 部分典型测点一维反演结果图

4. 成果解释

4.1. 推断解释准则

1) 破碎的岩性接触面及裂隙发育带的岩石导水性较好，在赋存地下水的条件下视电阻率或波速降低。在断面图中，断裂构造通常呈现出带状的低阻或低速。根据断裂与围岩电性差异，在等值线断面图中表现出漏斗状、带状或“V”字形等图案时[15][16]，并出现低阻或低速的特征，就基本可认定为物探的异常标志了。再结合工区实际的地质情况，大致可推断为断裂构造。

2) 对于不含水断裂，由于其赋水性较差，表现为电阻率或速度等值线的突变状、错断状。

3) 通过岩石的电性特征，围岩中电阻率较低的含水构造破碎带或砂砾岩，完整的岩层透水性较差，表现出高视电阻率和高波速。赋水的情况下则表现为视电阻率或波速相对较低，在测深断面图上表现为层状或局部圈闭状低阻异常。

4.2. L4 剖面分析

L4 线：剖面全长 1850 米，方位 129° (图 8)。

纵向上：剖面上整体仍然保持着表现为岩浆上涌后所形成的的强变质、中等变质、弱变质结构，以及由伸展构造所控制的含水裂隙带。

横向上：等值线不均匀特征更加明显，整体表现为低阻多，高阻少，核部表现最高阻的形态。在岩

浆上部，各低阻体推测为各岩体受岩浆上涌影响，未逃离的原岩体，产生局部体位移和充水的结果；在两侧则表现为岩石折断产生高角断裂，并沿断裂充水形成低阻带。

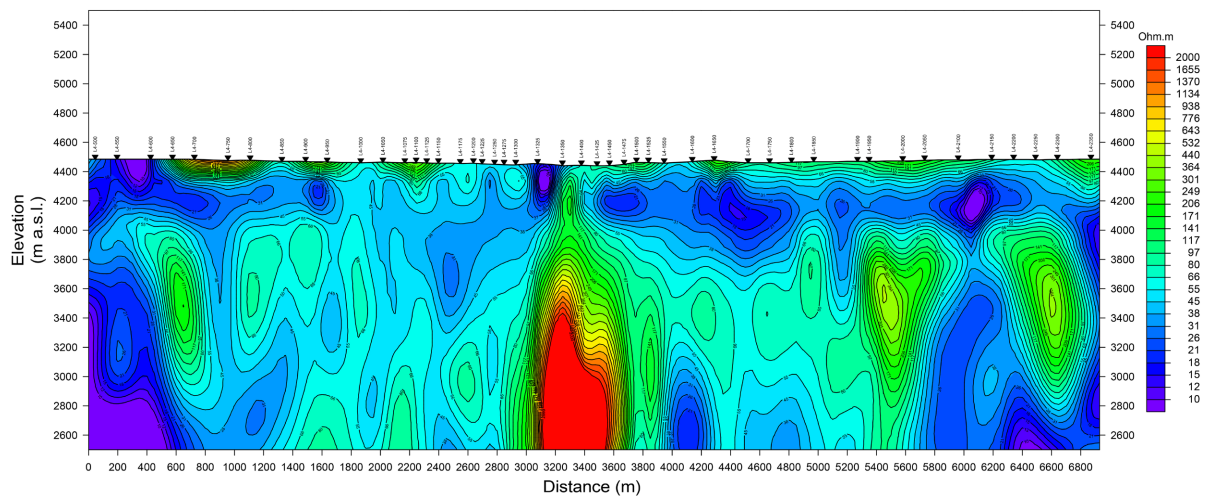


Figure 8. L4 line audio geomagnetic inversion of resistivity cross-sectional view

图 8. L4 线音频大地电磁反演视电阻率断面图

4.3. L5 剖面分析

L5 线：剖面全长 1300 米，方位 129° (图 9)。

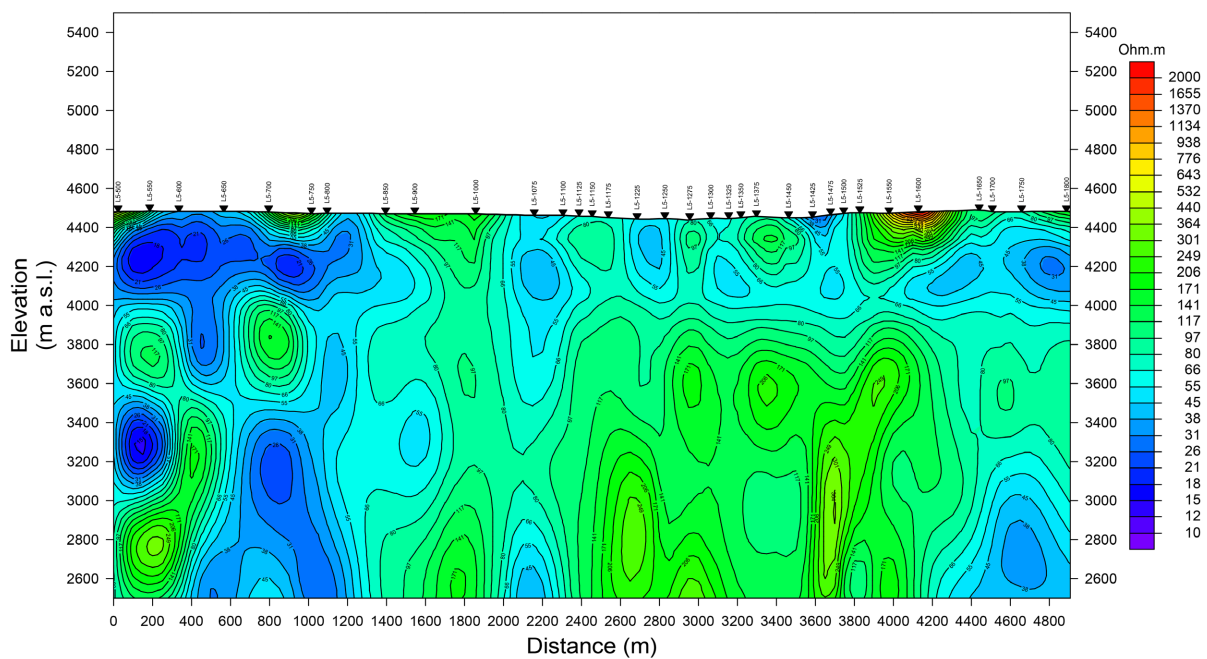


Figure 9. L5 line audio geomagnetic inversion of resistivity cross-sectional view

图 9. L5 线音频大地电磁反演视电阻率断面图

纵向上：剖面上表现为岩浆上涌，保留了较完整的侵入结构，在侵入岩周围出现了较为明显的强变质、中等变质、弱变质结构，以及由伸展构造所控制的含水裂隙带。

横向上：等值线出现明显串珠状特征，测线北西向边缘出现了低电阻区域，推测为地堑北侧正断层的显示。中部存在两个相对独立的富水区域，推测为在拉张的环境下，岩层水进入到岩浆岩裂隙后的充填。

4.4. L6 剖面分析

L6 线：剖面全长 2350 米，方位 129° (图 10)。

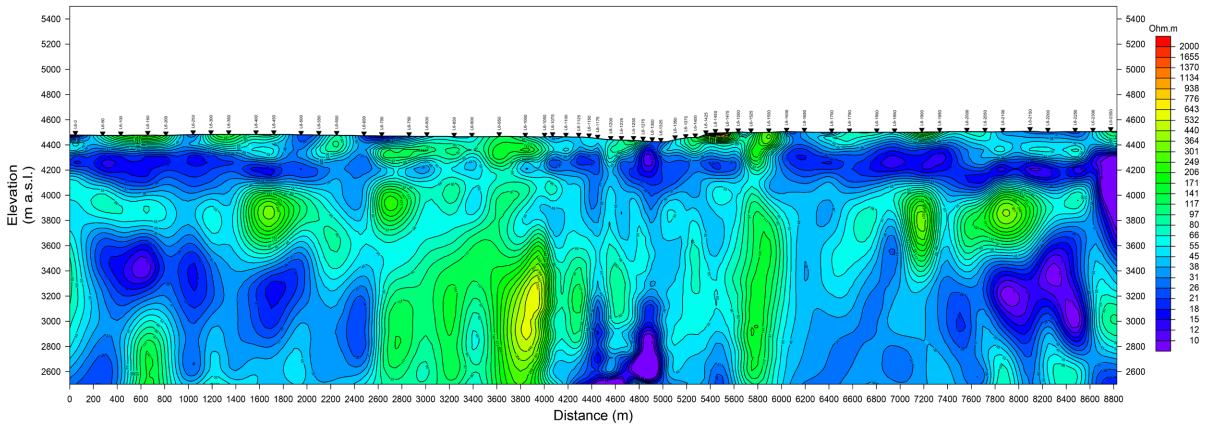


Figure 10. L6 line audio geomagnetic inversion of resistivity cross-sectional view
图 10. L6 线音频大地电磁反演视电阻率断面图

纵向上：测线北西向层状特征明显，但应推测为岩浆上涌强烈挤压，使得岩层折断，产生高角度较陡的岩层特征。其间的串珠状低阻，应该是在构造运动中产生的碎屑充水后的特征。

横向上：等值线出现明显串珠状特征，测线中部存在两个相对独立的富水区域，推测为在拉张的环境下，岩层水进入到岩浆岩裂隙后的充填。整体上来看，岩浆热液应该是由南西方向往北东东方向侵入。

5. 结论

本次工作采用音频大地电磁测深法在邱多江盆地内开展地热勘查工作，通过对反演得到的深部剖面切片进行分析解译，有以下两点认识。

- 1) 工作区断裂带为地下水循环提供了通道，广泛分布的裂隙为温泉的形成提供了补给来源；查明了深部热源与隐伏岩体的关联关系，理清了地下水在深部加热的循环过程，为认识地热系统的形成和演化过程提供了依据。
- 2) 结果表明音频大地电磁法在地热资源勘查中能有效的确定出断裂带位置及盖层的分布情况，也更加说明了音频大地电磁测深法在地热资源勘查中的应用是大有可为的。

致 谢

地质调查局应用地质调查中心吴文贤高级工程师对稿件修改完善提出了高贵的意见；祝杰博士在地质解译和稿件撰写方面提供了许多帮助；项目组物探成员野外一线的辛苦付出，保障了数据的真实可靠；在此表示最真挚的感谢！

基金项目

中国地质调查局项目《西藏错那－察隅地区地热资源调查评价》(编号：ZD20220418)。

参考文献

- [1] 覃田赐, 邓居智, 陈辉, 余辉. 音频大地电磁三维反演在江西丰城地热勘查中的应用[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(14): 5489-5498.
- [2] 闵刚, 王绪本, 张迅, 夏时斌, 孔凡涛, 邓佳良. AMT 法在四川广元宝轮地区中浅部地质调查中的应用[J]. 地质学报, 2017, 91(3): 690-702.
- [3] 朱丽丽, 左焕成, 龚旭, 李功振. 音频大地电磁法在泸沽湖地区地热勘查中的应用[J]. 地质找矿论丛, 2020, 35(4): 468-473.
- [4] 哈广浩, 吴中海, 何林. 藏南邛多江地堑的晚新生代沉积地层及对南北向裂谷形成时代的初步限定[J]. 地质学报, 2018, 92(10): 2051-2067.
- [5] 李政林. 特提斯喜马拉雅打拉二云母花岗岩年代学、地球化学及其动力学意义[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- [6] 吴中海, 张永双, 胡道功, 赵希涛, 叶培盛. 西藏错那-沃卡裂谷带中段邛多江地堑晚新生代正断层作用[J]. 地质力学学报, 2007(4): 297-306.
- [7] 刘明亮. 西藏典型高温水热系统中硼的地球化学研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 中国地质大学, 2018.
- [8] 李竹强. 浅谈阿什里地区 MT 电性模型的建立[J]. 内蒙古石油化工, 2012, 38(15): 56-57.
- [9] 徐坤, 李小庆, 常钰斌, 王鹏, 王阳玲, 欧栋. AMT 和 MT 联合探测技术在地下水勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2018, 15(3): 391-396.
- [10] 陈业斗, 杜文龙, 孙立鹏. 音频大地电磁法(AMT)在某铜矿勘查中的应用[J]. 山东煤炭科技, 2015(6): 158-160.
- [11] 田占峰, 毛星, 罗旭, 金胜, 叶高峰. 音频大地电磁测深法在电性结构研究中的应用——以郯庐断裂带宿迁段为例[J]. 物探与化探, 2016, 40(4): 732-736.
- [12] 王通. 大地电磁测深信号的高阶谱估计及应用研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [13] 祁晓雨, 许广春, 李志华. 天然源大地电磁法在构造勘察中的应用研究[J]. 铁道工程学报, 2011, 28(12): 11-14+30.
- [14] 赵维俊, 孙中任. 大地电磁阻抗张量旋转方法和曲线圆滑方法的比较[J]. 物探与化探, 2013, 37(6): 1125-1132.
- [15] 秦善强, 胡玉平, 赵学平. AMT 法在矿区金属矿勘查中的应用[J]. 长江大学学报, 2011, 8(8): 39-41+277.
- [16] 王强. 沂沭断裂带西缘昌乐县中部地区地热成热地质条件调查与分析[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.