



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.03.021

卢放, 阎红霞, 胡文广. 阜平县变质岩地区基岩裂隙水的电性特征[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(3): 126-131. LU Fang, YAN Hong xia, HU Wen guang. Electrical properties of bedrock fissure water in metamorphic rock area of Fuping County[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(3): 126-131. (in Chinese)

阜平县变质岩地区基岩裂隙水的电性特征

卢放¹, 阎红霞², 胡文广¹

(1. 中国地质调查局 水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051;
2. 河北大学 建筑工程学院, 河北 保定 071002)

摘要: 查明太行山缺水地区变质岩裂隙水水文地质特征与其电性特征之间的关系, 有助于分析该地区基岩裂隙水的赋存规律。阜平县是典型的太行山变质岩缺水地区, 根据区域地质资料, 采用音频大地电场法、放射性法、音频大地电磁法和激电法对比研究了变质岩裂隙水的电性特征, 形成了一套高效合理的寻找地下水富水部位的技术方法组合。结果表明, 阜平县变质岩裂隙水地区水文地质特征与其电性特征之间具有明显的一致性。阜平县变质岩基岩裂隙水地区的地下水勘查具有很强的实践意义, 为此类变质岩分布区地下水的找寻起到了示范作用。

关键词: 电性特征; 地层特征; 变质岩裂隙水; 断层

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)03-0126-06

Electrical properties of bedrock fissure water in metamorphic rock area of Fuping County

LU Fang¹, YAN Hong xia², HU Wen guang¹

(1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, Baoding 071051, China;
2. College of Civil Engineering and Architecture, Hebei University, Baoding 071002, China)

Abstract: To find out the relationship between the hydrogeological properties and electrical characteristics of metamorphic rock fissure water in water shortage areas of Taihang Mountains contributes to analyse occurrence patterns of metamorphic rock fissure water. The metamorphic rock area in Fuping County is a typical water shortage area. Based on the regional geological data, we studied the electrical properties of metamorphic rock fissure water using audio frequency telluric electricity field method, radioactivity exploration, audio frequency magnetotelluric method, and induced polarization method. An efficient and rational combination of technical methods to search rich part of underground water was formed. The results showed that there is evident consistence between the hydrogeological properties and electrical characteristics of the metamorphic rock fissure water in Fuping County. The groundwater exploration in the metamorphic rock fissure water area in Fuping County has huge practical significance, and it will serve as an example for finding groundwater in other metamorphic rock areas of this type.

Key words: electrical characteristics; strata characteristics; metamorphic rock fissure water; fault

位于太行山和五台山余脉交汇处的河北省保定市阜平县, 其区域地下水分布规律主要受新华夏系构造体系的控制, 地下水类型主要为松散岩类孔隙

水和变质岩类裂隙水, 地下水分布规律较为复杂。该县地表水、浅层地下水水质差, 泉水水量小, 深部地下水开采程度低, 严重影响人民生活、制约经济发

收稿日期: 2016-04-15 修回日期: 2016-05-23 网络出版时间: 2017-05-07
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170507.0920.008.html>
基金项目: 国土资源部地质调查项目(121201012000150017)

Fund: Geological Survey Project of Ministry of Land and Resources of the PRC (121201012000150017)

作者简介: 卢放(1977-), 男, 湖北随州人, 高级工程师, 博士, 主要从事水文地质方面的研究。E-mail: lufang1977@126.com

通讯作者: 阎红霞(1976-), 女, 河北保定人, 讲师, 博士, 主要从事地质工程方面的教学与研究。E-mail: hongxiayan@126.com

展^[1]。

近六十年来,太行山变质岩地区的基岩裂隙水研究积累了丰富的资料^[6,8]。廖资生认为地质构造制约了基岩裂隙水的分布和富集规律。宋献方认为基岩裂隙水循环机理不清,急需各类技术手段成果对水文参数的研究提供技术支持。

20世纪50年代,太行山变质岩地区的水文地质工作开始起步,近60年来积累了各类丰富的资料^[6,8]。廖资生认为基岩裂隙水以裂隙为主要的贮、导向空间,其地下水运动和富集规律主要受地质构造条件所控制。宋献方认为山区径流减少原因缺乏实验数据的支持,山区水保工程及水利工程对山区基岩水循环影响机理不清,水文参数缺乏,地下水补给机制急需查明。

本次工作以典型的太行山变质岩裂隙水分布区—阜平县为例,研究了该区基岩地下水的电性特征。在搜集、分析区域地质、水文地质资料的基础上,广泛进行了多种方法的探测工作,对各类电性参数分布特征进行了合理的地质—地球物理解释,对比分析了研究区基岩裂隙水的电性特征和水文地质特征。在此基础上,形成了一套高效合理的适合研究区寻找地下水富水部位的技术方法组合。实践证明,该技术方法组合具有高效、快捷、准确的特点,能为地下水的合理利用与保护提供决策依据,具有明显的社会意义。

1 研究区地质概况

选择阜平县史家寨乡凹里村为例对太行山区典

型片麻岩局部富水部位进行研究,其地质特征简述如下:

1 研究区属于风化片麻岩地区。

° 第四系为冲积物,主要为砂、砾石和卵石。

» 基岩为阜平期坊里片麻岩,岩性主要为黑云斜长片麻岩、浅粒岩和角闪斜长片麻岩。

¼ 研究区岩脉发育,辉绿岩、正长斑岩为主,闪长玢岩、石英钠长斑岩次之。

½ 研究区各类地质构造较为发育。

¾ 片麻岩节理发育,呈强风化状态。

∩ 断层破碎带为主要控水构造。

2 研究区电性特征及电探方法的选择

在收集分析前人研究资料的基础上,在凹里村进行了多种电探方法的物性试验工作^[9,12],总结了凹里村研究区地层的电性特征(见表1)。

表1 研究区电性特征

Tab. 1 Electrical properties of research area

岩性	电阻率/($\Omega \cdot m$) ⁻¹	极化率(%)
卵石	> 300	
砂、砾	50~ 200	1.5~ 3.0
风化壳裂隙层	150~ 800	1.5~ 3.0
片麻岩	> 1 000	
岩浆侵入岩	> 2 000	

根据拟解决的关键问题,结合凹里村的地质特征,经过综合分析,给出了研究区不同电探方法的适用范围^[13,14],见表2。

表2 不同电探方法适用性评估

Tab. 2 Suitability assessment of different electrical prospecting methods

方法	电性特征	探测深度	分辨率	工作效率	适用性
直流电阻率法	电阻率	中等	中等	至少6人工作,跑极困难,效率低	不宜适用
音频大地电场法	电位差	中等	较高	2人工作,效率高	适用
音频大地电磁法	电阻率	较深	高	需要3~4人工作,效率高	适用
高密度电法	电阻率	浅	高	效率中等	不宜适用
激电法	极化率	中等	较高	至少6人工作,跑极困难,效率低	适用
地质雷达	介电常数	很浅	高	效率高	不宜适用

分析前期物性试验成果,凹里村的电性特征研究选择了音频大地电场法(audio frequency telluric electricity field method,简称TEF)、放射性法(radioactivity exploration,简称RE)、音频大地电磁法^[15,18](audio frequency magnetotelluric method,简称AMT)和激电法(induced polarization method,简称IP)。根据研究区水文地质条件,上述方法测线的布置应尽量垂直于地质构造体的走向。在满

足各种场地的前提条件下,尽可能多的采用两种及其两种以上的方法,多参数、多角度的总结和提高研究效果。

3 研究区变质岩基岩裂隙水电性特征

阜平县变质岩基岩裂隙水主要赋存于太行山北、中段构造隆起部位各类变质岩裂隙中,其岩性一般为黑云斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩、浅粒岩、

斜长片麻岩和斜长角闪岩等。

在阜平县凹里村进行了地质调查。(1) 地表出露第四系冲积物, 主要由砂、砾构成。(2) 局部出露角闪斜长片麻岩风化壳, 呈现全风化、强风化状态, 裂隙发育明显。(3) 岩脉发育, 主要为闪长岩, 条带状产出, 走向近东西。(4) 地质构造发育, 大致呈东西向展布, 为正断层, 具供水意义。(5) 断层破碎带为主要控水构造, 也是导水通道。因此, 找水方向为风化壳裂隙水、断层构造水以及基岩裂隙水。

在凹里村重点部位布置了地质剖面 A-B (地质剖面 A-B 位置见图 1), 地质剖面见图 2。剖面显示, 凹里村地表分布为第四系砂、砾, 厚度约为 5 m。下伏地层由浅到深依次为角闪斜长片麻岩、浅粒岩和黑云斜长片麻岩。角闪斜长片麻岩为风化壳, 裂隙十分发育, 厚度不足 20 m。剖面前部有闪长岩脉出露地表。剖面中后部有北倾正断层出现。相对下盘, 断层上盘基岩裂隙更为发育。

对比分析了各测线的电性研究成果。

图 3 显示, TEF01 测线(横轴为距离 X , 单位为 m ; 纵轴为电位差 ΔV , 单位为 mV) 的 220 m (电位差为 1.2 mV) 和 TEF03 测线的 250 m (电位差为 1.2 mV) 对应出现电位差低值, 推测为断层的反映。需要注意的是, 其中 TEF01 测线在 220~260 m 之间存在一个宽缓的低值带(电位差为 1.0~1.3 mV), 说明该区域内基岩裂隙十分发育。TEF01 测线 10 m 处以及 TEF02 测线 30 m 处出现电位差高值, 推测为闪长岩脉的影响。阜平至史家寨公路西侧为山体, 凹里村向东约 400 m 为板峪河, 第四系覆盖层由西向东逐步增厚, 导致由西向东电位异常变化幅度由 TEF01 测线的陡峭变为 TEF03 测线的平缓。

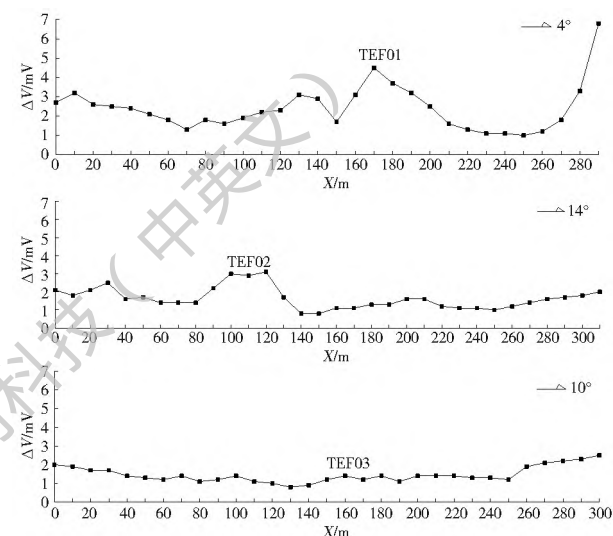


图 3 凹里村 TEF 成果

Fig. 3 TEF results of Aoli village

图 4 显示, RE01 测线(横轴为距离 X , 单位为 m ; 左侧纵轴为电位差 ΔV , 单位为 mV ; 右侧纵轴为 3 分钟内放射性读数 $counts/3min$, 无单位) 放射性读数异常高值出现在 190 m 处(放射性读数值高达 36), 对应的 TEF01 电位异常低值在 220 m 处, 据此可推测前述断层北倾。需要注意的是, RE01 测线 190~270 m 的放射性读数高值异常带(放射性读数值为 21~36), 正好与图 3 中 TEF01 测线 220~260 m 之间的电位差低值宽缓异常带相对应, 证明该区域内基岩裂隙十分发育。

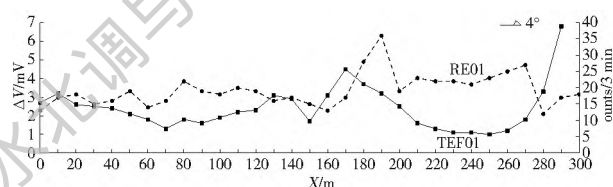


图 4 凹里村 TEF 和 RE 成果对比

Fig. 4 Comparison between TEF and RE results in Aoli village

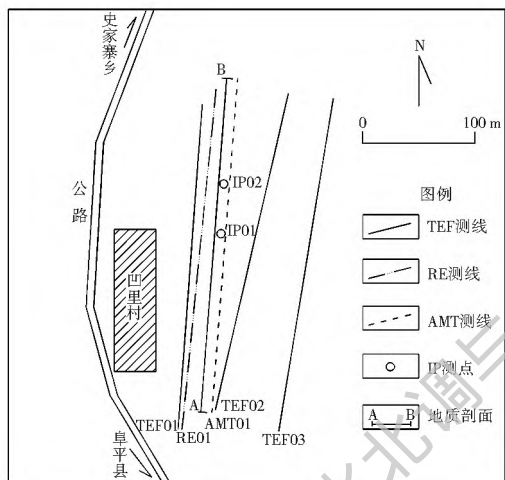


图 1 凹里村测线布置

Fig. 1 Distribution of survey lines in Aoli village

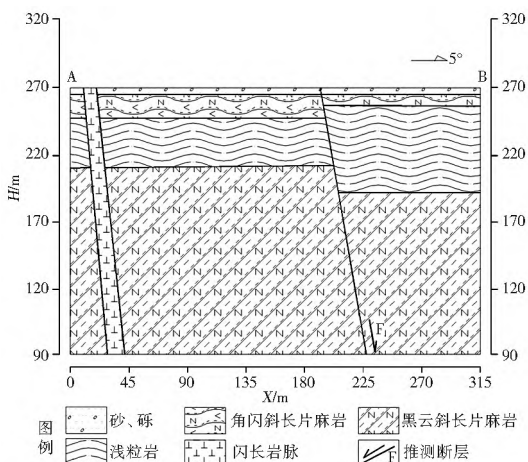


图 2 凹里村地质剖面

Fig. 2 Geological section of Aoli village

在凹里村布置了各类电探方法测线(见图 1),

图5显示, AMT01测线(地电断面解释图中横轴为距离 X ,单位为m;纵轴为深度 D ,单位为m;等值线为电阻率,单位为 $\Omega \cdot m$) 210 m附近,埋深50~150 m电阻率曲线出现近乎陡立的下降,推测该处存在前述近东西向断层,并可根据电阻率等值线变化趋势推测断层大致北倾,结论与放射性法和音频大地电场法一致。AMT01测线210~270 m之间出现电阻率低值“洼地”(电阻率值低于 $500 \Omega \cdot m$),推测该区域内基岩裂隙十分发育。

在上述结论的基础上,考虑场地条件对布置钻机的限制,设置了两个激电点IP01和IP02。IP01和IP02分别位于AMT01测线的165 m和210 m处。初步推测210 m处变质岩基岩裂隙水富水性比165 m处优越。

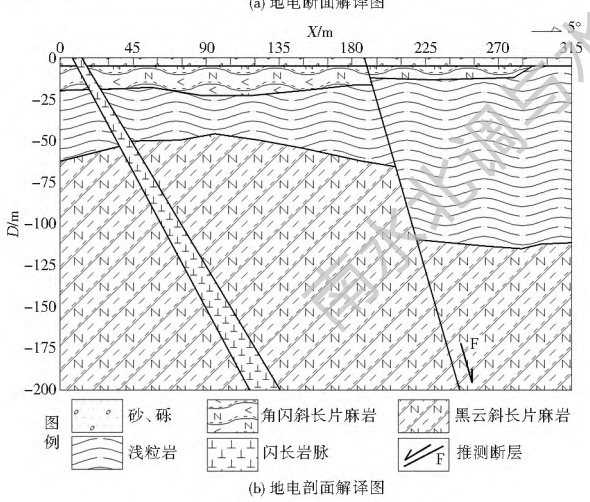
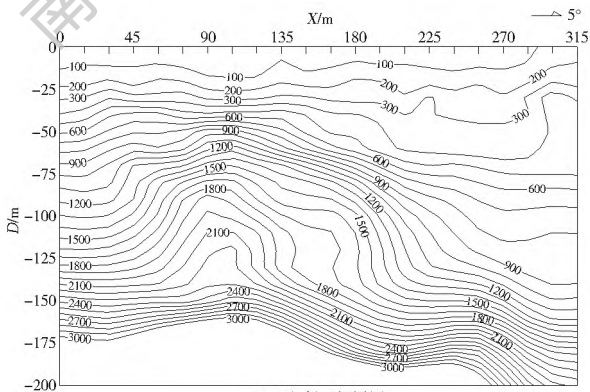


图5 巴里村 AMT 成果

Fig. 5 Results of AMT in Aoli village

在AMT01测线的165 m和210 m处分别设置激电点IP01和激电点IP02。图6显示,当激电点IP01和激电点(横轴为供电极距 $AB/2$,单位为m;纵轴为极化率 $polarizability$,单位为%)的 $AB/2$ 小于20 m时(据 $AB/2=20$ m,根据经验公式推测埋深大致应该约为14 m),IP01的极化率(范围为2.16%~2.47%)基本上大于IP02(范围为1.85%~2.16%),测线165 m处浅部地层呈现高极化特征,

推测该处浅部角闪斜长片麻岩风化壳裂隙水的富水性比210 m处优越。 $AB/2$ 大于20 m后,IP02的极化率(范围为2.30%~2.98%)基本上大于IP01(范围为2.31%~2.86%),测线210 m处深部地层呈现高极化特征,推测该处由浅到深分布有浅粒岩裂隙发育区以及黑云斜长片麻岩断层破碎带,变质岩破碎程度高,裂隙十分发育,深部富水性更佳,该处深部富水性比165 m处优越。

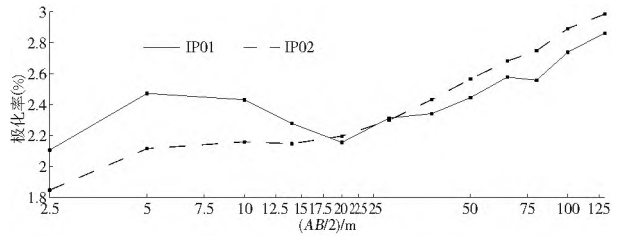


图6 巴里村 IP 成果(极化率)

Fig. 6 Results of IP in Aoli village

在AMT01测线210 m处布置ZK01,实施探采结合井1眼,井深100 m,进行了抽水试验(见图7)。

钻孔编号		ZK01	孔口高程/m	270
钻机型号		XY-150	孔内地下水位/m	2.00
开孔直径/mm		273	终孔直径/mm	235
层序	深度/m	分层厚度/m	钻孔柱状图	岩性描述
4.00	4.00		[Symbol]	第四系砂、砾
17.21	13.21		[Symbol]	角闪斜长片麻岩
76.52	59.31		[Symbol]	浅粒岩
100.00	23.48		[Symbol]	黑云斜长片麻岩

图7 巴里村钻孔柱状图

Fig. 7 Drill hole columnar section of Aoli village

抽水试验证明:(1)第四系松散砂、砾层厚度为4.0 m,富水性一般,涌水量为 $3 \text{ m}^3/\text{h}$ 。(2)角闪斜长片麻岩风化壳,厚度为13.21 m,风化程度高,富水性好,涌水量为 $21 \text{ m}^3/\text{h}$ 。(3)断层钻遇深度为76.52 m。下盘基岩较完整,具阻水作用。上盘破碎程度较高,为重要的富水部位,涌水量为 $31 \text{ m}^3/\text{h}$ 。断层破碎带为主要的控水构造,也是导水通道。(4)断层北侧的浅粒岩基岩裂隙十分发育,基岩厚度为59.31 m,富水性好,涌水量为 $25 \text{ m}^3/\text{h}$ 。该井总涌

水量达 $80 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

凹里村电探方法研究成果显示,基岩裂隙水的电性特征与地层特征之间具有一致性,且电性特征参数之间能够互相验证,大大增加了电探方法地质解释的可靠性。

适用于该研究区水文地质特征的电探技术方法组合可总结如下:根据不同方法的适用性和物性前提,认为音频大地电场法、放射性法、音频大地电磁法和激电法等方法组合适宜于太行山片麻岩地区局部富水部位的勘查。首先利用音频大地电场法进行扫面,初步确定研究区可能存在的基岩裂隙发育带和断层构造带,然后在基岩裂隙发育带和断层构造带使用放射性法进行对比,验证该构造的可靠性。随后应用音频大地电磁法确定其具体位置及其含水构造特征,最后布置激电法,利用极化率特征推断含水构造的富水性。

4 结论

在阜平县开展了变质岩基岩裂隙水的电探方法研究,分析了各类方法成果,研究了电性特征分布规律和变质岩裂隙水的赋存特性。

(1) 研究区地下水主要为风化壳裂隙水、断层构造水以及基岩裂隙水。风化壳裂隙水广泛分布在风化壳裂隙中,埋藏浅,富水性一般。断层构造水一般受到断层走向的控制,埋藏深,富水性好。基岩裂隙水主要分布在变质岩裂隙发育处,埋藏深度中等,富水性好。

(2) 研究区变质岩裂隙水的电性特征,一般体现为TEF 电位差低值、RE 放射性读数高值、AMT 电阻率低值以及IP 极化率高值的组合,各特征参数能够互相验证,且电性特征与地层特征之间具有一致性。

(3) 适用于该研究区水文地质特征的电探技术方法组合具有快捷、高效和准确的特点,值得在类似地区推广使用。

参考文献(References):

- [1] 吴爱民,李长青,徐彦泽,等.华北平原地下水可持续利用的主要问题及对策建议[J].南水北调与水利科技,2010,8(6):110-128.(WU Aimin, LI Changqing, XU Yanze, et al. Key Issues influencing sustainable groundwater utilization and its countermeasures in North China Plain [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(6): 110-128. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP. J. 1201. 2010. 06110
- [2] 张兆吉, 魏国中, 王昭, 等. 华北平原地下水资源可持续利用研究[J]. 资源科学, 2009, 31(3): 355-360. (ZHANG Zhaoji, LU O Guozhong, WANG Zhao, et al. Study on sustainable utilization of groundwater in North China Plain [J]. Resources Science, 2009, 31(3): 355-360. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j. issn: 1007-7588. 2009. 03. 001
- [3] 钱永, 张兆吉, 费宇红, 等. 华北平原浅层地下水可持续利用潜力分析[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 890-897. (QIAN Yong, ZHANG Zhaoji, FEI Yurong, et al. Sustainable exploitable potential of shallow groundwater in the North China Plain [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(8): 890-897. (in Chinese)) DOI: 10.13930/j.cnki.cjca.140704
- [4] 张光辉, 严明疆, 刘春华, 等. 太行山前丘陵区基岩裂隙水赋存的非均一性和易疏干性特征[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(1): 104-109. (ZHANG Guanghui, YAN Mingjiang, LIU Churhua, et al. Characteristics of nonuniformity and vulnerability of aquifers to dewatering of bedrock fissure water in the hilly area of the Taihang Mountains Piedmont [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(1): 104-109. (in Chinese)) DOI: 10.3724/sp.j.1201.2013.01104
- [5] 李传生, 靳孟贵, 武选民, 等. 唐县山区基岩裂隙水的赋存规律及找水方向[J]. 人民黄河, 2009, 31(4): 34-35. (LI Chuansheng, JIN Menggui, WU Xuanmin, et al. Metamorphic rock fissure water in mountains of Tang County and its direction of water finding [J]. Yellow River, 2009, 31(4): 34-35. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2009.04.015
- [6] 廖资生. 地下水的分类和基岩裂隙水的基本概念[J]. 高校地质学报, 1998, 4(4): 473-477. (LIAO Zisheng. Groundwater classification and basic concepts of fracture water [J]. Geological Journal of China Universities, 1998, 4(4): 473-477. (in Chinese)) DOI: 10.16108/j.issn1006-7493.1998.04.013
- [7] 宋献方, 李发东, 刘昌明, 等. 太行山区水循环及其对华北平原地下水的补给[J]. 自然资源学报, 2007, 22(3): 398-408. (SONG Xianfang, LI Fandong, LIU Changming, et al. Water cycle in taihang mt. and its recharge to groundwater in North China Plain [J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(3): 398-408. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-3037.2007.03.009
- [8] 陈宇, 温忠辉, 束龙仓. 基岩裂隙水研究现状与展望[J]. 水电能源科学, 2010, 28(4): 62-109. (CHEN Yu, WEN Zhonghui, SHU Longcang. Status and prospect of research on bedrock fissure water [J]. Water Resources and Power, 2010, 28(4): 62-109. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7709.2010.04.020
- [9] 刘人太, 李术才, 张庆松, 等. 岩溶裂隙水探查方法优化与工程治理研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1095-1107. (LIU Ren tai, LI Shucai, ZHANG Qing song, et al. Research on optimization of karst fissure water exploration methods and engineering countermeasures [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1095-1107. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2011.04.024
- [10] 张彪, 刘良志, 倪进鑫, 等. 综合物探方法在花岗岩严重缺水地区找水勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(4): 501-507. (ZHANG Biao, LIU Liangzhi, NI Jinxin, et al. The application of comprehensive geophysical prospecting method to water exploration in the granite severe water shortage region [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2015, 12

- (4): 501-507. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1672-7940.2015.04.015
- [11] 董健, 胡雪平, 李肖鹏, 等. 联合剖面法寻找基岩裂隙水[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(4): 3520-3527. (DONG Jian, HU Xueping, LI Xiaoping, et al. Composite profile method used for searching bedrock fissure water[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(4): 3520-3527. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1672-7940.2012.04.055)
- [12] 朱崇利. 数据处理前后博斯蒂克反演对比[J]. 科学技术与工程, 2013, 26(13): 7736-7739. (ZHU Chongli. Comparison of the bostick inversion before and after the data processing[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 26(13): 7736-7739. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1672-7940.2013.26.025)
- [13] 武毅, 郭建强, 朱庆俊, 等. 基岩水与平原水转换关系的地球物理勘查技术探讨[J]. 地球学报, 2004, 25(3): 369-372. (WU Yi, GUO Jianqiang, ZHU Qingjun, et al. Geophysical prospecting techniques for the interchange between bedrock water and plain water[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2004, 25(3): 369-372. (in Chinese) DOI: 10.3321/j.issn:1006-3021.2004.03.016)
- [14] 郑瑞宏. 多种方法对导水断层的探测和分析[J]. 科技导报, 2008, 26(22): 44-46. (ZHENG Ruihong. Various method of exploration and analysis on fault that may transmit water[J]. Science & Technology Review, 2008, 26(22): 44-46. (in Chinese) DOI: 10.3321/j.issn:1000-7857.2008.22.010)
- [15] 许福美, 雷芳芳, 吴志杰, 等. 顶峰山矿区水文地质特征与防治水措施[J]. 科技导报, 2011, 29(15): 66-69. (XU Furmei, LEI Fangfang, WU Zhijie, et al. Hydrogeological features and measures for water control in Dingfengshan Mine[J]. Science & Technology Review, 2011, 29(15): 66-69. (in Chinese) DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.15.008)
- [16] 邓启军, 李伟, 朱庆俊, 等. 岩脉发育区构造裂隙水勘查研究—以唐县史家佐村地下水勘查为例[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(5): 95-98. (DENG Qijun, LI Wei, ZHU Qingjun, et al. Exploration study of structural fissure in vein developing area—a case study of groundwater exploration in Shijiazuo Village of Tang County[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(5): 95-98. (in Chinese) DOI: 10.3724/sp.j.1201.2013.05095)
- [17] 宋洪伟, 夏凡, 张翼龙, 等. EH4 电导率成像系统在包头地热勘查中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(5): 128-130. (SONG Hongwei, XIA Fan, ZHANG Yilong, et al. Application of EH4 electrical conductivity imaging system on the geothermal exploration in Baotou[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(5): 128-130. (in Chinese) DOI: 10.3724/sp.j.1201.2012.05128)
- [18] 张宝匀, 么红超, 汪洋, 等. 物探方法在断裂破碎带富水性判别中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(5): 94-945. (ZHANG Baoyun, YAO Hongchao, WANG Yang, et al. Application of geophysical prospecting techniques in identification of water-rich conditions of fault fracture zone[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(5): 94-945. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2015.05.026)
- [19] 宋洪伟, 张翼龙, 夏凡, 等. 超高密度电法和激电法在河北某地找水实例分析[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(4): 60-62. (SONG Hongwei, ZHANG Yilong, XIA Fan, et al. Analysis of the water investigation by super density electrical method and ip in Hebei[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(4): 60-62. (in Chinese) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2011.04060)
- [20] 李慧杰, 朱庆俊, 李伟, 等. 山东临朐新生代玄武岩地下水赋存规律及电性特征[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(6): 65-69. (LI Huijie, ZHU Qingjun, LI Wei, et al. Storage rules and electrical characteristics of groundwater in Cenozoic Basalt in Linqu County of Shandong[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(6): 65-69. (in Chinese) DOI: 10.3724/sp.j.1201.2012.06065)