

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2019.0148

刘伟朋, 卢放, 韩振, 等. 阜平县太古界变质岩区地下水的赋存规律与电性特征[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(6): 170-177. LIU W P, LU F, HAN Z, et al. Occurrence law and electrical characteristics of groundwater in Archean metamorphic rock area of Fuping County[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(6): 170-177. (in Chinese)

阜平县太古界变质岩区地下水的赋存规律与电性特征

刘伟朋, 卢放, 韩振, 孟顺祥, 龚冀丛

(中国地质调查局 水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051)

摘要:阜平县太古界变质岩经历了多期变质深熔作用,以揉塑性片麻岩为主,地层致密柔韧,富水性差,找水难度较大。在地质调查、物探勘探及钻探验证相结合的基础上,较系统地分析了变质岩区构造裂隙水、风化壳裂隙-孔隙水、层状裂隙水和接触型基岩裂隙水四种地下水类型的赋存规律及电性特征。结果表明,构造裂隙水主要赋存在构造破碎带内;风化壳裂隙-孔隙水分布普遍,水量小,一般沟谷风化壳与断裂叠加带富水性较大;层状裂隙水和接触型基岩裂隙水主要赋存在硬脆-软塑岩性组合的接触带(面)上。在视电阻率等值线断面上,构造裂隙水呈现为陡降低阻带曲线;与构造复合的风化壳裂隙-孔隙水,呈现为凹型低阻曲线;层状裂隙水面状分布,呈现为水平低阻曲线;岩脉接触型基岩裂隙水,呈现为条带状高阻+类断层低阻反映。

关键词:变质岩;地下水类型;赋存规律;电性特征

中图分类号:P641 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Occurrence law and electrical characteristics of groundwater in Archean metamorphic rock area of Fuping County

LIU Weipeng, LU Fang, HAN Zhen, MENG Shunxiang, GONG Jicong

(Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, Baoding 071051, China)

Abstract: The Archean metamorphic rock in Fuping County has undergone multiple stages of metamorphosed deep-melting, mainly composed of plutonium-rich gneiss. The stratum is dense and flexible, and it is very difficult to find water because it contains a small amount of groundwater. Based on the combination of geological survey, geophysical exploration and drilling verification, this work systematically analyzed the regularity and electrical characteristics of the four types of groundwater, including structural fissure water in the metamorphic rock area, fissures in the weathering crust, pore water, layered fissure water, and contact-type bedrock fissure water. The results show that the structural fissure water was mainly distributed in the structural fracture zone. The fissure-porosity water in the weathering crust was widely distributed but the water volume was small. The water richness of the weathered crust and fracture zone in the valley was generally larger, the layered fissure water and the contact bedrock Fracture water was predominantly present on the contact zone of a hard brittle-soft rock combination. In the apparent resistivity section, the structural fissure water presented a steep reduction stopband, and the composite weathercock fissure-porosity water presented a concave low-resistance curve. Layered fissure water surface distribution showing a horizontal low resistance curve. Bedrock fissure water contacted with the veins presented as strip-shaped high resistance+type fault low resistance reflection.

Key words: metamorphic rock; types of groundwater; storage rules; electrical characteristics

收稿日期:2019-01-18 修回日期:2019-04-26 网络出版时间:2019-07-11

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190709.1319.002.html>

基金项目:自然资源部地质大调查项目(DD20160232;DD20160240)

作者简介:刘伟朋(1986—),男,河北唐县人,工程师,主要从事水工环地质调查与评价研究工作。E-mail:liuweipeng.1986@163.com

阜平县位于太行山中北部,保定市西部,为全山区县,是太行山脉典型的缺水地区^[1]。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,已严重影响人民生活、制约经济的发展^[1-2]。

阜平县严重缺水的现状是由自然因素控制和技术条件限制造成的。自然因素包括:(1)地貌,山区地形高差大,径流、排泄快,地下水补给量有限^[3-4];(2)气象,近几年降雨量减少,且暴雨集中,地下水补给量少^[5];(3)地质,太古界阜平群变质岩在阜平一带发育最好^[6],阜平群变质岩以揉塑性岩石为主,裂隙发育差,地下水难以赋存^[7],是典型的贫水地区^[8];(4)构造,地下水赋存受构造控制明显,极不均匀,多呈条带状脉状分布。技术条件限制主要为勘查条件较差,根据相关资料记载,在变质岩区勘查实施的单井小时出水量 5 m^3 上概率低于20%^[9]。

随着对变质岩区地下水研究的深入,根据变质岩区的岩性、结构、构造,目前已基本总结出变质岩区地下水的赋存类型^[11],通过音频大地电磁测深和激电法等电性物探方法也有成功找水的实例^[2,4],不过以往研究的重点为储水量较大的断裂蓄水构造与物探方法的电性反应,其它类型的蓄水构造对应的电性反应分析较少。但是对于一个人口集中的(乡)镇或村庄的有限区域内,可能不存在断裂蓄水构造或断裂蓄水构造储水量较小,这就需要研究多

种蓄水构造的电性反应,通过分析不同类型地下含水层的电性特征,识别出地下水的富集部位,从而准确定孔,并成功出水。本研究对于解决太行山变质岩地区居民的缺水问题,具有重要的社会意义和研究价值。

1 阜平变质岩区的基本特征

1.1 地层岩性及分布特征

阜平县地层岩性以太古界变质岩为主,分布面积 $1\,993.7\text{ km}^2$,占县域总面积的80.6%,见图1。该区变质岩包括阜平期和五台期的变质表壳岩和变质深成岩两大类型,构成了研究区的结晶基底。变质表壳岩多呈条带状、透镜状分布,以变粒岩、浅粒岩、斜长角闪岩等较硬脆性岩石为主,多构成陡坎状地貌单元,主要分布于县域西北部中低山区域;变质深成岩主要形成于阜平期,结构复杂,规模较大,经历了多期变质变形和深熔作用改造,以坊里片麻岩、莱树庄片麻岩等一组黑云斜长片麻岩、黑云二长片麻岩等揉塑性岩石为主,多构成宽缓斜坡地貌单元,主要分布于研究区中南部低中山及低山丘陵区域。

在变质岩区域,近平行分布有多条辉绿岩岩脉,走向 $\text{NW } 60^\circ$,呈弧形状展布,宽度 $5\sim 20\text{ m}$,长 $0.1\sim 2\text{ km}$,常具冷凝边,块状构造,表层节理裂隙发育,由浅至深节理裂隙逐渐不发育。

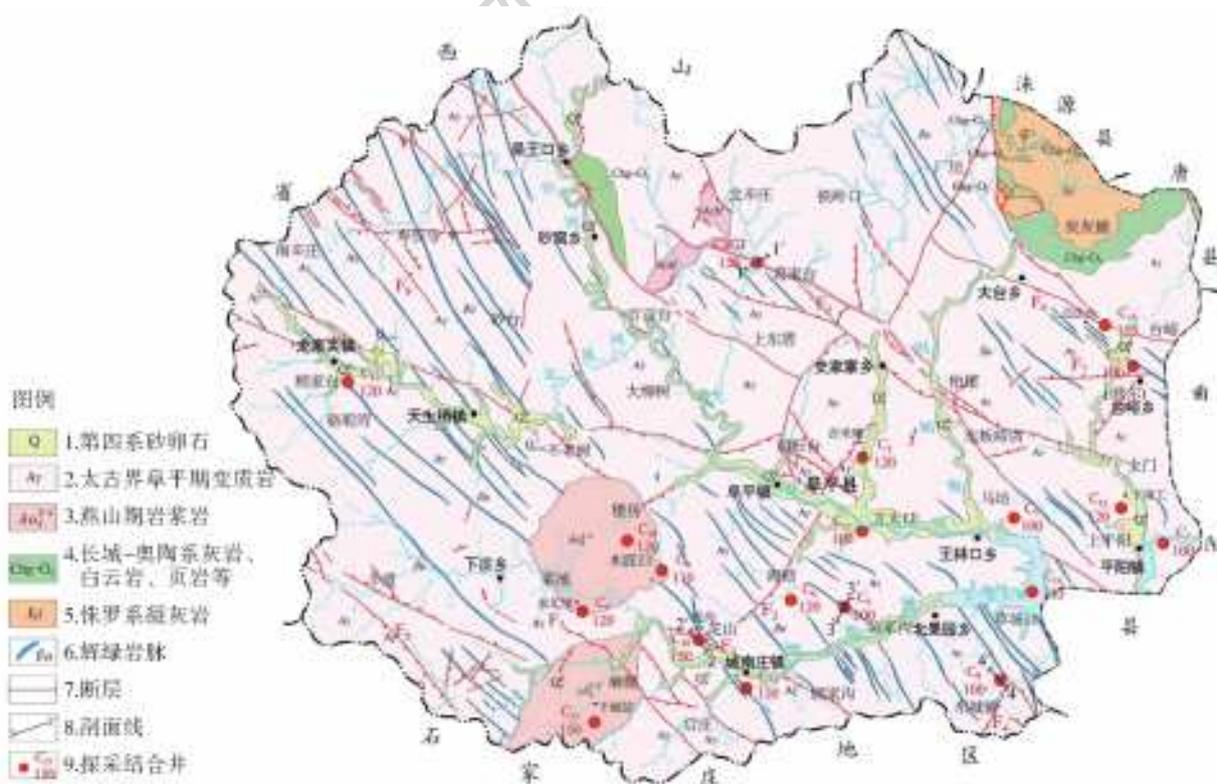


图1 河北省阜平县地质略图

Fig. 1 Schematic diagram of the geological structures in Fuping County of Hebei Province

1.2 断裂构造特征

研究区位于燕山沉降带和山西中台隆的结合部位,区内构造以北西向和北北东向断层构造为主,断层规模一般较大,常延伸十余至几十千米,断层破碎带宽达 10~100 m 以上,区内断层以正断层为主,但在葛家台、吴王口-上东漕及大台-台峪村一带分布有北西向的逆断层。根据断层形成时代可分为前寒武系断层和燕山期断层,其中,前寒武系断层由于发育较早,经过长时间的地质作用,其破碎带常被胶结甚至变质;穿过变质表壳岩区域的燕山期正断层,断层破碎带一般由构造角砾岩和张节理构成,空隙率较大,导水性较强。

1.3 地下水类型及赋存特征

研究区内地下水赋存介质主要为变质岩含水岩系^[12],根据赋存地下水的地质结构,可将研究区地下水分为变质岩断裂构造裂隙水、变质岩风化壳裂隙-孔隙水、变质岩层间裂隙水、变质岩与岩脉接触型裂隙水四种类型。其中,变质岩风化壳裂隙-空隙水,赋存于基岩的风化裂隙、孔隙内,具有分布广泛、埋藏浅的特点。根据本次钻孔资料,风化壳厚度一般小于 50 m,风化壳地下水埋深一般小于 10 m,含水层涌水量一般 $<5\text{ m}^3/\text{h}$ 。风化壳厚度受地质构造影响明显,凡是构造裂隙发育的地方,风化裂隙发育的强度和深度都大^[13],这种风化壳中的地下水与下部的构造裂隙水有着互补的水力联系;层间裂隙水赋存于层间构造(节理)裂隙含水层中,具有面状分布的特点,变质岩层间裂隙主要形成于与揉塑性岩层互层的硬脆性岩层内,揉塑性岩层在该蓄水构造中起隔水作用;变质岩断裂构造裂隙水和与岩脉接触型裂隙水主要赋存于断裂构造带和岩脉与围岩接触带内,呈条带状分布,具有埋藏深、地下水赋存集中的特点。

2 地下水赋存类型与电性特征

本次工作是在地质调查的基础上,通过实施的 20 余眼探采结合井的物探解译剖面及钻探验证对比分析,整理出阜平太古界变质岩区普遍存在的四种地下水类型及其对应的音频大地电磁测深法视电阻率电性反映。

针对变质岩含水层特征,物探找水的目的是划分含水层(带)结构,刻画构造空间发育特征^[10]。本次工作采用物探方法以可控源音频大地电磁测深法为主,音频大地电场法为辅。可控源音频大地电磁测深法,采用 EH-4 电导率成像系统设备,内含先进

的双源大地电磁测深系统^[14-17]。在可控源音频大地电磁法勘测中,得到的两个主要参数是视电阻率与阻抗相位。视电阻率是常用参数,它主要反映了地层导电性能,并通过导电性能的特征分析、了解各类地层的结构构造和含水性能,从而达到地下水勘查的目的^[18]。本次工作采用的探头响应频率 10~100 kHz,电偶极距 10~25 m,点距 10~50 m,测量方式为标量测量。

2.1 变质岩断裂构造裂隙水

2.1.1 赋存规律及电性特征

阜平变质岩区构造裂隙的发育程度与断裂的性质和岩性有关^[21]。一般压扭性断裂带多被糜棱岩填充,不利于地下水的富集;张性断裂破碎带裂隙发育,有利于地下水的富集。对于变粒岩、浅粒岩、斜长角闪岩等硬脆性岩体张性断裂破碎带,具有一定的宽度和延展性,带内岩体呈碎块状,碎块之间裂隙宽大,纵横交错呈网状,为地下水提供了较好的储存空间和富集条件,富水性好;对于片麻岩类揉塑性岩体断裂破碎带,宽度较小,多呈搭接交错延展,带内裂隙窄小密集,上段易高岭土化,堵塞裂隙通道,下部地下水以沿断裂带径向补给为主,具有一定的承压性,其存储空间和富集条件较硬脆性岩体断裂带较差。基岩构造裂隙水受构造控制,呈线状或脉状展布^[19]。在视电阻率断面上,由围岩-富水性断裂带-围岩,呈现出高阻-低阻-高阻的“U”型电性特征。断裂带富水性越好,其纵向反应为电阻值越小,横向反应的低阻带越宽。

2.1.2 葛家台村找水实例

葛家台村位于阜平县西北部,为中-低山沟谷地貌。物探工作区位于葛家台村村北“V”型沟谷中。沟谷走向 NNE 向,沟谷宽约 20~50 m,第四系松散堆积物小于 3 m,沟谷两侧黑云斜长片麻岩出露,节理裂隙发育一般,在区域构造上有 1 处近 EW 向断层横穿沟谷。物探测线沿沟谷部署,横穿区域断层 F。从 EH-4 物探断面上可知(见图 2),视电阻率等值线整体呈“U”型特征,在 0~150 m 段,基岩视电阻率 $>1\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$,为片麻岩的电性特征^[2]。在 150~165 m 段,电阻率等值线出现垂向陡降,且该低阻带电阻率小于 $1\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$,结合地质调查,推测该段为断层反映,且 0~150 m 段为断层下盘,岩体较完整。综合考虑,将井位部署于断层上盘,且穿遇断层,对应物探剖面约 160 m 处。钻探结果:井深 150 m,水位降深 79 m,涌水量 140.88 m^3/d ,主要出水部位为 136~138 m 段,成井后井水自流。

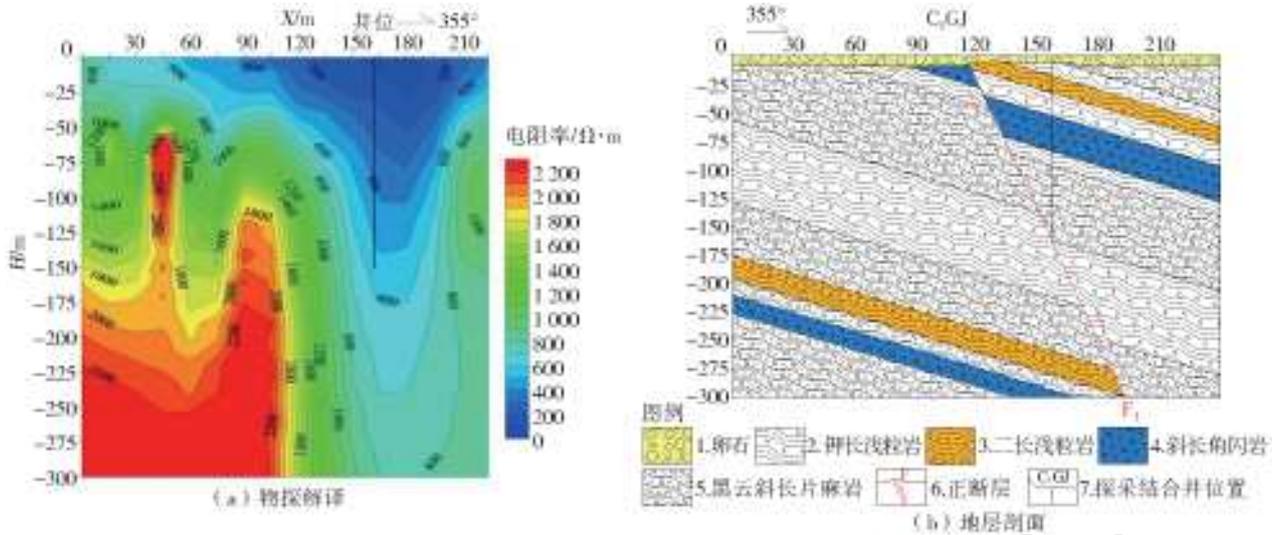


图2 葛家台 EH-4 物探解译及钻孔揭露地层剖面

Fig. 2 The stratigraphic profile of EH-4 geophysical interpretation and drilling exposure in Gejiatai village

2.1.3 八里沟找水实例

八里沟位于阜平县中南部,为低山沟谷地貌。物探工作区位于沟谷中下游的东侧。沟谷走向 NNE 向,沟谷宽约 20~100 m,第四系松散堆积物小于 3 m,沟谷两侧黑云斜长变粒岩、浅粒岩出露,节理裂隙发育,在区域构造上有 1 处近 EW 向断层横穿沟谷。物探测线沿沟谷部署,横穿区域断层 F。从 EH-4 物探断面上可知(见图 3),视电阻率等值线整体呈“U”型特征,0~60 m 视电阻率均为低值,推

测为富水断层破碎带反应。同时在测线 0 m 处附近基岩有断层面出露,断层面产状 $15^{\circ}/72^{\circ}$,则推测物探剖面 0~15 m 为主断层面反应,45~60 m 段为富水断层破碎带边缘受高阻围岩影响,呈现陡变低阻反应;180 m 处视电阻率呈低阻,宽度较小且陡立,推测为富水一般断层反映。综合考虑,将井位布置在断层的上盘,并使钻孔穿遇主断层,对应物探剖面约 10 m 处。钻探结果为井深 100 m,水位降深 10 m,涌水量 $19\ 200\ \text{m}^3/\text{d}$ 。

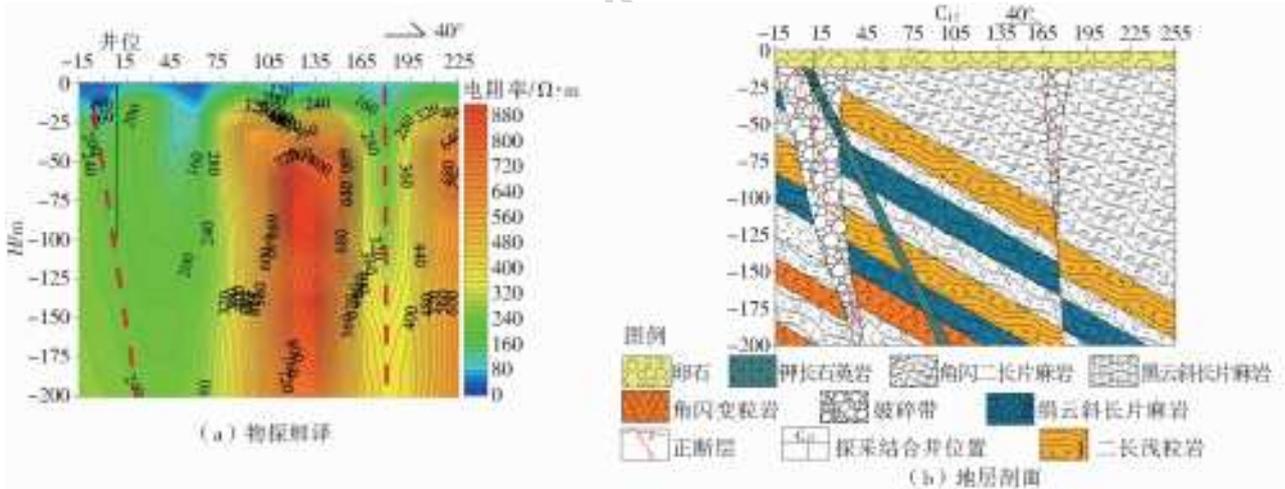


图3 八里沟 EH-4 物探解译及钻孔揭露地层剖面

Fig. 3 The stratigraphic profile of EH-4 geophysical interpretation and drilling exposure in Baligou village

2.2 变质岩风化壳裂隙-孔隙水

2.2.1 赋存规律及电性特征

变质岩区风化壳裂隙-孔隙水主要赋存于岩体浅部风化后的裂隙-孔隙中。地下水的富集主要取决于岩性、地形和构造条件的组合^[20],形成不同类型的富水区(带):(1)汇水洼地风化壳富水区,主要受地形控制,表现为层状潜水,主要含水层段一般<

20 m,在阜平县揉塑性片麻岩地区最为普遍,但富水量小。(2)与深部构造断裂复合的风化壳富水带,在断裂通过的一些地势低洼或沟谷处,岩体破碎,构造裂隙发育,风化深度较大^[22]。常形成局部加深的带状或囊状风化壳,向下与构造裂隙带相沟通,接受深部构造裂隙水和浅部风化壳裂隙-孔隙水的双重补给,因而水量比较丰富^[23-24]。在视电阻率断面上,带状(囊状)富水风化壳呈漏斗状低阻反应。

2.2.2 城南庄村找水实例

城南庄村位于胭脂河宽缓地段,河谷宽约 1~2 km,该段河谷第四系覆盖层厚度 5~15 m,随着近年来地下水位下降,该段大部分大口井或人工浅井涌水量减小,旱季无法满足居民用水需求。结合工作区特点,本次物探工作的目的是查找与构造断裂复合的风化壳富水带,即基底凹型富水带。从 EH-4

物探测深断面上可知(见图 4),视电阻率在 50~110 m 段出现坳陷,其下部在 110 m 附近视电阻率等值线出现连续陡降。推测其上部为断裂破碎带风化壳富水反应,下部为断裂反应。井位定于断面 90 m。钻探结果:井深 150 m,采取分层抽水,上部风化壳及松散堆积物裂隙-孔隙含水层带主要出水段为 6~24 m,水位降深 2.3 m,涌水量 441.6 m³/d。

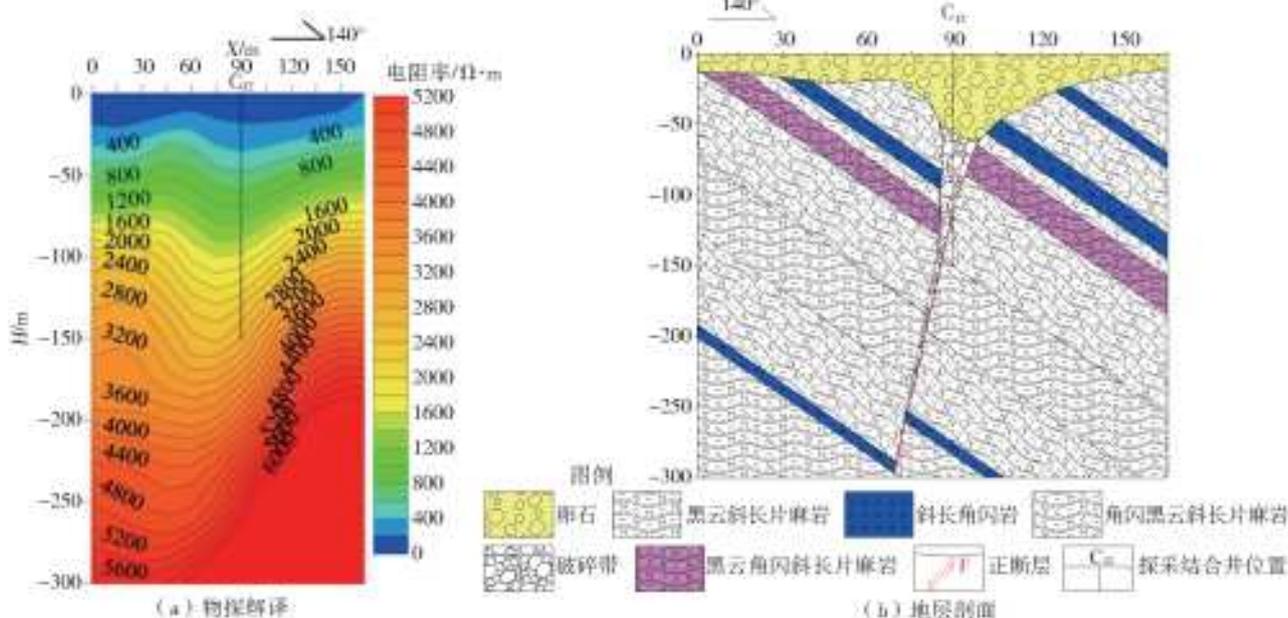


图 4 城南庄村 EH-4 物探解译及钻孔揭露地层剖面

Fig. 4 The stratigraphic profile of EH-4 geophysical interpretation and drilling exposure in Chengnanzhuang village

2.3 变质岩层间裂隙水

2.3.1 赋存规律及电性特征

层间裂隙水主要赋存在不同岩性的接触带上,以层间裂隙为含水层。在变质岩区,层间裂隙主要发生在中厚层的硬脆性岩石(混合花岗岩、斜长角闪岩、石英岩等)与厚层的揉塑性岩石(如黑云斜长片麻岩、片岩等)的接触带上。在变质岩受构造作用变质成岩过程中,揉塑性岩体发生柔性弯曲,硬性岩体则发生脆性折断,在层间滑动带中脆性岩石一侧,裂隙发育,含水性和透水性良好,地下水丰富^[25]。根据工作区已有资料^[2],结合本次多条物探测线结果,对于片麻岩基岩裸露区,0~20 m 风化壳裂隙层,视电阻率值为 150~800 Ω·m;25 m 以下,基岩电阻率 > 1 000 Ω·m,电位差 > 1.5 mV。当层间裂隙水赋存时,在 EH-4 物探视电阻率断面上,在相同深度,视电阻率等值线低于基岩的视电阻率基准值(>1 000 Ω·m)^[2],且呈近水平等值线。在音频大地电场视剖面上,含水层电位差低于基岩电位差的平均值。

2.3.2 东城铺村找水实例

阜平县北果园乡东城铺村探采结合井位于该村

北侧的半山腰处,基岩裸露,周围出露岩性以黑云斜长片麻岩为主,偶见斜长角闪岩、钾长变粒岩。通过 EH-4 物探勘探,其剖面视电阻率等值线反应为水平向较平直,垂直向缓慢递增(见图 5),在深度 25~50 m 微~未风化段,电阻率值小于其基准值。为了进一步查清低阻原因,在 EH4 测线上,同部署音频大地电场测线(见图 5),其剖面电位差明显低于该区基岩电位差平均值,由于该区富水的中强风化壳一般 < 25 m,因此,推测该区段存在层间裂隙水。经钻探验证,成井深度 100 m,揭露地层岩性为黑云斜长片麻岩夹斜长角闪岩和黑云钾长变粒岩,主要出水段为 15~25 m 和 45~52 m 的变层段,抽水试验水位降深 50.6 m,涌水量 370 m³/d。

2.4 变质岩与岩脉接触型裂隙水

2.4.1 赋存规律及电性特征

岩脉蓄水构造的富水性与岩脉、围岩的岩性特征有关。辉绿岩脉与围岩的组合中,辉绿岩脉属硬脆性岩石,围岩为揉塑性岩石,辉绿岩与围岩的相互挤压、冷凝成岩过程中,围岩发生柔性变形和错位松动,辉绿岩脉表层则出现冷凝裂隙带,围岩与岩脉的

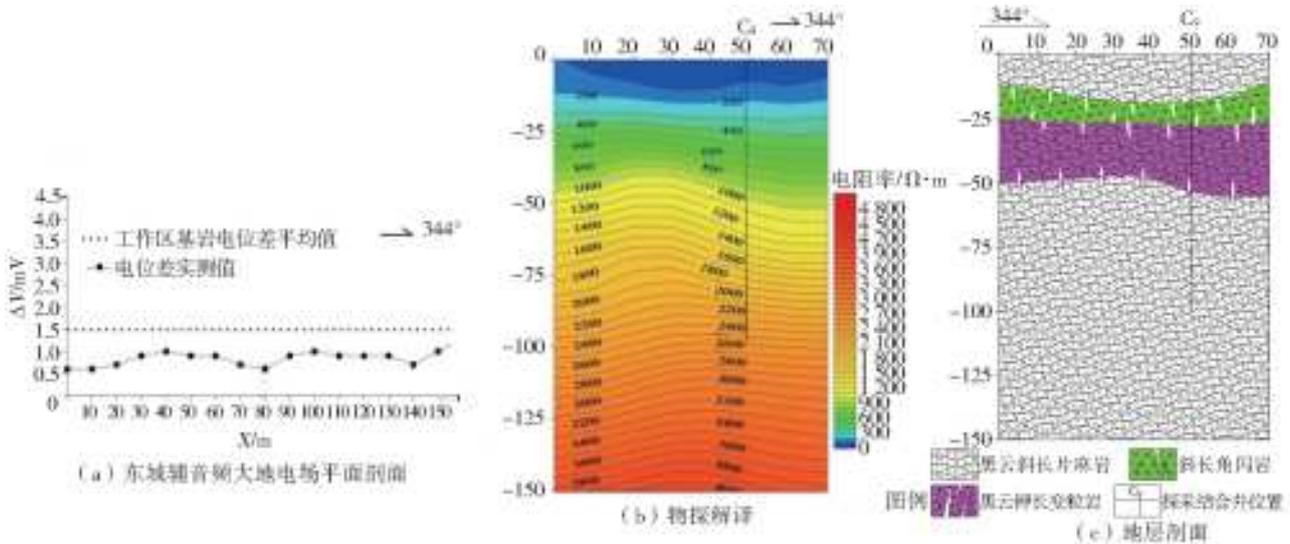


图5 东城铺村 EH-4 物探解译及钻孔揭露地层剖面

Fig. 5 The stratigraphic profile of EH-4 geophysical interpretation and drilling exposure in Dongchengpu village

接触带或影响带内节理裂隙发育,利于地下水的储存和富集。因此,在视电阻率剖面上,水平向从辉绿岩脉到围岩,电阻率值呈现为高值-类断层低值-较高值的特征,在岩脉边缘存在垂直陡降段,在岩脉中心位置电阻率值最大。

2.4.2 吴家沟找水实例

吴家沟位于胭脂河中游段北侧支沟上游,沟谷宽 50~250 m,沟谷两侧有多条辉绿岩脉出露,无明显区域断层穿过。根据调查已有的多眼大口井,发

现该段沟谷风化壳裂隙孔隙水赋存量较少,稳定涌水量小于 5 m³/h。本次 EH-4 勘查的目的为查明岩脉与围岩接触型裂隙的富水性。由勘查结果可知(见图 6),测线 75 m 处和 180 m 处电阻率较高。这于沟谷两侧岩脉出露位置相对应,为岩脉视电阻率反应。在测线两条岩脉中间 120 m 处存在低阻异常区,在此布置探采结合井,用于验证岩脉接触影响带蓄水构造。钻探结果:井深 100 m,抽水试验时,水位降深 62.13 m,涌水量为 330 m³/d。

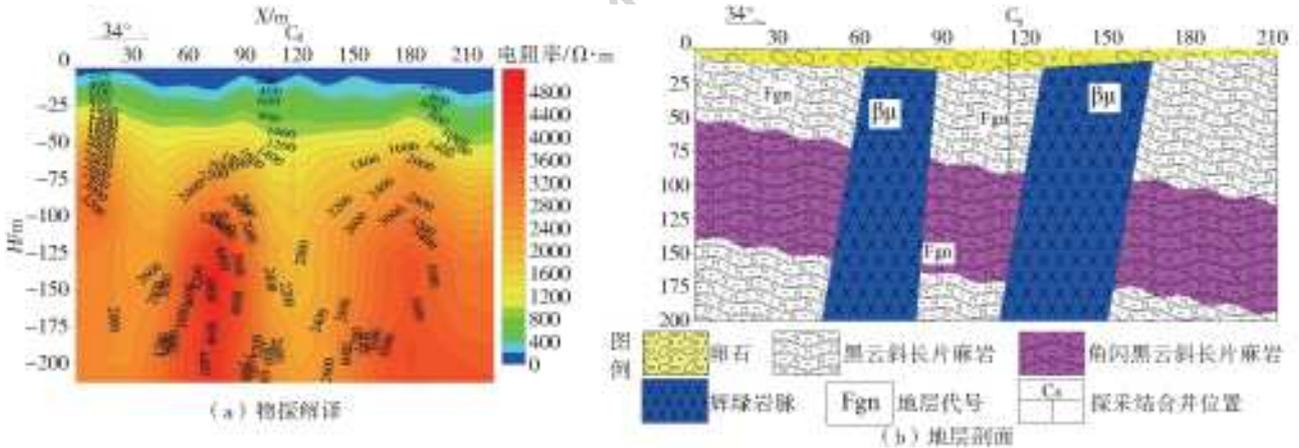


图6 吴家沟村 EH-4 物探解译及钻孔揭露地层剖面

Fig. 6 The stratigraphic profile of EH-4 geophysical interpretation and drilling exposure in Wujiagou village

3 结论

(1)阜平县变质岩区地下水类型主要有构造裂隙水、风化壳裂隙-孔隙水、层状裂隙水和接触型基岩裂隙水。构造裂隙水沿构造带分布,主要赋存在构造破碎带内,视电阻率表现为陡降低阻带;风化壳裂隙-孔隙水分布在河谷地带及平缓低洼处,一般富水性较低,但与构造风化带复合的风化壳富水性较大,视电阻率表现为凹型低阻曲线;层状裂隙孔隙水和接触型基岩裂隙水均为赋存在不同岩性的接触带

上,层状裂隙水面状分布,视电阻率表现为整体低阻反应,岩脉接触型基岩裂隙水条带状分布,视电阻率为条带状高阻+类断层低阻反映。

(2)利用电磁法(EH-4)物探方法在变质岩区找水,不同类型的蓄水构造组合在电性特征上的反映不同,其中尤以条带状的基岩(构造)裂隙水富集带反应最为明显,视电阻率值越低,且低阻带横向宽度越大,其富水性越好;层间裂隙水反应明显,富水区视电阻率值普遍小于区域基岩视电阻率基准值;在寻找岩脉接触带裂隙水时,受岩脉高阻和围岩相对

低阻影响,其富水量的视电阻率反应不明显。

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 A M, LI C Q, XU Y Z, et al. Key Issues influencing sustainable groundwater utilization and its counter-measures 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] 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 F, YAN H X, HU W G. Electrical properties of bedrock fissure water in metamorphic rock area of Fuping County [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 8 (6): 110-128. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.03.021.
- [3] 张兆吉, 雒国中, 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 Z J, LUO G Z, WANG Z, 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.
- [4] 卢放, 阎红霞, 胡文广. 太行山缺水地区变质岩裂隙水水文地质特征及其电性响应——以阜平县为例[J]. 科学技术与工程, 2016 16(14):18-22. (LU F, YAN H X, HU W G. Hydrogeological properties and their electrical properties responses of metamorphic rock fissure water in water shortage area of Taihang; A case study in Fuping County[J]. Science Technology and Engineering, 2016,16(14):18-22. (in Chinese))
- [5] 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 Y, ZHANG Z J, FEI Y H, 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.cjea.140704.
- [6] 邓俊国, 王亚欣, 张振, 等. 保定地区阜平群变质岩岩石特征及原岩分析[J]. 保定师专学报, 2000,13(2):31-35. (DENG J G, WANG Y X, ZHANG Z, et al. The feature of the metamorphite and the photolyte analysis on the Fuping Group in the Baoding area[J]. Journal of Baoding teachers' College, 2000,13(2):31-35. (in Chinese))
- [7] 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 Z S. 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.
- [8] 张立宁, 王会壮, 杨雪娟. 平山县变质岩贫水区物探找水研究[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(2):125-127. (ZHANG L N, WANG H Z, YANG X J. Research on geophysical water prospecting in metamorphic rock poor water area of Pingshan County[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012,10(2):125-127. (in Chinese))
- [9] 宋云峰, 武爱华, 李雪梅. 变质岩山区高密度电法找水案例[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2014, 45(2):272-275. (SONG Y F, WU A H, LI X M. Case of metamorphic rock mountain high density electrical method in water exploration[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2014,45(2):272-275. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-2324.2014.02.020.
- [10] 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 H J, ZHU Q J, LI W, 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.
- [11] 徐光瑜, 刘福臣, 李凌霄. 泰山群变质岩地下水的富集条件与寻找方法[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(3):24-27. (XU G Y, LIU F C, LI L X. Condition of storage structure and seeking groundwater below[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(3):24-27. (in Chinese))
- [12] 王振兴, 李向全, 侯新伟, 等. 太行山前严重缺水地区地下水勘查实践——以灵寿县丘陵区为例[J]. 南水北调与水利科技, 2012,10(3):127-132. (WANG Z X, LI X Q, HOU X W, et al. Groundwater exploration in serious water shortage area of Taihang Piedmont: A case study in the hilly area of Lingshou County[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10 (3): 127-132. (in Chinese)) DOI:10.3724/SP.J.1201.2012.03127.
- [13] 王洪磊, 李伟, 吴宏涛. 顺平县地下水蓄水构造及找水方向[J]. 山西建筑, 2016, 42(12):45-46. (WANG H L, LI W, WU H T. The storage water structure and water-seeking direction on Shunping County [J]. Shanxi Architecture, 2016,42(12):45-46. (in Chinese)) DOI:10.13719/j.cnki.cn14-1279/tu.2016.12.025.
- [14] 杨宏智, 吕小红, 赵德庆, 等. EH-4 大地电磁测深系统

- 在山东临淄地区岩溶裂隙水勘查中的应用[J]. 山东国土资源, 2013, 29(5): 40-43. (YANG H Z, LV X H, ZHAO D Q, et al. Application of EH-4 electromagnetic sounding system in karst fissure water exploration in Linzi area of Shandong Province [J]. Land and Resources in Shangdong Province, 2013, 29(5): 40-43. (in Chinese))
- [15] 王焯, 曹哲明, 汤井田, 等. 铁路隧道工程勘查中高频大地电磁测深应用效果研究[J]. 工程地质学报, 2005, 13(3): 424-428. (WANG H, CAO Z M, TANG J T, et al. Application of the high frequency magnetotelluric sounding in the exploatory investigation of railway tunnel engineering[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(3): 424-428. (in Chinese))
- [16] 沈远超, 沈萍, 刘铁兵, 等. EH-4 在危机矿山隐伏金矿体定位预测中的应用研究[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(2): 559-567. (SHEN Y C, SHEN P, LIU T B, et al. Prediction of hidden gold orebodies in depleted mines by the Stratagem EH-4 system[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(2): 559-567. (in Chinese))
- [17] 叶益信, 邓居智, 方根显. 高频大地电磁测深(EH-4)在热储构造勘查中的试验研究——以抚州地热区为例[J]. 地质与勘探, 2011, 47(4): 649-653. (YE Y X, DENG J Z, FANG G X. The test research of high frequency magnetotelluric sounding to reservoir structure survey: Taking the Fuzhou geothermal area in Jiangxi Province as an example[J]. Geology and Prospecting, 2011, 47(4): 649-653. (in Chinese))
- [18] 王东华. 基岩储水构造研究中的应用电阻率和相位参数作用分析[J]. 地下水, 2018, 40(1): 96-97 (WANG D H. Analysis of the application of resistivity and phase parameters in the study of bedrock water storage structure[J]. Groundwater, 2018, 40(1): 96-97. (in Chinese))
- [19] 杨英杰. 对低山丘陵区基岩裂隙水富存部位的分析[J]. 吉林水利, 2015(1): 33-35 (YANG Y J. Analysis and Discussion on the hilly area of bedrock fissure water rich diversity of deposit [J]. Jilin Water Resources, 2015(1): 33-35. (in Chinese)) DOI: 10.15920/j.cnki.22-1179/tv.2015.01.010.
- [20] 郭永海, 王海龙, 董建楠, 等. 北山地区风化裂隙水分布特征和富集规律[J]. 世界核地质科学, 2012, 29(4): 222-226 (GUO Y H, WANG H L, DONG J N, et al. Distribution and enrichment regularity of weathering fracture water in Beishan area [J]. World Nuclear Geoscience, 2012, 29(4): 222-226. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-0636.2012.04.007.
- [21] 胡学玉, 李秋金, 解连坤. 变质岩地下水的富集与寻找[J]. 中国农村水利水电, 2000(7): 47-48. (HU X Y, LI Q J, XIE L K. Enrichment of groundwater in metamorphic rock and finding out [J]. China Rural Water and Hydropower, 2000(7): 47-48. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2000.07.025.
- [22] 王汉兴, 郑朋. 贵州省变质岩区基岩裂隙水富水分析[J]. 公路交通技术, 2016, 32(3): 10-14. (WANG H X, ZHENG P. Rich water analysis for fissure water in bed rock in metamorphic rock terrains in Guizhou Province [J]. Technology of Highway and Transport, 2016, 32(3): 10-14. (in Chinese)) DOI: 10.13607/j.cnki.gljt.2016.03.003.
- [23] 沈照理, 刘光亚, 杨成田, 等. 水文地质学[M]. 北京: 科学出版社, 1985. (SHEN Z L, LIU G Y, YANG C T, et al. Hydrogeology [M]. Beijing: Science Press, 1985 (in Chinese))
- [24] 徐光瑜, 刘福臣, 李凌霄. 泰山群变质岩地下水的富集条件与寻找方法[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(3): 24-27. (XU G Y, LIU F C, LI L X. Condition of storage structure and seeking groundwater below Taishan-group metamorphic rock [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(3): 24-27. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-5485.2009.03.007.
- [25] 谭长伟. 变质岩区地下水富集规律的探讨[J]. 地下水, 1992, 14(2): 115-118. (TAN C W. Discussion on the law of groundwater enrichment in metamorphic rock area [J]. Ground Water, 1992, 14(2): 115-118. (in Chinese))