

卢放, 罗旋, 胡文广, 等. 太行山北段岩溶裂隙水的富水性及其电性特征: 以保定西部山区为例[J]. 中国岩溶, 2022, 41(6): 986-997.  
DOI: 10.11932/karst20220610

# 太行山北段岩溶裂隙水的富水性及其电性特征 ——以保定西部山区为例

卢放, 罗旋, 胡文广, 于蕾

(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:**为揭示太行山北段岩溶裂隙水富水性分布规律, 采用电阻率、极化率、半衰时和偏离度分析不同含水层介质结构、不同含水岩组和不同地下水系统岩溶裂隙水与电性参数的关系, 探讨研究区岩溶裂隙水富水性的影响因素及其电性响应特征。结果表明: 含水层介质结构按照溶蚀孔洞型→断层型→褶皱型→岩体阻水型的排列顺序, 半衰时值分布范围依次降低, 而偏离度值分布范围依次升高; 四种电性参数对奥陶系含水岩组、蓟县系含水岩组具有较强的分辨能力; 极化率、半衰时和偏离度难以识别拒马河、界河—唐河以及瀑河—漕河三种岩溶裂隙地下水系统类型; 奥陶系含水岩组的富水性优于蓟县系含水岩组; 就含水层介质结构而言, 溶蚀孔洞型富水性最佳, 断层型和褶皱型次之, 岩体阻水型富水性最差。

**关键词:**岩溶裂隙水; 单位涌水量; 电性参数; 含水层介质结构; 含水岩组; 地下水系统; 富水性

中图分类号: P641.1 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2022)06-0986-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## 0 引言

随着经济快速发展, 太行山北段地区水资源短缺问题日益严重<sup>[1-2]</sup>。岩溶裂隙水是该地区主要的供水水源, 研究揭示岩溶裂隙水的分布特征及赋存规律, 是水资源合理开发利用迫切需要开展的工作。前人对中国太行山北段地区岩溶裂隙水的研究, 主要集中在岩溶裂隙的发育特征<sup>[3-8]</sup>、含水层介质结构的空组成<sup>[9-11]</sup>、地下水系统划分<sup>[12-15]</sup>、地下水污染<sup>[16-17]</sup>以及水资源保护<sup>[18-20]</sup>等方面, 但采用物探电性参数对富水性分布不均匀特征的刻画尚不多见, 利用物探工作开展富水性特征规律的探索, 解决当地用水困难, 具有重要的社会意义和研究价值。

本文以太行山北段岩溶裂隙水为对象, 探讨研究区地下水电性参数(电阻率 $\rho$ <sup>[21]</sup>、极化率 $\eta$ <sup>[22]</sup>、半衰时 $S_t$ <sup>[23]</sup>和偏离度 $r$ <sup>[24]</sup>)的分布特征, 分析电性参数与不同含水层介质结构、不同含水岩组和不同地下水系统岩溶裂隙水富水性的关系, 讨论影响电性参数与富水性关系的相关因素, 以期丰富太行山北段岩溶裂隙水的基础研究, 并为该地区岩溶地下水资源的科学开发利用提供支撑。

## 1 研究区概况

研究区位于河北省保定市西部太行山连片扶贫区, 包括涞水县、涞源县、易县和顺平县。区内太行

资助项目: 中国地质调查局地质调查项目“太行山北段综合地质调查”(DD20190259)

第一作者简介: 卢放(1977—), 男, 高级工程师, 主要从事水文地质、水文物探相关领域研究。E-mail: lufang1977@126.com。

通信作者: 罗旋(1991—), 女, 工程师, 主要从事水文地质领域研究。E-mail: 14782427@qq.com。

收稿日期: 2021-09-23

山脉呈北东—南西向展布,东坡陡峭,拔地而起屹立于华北平原西侧,最大高差可达2 000 m,从北西到南东依次为中低山、丘陵和山前平原。研究区内主要河流有拒马河、易水河、瀑河、漕河、界河和唐河。各河流上游修建水库,下游多出现断流、干涸现象。

研究区属于海河流域一级地下水系统中的大清

河流域二级地下水系统(VII)<sup>[25]</sup>,进一步划分的三级地下水系统有:拒马河岩溶裂隙地下水系统(VII<sub>1</sub>)、瀑河—漕河岩溶裂隙地下水系统(VII<sub>2</sub>)、界河—唐河岩溶裂隙地下水系统(VII<sub>3</sub>)<sup>[26]</sup>和四级、五级地下水系统,划分结果见表1。

表1 研究区岩溶地下水系统划分

Table 1 Classification of karst groundwater system in the research area

三级地下水系统代码及名称	四级地下水系统代码及名称	五级地下水系统代码及名称
拒马河岩溶裂隙地下水系统(VII <sub>1</sub> )	北拒马河岩溶裂隙地下水系统(VII <sub>1,2</sub> )	北拒马河岩溶裂隙地下水系统(VII <sub>1,2,3</sub> )
		大西沟岩溶裂隙地下水系统(VII <sub>1,2,5</sub> )
		鱼谷洞岩溶裂隙地下水系统(VII <sub>1,2,8</sub> )
瀑河—漕河岩溶裂隙地下水系统(VII <sub>2</sub> )	易水河岩溶裂隙地下水系统(VII <sub>1,3</sub> )	北易水河岩溶裂隙地下水系统(VII <sub>1,3,1</sub> )
		中易水河岩溶裂隙地下水系统(VII <sub>1,3,2</sub> )
		瀑河上游岩溶裂隙地下水系统(VII <sub>2,1-1</sub> )
界河—唐河岩溶裂隙地下水系统(VII <sub>3</sub> )	瀑河岩溶裂隙地下水系统(VII <sub>2,1</sub> )	北邵—东庄岩溶裂隙地下水系统(VII <sub>2,1-2</sub> )
		漕河岩溶裂隙地下水系统(VII <sub>2,2</sub> )
		界河上游岩溶裂隙地下水系统(VII <sub>3,1-1</sub> )
唐河岩溶裂隙地下水系统(VII <sub>3,2</sub> )	界河岩溶裂隙地下水系统(VII <sub>3,1</sub> )	安阳向斜东岩溶裂隙地下水系统(VII <sub>3,1-2</sub> )
		界河中上游岩溶裂隙地下水系统(VII <sub>3,1-3</sub> )
		安阳向斜西岩溶裂隙地下水系统(VII <sub>3,2-2</sub> )

研究区碳酸盐岩裂隙岩溶含水岩组可分为奥陶系碳酸盐岩裂隙岩溶含水岩组和蓟县系碳酸盐岩裂隙岩溶含水岩组。

奥陶系碳酸盐岩裂隙岩溶含水岩组包括冶里组(O<sub>1y</sub>)、亮甲山组(O<sub>1l</sub>)燧石条带白云岩和马家沟组(O<sub>1-2m</sub>)灰岩,主要分布于安阳向斜核部及两翼、紫石口—蒲洼一带。该含水岩组孔洞、溶隙、裂隙发育,多形成地下水富集带。

蓟县系碳酸盐岩裂隙岩溶含水岩组包括蓟县系雾迷山组(Jxw)、高于庄组(Jxg)燧石条带白云岩,主要分布于紫荆关大断裂以东地区。该含水岩组主要发育裂隙,富水性较好。

在上列含水层间沉积有青白口系龙山组(Qnl)石英砂岩、粉砂岩,下马岭组(Qnx)页岩、粉砂质页岩,以及寒武系下统馒头组(C<sub>2m</sub>)薄层泥岩、页岩、泥质灰岩等隔水层。

根据前人研究结果<sup>[27]</sup>,区内含水层介质结构主要有四类,分别为溶蚀孔洞型、断层型、褶皱型和岩体阻水型。

紫荆关大断裂是研究区的主要断裂,可分为北支断裂和南支断裂<sup>[28-30]</sup>。北支断裂经乌龙沟乡、河

东镇,走向为NE—SW,倾向南东,倾角较陡,铅直断距约计千米,断层带内发育0~20 m宽度不等的糜棱岩;南支断裂经镇厂、紫荆关镇、良岗镇延伸至灵山镇,走向为NE—SW,倾向南东,倾角为55°~75°,水平断距约20 m。两条断层均为正断层,上盘普遍较为破碎,断裂破碎带内白云岩、灰岩裂隙发育程度较高,富水性较好。

区域地质资料和测井数据显示,研究区和地下水有关的地层电阻率值变化较大(几十至数千Ω·m),主要受到断层、裂隙、破碎、是否泥质填充、是否充水等条件的影响,具体可参见表2。

## 2 研究方法

### 2.1 数据获取

为解决当地的用水需求,在研究区内布置39个探采结合的水文地质钻孔(图1)。各孔均通过抽水试验获取单位涌水量参数。

研究区岩溶裂隙水的富水性具有较为明显的激发极化响应<sup>[31]</sup>。一般情况下,在岩溶裂隙水富集区体现为较明显的电阻率ρ低值、极化率η高值、半衰



表 3 激发极化法极距

Table 3 Electrode spacing of induced polarization method

序号	供电极距AB/2/m	测量极距MN/2/m	装置系数K/m	序号	供电极距AB/2/m	测量极距MN/2/m	装置系数K/m
01	2.5	0.83	10.5	10	50	16.67	209.5
02	3.5	1.17	14.7	11	65	21.67	272.4
03	5.0	1.67	21.0	12	80	26.67	335.2
04	7.0	2.33	29.3	13	100	33.33	419.0
05	10.0	3.33	41.9	14	130	43.33	544.7
06	14.0	4.67	58.7	15	170	56.67	712.3
07	20.0	6.67	83.8	16	220	73.33	922.0
08	28.0	9.33	117.3	17	280	93.33	1 173.0
09	38.0	12.67	159.2	18	350	116.67	1 467.0

为保证电性参数实测数据的可靠性,测量中要求供电时间大于 30 s, MN 之间的电位差大于 20 mV。

## 2.2 数据处理

对采集的数据用 Grapher 软件进行统计分析并绘制箱型图。箱型图利用一组数据的最小值、第一四分位数(25%)、中位数即第二四分位数(50%)、第三四分位数(75%)与最大值来描述该组数据的统计学特征,其优点是不受异常值的影响,以一种相对稳定的方式描述数据的离散分布情况<sup>[32]</sup>。

单位涌水量或电性参数第一四分位数(25%)、第三四分位数(75%)所圈定的范围,反映出所有单位涌水量或电性参数值中间 50% 数据的离散程度,对研究区岩溶裂隙水的各种类型归属具有指示作用。

## 3 结果与分析

### 3.1 实验结果

39 个钻孔试验所得结果见表 4。单位涌水量与含水层介质结构、含水岩组和地下水系统存在如图 2 所示关系。

图 2a 中,溶蚀孔洞型岩溶裂隙水单位涌水量的第一四分位数和第三四分位数分别为  $15.33 \text{ L}\cdot(\text{s}\cdot\text{m})^{-1}$  和  $34.69 \text{ L}\cdot(\text{s}\cdot\text{m})^{-1}$ ,岩体阻水型单位涌水量的第一四分位数和第三四分位数分别为  $0.036 \text{ L}\cdot(\text{s}\cdot\text{m})^{-1}$  和  $0.107 \text{ L}\cdot(\text{s}\cdot\text{m})^{-1}$ ,溶蚀孔洞型和岩体阻水型单位涌水量分布范围差别很大,较易区分。而当研究区某钻孔单位涌水量值位于  $0.281\sim 0.353 \text{ L}\cdot(\text{s}\cdot\text{m})^{-1}$  范围时(即断层型第一四分位数和褶皱型第三四分位数),

难以分辨该钻孔岩溶裂隙水是属于断层型或者褶皱型。溶蚀孔洞型岩溶裂隙水富水性最佳,断层型次之,褶皱型稍逊,岩体阻水型最差(中位值分别为  $21.70 \text{ L}\cdot(\text{s}\cdot\text{m})^{-1}$ 、 $0.439 \text{ L}\cdot(\text{s}\cdot\text{m})^{-1}$ 、 $0.210 \text{ L}\cdot(\text{s}\cdot\text{m})^{-1}$  和  $0.078 \text{ L}\cdot(\text{s}\cdot\text{m})^{-1}$ )。图 2b 中,奥陶系含水岩组全部钻孔单位涌水量的中间 50% 数据位于  $10.56\sim 30.21 \text{ L}\cdot(\text{s}\cdot\text{m})^{-1}$  之间,蓟县系含水岩组全部钻孔单位涌水量的中间 50% 数据位于  $0.104\sim 1.037 \text{ L}\cdot(\text{s}\cdot\text{m})^{-1}$  之间,二者箱型图没有交集,说明奥陶系灰岩富水性普遍优于蓟县系白云岩。图 2c 中,绝大多数钻孔单位涌水量值存在较大范围的重合,说明单位涌水量值与岩溶裂隙水地下水系统难以建立明显的关联。

### 3.2 研究区电性参数与含水层介质结构、含水岩组和地下水系统之间的关系

#### 3.2.1 电性参数与岩溶裂隙水含水层介质结构之间的关系

图 3 中,电阻率值位于溶蚀孔洞型第三四分位数( $524 \Omega\cdot\text{m}$ )和岩体阻水型第一四分位数( $512 \Omega\cdot\text{m}$ )范围时,电阻率不能对四种含水层介质结构进行分辨。溶蚀孔洞型全部钻孔极化率中间 50% 数据位于  $1.826\%\sim 2.113\%$  之间,断层型全部钻孔极化率中间 50% 数据分布范围为  $1.638\%\sim 1.962\%$ ,二者重叠范围较大,极化率对此二种含水层介质结构的辨别能力较差。极化率值位于褶皱型第一四分位数( $0.924\%$ )和岩体阻水型第三四分位数( $1.121\%$ )范围时,极化率对褶皱型和岩体阻水型的分辨能力很弱。图 3 中半衰期和偏离度对溶蚀孔洞型和岩体阻水型的响应较为明显。在分辨 4 种含水层介质结构全局变化趋势方面,按照溶蚀孔洞型→断层型→褶皱

表 4 实验结果

Table 4 Test results

钻孔名称	单位涌水量/L·(s·m) <sup>-1</sup>	水位/m	电阻率/ $\rho/\Omega\cdot m$	极化率/ $\eta/\%$	半衰时/St/ms	偏离度/r/%	含水层介质结构	含水岩组	地下水系统	钻孔包气带岩性和厚度	所处地下水系统的动力场位置
沙峪	30.214	12.05	127	2.027	1 920	4.023	溶蚀孔洞型	奥陶系	Ⅶ <sub>1,2,8</sub>	粗砂1.64 m、砾12.03 m(层底埋深23.62 m)	岩溶水顶托补给区
芦子水	21.695	7.94	153	1.826	1 760	4.332	溶蚀孔洞型	奥陶系	Ⅶ <sub>1,2,8</sub>	粗砂2.10 m、卵石3.42 m(层底埋深18.25 m)	岩溶水顶托补给区
清水建	15.332	9.80	178	2.109	2 020	4.276	溶蚀孔洞型	奥陶系	Ⅶ <sub>1,2,8</sub>	粗砂1.22 m、砾7.33 m、卵石2.85 m(层底埋深27.31 m)	岩溶水顶托补给区
马各庄	33.564	12.45	147	1.657	1 550	3.902	溶蚀孔洞型	奥陶系	Ⅶ <sub>1,2,8</sub>	粗砂3.45 m、砾2.15 m、卵石1.39 m(层底埋深37.60 m)	岩溶水顶托补给区
西安阳	5.007	3.09	223	2.513	1 610	4.401	断层型	奥陶系	Ⅶ <sub>3,1,2</sub>	碎石3.09 m(层底埋深9.00 m)	人工开采区
岭后	10.560	11.86	234	2.016	1 540	4.631	褶皱型	奥陶系	Ⅶ <sub>3,2,2</sub>	卵石3.00 m、风化白云岩8.86 m(层底埋深47.00 m)	潜流排泄区
龙门	39.073	13.01	524	2.113	1 980	4.053	溶蚀孔洞型	蓟县系	Ⅶ <sub>1,2,3</sub>	卵石、砂13.01 m(层底埋深28.10 m)	岩溶水顶托补给区
西南蒲	4.080	48.45	97	1.927	1 860	4.601	溶蚀孔洞型	蓟县系	Ⅶ <sub>3,1,3</sub>	黏土15.20 m、卵石25.80 m、含砾砂岩6.40 m、砂岩1.05 m(层底埋深9.60 m)	人工开采区
计鹿	34.686	6.99	428	1.526	1 620	4.181	溶蚀孔洞型	蓟县系	Ⅶ <sub>1,2,3</sub>	粗砂5.12 m、砾2.43 m、卵石3.24 m(层底埋深16.25 m)	岩溶水顶托补给区
桑园	4.135	2.68	833	3.127	2 230	4.556	溶蚀孔洞型	蓟县系	Ⅶ <sub>1,2,3</sub>	卵石2.68 m(层底埋深6.60 m)	岩溶水顶托补给区
高庄	15.654	5.00	512	1.984	1 910	4.268	溶蚀孔洞型	蓟县系	Ⅶ <sub>1,2,3</sub>	回填土2.00 m、卵石3.00 m(层底埋深17.65 m)	岩溶水顶托补给区
南庄子	0.521	18.97	537	1.638	1 180	4.571	断层型	蓟县系	Ⅶ <sub>1,2,5</sub>	砾石18.52 m(层底埋深22.61 m)	岩溶地下水侧向补给区
安子沟	0.439	22.32	582	1.641	1 340	4.823	断层型	蓟县系	Ⅶ <sub>1,2,5</sub>	砾石2.34 m、卵石11.33 m(层底埋深20.67 m)	岩溶地下水侧向补给区
西角	0.386	16.28	399	1.501	1 400	4.907	断层型	蓟县系	Ⅶ <sub>1,2,3</sub>	砾石3.27 m、白云岩5.38 m(层底埋深20.34 m)	人工开采区
向阳	0.271	33.25	602	1.235	1 080	5.222	褶皱型	蓟县系	Ⅶ <sub>2,1,2</sub>	粉土1.34 m、细晶白云岩9.76 m(层底埋深6.39 m)	地下水径流区
东娄山	0.113	21.60	564	1.193	1 060	5.348	褶皱型	蓟县系	Ⅶ <sub>2,1,2</sub>	粉土2.13 m、细晶白云岩6.39 m(层底埋深8.66 m)	地下水径流区
南峪	1.037	128.41	1 185	1.962	1 530	4.222	断层型	蓟县系	Ⅶ <sub>1,2,3</sub>	回填土4.30 m、灰质白云岩124.11 m(层底埋深206.40 m)	大气降水入渗补给区
白云西庄	1.214	95.65	387	1.749	1 320	4.638	断层型	蓟县系	Ⅶ <sub>3,1,3</sub>	粉砂10.00 m、燧石条带白云岩49.00 m、白云岩56.65 m(层底埋深275.00 m)	人工开采区
娘娘宫	0.331	3.09	422	1.805	1 200	4.932	断层型	蓟县系	Ⅶ <sub>3,1,1</sub>	卵石3.09 m(层底埋深15.20 m)	大气降水入渗补给区

续表 4

钻孔名称	单位涌水量/L·(s·m) <sup>-1</sup>	水位/m	电阻率/ $\rho/\Omega\cdot\text{m}$	极化率/ $\eta/\%$	半衰时/St/ms	偏离度/ $r/\%$	含水层介质结构	含水岩组	地下水系统	钻孔包气带岩性和厚度	所处地下水系统的动力场位置
金水口	0.259	27.50	1083	1.712	1 050	5.132	断层型	蓟县系	Ⅶ <sub>1,2-5</sub>	砾石27.50 m(层底埋深28.96 m)	岩溶地下水侧向补给区
南康关	0.281	64.09	391	1.286	1 410	4.701	断层型	蓟县系	Ⅶ <sub>3,1-2</sub>	角砾岩64.09 m(层底埋深84.00 m)	人工开采区
辛宅	2.238	45.69	149	2.103	1 770	4.532	断层型	蓟县系	Ⅶ <sub>3,1-3</sub>	粉土21.00 m、粉质黏土24.69 m(层底埋深39.00 m)	人工开采区
西白司城	0.248	14.91	521	1.875	1 110	5.218	断层型	蓟县系	Ⅶ <sub>3,1-2</sub>	粉土4.06 m、风化泥质灰岩10.85 m(32.44 m)	人工开采区
史家沟	0.101	10.04	452	0.924	950	4.995	褶皱型	蓟县系	Ⅶ <sub>3,1-2</sub>	黏土0.66 m、破碎石灰岩8.34 m、竹叶状灰岩1.04 m(层底埋深12.54 m)	岩溶地下水侧向补给区
导务	0.006	4.26	516	0.913	910	5.706	褶皱型	蓟县系	Ⅶ <sub>3,1-2</sub>	黏土0.90 m、石灰岩3.36 m(层底埋深15.30 m)	地下水径流区
福山口	0.211	39.16	907	0.889	980	5.668	褶皱型	蓟县系	Ⅶ <sub>1,2-3</sub>	粉土11.90 m、微晶白云岩27.26 m(层底埋深37.70 m)	潜流排泄区
都衙	0.353	8.43	1076	1.333	1 100	5.425	褶皱型	蓟县系	Ⅶ <sub>1,2-3</sub>	砾石5.32 m、白云岩3.11 m(层底埋深46.88 m)	潜流排泄区
南清醒	0.354	1.29	261	1.628	1 280	4.506	褶皱型	蓟县系	Ⅶ <sub>3,1-1</sub>	含砾石黏土1.29 m(层底埋深4.70 m)	岩溶地下水侧向补给区
裸心峪	0.183	10.50	986	1.825	1 230	5.203	褶皱型	蓟县系	Ⅶ <sub>1,2-3</sub>	白云岩10.50 m(层底埋深41.40 m)	岩溶地下水侧向补给区
夏家庄	0.209	65.35	713	1.269	1 160	4.798	褶皱型	蓟县系	Ⅶ <sub>2,1-1</sub>	细晶燧石白云岩63.70 m、白云岩1.65 m(层底埋深14.70 m)	人工开采区
南百全	0.107	7.23	618	0.951	920	5.889	岩体阻水型	蓟县系	Ⅶ <sub>1,3-1</sub>	黏土5.39 m、细晶白云岩2.36 m(层底埋深12.39 m)	人工开采区
柳林庄	0.092	8.00	576	0.934	960	6.301	岩体阻水型	蓟县系	Ⅶ <sub>1,3-2</sub>	粉土2.41 m、微晶灰岩5.25 m(层底埋深3.95 m)	人工开采区
太和庄	0.011	7.99	577	0.775	910	6.891	岩体阻水型	蓟县系	Ⅶ <sub>1,3-1</sub>	粉质黏土6.00 m、细晶白云岩1.99 m(层底埋深55.40 m)	地下水径流区
上黄蒿	0.028	6.36	651	1.121	970	7.021	岩体阻水型	蓟县系	Ⅶ <sub>1,3-1</sub>	卵石6.36 m(层底埋深8.50 m)	人工开采区
福家庄	0.078	10.36	512	0.906	890	6.114	岩体阻水型	蓟县系	Ⅶ <sub>1,3-2</sub>	粉土3.00 m、微晶灰岩4.20 m、微晶灰岩3.16 m(层底埋深4.00 m)	人工开采区
官银堂	0.059	11.79	317	0.859	990	5.867	岩体阻水型	蓟县系	Ⅶ <sub>3,1-1</sub>	卵石5.50 m、粉晶白云岩6.29 m(层底埋深8.90 m)	大气降水入渗补给区
西后兴	0.108	36.24	206	1.539	1 090	4.938	岩体阻水型	蓟县系	Ⅶ <sub>3,1-3</sub>	黏土3.00 m、粉土18.50 m、黏土11.50 m、卵石3.24 m(层底埋深38.50 m)	人工开采区
南韩	0.036	27.84	725	0.821	820	6.329	岩体阻水型	蓟县系	Ⅶ <sub>2,1-2</sub>	粉土2.00 m、碎石12.40 m、砾石9.60 m、石灰岩3.84 m(层底埋深5.20 m)	地下水径流区
草庄儿	0.104	3.95	1088	1.002	990	5.331	岩体阻水型	蓟县系	Ⅶ <sub>1,2-2</sub>	砂卵石3.95 m(层底埋深8.60 m)	潜流排泄区

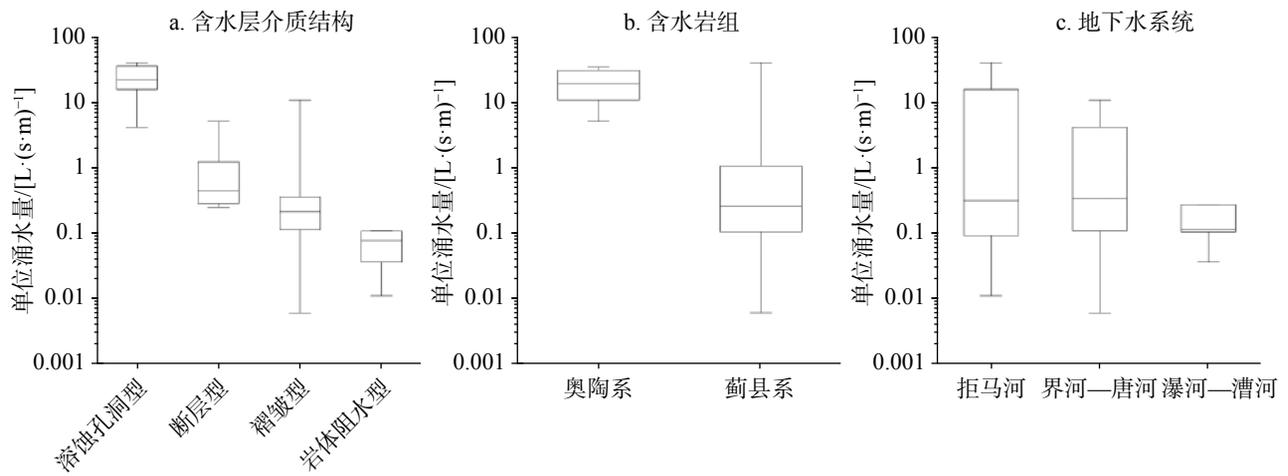


图2 单位涌水量及其影响因素

Fig. 2 Unit water inflow and influence factors

型→岩体阻水型的排列顺序,半衰时值分布范围依次降低,而偏离度值分布范围依次升高。

3.2.2 电性参数与岩溶裂隙水含水岩组之间的关系

图4中,奥陶系含水岩组岩溶裂隙水电阻率值的第三四分位数(223 Ω·m)与蓟县系的第一四分位数(422 Ω·m)存在很大差异,二者电阻率值分布范围

没有重合,蓟县系含水岩组岩溶裂隙水的电阻率明显高于奥陶系。奥陶系含水岩组岩溶裂隙水半衰时值的第一四分位数(1 550 ms)与蓟县系的第三四分位数(1 410 ms)差距较大,没有出现重合,说明半衰时对奥陶系及蓟县系含水岩组具有较强的分辨能力。极化率和偏离度在两种含水岩组分布的整体趋势方面,分别呈现下降和抬升的形态(按照奥陶系→蓟县

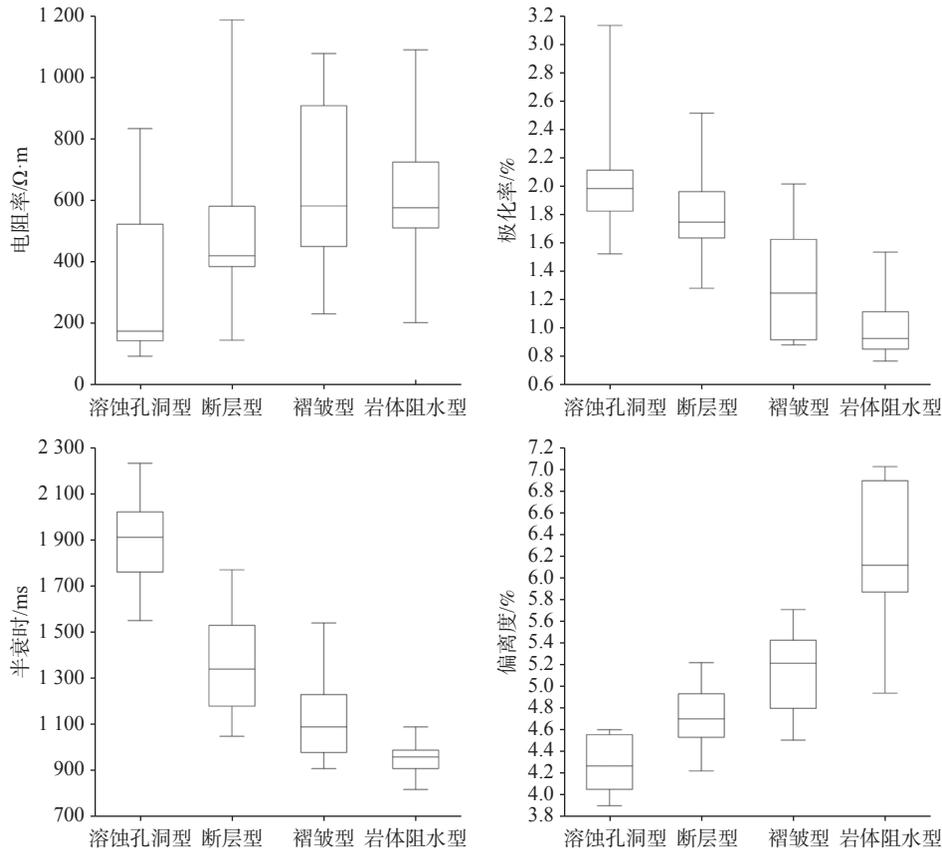


图3 电性参数与含水层介质结构之间的关系

Fig. 3 Relationships between electrical parameters and aquifers media structures

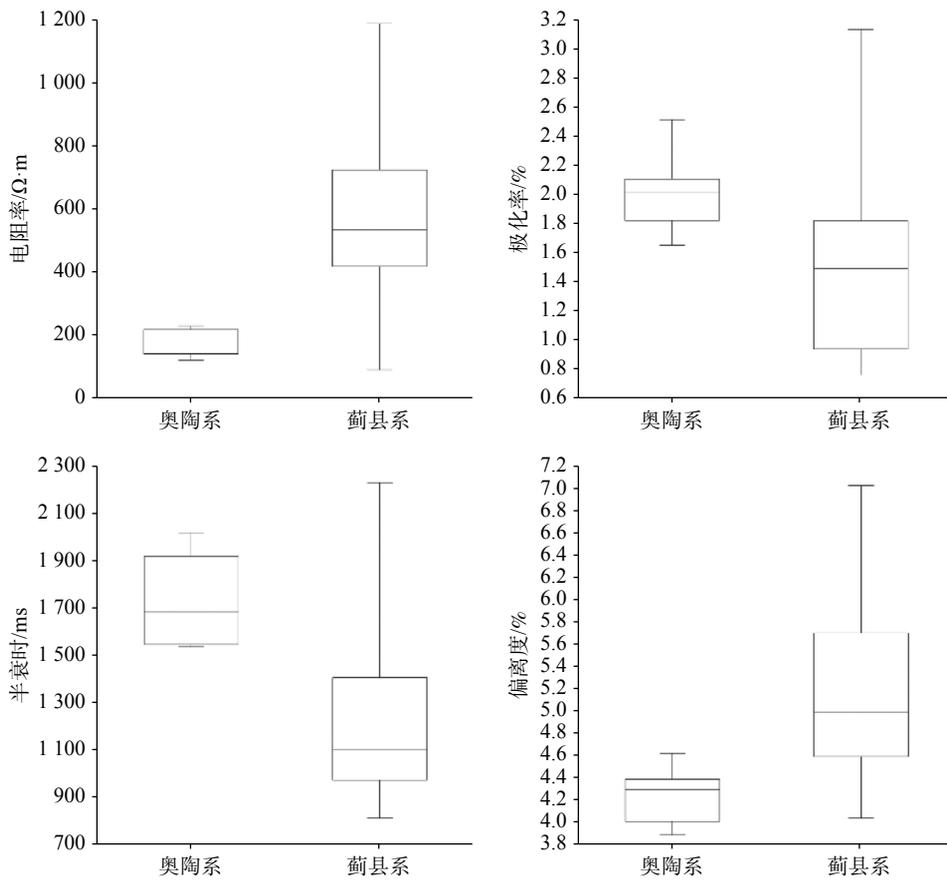


图 4 电性参数与含水岩组之间的关系

Fig. 4 Relationships between electrical parameters and water-bearing formations

系的排列顺序), 区别效果也较为可靠。

### 3.2.3 电性参数与岩溶裂隙水地下水系统之间的关系

图 5 中, 拒马河地下水系统电阻率值的第三四分位数 ( $907 \Omega \cdot m$ ) 与瀑河—漕河地下水系统的第一四分位数 ( $602 \Omega \cdot m$ ) 之间, 重合范围较广, 说明电阻率值难以分辨拒马河地下水系统与瀑河—漕河地下水系统。界河—唐河地下水系统的电阻率处于低值范围(电阻率中间 50% 数据分布范围为  $223 \sim 452 \Omega \cdot m$ )。拒马河地下水系统极化率值的第三四分位数 (1.984%) 与界河—唐河地下水系统的第一四分位数 (1.286%) 之间, 重合较多, 极化率对此两种地下水系统的分辨能力很差。瀑河—漕河地下水系统的极化率较低(极化率中间 50% 数据分布范围为  $1.002\% \sim 1.269\%$ ), 但依旧与拒马河地下水系统存在较小范围的重合现象。与极化率类似, 半衰时和偏离度同样难以体现三种地下水系统的整体变化趋势。

由表 4 可知, 单位涌水量大于  $2 L \cdot (s \cdot m)^{-1}$  的钻孔

有沙峪、芦子水、清水建、马各庄、计鹿、龙门、桑园、高庄、西安阳、岭后、西南蒲和辛宅等,  $0.3 L \cdot (s \cdot m)^{-1} <$  单位涌水量  $< 2 L \cdot (s \cdot m)^{-1}$  的钻孔有南庄子、安子沟、西角、娘娘宫、南清醒、白云西庄、都衙和南峪等。因此, 研究区岩溶裂隙水富水地段主要分布在紫荆关大断裂破碎带、安阳向斜附近, 以及界河—唐河岩溶裂隙地下水系统内。

### 3.3 其他影响因素

紫荆关大断裂对研究区岩溶裂隙水的分布具有重要影响。图 1 中, 拒马河岩溶裂隙地下水系统中的计鹿、福山口两个钻孔分别位于南支断裂的上、下两盘。两处含水岩组均为蓟县系雾迷山组、高于庄组白云岩, 但由于受到断层控水作用的影响, 形成上盘计鹿钻孔富水性(单位涌水量  $34.686 L \cdot (s \cdot m)^{-1}$ ) 优于下盘福山口钻孔(单位涌水量  $0.211 L \cdot (s \cdot m)^{-1}$ ) 的现象。计鹿钻孔电阻率  $428 \Omega \cdot m$ 、极化率 1.526%、半衰时 1620 ms 和偏离度 4.181%, 福山口钻孔电阻率  $907 \Omega \cdot m$ 、极化率 0.889%、半衰时 980 ms 和偏离度 5.668%。计鹿钻孔电性参数的富水性特征明显优

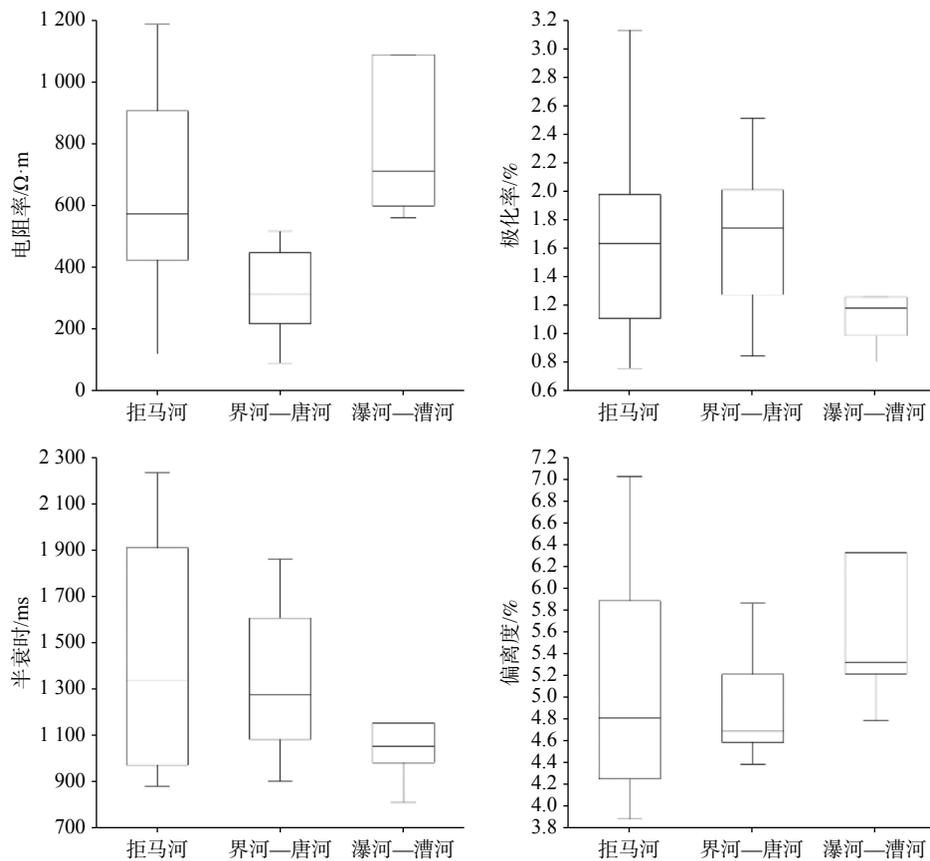


图5 电性参数与地下水系统之间的关系

Fig. 5 Relationships between electrical parameters and groundwater systems

于福山口钻孔。界河岩溶裂隙地下水系统中娘娘宫、官银堂两个钻孔也分别位于南支断裂的上、下两盘，单位涌水量、极化率、半衰时和偏离度也具有类似的富水性和贫水性特征。

研究区内的次级断裂对局部岩溶裂隙水的分布具有一定影响。图1中，界河岩溶裂隙地下水系统中的西白司城钻孔，位于紫荆关大断裂上盘蓟县系雾迷山组、高于庄组白云岩分布区，含水层介质结构亦为断层型。但由于西白司城钻孔附近发育有一条次级压性逆断层，导致钻孔单位涌水量仅为 $0.248 \text{ L} \cdot (\text{s} \cdot \text{m})^{-1}$ 。同理，该次级压性逆断层附近的导务钻孔，其电性参数基本上也能提供类似的岩溶裂隙水贫水性数据支持。

水位埋深、钻孔包气带岩性厚度以及所处地下水系统动力场位置对岩溶裂隙水的分布具有影响。随着岩溶水补、径、排关系发生动态变化，地下水位呈下降态势，包气带厚度增大，降水入渗路径增长，水力坡度一般增大，在一定程度上影响了岩溶水的流动场，导致岩溶水径流条件发生变化。由表4可知，包气带岩性为颗粒较粗的砂、砾、卵石时(如

龙门、计鹿、高庄等)，入渗补给量较大。包气带岩性为黏土、粉质黏土、细晶白云岩时(如上黄蒿、导务、太和庄等)，入渗补给量较小。

## 4 结论

(1)太行山北段保定西部山区岩溶裂隙水的电性参数分布区间大，数据离散程度高。按照溶蚀孔洞型→断层型→褶皱型→岩体阻水型的排列顺序，半衰时值分布范围依次降低，而偏离度值分布范围依次升高。电阻率、极化率、半衰时和偏离度对奥陶系含水岩组、蓟县系含水岩组具有较强的分辨能力。极化率、半衰时和偏离度难以识别拒马河、界河—唐河以及瀑河—漕河三种岩溶裂隙地下水系统类型；

(2)研究区奥陶系含水岩组富水性明显优于蓟县系。就含水层介质结构而言，溶蚀孔洞型富水性最佳，断层型和褶皱型次之，岩体阻水型富水性最差；

(3)紫荆关大断裂以及一些次级压性逆断层，对

断裂分布区岩溶裂隙水富水性有着较强的控制作用;

(4)研究区岩溶裂隙水富水地段主要分布在紫荆关大断裂上盘破碎带、安阳向斜附近及界河—唐河岩溶裂隙地下水系统内。

## 参考文献

- [1] 梁永平, 申豪勇, 赵春红, 王志恒, 唐春雷, 赵一, 谢浩, 石维芝. 对中国北方岩溶水研究方向的思考与实践[J]. 中国岩溶, 2021, 40(3): 363-380.  
LIANG Yongping, SHEN Haoyong, ZHAO Chunhong, WANG Zhiheng, TANG Chunlei, ZHAO Yi, XIE Hao, SHI Weizhi. Thinking and practice on the research direction of karst water in Northern China[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(3): 363-380.
- [2] 孟顺祥, 宋绵, 刘伟朋. 太行山区1:5万水文地质调查(水环中心)成果报告[R]. 北京: 中国地质调查局, 2017.  
MENG Shunxiang, SONG Mian, LIU Weipeng. The 1:50,000 hydrogeological investigation report of Taihang Mountains (Center for Hydrogeology and Environmental Geology, China Geological Survey)[R]. Beijing: China Geological Survey, 2017.
- [3] 曹贤发, 刘玉康, 刘之葵, 张炳晖. 基于强溶蚀带特征的地基岩溶发育程度评价方法[J]. 中国岩溶, 2020, 39(4): 577-583.  
CAO Xianfa, LIU Yukang, LIU Zhikui, ZHANG Binghui. Evaluation method of development degree based on features of intense dissolution layer[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(4): 577-583.
- [4] 李传生, 靳孟贵, 武选民, 刘宏伟, 王宁涛. 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, LIU Hongwei, WANG Ningtao. Metamorphic rock fissure water in mountains of Tang county and its direction of water finding[J]. *Yellow River*, 2009, 31(4): 34-35.
- [5] 刘元晴, 周乐, 李伟, 丁鹏, 吕琳, 马雪梅, 孟顺祥, 邓启军, 李波. 鲁中南山区古近系朱家沟组灰质砾岩溶蚀发育特征及水文地质意义[J]. 中国岩溶, 2020, 39(3): 327-334.  
LIU Yuanqing, ZHOU Le, LI Wei, DING Peng, LYU Lin, MA Xuemei, MENG Shunxiang, DENG Qijun, LI Bo. Dissolution characteristics of limestone conglomerate in the Paleogene Zhujiagou formation in the central and southern mountainous area of Shandong Province and hydrogeological implications[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(3): 327-334.
- [6] 钟祖良, 高国富, 刘新荣, 王南云, 李皓. 地下采动下含深大裂隙岩溶山体变形响应特征[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 97-106.  
ZHONG Zuliang, GAO Guofu, LIU Xinrong, WANG Nanyun, LI Hao. Deformation response characteristics of karst mountains with deep and large fissures under the condition of underground mining[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(4): 97-106.
- [7] 杨忠平, 蒋源文, 李滨, 高杨, 刘欣荣, 赵亚龙. 采动作用下岩溶山体深大裂隙扩展贯通机理研究[J]. 地质力学学报, 2020, 26(4): 459-470.  
YANG Zhongping, JIANG Yuanwen, LI Bin, GAO Yang, LIU Xinrong, ZHAO Yalong. Study on the mechanism of deep and large fracture propagation and transfixion in karst slope under the action of mining[J]. *Journal of Geomechanics*, 2020, 26(4): 459-470.
- [8] 唐博宁, 朱传庆, 邱楠生, 崔悦, 郭飒飒, 陈驰. 雄安新区雾迷山组岩溶裂隙发育特征[J]. 地质学报, 2020, 94(7): 2002-2012.  
TANG Boning, ZHU Chuanqing, QIU Nansheng, CUI Yue, GUO Sasa, CHEN Chi. Characteristics of the karst thermal reservoir in the Wumishan Formation in the Xiong'an New Area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(7): 2002-2012.
- [9] 刘伟朋, 卢放, 韩振, 孟顺祥, 龚冀丛. 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 Weipeng, LU Fang, HAN Zhen, MENG Shunxiang, GONG Jicong. 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.
- [10] 吉学亮, 尹学灵, 潘晓东, 陈志兵. 岩溶斜坡地带基于蓄水构造的地下水富集模式[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(22): 8-15.  
JI Xueliang, YIN Xueling, PAN Xiaodong, CHEN Zhibing. Groundwater enrichment model in karst slope zone based on storage structure[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(22): 8-15.
- [11] 贾德旺. 鲁南山区基岩蓄水构造类型及找水定井方法[J]. 地质学刊, 2020, 44(3): 318-325.  
JIA Dewang. Type of bedrock water storage structure and the method of water exploration and well determination in the southern mountainous area of Shandong[J]. *Journal of Geology*, 2020, 44(3): 318-325.
- [12] 梁永平, 王维泰. 中国北方岩溶水系统划分与系统特征[J]. 地球学报, 2010, 31(6): 860-868.  
LIANG Yongping, WANG Weitai. The division and characteristics of karst water systems in Northern China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2010, 31(6): 860-868.
- [13] 冯亚伟, 陈洪年, 贾德旺. 山东省岩溶地下水系统划分及构造模式[J]. 水文, 2020, 40(6): 83-89.  
FENG Yawei, CHEN Hongnian, JIA Dewang. Division and structural pattern of karst groundwater system in Shandong Province[J]. *Journal of China Hydrology*, 2020, 40(6): 83-89.
- [14] 蒋显忠, 夏平. 伊犁盆地地下水系统划分研究[J]. 地下水, 2020, 42(4): 44-45.  
JIANG Xianzhong, XIA Ping. Study on division of groundwater system in Yili Basin[J]. *Groundwater*, 2020, 42(4): 44-45.
- [15] 邵杰, 李瑛, 董美玲, 冯俊岭. 新疆伊犁河谷地下水系统划分及特征研究[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(22): 43-46.  
SHAO Jie, LI Ying, DONG Meiling, FENG Junling. Classification and characteristics of groundwater system in Yili river val-

- ley of Xinjiang[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47(22): 43-46.
- [16] 高旭波, 王万洲, 侯保俊, 高列波, 张建友, 张松涛, 李成城, 姜春芳. 中国北方岩溶地下水污染分析[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(3): 287-298.
- GAO Xubo, WANG Wanzhou, HOU Baojun, GAO Liebo, ZHANG Jianyou, ZHANG Songtao, LI Chengcheng, JIANG Chunfang. Analysis of karst groundwater pollution in Northern China[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(3): 287-298.
- [17] 钱家忠, 汪家权, 葛晓光, 张寿全, 李如忠. 我国北方型裂隙岩溶水流及污染物运移数值模拟研究进展[J]. *水科学进展*, 2003, 14(4): 509-512.
- QIAN Jiazhong, WANG Jiaquan, GE Xiaoguang, ZHANG Shouquan, LI Ruzhong. Advances in research for numerical simulation of contaminant transport and flow in North China type fracture karst media[J]. *Advances in Water Science*, 2003, 14(4): 509-512.
- [18] 梁永平, 王维泰, 赵春红, 王玮, 唐春雷. 中国北方岩溶水变化特征及其环境问题[J]. *中国岩溶*, 2013, 32(1): 34-42.
- LIANG Yongping, WANG Weitai, ZHAO Chunhong, WANG Wei, TANG Chunlei. Variation of karst water and environmental problems in North China[J]. *Carsologica Sinica*, 2013, 32(1): 34-42.
- [19] 申豪勇, 梁永平, 徐永新, 张发旺. 中国北方岩溶地下水补给研究进展[J]. *水文*, 2019, 39(3): 15-21.
- SHEN Haoyong, LIANG Yongping, XU Yongxin, ZHANG Fawang. Research progress of karst groundwater recharge in Northern China[J]. *Journal of China Hydrology*, 2019, 39(3): 15-21.
- [20] 王宇. 岩溶区地表水与地下水资源及环境统一评价的流域边界划分研究[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(6): 823-830.
- WANG Yu. Study on watershed boundary division for unified evaluation of surface water and groundwater resources and environment in karst areas[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(6): 823-830.
- [21] 夏中广, 郭莹. 电法勘探在某辉锑矿采空区探测中的应用[J]. *工程地球物理学报*, 2013, 10(5): 676-682.
- XIA Zhongguang, GUO Ying. The application of electrical prospecting to the exploration of a stibnite goaf[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2013, 10(5): 676-682.
- [22] 宋洪伟, 张翼龙, 夏凡, 殷夏, 苗青壮. 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, YIN Xia, MIAO Qingzhuang. 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.
- [23] 李慧杰, 朱庆俊, 李伟, 王璇. 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, WANG Xuan. Storage rules and electrical characteristics of groundwater in Genozoic Basalt in Linqu county of Shandong[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2012, 10(6): 65-69.
- [24] 李金铭. 激发极化法方法技术指南[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 184-185.
- LI Jinming. Technical guide for induced polarization method[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 184-185.
- [25] 张宗祜, 李烈荣. 中国地下水资源(河北卷)[M]. 北京: 中国地图出版社, 2005: 5-6.
- ZHANG Zonghu, LI Lierong. Groundwater resources of China(vol. Hebei)[M]. Beijing: SinoMaps, 2005: 5-6.
- [26] 陈望和. 河北地下水[M]. 北京: 地震出版社, 1999: 132-133.
- CHEN Wanghe. Groundwater of Hebei[M]. Beijing: Seismological Press, 1999: 132-133.
- [27] 韩双宝, 李甫成, 马涛. 燕山—太行山连片扶贫区1:5万水文地质调查成果报告[R]. 北京: 中国地质调查局, 2019.
- HAN Shuangbao, LI Fucheng, MA Tao. The 1:50,000 hydrogeological investigation report of contiguous poverty alleviation area in the Taihang-Yanshan Mountains[R]. Beijing: China Geological Survey, 2019.
- [28] 河北省地质矿产局. 河北省北京市天津市区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 571-574.
- Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration. Regional geological memoirs of Hebei, Beijing and Tianjin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989: 571-574.
- [29] 薛原. 太行山北段紫荆关断裂带构造特征与活动期次[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- XUE Yuan. Structural characteristics and evolutionary stages of Zijingguan fault zone in northern Taihang Mountains[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015.
- [30] 陈桂华. 紫荆关断裂带构造活动特征: 以太行山北段为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2002.
- CHEN Guihua. Evolutional and structural characteristics of Zijingguan fault zone: An example from northern part of Taihang Mountains[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2002.
- [31] 程志平. 电法勘探教程[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 110-111.
- CHENG Zhiping. Electrical exploration course[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007: 110-111.
- [32] 何高清, 肖健. 轴承尺寸检测数据的异常值检测与数据处理研究[J]. *机电工程*, 2021, 38(2): 198-203.
- HE Gaoqing, XIAO Jian. Outlier detection and data processing of bearing dimension detection data[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2021, 38(2): 198-203.

## Water abundance of karst fissure water and its electrical properties in north Taihang Mountains: A case study of mountainous area in the west of Baoding

LU Fang, LUO Xuan, HU Wenguang, YU Lei

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

**Abstract** In north Taihang Mountains, there are mainly located the karst fissure groundwater systems of Juma river, of Puhe river-Caohe river and of Jiehe river-Tanghe river. The water-bearing formation of carbonatite karst fissure in the research area can be divided into the Ordovician and the Jixian water-bearing formations. The Ordovician water-bearing formation is mainly developed with chert zebra dolomite and limestone with holes, solution cracks and fissures and groundwater concentration zones. The Jixian water-bearing formation is made up of chert zebra dolomite with fissures, where water abundance is good. The aquifer medium structures in the research area are divided into corrosion pore type, fault type, fold type and water blocking type of rock mass. Zijingguan fault is a normal fault with relatively fragmented hanging wall. The fissures of dolomite and limestone are developed in the fracture zone with good water abundance. To determine the spatial variation of water abundance of karst fissure water in the northern Taihang Mountains and the electrical characteristics of fissure water, karst fissure water in the northern Taihang Mountains was taken as research object and the data of unit water inflow of 39 boreholes was obtained by pumping tests.

According to the characteristic of karst fissure water i.e., obvious induced polarization response, four electrical parameters—resistivity, polarizability, half damping time and deviation degree—were acquired by induced polarization method. Statistical analyses and box-whisker plots were processed by Grapher software. The distribution characteristics of four electrical parameters were studied. The relationships between electrical parameters and water abundance of karst fissure water in different aquifer medium structures, water-bearing formations and groundwater systems were analyzed. Interfering factors of water abundance of karst fissure water in the research area and its electrical response characteristics were discussed. The range delineated by lower box (25%) and upper box (75%) of unit water inflow or electrical parameters reflects the dispersion degree of 50% of the data in the central range, which is indicative of various types of karst fissure water in the research area. Results showed that the structure of aquifer media was arranged in the order of corrosion pore type→fault type→fold type→water blocking type of rock mass. In this sequence, the distribution range of half aging value decreases in turn, while the distribution range of deviation value increases correspondingly. It is difficult to distinguish the four types of aquifer medium structures by resistivity and polarizability. Water-bearing formations of the Ordovician system and the Jixianian system could be identified effectively with resistivity, polarizability, half damping time and deviation degree. It was hard to identify groundwater system types among the Juma river, the Jiehe river-Tanghe river and the Puhe river-Caohe river just by the use of polarizability, half damping time and deviation degree. Water abundance in the Ordovician system is better than its value in the Jixianian system. The best water abundance was found in corrosion pore type, followed by fault type, fold type, and water blocking type of rock mass in sequence.

**Key words** karst fissure water, unit water inflow, electrical parameter, aquifer medium structure, water-bearing formation, groundwater system, water abundance

(编辑 黄晨晖)