第 31 卷第 4 期 地 质 与 资 源 Vol. 31 No. 4
2022 年 8 月 GEOLOGY AND RESOURCES Aug. 2022
文章编号:1671-1947(2022)04-0539-09 中图分类号:P641.1;P642.25 开放科学标志码(OSID):
DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2022.04.011 文献标志码:A

河北省兴隆县北部岩溶储水结构特征及供水服务能力分析

杨学亮[1],杨 熙[2],张 勃[2],赵建青[1],王昕洲[1],郑 军[1]
1. 河北省地质环境监测院,河北 石家庄 050000;
2. 河北省地质矿产局 第四水文工程地质大队,河北 沧州 06100

摘 要: 河北省承德市兴隆县北部地区赋存丰富的岩溶水资源, 该岩熔水为当地居民生产生活用水的主要来源. 在 1:5 万水文地质调查研究中,以岩溶水为主要研究对象,查明了区内基础水文地质条件;对岩溶含水岩组进行了划分,查明了区域岩溶储水结构特征,将研究区划分为滦河流域下游柳河流域主要储水结构及滦河流域下游柴白河流域主要储水结构. 在研究区实施探采结合孔 3 眼,施工配套观测孔 3 眼,对探采结合孔供水服务能力进行分析评估,可为该地区岩溶地下水资源的合理开发利用提供科学依据.

关键词:岩溶水;储水结构;供水能力; 水资源;滦河流域;河北省

STORAGE STRUCTURE AND SUPPLY CAPACITY OF KARST WATER IN NORTHERN XINGLONG COUNTY, HEBEI PROVINCE

YANG Xue-liang[1], YANG Xi[2], ZHANG Bo[2], ZHAO Jian-qing[1], WANG Xin-zhou[1], ZHENG Jun[1]
1. *Hebei Institute of Geological Environment Monitoring, Shijiazhuang* 050000, *China*; 2. *No.4 Hydrological Engineering Geological Team, Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration, Cangzhou* 061000, *Hebei Province, China*

Abstract: The abundant karst water resources in the northern Xinglong County of Chengde City, Hebei Province, serve as the major water supplies for production and daily life of local residents. The basic hydrogeological conditions in the area are identified with karst water as the main study object in the 1∶50 000 hydrogeological survey. Through the classification of water-bearing rock formations and analysis of the storage structure characteristics of regional karst water, the study area is divided into the main water storage structures of Liuhe river basin and Qaibai river basin in the lower reaches of Luanhe River Basin. Three exploration-mining combination boreholes and three construction matching observation wells are applied for the analysis and evaluation of water supply capacity of boreholes, to provide scientific basis for rational development and utilization of karst groundwater resources in the area.

Key words: karst water; water storage structure; water supply capacity; water resource; Luanhe River Basin; Hebei Province

0 引言

关于岩溶储水结构特征及岩溶裂隙储水问题,国内许多学者做了详细研究和论述[1-7],强调了岩溶裂隙水对我国北方地区地下水资源的重要性. 笔者基于承

收稿日期:2021-04-08;**修回日期**:2021-07-30. **编辑**:李兰英.
基金项目:中国地质调查局项目"承德地区水文地质调查"(编号 DD20190311).
作者简介:杨学亮(1981—),男,硕士,高级工程师,从事水文地质、工程地质、地质灾害、矿山环境生态修复等方面研究,通信地址 河北省石家庄市兴苑街 58 号,E-mail//114120538@qq.com

德地区水文地质调查项目所取得的数据，综合分析区域水文地质条件及钻孔资料，对研究区含水岩组进行了划分. 同时对区域岩溶储水结构特征进行研究探索，将研究区划分为滦河流域下游柳河流域主要储水结构、滦河流域下游柴白河流域主要储水结构. 在研究区实施探采结合孔 3 眼，施工配套观测孔 3 眼，对钻孔总供水能力进行评估，旨在为该地区岩溶地下水资源的合理开发利用提供科学依据.

研究区位于河北省承德市兴隆县北部，包括鹰手营子矿区、汪家庄镇、北马圈子镇、北营房镇等乡镇. 该区属半湿润半干旱大陆性季风型山地气候，地下水主要靠大气降水入渗补给，其次为域外地下水的侧向径流补给. 区内降水量、降水强度及降水补给特征对地下水形成起着主要控制作用. 多年平均降雨量 545.6 mm，降水年内分配极不均匀，7—8 月份降雨量占全年的 70%，且多为暴雨，加之地形坡度较大，植被发育一般，降水入渗系数仅为 4%~8%，所以大部分降水以地表径流流失. 主要河流为柳河、清水河、柴白河及洵河.

研究区是 20 世纪 50 年代末兴起的老工业基地，资源枯竭较为严重，生态环境脆弱，水资源的短缺阻碍着这一地区的社会经济发展. 因此，紧密结合研究区社会经济发展需求，寻找岩溶储水结构并开发利用岩溶水资源成为解决该地区缺水问题的重要途径.

1 研究区地质-水文地质概况

1.1 地质背景

研究区位于燕山构造单元的内蒙地轴南侧燕山台褶带，自元古宙末期基底形成以来，长期处于被剥蚀状态. 区内地层主要发育元古宇长城系、蓟县系、青白口系，古生界寒武系、奥陶系，中生界侏罗系以及第四系，且有太古宇深变质岩、混合岩分布. 至燕山运动地台活化，形成一系列断陷盆地，接受了数千米中生代砂砾岩、泥岩、火山岩及火山碎屑岩堆积. 受新华夏构造体系控制，区内主要的大断裂为平坊-桑园大断裂及密云-喜峰口大断裂，破碎带数十米，最宽可达 200~300 m，断面陡倾，裂隙、溶隙密集. 含水层厚度大、面积广，能够广泛接受大气降水，构成完整的岩溶水系统，常有泉出露.

研究区一般断裂按其展布方向分为 NE—NNE 向、近 E-W 向两组. 其中 NE—NNE 向断裂遍布全区，数量最多，为该区主要构造. 断裂规模相差悬殊，长数千米至几十千米. 在走向上多呈弯曲波状，形成断裂带. 近 E-W 向断裂与 NE—NNE 向断裂相交分布，不同级次的断裂、褶皱等构造较为发育，形成断裂带. 构造裂隙发育较好的地段为地下水的形成提供了有利条件，可作为区域性岩溶裂隙水的储水空间和导水通道[8]，对区内岩溶裂隙水的分布与径流起到了很大作用. 岩溶地下水系统受该构造控水影响较为明显，认为构造空间分布特征是地下水系统边界划分的重要依据之一.

1.2 岩溶含水岩组

根据地层岩性、地下水赋存条件、水理性质和富水性，研究区地下水含水系统可分为 4 种类型：松散岩类孔隙含水岩组、碳酸盐岩裂隙溶洞含水岩组、碎屑岩类孔隙裂隙含水岩组、岩浆岩变质岩裂隙含水岩组. 其中碳酸盐岩裂隙溶洞含水岩组分布面积广，裂隙密集，岩层破碎，含水层厚度大，能够广泛接受大气降水，为区内主要岩溶含水层组.

据资料分析可知，部分岩溶含水系统同时存在大气降水、地表水、松散岩类孔隙水、碎屑岩类孔隙裂隙水、岩溶地下水等多种水资源要素，各水资源要素之间存在直接或者间接的复杂转化关[9]. 研究区碳酸盐岩裂隙溶洞含水岩组不仅接受大气降水入渗补给，同时还接受清水河、柴白河、柳河在系统上游地区地表产流进入碳酸盐岩区后对岩溶水形成的渗流补给，及河谷冲洪积层孔隙含水层在进入碳酸盐岩区后通过地下潜流形成对岩溶水的补给.

岩溶水多富集于构造所控制形成的地下暗河或储藏于可溶岩层中[10]. 研究发现，本区岩溶水主要储藏于可溶岩层中. 依据地下水赋存条件及水动力特征，将其分为 4 类，如表 1.

1)奥陶系碳酸盐岩裂隙溶洞含水岩组

该岩组主要分布在研究区中部刘家庄-洞庙河站-跳沟、小煤岭沟-石家庄-李家东沟及西南部马家庄-马家庄后沟. 断裂构造发育，岩石较破碎，岩溶较发育. 北沟-小跳沟-梁西一带为水量丰富区，小跳沟现已建供水水源地 1 处，共打 3 眼井，可开采资源约为 600×10^4 m^3/a，为中型水源地. 位于拨东的钻孔 ZK2，抽水试验资料显示，涌水量约为 2 200 m^3/d. 位于跳沟的

表 1　含水岩组划分

Table 1　Classification of water-bearing rock formations

大类	亚类	次亚类	主要含水岩层	主要含水岩层岩性
碳酸盐岩裂隙溶洞含水岩组	1)奥陶系碳酸盐岩裂隙溶洞含水岩组(碳酸盐岩含量大于 70%)	——	中下奥陶系统	灰岩、白云质灰岩、豹皮状灰岩、泥质条带灰岩等
	2)寒武系碳酸盐岩裂隙溶洞含水岩组(碳酸盐岩含量大于 70%)	——	炒米店组、崮山组、张夏组、馒头组、昌平组	灰岩、泥质条带灰岩、白云质灰岩等
	3)蓟县系碳酸盐岩裂隙溶洞含水岩组	1)雾迷山组-高于庄组碳酸盐岩裂隙溶洞含水岩组(碳酸盐岩含量大于 70%)	雾迷山组、杨庄组一段至二段、高于庄组一段至四段	中层及厚层状白云岩、砂质白云岩、泥质白云岩、硅质白云岩、白云质灰岩等
		2) 铁岭组碳酸盐岩裂隙溶洞含水岩组(碳酸盐岩含量 50%~70%)	铁岭组	白云岩、含锰白云岩夹页岩、泥质白云岩等
	4)长城系大红峪组碳酸盐岩裂隙溶洞含水岩组(碳酸盐岩含量 50%~70%)	——	大红峪组	厚层石英砂岩夹硅质条带白云岩、页岩等

钻孔 ZK3，涌水量约为 1 900 m^3/d. 小煤岭沟–东窝铺一带,汇水面积相对窄小,构造裂隙发育较差,灰岩破碎程度相对较差,参考《水文地质图编制规范(1:50 000)》中关于含水岩组富水性的分类规定，将其划分为水量中等区.

2)寒武系碳酸盐岩裂隙溶洞含水岩组

该岩组主要分布在研究区中部老虎沟–徐家庄、西南部王田沟–郝家庄、东部金扇子–东窝铺. 含水层组分布面积多狭长且受顶底板岩层岩性影响，富水性相对较差. 一般情况下水量中等区井孔涌水量及泉流量多为 300~1 000 m^3/d. 水量贫乏区井孔涌水量及泉流量多小于 300 m^3/d.

3)蓟县系碳酸盐岩裂隙溶洞含水岩组

该含水岩组分为两类.

①蓟县系雾迷山组–高于庄组碳酸盐岩裂隙溶洞含水岩组：主要分布在研究区东北部涝洼–孔隆堂南沟、老雕窝–小石门及南部火道沟–小水泉. 水量丰富区含水层较厚,且受断裂构造带影响,裂隙、溶隙密集,能够广泛接受大气降水,构成完整的岩溶水系统.

②蓟县系铁岭组碳酸盐岩裂隙溶洞含水岩组:主要分布在工作区中部头道沟–转鱼沟–东沟、东部老烧锅河北一带及西南部东梅寺–郝家庄西沟. 分布面积较小,含水层较薄,一般在构造发育地带富水性较好,其他部位富水性相对较差,在本区基本为水量贫乏区,井孔涌水量多小于 100 m^3/d,常见泉流量多小于 1 L/s (86.4 m^3/d).

4)长城系大红峪组碳酸盐岩裂隙溶洞含水岩组

该岩组主要分布在研究区东北部小石门一带,面积较小,含水层较薄,为水量极贫乏区.

2　岩溶储水结构

岩溶储水结构是寻找地下水的有利靶区. 本研究以水文地质调查为先导，分析了研究区多年的水文地质工程地质资料，在一定程度上掌握了区域的构造展布;选择适宜的地球物理探测方法,开展综合地球物理勘查,寻找具有供水价值的含水层、储水结构,并获得含水层的埋深、厚度,储水结构的规模、空间分布等基本数据[11]. 从区域上看,地质构造作用方式决定了岩溶储水构造的水文地质特征，储水构造所处的地形地貌条件决定了地下水的补给排泄范围、水量丰富程度和循环模式[12]. 研究认为,虽然岩溶储水载体在纵横方向上发育不均一，但大体规律是岩溶地下水多储藏于可溶岩层中. 岩溶水系统控制着岩溶地下水的循环、分布、埋藏、富集规律等;水化学的分布特征控制着岩溶含水层的脆弱性程度[9]. 将研究区划分为滦河流域下游柳河流域主要储水结构、滦河流域下游柴白河流域主要储水结构.

2.1　滦河流域下游柳河流域主要储水结构

寻找岩溶储水结构,需要结合地形地貌特征、地下水埋深情况、地层岩性特点等,并合理选择物探方法组合,综合分析其特征,来探明地下含水结构的走向、宽度、下延伸度等[10]. 本研究针对滦河流域下游主要岩溶储水结构开展了物探和钻探工作，主要工作集中在拨东及跳沟工作区.

工作中查明了主要储水结构为碳酸盐岩岩溶裂隙溶洞溶隙. 该区域碳酸盐岩具厚层状致密块状构造，属硬脆性岩石，在构造应力作用下，易产生张性节理裂隙，并经水的长期溶蚀作用，溶孔、溶隙、溶洞发育，构成很好的储水空间. 尤其是在径流排泄区，岩溶水较富集，在断裂(层)破碎带、阻水岩层的迎水侧及岩体接触部位，地下水交替循环强烈，岩溶发育程度高，常常构成较大的储水构造. 岩溶水系统内往往同时存在包括大气降水、地表水、松散层孔隙地下水、碎屑岩裂隙地下水和岩溶地下水等多种水资源要素，各水资源要素间存在直接或者间接的复杂转化关系[9]. 岩溶储水结构，可作为缺水村镇居民分散供水或者集中供水较为理想的水源[12]. 寻找有利于地下水富集的储水结构，对于解决人畜缺水问题是一条重要途径.

1)拨东灰岩-裂隙导水储水结构

拨东工作区主要出露中奥陶统厚层灰岩、白云质灰岩夹竹叶状灰岩及下奥陶统豹皮状灰岩、泥质条带灰岩、白云质灰岩. 推测灰岩岩层经过多次地质构造变动，产生了褶皱和断裂，并被含有二氧化碳的水溶蚀，发育溶隙，在局部形成连通性各异的裂隙网络[13]，既可以提供大气降水和地表水的入渗运移通道，又可以为岩溶地下水提供储存和积蓄的空间.

采用激电中梯测深、可控源音频大地电磁测深等方法，完成了物探剖面. 其中 L02 线近南北向顺沟布设，大致查明了奥陶系下统和中统接触带存在裂隙发育，并通过南东向破坏构造的导水通道以确定勘查施工孔位. 结果显示：于深度 50~200 m 范围内探测到电阻率梯度变化带，与中下奥陶统岩层倾向一致，为下奥陶统、中奥陶统地层接触带. 构造裂隙(倾角约 50°)沿南东向发育，导致岩层较破碎，影响带宽度大，形成地下水富集带，地下水赋存条件较好，构成灰岩-裂隙导水储水结构. 认为地下水的主要储存形式为构造控制下的岩溶网络-管道裂隙水. 物探解释成果见图 1.

在拨东村施工了一眼探采结合孔 ZK2，配套施工一眼观测孔 GCK2. 主孔 ZK2 揭露的地层结构为：0~1 m 为灰黑色杂填土，由黏性土、碎残石及其他杂物组成；1~29 m 为黄褐色碎石土，碎石含量约占 70%，多为棱角状，成分以灰岩为主，含少量砂岩，由粉质黏土填充；29~30 m 为漂石层；30~101 m 为青灰色奥陶系灰岩，隐晶质结构，块状构造，主要由碳酸盐矿物组成，局部见有方解石脉，岩心呈短柱状，可见节理裂隙，岩质较硬；30.5~32 m 为黄褐色断层泥. 主要裂隙段及含水层位置为 45~50 m 和 65~70 m.

对该钻孔进行了 2 个落程稳定流抽水试验. 根据抽水试验数据及观测结果，使用曲度法判断涌水量方程类型. 该井静水位为 7.84 m，最大降深 2.31 m 时，稳定后单井涌水量约为 2 000 m^3/d. 通过钻探工作，进一

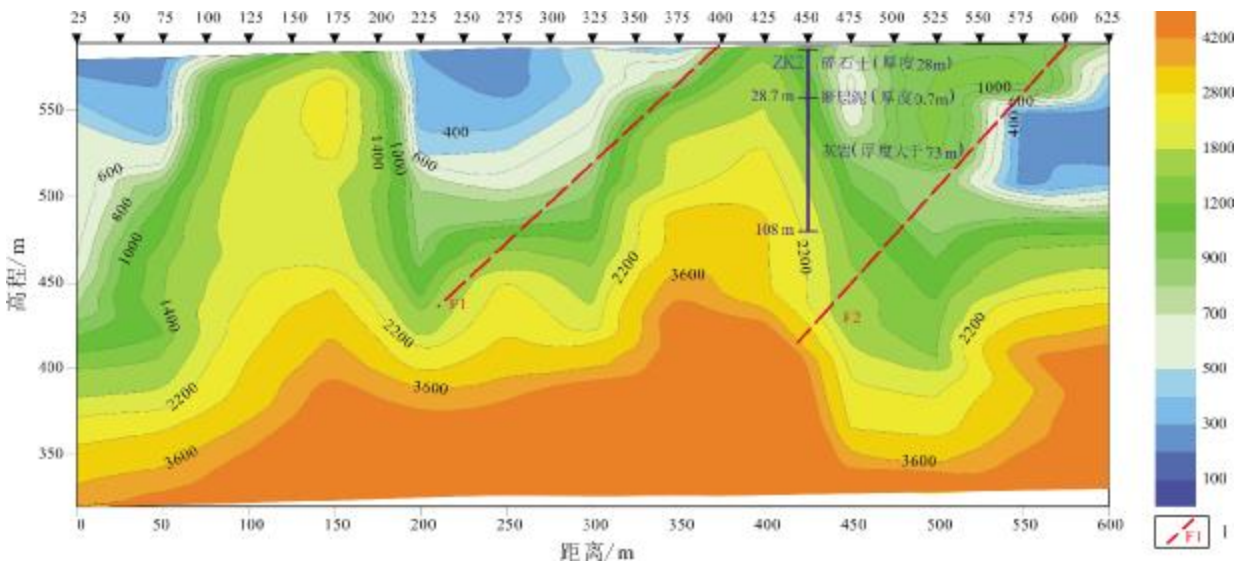

图 1 拨东工作区可控源音频大地电磁测深反演深度-电阻率等值线断面图

Fig. 1 Cross-section of resistivity contour by controllable source audio magnetotelluric sounding inversion in Bodong area

1—推测断层及编号(inferred fault and number)

步验证了拨东灰岩-裂隙导水储水结构的发育情况，确定了主要裂隙段位置及含水层位置.

配套观测孔 GCK2 孔深约 142 m，距离主孔 ZK2 约 136 m. 同步对观测孔 GCK2 进行数据观测,可知主孔水位降深为 0.9 m 时，观测孔水位降深为 0.5 m;主孔水位降深为 2.31 m 时,观测孔水位降深为 1.37 m.

2)跳沟灰岩-裂隙破碎带储水结构

跳沟研究区为一近东西向冲沟，延伸超过 4 km，为后期构造裂隙发育所成. 推测由于裂隙影响，致使岩层破碎,加速了岩溶化作用,使得岩溶水在一定程度上能够富集[14].

该区主要出露奥陶系灰岩、白云质灰岩、豹皮状灰岩. 在冲沟内，采用可控源音频大地电磁测深法顺沟完成一条剖面. 电阻率等值线图揭示:深度 300 m 以上出现了明显的低电阻率异常带,电阻率值低于 400 Ωm,与地表出露的正长斑岩、奥陶系灰岩类地层的电阻率均不符合,异常向深部延伸超过 300 m,上游地下水补给面积也较大,形成灰岩-裂隙破碎带储水结构. 认为地下水的主要储存形式为构造控制下的岩溶网络-管道裂隙水(图 2).

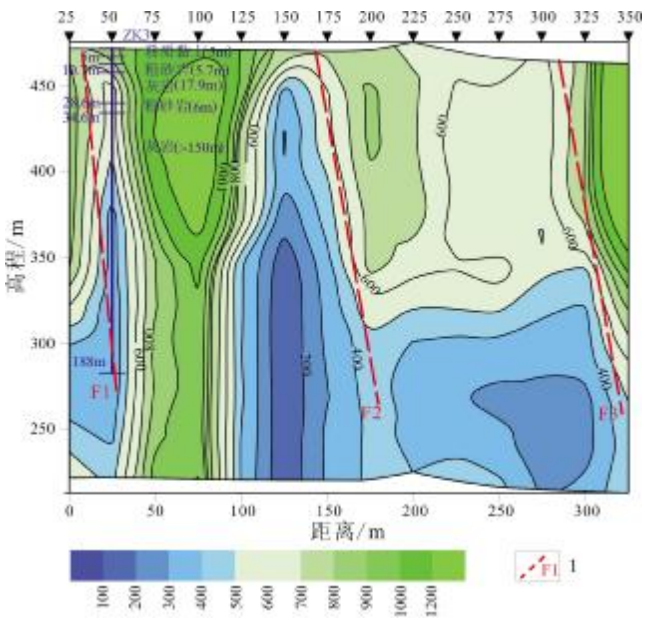

图 2　跳沟工作区可控源音频大地电磁测深反演深度-电阻率断面图

Fig. 2　Cross-section of resistivity contour by controllable source audio magnetotelluric sounding inversion in Tiaogou area

1—推测断层及编号(inferred fault and number)

在跳沟村施工了一眼探采结合孔 ZK3，配套施工一眼观测孔 GCK3. 主孔 ZK3 揭露的地层结构为: 0~5 m 为浅黄色粉质黏土,土质均匀,软塑为主; 5~9 m 为青灰色奥陶系灰岩,隐晶质结构,块状构造,岩心多为长柱状,少量为碎块状,节理裂隙不发育; 9~15 m 为黄褐色—土黄色粗砂岩,粒状结构,块状构造; 15~188 m 为青灰色奥陶系灰岩,隐晶质结构,块状构造,岩石质硬. 15~47 m 节理裂隙不发育; 47~53.5 m 发育少量节理裂隙; 53.5~63 m 节理裂隙不发育; 63~188 m 裂隙发育. 该井主要裂隙段及含水层位置位于 115~120 m 和 150~165 m.

对其进行了 3 个落程稳定流抽水试验. 该井静水位为 13.57 m,最大降深 12.57 m 时,稳定后单井涌水量约为 1 900 m^3/d.

配套观测孔 GCK3 孔深约 154 m，距离主孔 ZK3 约 19 m. 同步对观测孔 GCK3 进行数据观测，可知主孔水位降深为 12.57 m 时,观测孔水位降深为 11.64 m;主孔水位降深为 8.44 m 时，观测孔水位降深亦为 8.44 m;主孔水位降深为 4.38 m 时,观测孔水位降深亦为 4.38 m.

2.2　滦河流域下游柴白河流域主要储水空间结构

针对该储水空间结构开展了物探和钻探工作,主要研究工作集中在南大洼工作区，为南大洼非可溶岩-断裂破碎带储水结构. 推测认为该地非可溶岩受到构造的影响，使得断裂破碎带处地下水活动相对频繁,运移速度加快,导致岩溶发育速率增强[10].

该区域主要出露侏罗纪正长斑岩，在东北部小面积出露有侏罗纪次正长斑岩. 采用可控源音频大地电磁测深等方法,完成了 5 条物探剖面,均探测到低电阻率异常带. 其中 L02 线的低电阻率异常主要以 175 点为中心,向深部延伸超过 300 m,浅部宽约 75 m,向深部变窄,较为陡立;深部略南倾,倾角为 75~90°. 认为南大洼工作区内的低电阻率异常为正长斑岩断裂破碎所致,断裂带电阻率降低明显,存在一条充水构造破碎带,岩石破碎、裂隙发育,多填充水,距冲沟东南侧的山体较近. 建议在 L02 线 175 点(深大异常)处进行钻探(图 3).

在南大洼村施工了一眼探采结合孔 ZK1，配套施工一眼观测孔 GCK1. 主孔 ZK1 揭露的地层结构为: 0~8 m 为黄褐色砂砾石,主要以第四系河道堆积、砂卵砾石为主; 8~32.5 m 为浅灰色石英粗安质角砾岩,块

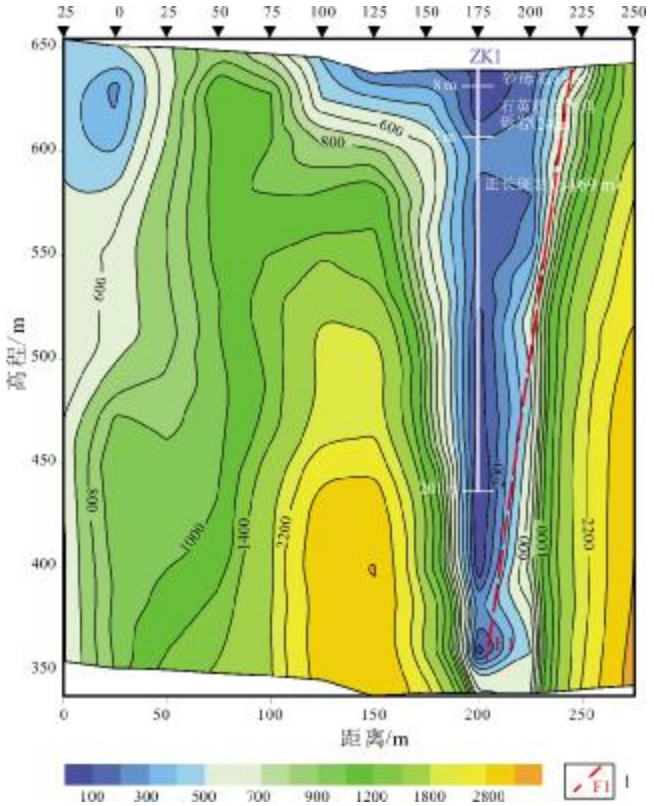

图 3 南大洼工作区可控源音频大地电磁测深反演深度–电阻率断面图

Fig. 3 Cross-section of resistivity contour by controllable source audio magnetotelluric sounding inversion in Nandawa area

1—推测断层及编号(inferred fault and number)

状构造，斑状结构，主要由火山角砾和胶结物组成；32.5~201 m 为浅灰–肉红色正长斑岩，斑状结构，块状构造，主要矿物成分为正长石，次要矿物成分为石英、角闪石，斑晶直径 0.2~11 cm，主要成分为正长石、角闪石. 主要裂隙段及含水层位置为 32~45 m 和 127~140 m.

对主孔 ZK1 进行了 3 个落程稳定流抽水试验，该井静水位为 3.33 m，最大降深 32.66 m 时，稳定后单井涌水量约为 400 m^3/d.

配套观测孔 GCK1 孔深约 148 m，距离主孔约 174 m. 同步对其进行数据观测，未发现该孔水位降深出现变化.

3 岩溶含水介质特征

研究和分析认为，滦河流域下游柳河流域主要储水空间、滦河流域下游柴白河流域主要储水空间的含水介质主要表现为“裂隙岩溶型”. 含水介质多由溶蚀空洞和裂隙共同构成[10]. 本研究共计调查井 72 点，其中枯水期(2019 年 6 月 16—17 日)、丰水期(2019 年 8 月 31 日—9 月 2 日) 各调查 36 点. 调查结果显示，丰水期统测井水位埋深大部分均出现不同程度的上升情况，水位变幅为 0.04~1.19 m，地下水动态有降水入渗补给滞后现象(图 4). 在径流、排泄区地下水水力坡度较为平缓，水量相对丰富，可以形成径流带，沿途接受降水通过岩溶裂隙介质以扩散流的形式和通过落水洞以集中流的形式补给[11]，且推测通过岩溶裂隙介质以扩散流的形式补给占比例更大. 降雨期间，岩溶裂隙介质为流域地下水的主要排泄通道，发挥着重要的排泄作用[11].

4 探采结合孔供水服务能力及建议方案

城镇供水关系公共健康和生命安全[15]，国内学者针对岩溶供水做过较多研究[16-21]. 中国地质环境监测院在承德地区实施的水文地质调查工作，对解决群众安全饮水及相关扶贫产业的用水问题作出了贡献.

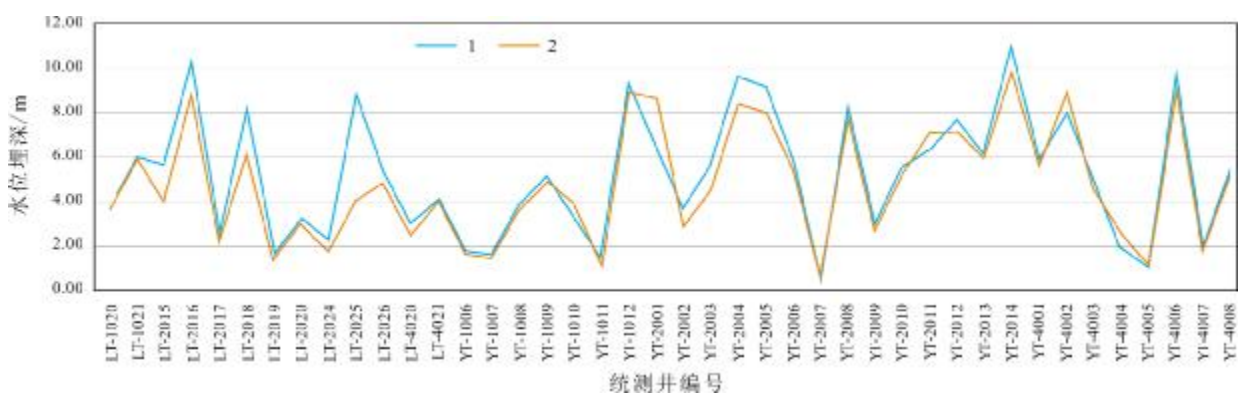

图 4 研究区部分统测井点水位变化动态曲线图

Fig. 4 Dynamic curves of water level changes at some logging points in the study area

1—枯水期水位埋深(water level depth in dry season)；2—丰水期水位埋深(water level depth in wet season)

随着京津冀协同发展，兴隆县人口急剧增加.兴隆县规划人口约 20 万人，生活饮用水需水量约为 4×10^4 m^3/d.目前水源地的日供水量仅为 1×10^4 m^3/d 左右,缺水量 3×10^4 m^3/d 左右.兴隆县城现有水源地供水量已经不能满足其现状及未来规划的饮用水需求.

依据 1∶5 万水文地质调查与物探解译结果，在研究区实施探采结合孔(表 2).

南大洼村位于承德县刘杖子乡,为革命老区,同时为贫困村.探采结合孔 ZK1 单井涌水量约为 400 m^3/d,预计能够为 200 余户村民，20 余公顷蘑菇大棚、蔬菜大棚、果园等供水.特别是能够缓解旱季用水困难的现状.

拨东村现供水条件简陋,水质差,水量不足,无法满足当地生产生活需求.探采结合孔 ZK2 单井涌水量约为 2 200 m^3/d,预计能够为 500 多村民以及 13 余公顷农田等供水.能够改善因水质较差、干旱季节居民用水紧缺等问题带来的不良影响.

跳沟村是鹰手营子矿区脱贫攻坚龙头村，也是美丽乡村建设示范村,近年来注重生态文明建设及特有乡村文化产业发展.探采结合孔 ZK3 单井涌水量为 1 900 m^3/d，预计能够为 20 余公顷农田梯田、山楂果园、葡萄采摘园的灌溉提供良好的支撑,有效带动村庄经济、文化发展.

3 眼探采结合孔预计能为该地区供水 4 500 m^3/d,灌溉约 53 hm^2 农田,缓解近千居民用水问题.

需要特别指出的是，井孔 ZK1 位于兴隆县拨东村,距离兴隆县城约 19.23 km,距兴隆县现有扁担沟水源地主管网约 6.25 km.随着该地区经济的快速发展,供水安全的风险和挑战越来越大,为进一步满足实际需求，加强地下水的合理开发和科学利用及水资源的有效管理,建议井孔 ZK1 尽快并入兴隆县城供水管网.为确保相关工作能够有序开展,进行了实地勘查,该区域工程地质条件简单，尚未发现大型构造活动痕迹,无地质灾害.第四系覆盖层稳定,没有墓穴、防空洞、孤石等对工程不利的埋藏物.鉴于承德市多年平均最大冻深为 0.98 m,历年最大冻深为 1.26 m,建议供水管道基础埋深超过 1.3 m 为宜，埋深在最大冻土线以下 0.3 m，即管道埋深在 1.6 m 左右.沿途经过拨西村、郝家庄村、郝家庄西沟村及扁担沟村等地.工作区内有水泥路、乡村公路等,交通较为便利,方便机械运输设备通行.附近均有可用电源，可以为铺设管道提供便利条件.

5　结论

(1)对研究区含水岩组进行了划分,将岩溶含水岩组划分为奥陶系碳酸盐岩裂隙溶洞含水岩组、寒武系碳酸盐岩裂隙溶洞含水岩组、蓟县系碳酸盐岩裂隙溶洞含水岩组、长城系大红峪组碳酸盐岩裂隙溶洞含水岩组.

(2)对区域岩溶储水结构特征进行研究探索,将研究区划分为滦河流域下游柳河流域主要储水结构、滦河流域下游柴白河流域主要储水结构.并将滦河流域下游柳河流域主要储水结构细分为拨东灰岩-裂隙导水储水结构和跳沟灰岩-裂隙破碎带储水结构两个小类.查明区域储水空间结构特征.

(3)依据 1∶5 万水文地质调查与物探解译结果,在研究区共实施探采结合孔 3 眼（配套施工配套观测孔 3 眼）.探采结合孔分别位于承德县刘杖子乡南大洼、兴隆县平安堡镇拨东村、鹰手营子镇跳沟村.预计能够为该地区供水 4 500 m^3/d,灌溉约 53 hm^2 农田,缓解近千居民用水问题.

致谢：在研究工作及成文过程中得到中国地质环

表 2　探采结合孔供水能力及服务对象一览表

Table 2　Water supply capacity and service objects of exploration-mining combination boreholes

井号	地点	服务方向	单井出水量/(m^3/d)	主要灌溉对象	灌溉面积/hm^2	饮水户数
ZK1	南大洼村	革命老区扶贫攻坚	400	蘑菇、蔬菜大棚及果园等	20	200
ZK2	拨东村	饮用水源地	2 200	农田	13	500
ZK3	跳沟村	灌溉水源地	1 900	山楂果园、葡萄园等	20	150
合计			4 500		53	850

境监测院殷志强、刘文波、邵海等同志的指导及支持，在此表示衷心的感谢.

参考文献(References):

[1]杨平恒，张宇，田萍，等. 川东平行岭谷典型岩溶含水介质特征的识别方法探讨——以重庆青木关地下水系统为例[J]. 西南大学学报(自然科学版)，2016，38(2)：90-97.
Yang P H，Zhang Y，Tian P，et al. A methodological research on the identification of a typical karst aquifer media in the paralleled ridge-valley of east Sichuan：A case study of Qingmuguan karst groundwater system，Chongqing[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition)，2016，38(2)：90-97.

[2]王晓红，刘久荣，辛宝东，等. 北京岩溶水系统划分及特征分析[J]. 城市地质，2016，11(3)：8-15.
Wang X H，Liu J R，Xin B D，et al. Division and characterization analysis of karst groundwater system in Beijing[J]. Urban Geology，2016，11(3)：8-15.

[3]袁建飞，邓国仕，徐芬，等. 毕节市北部岩溶地下水水文地球化学特征[J]. 水文地质工程地质，2016，43(1)：12-21.
Yuan J F，Deng G S，Xu F，et al. Hydrogeochemical characteristics of karst groundwater in the northern part of the city of Bijie[J]. Hydrogeology and Engineering Geology，2016，43(1)：12-21.

[4]张彦林，李生永，付东林，等. 陇东盆地西部岩溶地下水形成机制研究[J]. 中国地质，2006，33(6)：1393-1399.
Zhang Y L，Li S Y，Fu D L，et al. Formation mechanism of karst groundwater in the western Longdong basin，northwestern China[J]. Geology in China，2006，33(6)：1393-1399.

[5]Noorishad J，Ayatollahi M S，Witherspoon P A. A finite-element method for coupled stress and fluid flow analysis in fractured rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts，1982，19(4)：185-193.

[6]刘建明，张玉修，曾璐，等. 北京张坊地区中上元古界中岩溶发育与构造作用[J]. 中国科学院大学学报，2019，36(2)：208-217.
Liu J M，Zhang Y X，Zeng L，et al. Structure-controlled karst development in Middle-Upper Proterozoic strata in the Zhangfang area in Beijing[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences，2019，36(2)：208-217.

[7]刘崇军，刘全国，于洋，等. 北京西山岩溶水系统渗透系数计算及富水性分析[J]. 城市地质，2017，12(2)：73-77.
Liu C J，Liu Q G，Yu Y，et al. Permeability coefficient calculation and aquiferous property analysis on karst water system in the west hill of Beijing[J]. Urban Geology，2017，12(2)：73-77.

[8]李向全，张发旺，毕二平，等. 宁夏南部“南北古脊梁”岩溶裂隙水流系统分析[J]. 地球学报，2004，25(5)：571-574.
Li X Q，Zhang F W，Bi E P，et al. The deep karst groundwater system in arid regions of northwestern China：A case study of karst fissure groundwater in southern Ningxia[J]. Acta Geoscientica Sinica，2004，25(5)：571-574.

[9]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 Y P，Wang W T. The division and characteristics of karst water systems in northern China[J]. Acta Geoscientia Sinica，2010，31(6)：860-868.

[10]甘伏平，喻立平，卢呈杰，等. 不同岩溶储水结构分析与地球物理勘察[J]. 地质与勘探，2011，47(4)：663-672.
Gan F P，Yu L P，Lu C J，et al. Geophysical prospecting and analyzing on different karst water-bearing structures[J]. Geology and Prospecting，2011，47(4)：663-672.

[11]武选民，文冬光，张福存，等. 我国西北人畜饮用缺水地区储水构造特征与工程范例[J]. 水文地质工程地质，2010，37(1)：22-26.
Wu X M，Wen D G，Zhang F C，et al. Groundwater-bearing structures in northwestern China and their application to water-taking works for water-shortage towns[J]. Hydrogeology and Engineering Geology，2010，37(1)：22-26.

[12]武选民，文冬光，张福存，等. 辽西山地缺水地区储水构造的特征和供水示范工程的建立[J]. 地质通报，2010，29(1)：142-146.
Wu X M，Wen D G，Zhang F C，et al. Groundwater-bearing structures in water deficient mountainous area，western Liaoning，China and set-up of civil water supply demonstration project[J]. Geological Bulletin of China，2010，29(1)：142-146.

[13]乔小娟，侯泉林，琚宜文，等. 北京张坊地区岩溶地下水运移富集的构造控制分析[J]. 中国岩溶，2014，33(2)：184-191.
Qiao X J，Hou Q L，Ju Y W，et al. Research about the control of geological structure on karst groundwater system in Zhangfang，Beijing[J]. Carsologica Sinica，2014，33(2)：184-191.

[14]高阳，熊华山，彭明涛，等. 渝东南岩溶储水构造高密度电阻率法异常特征[J]. 物探与化探，2016，40(6)：1108-1115.
Gao Y，Xiong H S，Peng M T，et al. High density electrical prospecting anomaly analysis of water-bearing structure in karst area of southeast Chongqing[J]. Geophysical and Geochemical Exploration，2016，40(6)：1108-1115.

[15]郑丹，崔鹏飞，陈永，等. 2011—2017 年我国城镇供水状况宏观数据分析总结[J]. 给水排水，2020，56(S1)：400-407.
Zheng D，Cui P F，Chen Y，et al. Summary of macro data analysis of urban water supply in China from 2011 to 2017[J]. Water & Wastewater Engineering，2020，56(S1)：400-407.

[16]叶晓华，白平. 川北地区岩溶发育特征及水资源利用前景浅析——以曾家山地区为例[J]. 四川地质学报，2019，39(4)：642-647.
Ye X H，Bai P. A brief analysis of karstification development and prospects of water resources utilization in North Sichuan[J]. Acta Geologica Sichuan，2019，39(4)：642-647.

(下转第 578 页/Continued on Page 578)

[3]王晓刚，黎荣，蔡俐鹏，等. 川滇黔峨眉山玄武岩铜矿成矿地质特征、成矿条件及找矿远景[J]. 四川地质学报，2010，30(2)：174-182.
Wang X G，Li R，Cai L P，et al. Geological features，ore-forming conditions and prospecting potential of the Emeishan basalt-hosted Cu deposits in the Sichuan-Yunnan-Guizhou border region [J]. Acta Geologica Sichuan，2010，30(2)：174-182.

[4]张洪超，惠陶，陈浩如. 川西沐川地区玄武岩型铜矿找矿前景[J]. 铜业工程，2010(4)：17-20.
Zhang H C，Hui T，Chen H R. Exploration prospecting of basalts copper ore in Muchuan district of western Sichuan [J]. Copper Engineering，2010(4)：17-20.

(上接第 464 页/Continued from Page 464)

[11]葛文春，林强，孙德有，等. 大兴安岭中生代玄武岩的地球化学特征：壳幔相互作用的证据[J]. 岩石学报，1999，15(3)：396-407.
Ge W C，Lin Q，Sun D Y，et al. Geochemical characteristics of the Mesozoic basalts in Da Hinggan Ling：Evidence of the mantle-crust interaction[J]. Acta Petrologica Sinica，1999，15(3)：396-407.

[12]张宏，马俊孝，权恒，等. 大兴安岭北段中生代火山岩形成的动力学环境[J]. 贵金属地质，1999，8(1)：56-64.
Zhang H，Ma J X，Quan H，et al. The dynamic background of Mesozoic volcanic activity in northern part of Daxing'anling Mountains[J]. Journal of Precious Metallic Geology，1999，8(1)：56-64.

[13]Meng Q R. What drove Late Mesozoic extension of the Northern China-Mongolia tract? [J]. Tectonophysics，2003，369(3/4)：155-174.

[14]Wang P J，Chen F K，Shen S M，et al. Geochemical and Nd-Sr-Pb isotopic composition of Mesozoic volcanic rocks in the Songliao Basin，NE China[J]. Geochemical Journal，2006，40(2)：149-159.

[15]陈志广，张连昌，周新华，等. 满洲里新右旗火山岩剖面年代学和地球化学特征[J]. 岩石学报，2006，22(12)：2971-2986.
Chen Z G，Zhang L C，Zhou X H，et al. Geochronology and geochemical characteristics of volcanic rocks section in Manzhouli Xinyouqi，Inner-Mongolia [J]. Acta Petrologica Sinica，2006，22(12)：2971-2986.

[16]张玉涛，张连昌，英基丰，等. 大兴安岭北段塔河地区早白垩世火山岩地球化学及源区特征[J]. 岩石学报，2007，23(11)：2811-2822.
Zhang Y T，Zhang L C，Ying J F，et al. Geochemistry and source characteristics of Early Cretaceous volcanic rocks in Tahe，north Da Hinggan Mountain [J]. Acta Petrologica Sinica，2007，23(11)：2811-2822.

[17]Ying J F，Zhou X H，Zhang L C，et al. Geochronological framework of Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range，NE China，and their geodynamic implications [J]. Journal of Asian Earth Sciences，2010，39(6)：786-793.

[18]徐美君，许文良，孟恩，等. 内蒙古东北部额尔古纳地区上护林-向阳盆地中生代火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征[J]. 地质通报，2011，30(9)：1321-1338.
Xu M J，Xu W L，Meng E，et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb chronology and geochemistry of Mesozoic volcanic rocks from the Shanghulin-Xiangyang basin in Ergun area，northeastern Inner Mongolia [J]. Geological Bulletin of China，2011，30(9)：1321-1338.

[19]吴涛涛，赵东芳，邵军，等. 内蒙古比利亚谷铅锌银矿床地质地球化学特征及成因[J]. 中国地质，2014，41(4)：1242-1252.
Wu T T，Zhang D F，Shao J，et al. Geological and geochemical characteristics and genesis of the Biliyagu lead-zinc-silver deposit，Inner Mongolia[J]. Geology in China，2014，41(4)：1242-1252.

(上接第 546 页/Continued from Page 546)

[17]隋少强，汪新伟，周总瑛，等. 天津岩溶地热田热储特征研究[J]. 地质与资源，2019，28(6)：590-594，569.
Sui S Q，Wang X W，Zhou Z Y，et al. Study on the thermal reservoir characteristics of karst geothermal fields in Tianjin City[J]. Geology and Resources，2019，28(6)：590-594，569.

[18]邓启军，李伟，朱庆俊，等. 河北坝上张北县玄武岩区蓄水构造特征与找水实践[J]. 地质通报，2020，39(12)：1899-1907.
Deng Q J，Li W，Zhu Q J，et al. An analysis of the characteristics of water storage structure and the practice of groundwater exploration in the basalt area of Zhangbei County，Bashang，Hebei Province[J]. Geological Bulletin of China，2020，39(12)：1899-1907.

[19]李涛，邓铭江，王于宝，等. 台兰河山前地下储水构造及地下水库可行性研究[J]. 水文地质工程地质，2011，38(1)：30-34.
Li T，Deng M J，Wang Y B，et al. A study of the feasibility of the groundwater storage structure and groundwater reservoir in the piedmont of the Tailan River [J]. Hydrogeology and Engineering Geology，2011，38(1)：30-34.

[20]刘声凯，刘海飞，黄超，等. 水文地质调查与综合物探在赣南花岗岩地区找水中的应用[J]. 地质与勘探，2021，57(3)：584-592.
Liu S K，Liu H F，Huang C，et al. Groundwater prospecting by combined hydrogeological and integrated geophysical surveys in granite areas，southern Jiangxi Province[J]. Geology and Exploration，2021，57(3)：584-592.

[21]马超，孙管彬，邵光宇，等. 淄河源区含水层介质特征及富水规律研究[J]. 干旱区资源与环境，2020，34(12)：173-180.
Ma C，Sun Q B，Shao G Y，et al. Study on the characteristics of aquifers medium and the law of water abundance in Zihe River source area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment，2020，34(12)：173-180.