

北京张坊地区岩溶地下水运移富集的构造控制分析

乔小娟¹, 侯泉林¹, 琚宜文¹, 刘凯², 张玉修¹, 郭高轩²

(1. 中国科学院计算地球动力学重点实验室/中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049;

2. 北京市水文地质工程地质大队, 北京 100195)

摘 要:北京西山张坊地区碳酸盐岩集中分布,地下水赋存于复杂的构造裂隙网络中,形成岩溶裂隙水。文章从构造空间分布的属性和规律出发,分析了在张坊地区褶皱构造格架控制的岩溶水文地质单元内,地下水赋存富集规律与多期构造演化产生的一系列北东—北西向、南北向断裂及裂隙网络的制约关系。研究表明,本区断裂经历了侏罗世逆冲推覆活动与白垩世的伸展构造,先压后张两期构造作用的叠加,形成了多条区域性断裂,其导水性能大为增强。裂隙中频度较大的NE和NW向是优势裂隙,表现出构造节理的共轭特征,多高倾角或直立,导致雨水的直接下渗;在裂隙交汇带构成了区域地下水的径流通道和存储空间,控制了白岱、甘池—长沟、高庄—石窝富水区的形成以及岩溶泉的出露,具有重要的供水意义。

关键词:岩溶地下水;地质构造;裂隙网络;构造控水;张坊

中图分类号:P641.134 **文献标识码:**A

0 引 言

岩溶裂隙地下水系统具有各种规模的溶隙、裂隙及节理,其分布、规模和组合型式在空间上不均一,影响着岩溶地下水系统的补给、径流、排泄条件,控制着岩溶水动力场特征^[1-5]。

岩溶地下水流动系统受到岩溶发育、地形地貌、地层产状、岩性组合、断层破碎带及溶洞、裂隙节理的展布等因素的影响。由于岩溶介质的不均一性、裂隙网络的复杂性以及影响因素的多样性,具体地区的岩溶发育规律及其构造制约关系还有待进一步深入研究^[6-8]。一些学者通过地质调查、地球物理电磁或地震方法、钻井示踪试验或模型等来研究岩溶介质环境特性^[9-14]。地质构造条件和水文地质条件综合分析法是构造控水研究最基本的方法,国内外一些学者围绕区域构造控水做过一些研究^[15-17]。Morikawa

(2008)水样分析研究氮同位素特征与构造展布的关系。Dafny(2010)通过建立三维数值模型刻画Yarqon—Taninim含水层中岩溶和构造发育对地下水流动的影响。Elmahdy(2013,2014)通过遥感GIS的方法研究构造对地下水及其盐度的影响。肖楠森^[18]、钱学涛^[19]、刘光亚^[20]等指出,构造控水研究应以构造力学分析为主线,充分考虑地层、岩性等地质、水文地质条件,最终判定构造控水模式。

北京房山地区地下水资源具有较好的研究基础,很多单位和学者就岩溶洞系的形成及其与构造作用的关系、水文地球化学特征、开采现状等进行了深入的调查和探讨^[21-24],已积累了大量的基础资料。本文从构造控水角度出发,研究区域构造发育规律,认识裂隙空间展布的构造特征,对裂隙的几何特性进行统计,探究构造对区域地下水流动的控制、地下水富集区分布的影响以及对泉群出露的制约,为该区水资

基金项目:北京岩溶水资源勘查评价工程(BJYRS-ZT-03),博士后基金(119103S189)

第一作者简介:乔小娟(1982—),女,讲师,水文地质专业。E-mail:qiaoxj2010@163.com。

收稿日期:2013-06-27

源评价、优化配置,保障供水安全具有重要科学和现实意义。

1 区域地质背景

张坊工作区位于北京市房山区西南部,太行山北端,属华北平原与太行山脉的过渡地带,地形以山区

为主,受大石河和拒马河的影响,地势总体上西高东低、北高南低。

1.1 地层岩性

区内地层出露较齐全。主要发育中元古界蓟县系(Jx)、长城系(Ch)、新元古界青白口系(Qn),古生界寒武系—奥陶系(Є—O)、石炭系—二叠系(C—P),中生界侏罗系—白垩系(J—K)地层(图 1)。

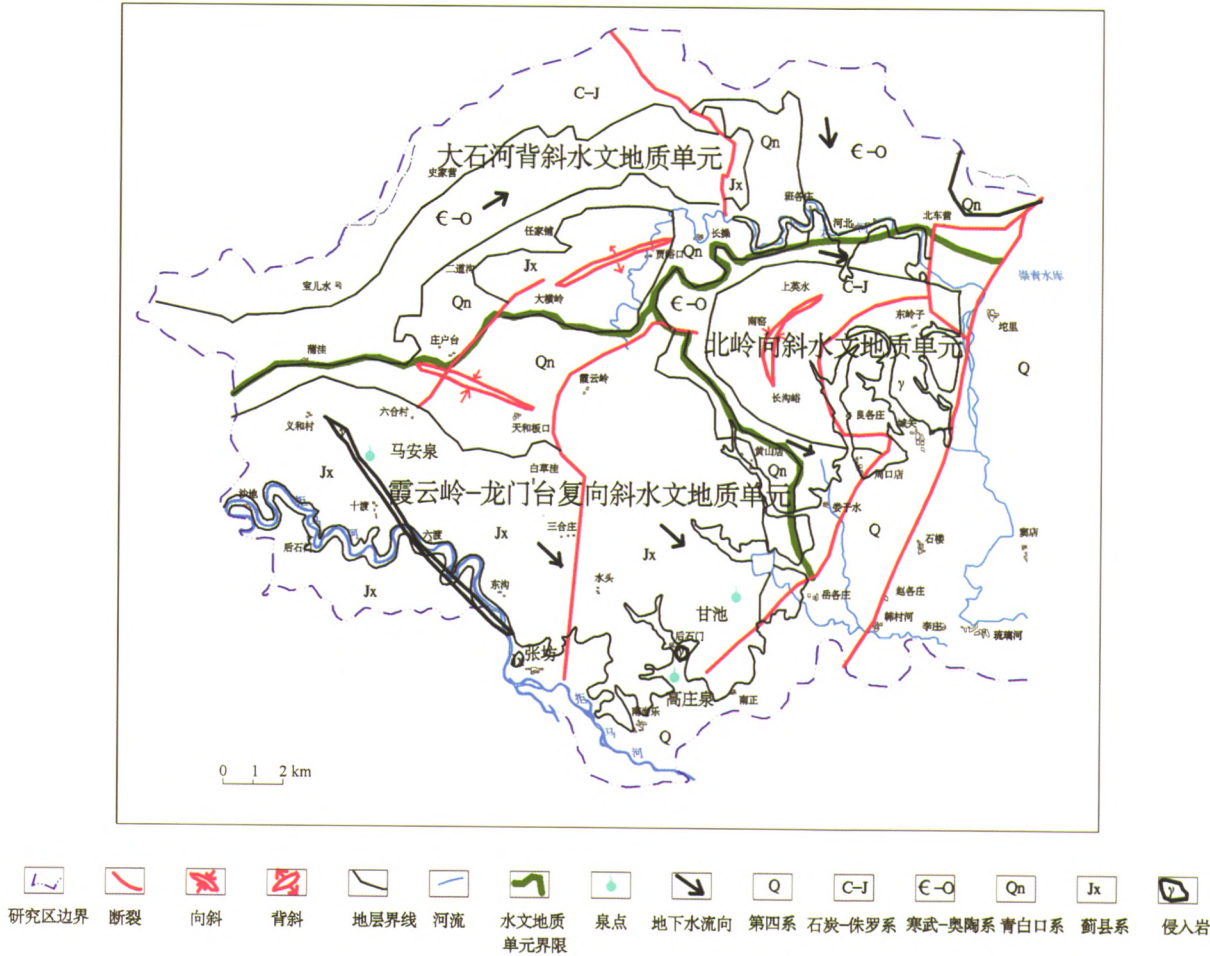


图 1 房山区褶皱单元与岩溶地下水水文地质单元分区略图
Fig.1 Folds and hydrogeological units in the Fangshan karst groundwater system

区内构造活动较发育,岩浆活动以燕山期中酸性岩浆活动为主。房山岩浆岩体出露在本区东部、房山城关以北地区,岩性为灰黄、灰白色花岗闪长岩。石门岩浆岩体出露在高庄泉以北的石门村,岩性为白色闪长花岗岩,坚硬致密,表面形成巨大的球形风化面。煌斑岩脉在西部地区,沿十渡马安村—六渡向东南一线出露。

区域上,大面积出露的碳酸盐岩层,以上元古界的白云岩居多,下古生界的石灰岩次之。这些含碳酸钙、镁和少量硅、铁质的海相沉积岩层,经过地壳的多次运动,尤其是中、新生代地质构造变动,产生褶皱和

断裂,被含有二氧化碳的水溶蚀,发育有规模不等的溶孔、溶隙,逐渐侵蚀扩展为溶洞,局部形成连通性各异的管道—裂隙网络。区域含水层地层岩性以碳酸盐岩为主,含水岩组主要为中元古界蓟县系雾迷山组(Jxw)、铁岭组(Jxt)。

1.2 褶皱构造

房山区域主要褶皱构造有大石河背斜、北岭向斜、霞云岭—龙门台复向斜,三个褶皱构造构成了本区的构造格架。受区域构造格局的控制,可划分成三个水文地质单元,即:北岭向斜水文地质单元、大石河背斜水文地质单元、霞云岭—龙门台复向斜水文地质

单元(图 1)。张坊工作区位于霞云岭—龙门台复向斜水文地质单元内^[25]。

1.3 断裂构造

在霞云岭—龙门台复向斜褶皱构造区内,断层发育比较有规律。据以往的野外地质调查、区域遥感解译、局部地球物理勘探等手段得出的结果^[26],可分为三组断裂:北东向断裂、北西向断裂、南北向断裂。北

东向断裂编号依次为 F1—F11。北西向断裂规模较大的共计 9 条,分别为 F12—F20,走向约为 330°,且有煌斑岩脉侵入。南北向断裂有 1 条,即大峪沟断裂(F21)。

北东向和北西向断裂数量多、规模大,组成本区主要的断裂构造格架(图 2)。

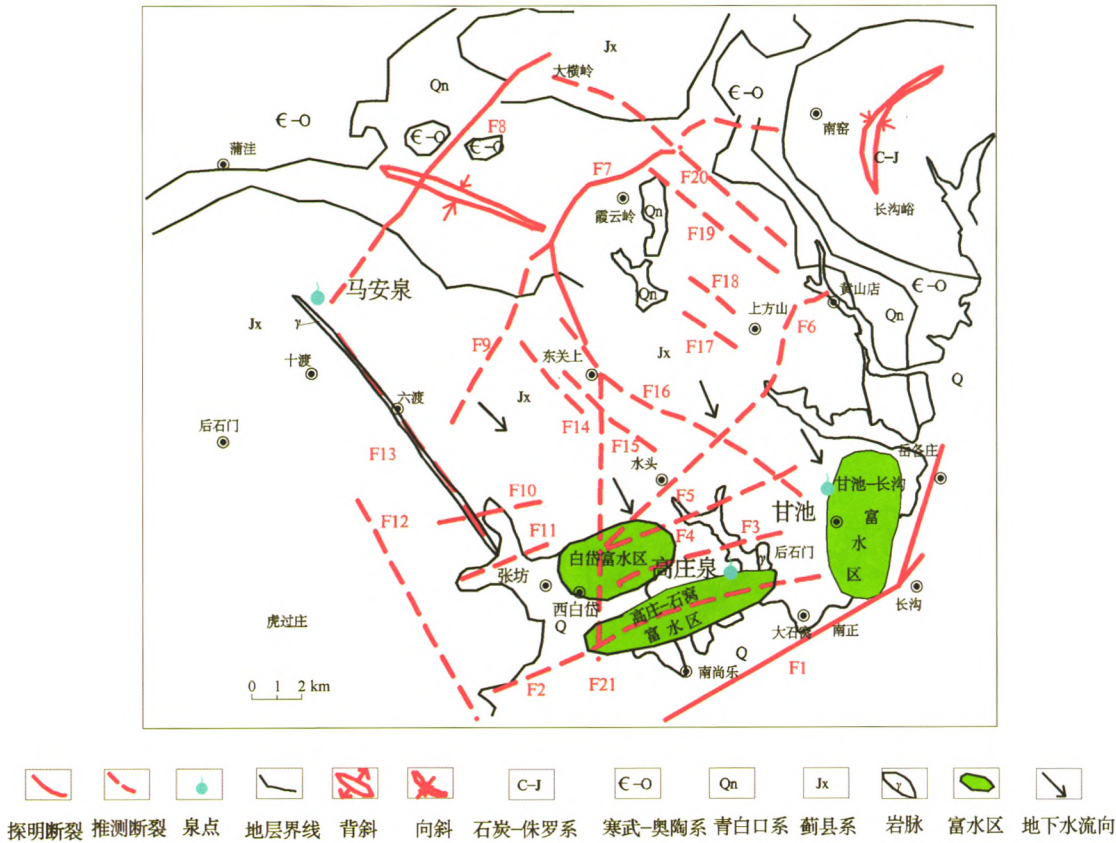


图 2 北西向断裂系和北东向断裂系组成的网状构造格架

Fig. 2 NE-trend and NW-trend fault networks in Fangshan

2 构造对地下水系统的制约

2.1 断层—裂隙对地下水流向的控制

2.1.1 断层构造

本地区地层的形成经历了印支期、燕山期、喜马拉雅期的作用。印支期构造作用,发生于中三叠世晚期至晚三叠世末,主要受力情况为南北方向挤压,在研究区内表现为东西向展布。燕山期运动发生时间为晚侏罗纪至晚白垩世末,受力为北西—南东向挤压收缩加南北方向的反时针扭动。喜马拉雅期运动发生时间为晚白垩世至现在,受力以北西—南东向拉伸加南北方向的顺时针扭动为主。

从构造演化角度分析,该区侏罗世逆冲断层及相

关褶皱表明所处环境为挤压状态,多形成阻水断裂构造;白垩世演化为拉伸的构造环境,构造主要沿着早期的构造薄弱带活动,使挤压断裂拉张更破碎,形成高角度正断层。经历了两期构造作用,先压(逆断层)、后张(正断作用)的叠加,使该区断层及其影响带的导水性能大为增加,野外资料见图 3。

本区的牛口峪—长沟断裂(F1)、黄山店断裂(F6)、霞云岭断裂(F7)、庄户台断裂(F8)等规模较大,横切霞云岭—龙门台复向斜,形成多级逆冲断裂构造,这些区域性大断层整体向南东倾。对于北西向断层地下水顺其断层展布方向自北西向南东径流。对于北东、北东东断层,地下水也可能通过其伴生并且彼此沟通的横张裂隙自北西向南东运移。因此,断

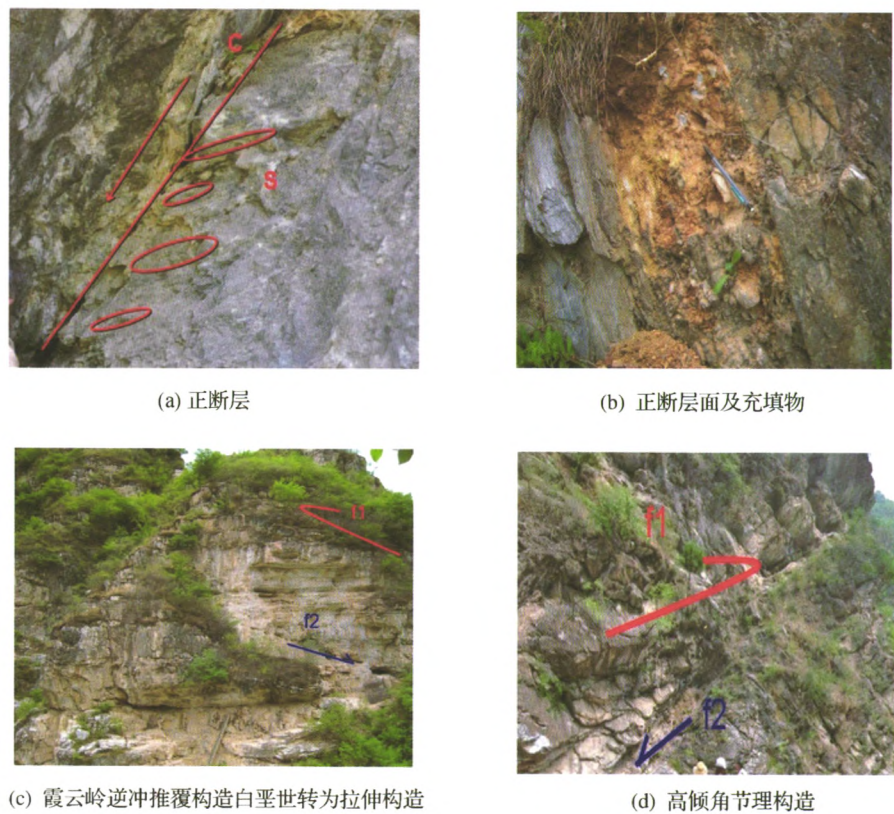


图 3 多期构造活动的叠加作用(f1 逆冲推覆构造,f2 拉伸构造)
Fig. 3 Geological bodies formed by the overprint of two-episodic tectonic processes

层构造对地下水的分布和流动具有明显的控制作用。加之,该区地势西高东低、北高南低,山区地表节理裂隙发育,有利于大气降水入渗接受补给。因此,受地形与构造的共同控制作用,区域地下水整体自西北向东南流动。

2.1.2 构造裂隙

本次对研究区进行野外测量获得的 8 000 多条地表地层节理裂隙,对其产状进行统计分析,以查明构造裂隙发育规律,阐明其对地下水富集性的约束作用。

2.1.2.1 节理倾角分布特征

从野外观测资料统计分析表明,研究区地表发育的节理主要以高倾角为主,节理倾角主要分布在 70°~90°之间(图 4)。

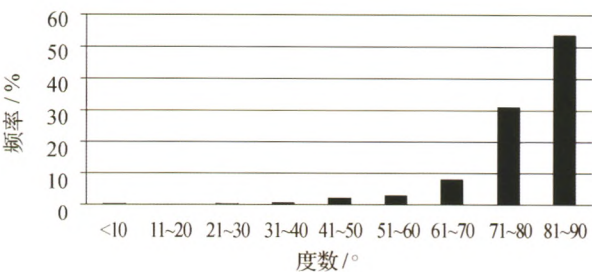


图 4 节理倾角分布特征图

Fig. 4 Joint dips distribution

2.1.2.2 节理方位分布特征

通过对研究区野外出露的节理进行详细的观察与测量,将研究区内所有节理的倾角、倾向统计出来,并利用等密图和玫瑰图分析,发现该区主要发育 NE—SW 向和 NEE 向节理,其次近 NW—SE 向和 NNW 向节理较发育(图 5)。

2.1.2.3 裂隙网络的控水作用

裂隙网络发育规律对地下水系统的控制表现在两方面,一方面提供大气降水和地表水入渗的运移通道,另一方面为岩溶地下水提供储集空间。

(1)从上图 5 可知,整体上,节理的产状具有明显的区域构造断裂特征,并且表现出构造节理的共轭特征。大部分区域节理发育方向较为集中,优势节理突出,少数区域的节理发育方向分散,说明其节理形成受到多期次的构造应力作用。该区多期、多次的构造变形中发育了大量的构造裂隙,主要为高角度节理,发育密度大、深度大。垂直下渗速度较快,水交替较快,提供大气降水和地表水入渗的运移通道。

(2)构造裂隙一方面提供大气降水和地表水入渗的运移通道,另一方面为岩溶地下水提供储集空间。

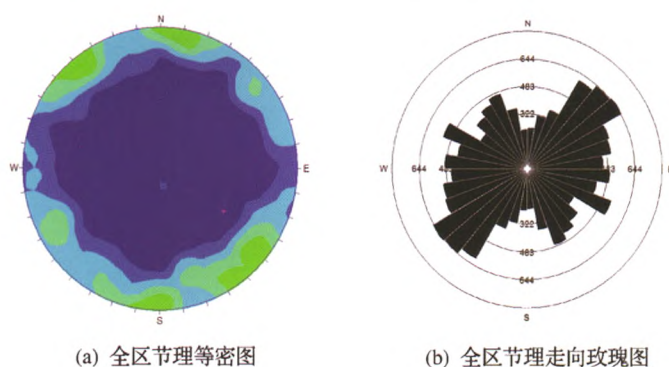


图 5 全区节理等密图与走向玫瑰图

Fig. 5 Joint equidensity and trend rose diagram

特别是在不同方位断裂的交接部位及主干断裂与分支断裂的交接部位,岩石破碎厉害,且影响带的宽度大,往往成为地下水富集的良好场所^[27]。在研究区内,北西和北东两个主要方向的断裂在其断裂影响带交叠的部位,通常其富水性要好一些。

2.2 构造对富水的控制

受到构造影响,在断裂交接部位通常较富水。不同方位断裂的交接部位及主干断裂与分支断裂的交接部位,往往形成地下水富集带。如区域上形成的白岱、石窝和长沟富水区在很大程度上受到了构造发育的影响(图 2)。

2.2.1 白岱富水区

白岱富水区位于西白岱—张坊村南、靠近北拒马河北岸一带。位于霞云岭—大峪沟断裂(F21)与北东向断裂 F3、F4、F5 交错部位,构造复合区域应力集中释放,构造裂隙发育,形成此富水区。F21 在霞云岭—大峪沟之间断层走向南北向,为压扭性断层。霞云岭—大峪沟断裂带上褶皱—逆冲构造褶皱翼部发生断层错动,导致岩石破碎,节理裂隙发育,为地下水运移提供了良好的通道。褶皱冲断构造所形成的错动破裂面对促进深层岩溶裂隙发育具有重要意义。物探测井和岩芯分析发现,在深度 58~78.79 m、125~130 m、135~155 m、290~330 m 地层破碎。此区域地下水径流条件好,富含地下水,水井出水量较大,单井出水量达到 4 000~6 000 m³/d。在三座庵背斜核部,地层完整致密,地层富水性较差,单井出水量不足 1 000 m³/d^[28-29],成为白岱富水区与石窝富水区之间的界线。

2.2.2 甘池—长沟富水区

长沟富水区位于 F1(牛口峪—长沟断裂)以西,东部为洪水庄组和下马岭组页岩。本区的 F1(牛口

峪—长沟断裂)、F6(黄山店断裂)、F7(霞云岭断裂)、F8(庄户台断裂)等几条较大的断裂形成多级断裂构造,使地层由西北向东南逐级抬升,说明本组断裂为逆断层。东部边界下马岭页岩,西部石门岩体对地下水具有一定的阻隔。甘池泉在这一带出露。

2.2.3 高庄泉—石窝富水区

在边山排泄带,高庄泉—石窝一带的富水性应该较好。其分布在 F2 断裂附近,F2 断裂南部为 F1 断裂。在 F1 和 F2 断裂之间为汉白玉大理岩、砂岩与千枚岩形成的弱透水层组,富水性较差,形成富水区的南部边界。而在东部受到北面石门花岗岩体活动的影响,形成东部边界的界线。从岩溶地下水循环和构造地质学角度分析,地下水可以沿裂隙系统进行大范围深循环,以 F2 断裂为界,北部地下水由西北向东南径流,在高庄村一带,沿 F2 以南分布的厚层汉白玉大理岩、砂岩与千枚岩形成弱透水层组,具相对隔水性,阻碍了地下水向南部的径流,石门闪长花岗岩体的存在阻碍了地下水向东部的径流,使部分地下水溢出地表形成高庄泉。

2.2.4 可能的其他富水区

根据前面构造与裂隙对水富区的分析,在霞云岭—大峪沟断裂(F21)与北西向的 F14、F15 和 F16 几条断裂的交汇地带,若存在相对隔水层位,其富水性理论上分析较好。受霞云岭逆冲断层的影响,节理较为发育,在该区域节理密度较大,并且逆冲断层促进了一些大型溶洞(仙栖洞、龙仙宫)和岩溶泉点的发育。但其富水性还需进一步做实地勘探打井工作,才能做出结论。

从上面的分析,可以看出断裂构造对白岱、石窝及长沟等富水区的形成与地下水的径流具有重要的控制作用。

2.3 构造对泉群的控制

从岩溶地下水循环和构造地质学角度分析,岩溶地下水在岩溶溶隙裂隙网络中自水头高处流向低处,在地形切割处或阻水构造部位出露成泉。

本区流量较大的泉水都是岩溶泉,分布稀疏,多出露于山前或山间低谷中,其成因多与深大断裂阻水或导水有关,为深部成因的泉。如马鞍泉出露于煌斑

岩脉和庄户台断裂(F8)交汇处。高庄泉在 F2 断裂北部,高庄泉出露于南部弱透水岩层和东部石门岩体的阻隔区内(图 6)。甘池泉出露于西北部山区蓟县系雾迷山组白云岩含水层中,发育有高角度的节理裂隙,沿村附近页岩阻挡了地下水自西北向东南的流动,形成泉群(图 7)。

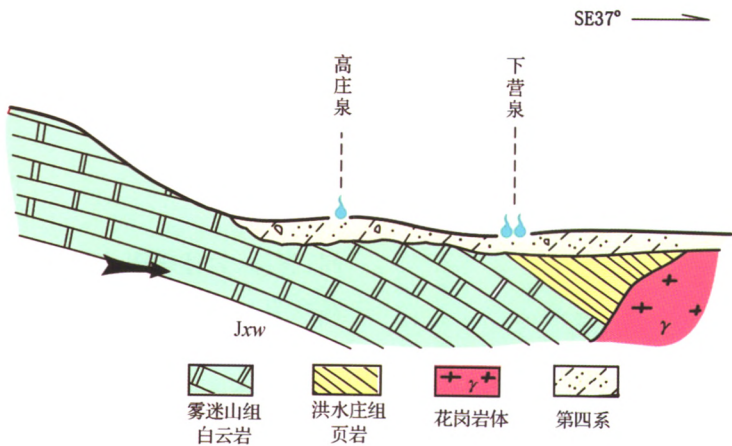


图 6 高庄泉地质剖面示意图

Fig. 6 Gaozhuang spring geologic section

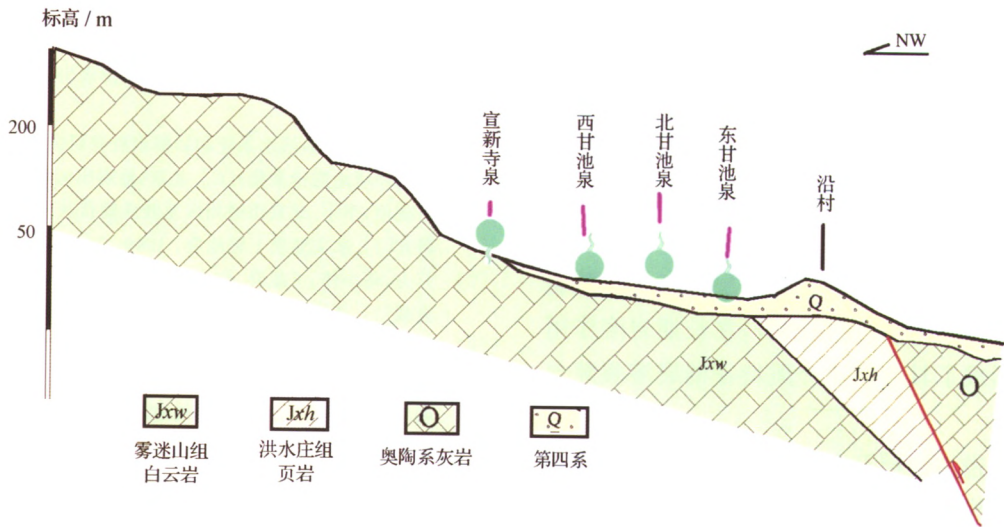


图 7 甘池泉水文地质剖面图

Fig. 7 Ganchi springs hydrogeologic profile

调查发现,研究区内大量的山间小泉多为裂隙泉,即在岩溶节理裂隙发育区域,汇集大气降水,经过较短的径流途径,在地势较低或者岩性变化的地方出露为山泉。其动态特征明显受大气降水的影响,往往雨后泉水流量较大,但衰减也快,多为季节性泉水。如龙泉寺泉水出露于高程 539 m 的山间平台,泉口

出露处为一套板岩、页岩质的岩层和一套灰岩,整体岩层大约近水平产状,垂直裂隙发育,分析此泉形成原因为大气降水通过表层裸露灰岩渗漏,下行至板岩地层内受到阻隔,出露为泉。此泉虽为季节性泉水,雨季水位上升,雨季后水位回落,但常年有水,水质清澈(图 8)。

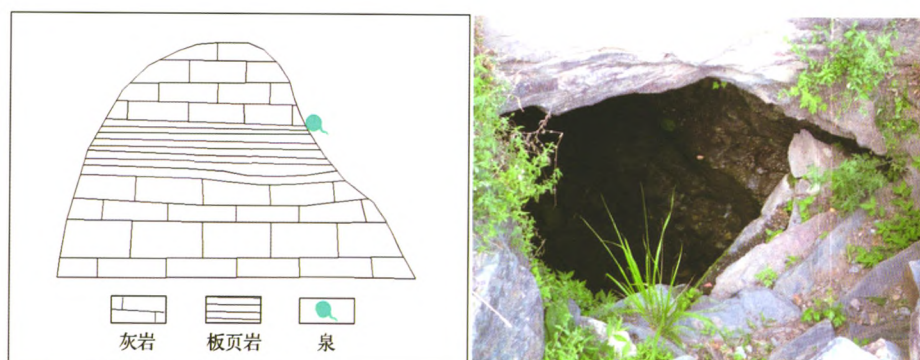


图8 龙泉寺野外调查资料

Fig. 8 Longquan temple spring investigation

3 结 语

北京市目前地下水供水量已经占总供水量的 70% 以上,平原区第四系地下水超采压力较大,山区岩溶地下水资源因水质优良,动态稳定,分布较集中,资源量大,而成为优良供水水源的备选。北京房山张坊地区作为应急水源地,以岩溶裂隙水为主要供水水源,已运行近 10 年,累计向市区供水达 $2.4 \times 10^4 \text{ m}^3$,保障了连枯年份首都的供水安全。

本文结合张坊岩溶区特殊的地质、水文地质条件,立足于基本构造断裂裂隙分布与岩溶发育特征,将地质条件分析与地下水分析相结合,从构造控水的角度,分析了区域地下水径流的径流排泄特征,获得以下几点认识:

(1)房山西南张坊地区主要含水层是海相碳酸盐岩蓟县系雾迷山组和铁岭组白云岩,在长期岩溶作用下,可溶地层形成了具有多重介质特征的岩溶裂隙含水介质。

(2)侏罗世逆冲断层及相关褶皱表明所处环境为挤压状态,多形成阻水断裂构造;白垩世演化为拉伸的构造环境,薄弱构造带多形成导水断裂。先压后张的两期构造作用叠加,使该区断层导水性能大为增强。

(3)在裂隙中出现频度较大的 NE 和 NW 向是优势裂隙,表现出构造节理的共轭特征。其中多直立或高倾角节理,导致雨水的直接下渗;密度高、渗透性好的多组裂隙形成纵横交错的溶蚀裂隙网络,成为地下水入渗—径流的通道。

(4)多期构造运动下形成的多条区域性断裂,在山麓交汇带构成了区域地下水的径流通道和存储空间。

间;岩脉、岩体等阻水构造控制了白岱、甘池—长沟、高庄泉—石窝富水区的形成以及一系列岩溶泉的出露,使水源地及泉群能够获得较稳定的补给,从而保证了区域供水水源。

参考文献

- [1] 袁道先. 中国岩溶学[M]. 北京:地质出版社,1993.
- [2] 韩行瑞,鲁荣安,李庆松. 岩溶水系统——山西岩溶大泉研究[M]. 北京:地质出版社,1993:211—229.
- [3] 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,2010,319(6):860—868.
- [4] 何宇彬,韩宝平,徐超,等. 中国喀斯特水研究[M]. 上海:同济大学出版社,1997.
- [5] 朱远峰. 中国岩溶水系统和岩溶水资源研究进展(工程地质水文地质环境地质论文集)[C]. 北京:地震出版社,1993:194—199.
- [6] 吕晓俭,李宇. 北京市通州区龙旺庄隐伏灰岩水源地勘查与评价研究[J]. 水文地质工程地质,1999,26(2):17—21.
- [7] 万力,蒋小伟,王旭升. 含水层的一种普遍规律:渗透系数随深度衰减[J]. 高校地质学报,2010,16(1):7—12.
- [8] 谢振华,张兆吉,邢国章,等. 华北平原典型城市地下水供水安全保障分析[J]. 资源科学,2009,31(3):400—405.
- [9] 韩宝平. 微观喀斯特作用机理研究[M]. 北京:地质出版社,1998.
- [10] Winter H, Stoll J, Aulbach E. New electrical potential logging tool: Sci Drilling, 1991, 2(4): 147—159.
- [11] Nativ R, Adar EM, Becker A. Designing a monitoring network for contaminated ground water in fractured chalk[J]. Ground Water, 1999, 37(1): 38—47.
- [12] Illman WA, Neuman SP. Type curve interpretation of a cross-hole pneumatic injection test in unsaturated fractured tuff[J]. Water Resources Research, 2001, 37(3): 583—603.
- [13] Benischke R, Goldscheider N, Smart C. Tracer techniques. In: Goldscheider, N., Drew, D. (Eds.), Methods in Karst Hydrogeology. Taylor & Francis Group, London, UK, 2007: 147—170.
- [14] Gabrovsek F, Dreybrodt W. Spreading of tracer plumes through confined telenetic karst aquifers: A model[J]. Journal of Hydrology, 2011, 409 (1): 20—29.

- [15] Dafny Elad, Burg Avi, Gvirtzman Haim. Effects of Karst and geological structure on groundwater flow: The case of Yarqon-Taninim Aquifer, Israel[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 389(3):260—275.
- [16] Elmahdy S I, Mohamed M M. Relationship between geological structures and groundwater flow and groundwater salinity in Al Jaaw Plain, United Arab Emirates; mapping and analysis by means of remote sensing and GIS [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2014, 7(3): 1249—1259.
- [17] Morikawa N, Kazahaya K, Masuda H, et al. Relationship between geological structure and helium isotopes in deep groundwater from the Osaka Basin: Application to deep groundwater hydrology [J]. *Geochemical Journal*, 2008, 42(1): 61—74.
- [18] 肖楠森. 新构造分析及其在地下水勘查中的应用[M]. 北京:地质出版社, 1986.
- [19] 钱学溥. 中国蓄水构造类型[M]. 北京:科学出版社, 1990.
- [20] 刘光亚. 基岩地下水[M]. 南宁:广西人民出版社, 1980.
- [21] 吕金波, 李铁英, 孙永华, 等. 北京石花洞的岩溶地质特征[J]. *中国区域地质*, 1999, 18(4):373—378.
- [22] 吕金波, 卢耀如, 郑桂森, 等. 北京西山岩溶洞系的形成及其与新构造运动的关系[J]. *地质通报*, 2010, 29(4):502—509.
- [23] 辛宝东. 北京市房山区岩溶地下水水文地球化学特征[J]. *水文地质工程地质*, 2005, 32(3): 74—75.
- [24] 郭高轩, 刘文臣, 辛宝东, 等. 北京岩溶水勘查开发的现状与思考[J]. *南水北调与水利科技*, 2011, 9(2):33—36.
- [25] 李世君. 北京张坊岩溶地下水库特征及调蓄能力研究[D]. 中国地质大学(北京), 2012.
- [26] 北京市水文地质工程地质大队. 北京应急水源—房山岩溶地下水供水水文地质勘察与评价[R]. 2007.
- [27] 北京师范大学地理系山区找水组, 北京市地质局水文一大队山区组. 关于不同力学性质断裂构造各部位富水性的几点认识[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 1976, (1):73—79.
- [28] 沈媛媛, 辛宝东, 郭高轩, 等. 北京房山岩溶水应急水源地下水数值模拟及预测[J]. *南水北调与水利科技*, 2001, 9(5): 103—106, 114.
- [29] 刘记来. 北京应急地下水源地开采极限研究[D]. 中国科学院研究生院, 2010.

Research about the control of geological structure on karst groundwater system in Zhangfang, Beijing

QIAO Xiao-juan¹, HOU Quan-lin¹, JU Yi-wen¹, LIU Kai², ZHANG Yu-xiu¹, GUO Gao-xuan²

(1. Key Laboratory of Computational Geodynamics, CAS/College of Earth Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Hydrogeology and Engineering Geology Team of Beijing, Beijing 100195, China)

Abstract: Carbonate formations are intensively distributed throughout Zhangfang, Fangshan, in the West Mountain area of Beijing. Karst groundwater exists among the geological fracture network which is characterized by the different arrangements and levels in different types of fracture networks and structures. The influence of the tectonic environment on the dynamic change rule and the enrichment regulation of karst groundwater system is significant for the exploitation and protection of karst groundwater resources.

From the control function of fault and fracture point of view, based on the developmental and distribution pattern of multi-episodic tectonism, this study analyzed fractures in the three-fold structural units characterized by NE-NW and NS trends and discussed the influence of multi-episodic tectonism on groundwater flow, the spring system and rich water zones.

The results showed that the geological fracture underwent two episodes of tectonism, thrusting nappe in the Jurassic and extension in the Cretaceous. The overprint of the processes of the two tectonic episodes resulted in a number of faults with high hydraulic conductivity, which serve as conduits. The superior joint groups are in the NE and NW directions, with conjugated characteristics. The high-angle or vertical dips directly benefit infiltration. The fractures in the intersection areas have formed groundwater runoff channels and storage space, controlling water-rich zones such as Baidai, Ganchi-Changgou and Gaozhuang-Shiwo. Magmatic rock and the aquiclude also contribute to the rich water zones and the location of springs, all of which have important significance for water supply.

Key words: system of karst groundwater; geological structure; fracture network; flow field controlled by structure; Zhangfang karst area

(编辑 黄晨晖 韦复才)