

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0049

邓启军,李伟,王雨山,等.鲁中南泰安纸坊泉域岩溶水强径流带成因及特征[J].南水北调与水利科技,2019,17(2):182-188,195. DENG Q J, LI W, WANG Y S, et al. The causes and characteristics of karst water strong run-off belts in Tai'an Zhifang spring area in central and southern parts of Shandong[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(2): 182-188, 195. (in Chinese)

鲁中南泰安纸坊泉域岩溶水强径流带成因及特征

邓启军^{1,2}, 李伟¹, 王雨山¹, 吕琳¹, 刘元晴¹, 马雪梅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. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要:近年来,鲁中南地区岩溶地下水泉水流量衰减、干涸,水源地超采,岩溶塌陷等环境地质问题日益凸显,迫切需要加强研究。以泰安纸坊泉域为例,探讨了泉域内岩溶水强径流带分布、成因类型及典型水文地质特征,以达到合理开发、保护岩溶地下水的可行性。结果表明,岩溶水强径流带是有巨大调蓄功能并发育于浅部地下水积极交替带的网络状强岩溶富水带,其地下水动态稳定,成井率高且识别特征明显,是本区岩溶水水源地开采的理想场所。研究强径流带系统的水文地质条件,掌握其规律,为进一步研究鲁中南地区岩溶地下水提供了一条有效途径。

关键词:鲁中南地区;岩溶水;纸坊泉域;强径流带;成因;水文地质特征

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



The causes and characteristics of karst water strong run-off belts in Tai'an Zhifang spring area in central and southern parts of Shandong

DENG Qijun^{1,2}, LI Wei¹, WANG Yushan¹, LYU Lin¹, LIU Yuanqing¹, MA Xuemei¹

(1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, CGS, Baoding 071051, China;

2. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In recent years, environmental geological problems, such as, karst groundwater spring water flow attenuation, dryness, water source over-exploitation and karst collapse, have become increasingly apparent in central and southern parts of Shandong Provinces. It is urgent to strengthen this research topic. The distribution, genetic types and typical hydrogeological characteristics of karst water strong run-off belts in the Tai'an Zhifang spring area were investigated in this study. In order to achieve the feasibility of rational development and protection of karst groundwater, the results showed that the karst water strong run-off belts was a network-like strong karst water-rich zone with a large regulation function and developed in the active alternating zone of shallow groundwater. The groundwater regime was stable, with a high rate of bore formation and obvious identification characteristics. It is an ideal place for the exploitation of karst water sources in this area. Investigating the hydrogeological conditions of the strong run-off belts system and mastering its laws provided an effective way to further explore the karst groundwater in the central and southern portions of Shandong.

Key words: central and southern parts of Shandong; karst water; Zhifang spring area; strong run-off belts; causes; hydrogeological characteristics

收稿日期:2018-11-04 修回日期:2018-12-17 网络出版时间:2019-01-24

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20190122.1210.006.html>

基金项目:中国地质调查局地质大调查项目(DD20160289; DD20190259)

作者简介:邓启军(1985—),男,安徽六安人,工程师,主要从事基岩地下水勘查、评价方面研究。E-mail: dqjaaa@126.com

通信作者:李伟(1970—),男,教授级高级工程师,主要从事基岩地下水勘查、评价方面研究。E-mail: ffsmuzili@sina.com

岩溶水是我国北方地区重要城市和工农业供水的重要来源,在区域的水资源组成中占有重要的地位,其以相对独立、规模不等的岩溶水系统进行循环^[1-5]。强径流带是北方岩溶区特有的一种宏观的水文地质现象,它主要是以溶隙为主,与溶孔及溶洞交织组成的网络状地下水流比较集中强岩溶含水带^[6-9],其对于北方地区岩溶水的勘探、开发和治理都具有非常重要的意义。

近几十年来,我国北方有近 30% 的岩溶大泉断流,80% 以上泉水流量大幅度衰减,多数地区区域岩溶地下水位每年以 1~2 m 速度持续下降,同时,约有 20% 的岩溶水系统主排泄带典型地下水的水质在Ⅲ类以下^[10]。北方岩溶水系统从输入、输出到结构、水资源要素转化关系发生了很大的变化^[10-12]。鲁中南地区亦同样面临着岩溶地下水泉水流量衰减、干涸,岩溶水源地超采等诸多问题。以笔者工作的沂蒙山区及大汶河流域为例,近几十年消失的岩溶大泉就有郭娘泉(12 960 m³/d,20 世纪 70 年代断流),鹏山泉(11 369 m³/d,20 世纪 90 年代断

流),辛庄泉(15 863.04 m³/d,2011 年断流)等,而其余较大的如西长旺泉,东泉等,其流量也呈不同程度的减小^[13-14]。针对以上的情况,迫切需要加强以泉域为系统的鲁中南岩溶地下水的研究。

纸坊泉群是在本次 1:5 万水文地质调查的基础上新发现的一个典型独立的封闭式泉排型岩溶水系统,其位于泰安市崮峪镇纸坊—南崮峪村一带,共有四个泉组成(图 1,图 2),分别为纸坊北泉(Q10,60.77 L/s),南崮峪村委泉(Q11,1.0 L/s),南滚泉(Q12,14.87 L/s),北滚泉(Q13,68.5 L/s),累计流量为 0.145 m³/s。泉域内发育有通向泉口的强径流带,分别是南白塔—纸坊,徐冶—青沙沟以及南冶—曹家庄强径流带。该泉域边界范围清晰,区内以季节性农业、生活用水为主,人为影响因素相对较小。因此,开展该泉域内岩溶水强径流带分布、成因类型及水文地质特征的研究,以此揭示鲁中南地区岩溶水强径流带的一些典型水文地质特征并掌握其形成规律,进而合理地开发、保护本地区岩溶地下水资源。



图 1 纸坊泉群照片(2017.8)
Fig.1 The photos of Zhifang spring group (2017.8)

1 纸坊泉域出露的地质条件

1.1 范围与边界

纸坊泉域位于大汶河一级支流牟汶河的汇河支流上游(图 2),其东以将山后—南白塔南北向断层为隔水边界,西以南白塔—店子—西南峪—牛角一线变

质岩地表分水岭为界,北、西北至崮峪岩体与碳酸盐岩交界的位置,泉域面积 21.45 km²,其中碳酸盐岩面积约占 90%。

1.2 地层概况

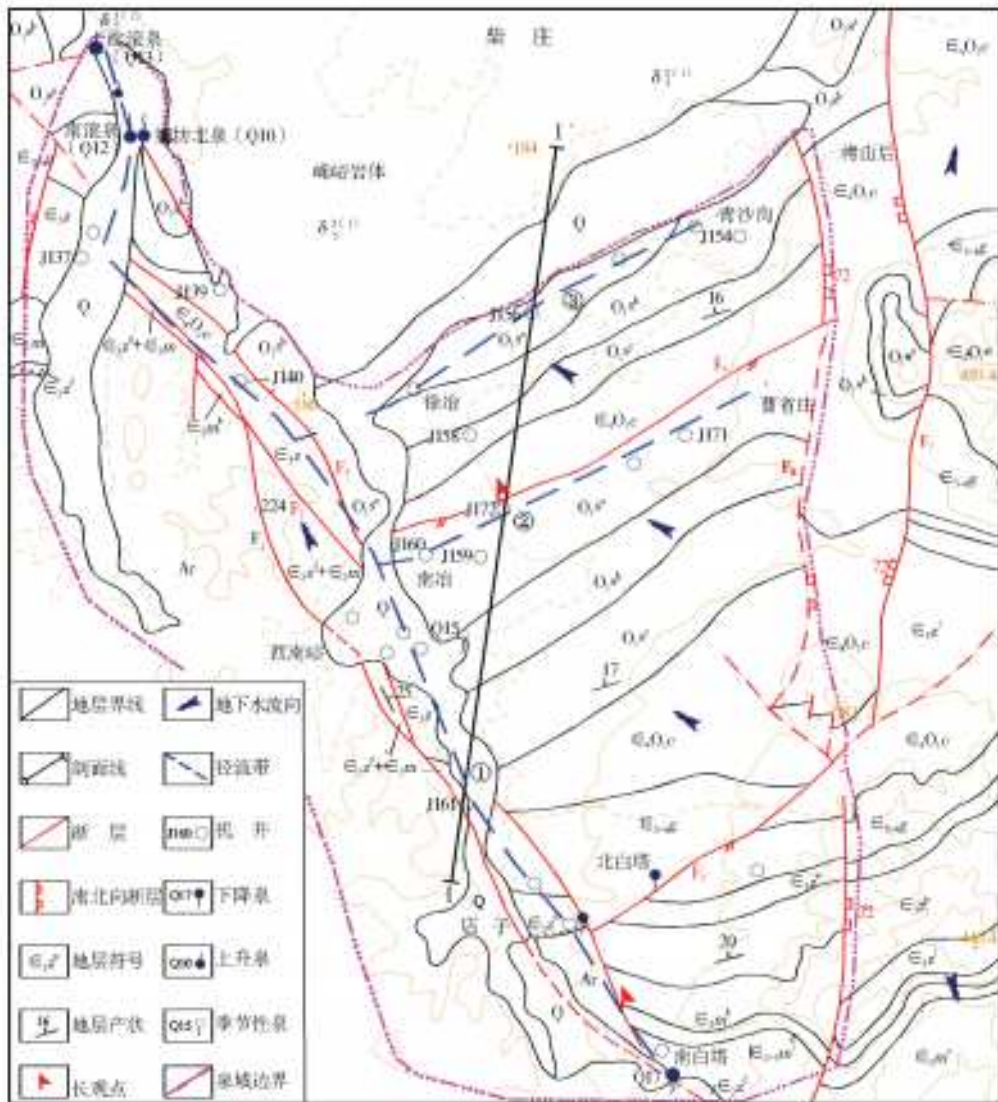
泉域内出露地层主要为太古界及古生界地层。太古界泰山群(Art)的岩性为黑云变粒岩,主要分

布于泉域的西部。寒武系地层岩性为白云岩、泥页岩、鲕粒灰岩、竹叶状灰岩等,分布于泉域南部北白塔一带以及南白塔-纸坊强径流带的中上游(图 2, J137 孔至 Q17 段)。其中北白塔一带,地层呈近东西方向条带状延伸,产状 $343 \angle 20$;南白塔-纸坊强径流带的中上游段,受断层构造影响,地层呈块状,产状 $35 \angle 25$ 。奥陶系地层为下统三山子组(O_1s)的细晶白云岩,分布于泉口排泄区及徐冶-青沙沟、南冶-曹省庄一带,呈 NE-SW 方向条带状延伸,产状 $340 \angle 17$ 。徐冶-青沙沟断层(F_4)为正断层,受崮峪岩体侵入影响,断层下盘上升,导致了三山子组 a、b、c 段及炒米店组($\epsilon_4 O_1c$)上段在徐冶-南冶一带重复出现。

1.3 构造特征

泉域内构造以断层为主,有三个主导方向,分别

是:(1)NW 方向(F_1 、 F_2 、 F_3)。位于南白塔-纸坊一线,断层长约 7 km,呈张性、张扭性,断距较宽,可见有构造角砾岩。该方向断层沿线地势低洼,机井密布,南白塔-纸坊强径流带即位于该方向断层带内。(2)NE 方向(F_4 、 F_5)。 F_4 断层位于南冶-曹省庄一线,该断层为正断层,倾向南东,倾角约 40° ,呈压扭性,该断层为泉域北部三山子组 a 段(O_1s^a)与炒米店组($\epsilon_4 O_1c$)的岩性分界线,南冶-曹省庄径流带一线机井均位于断层的南侧。 F_5 断层位于泉域的南部,为正断层,呈压扭性,断层的北侧出露有两个下降泉,该断层与 NW 方向断层交汇于店子村一带。(3)南北向构造(F_6 、 F_7)。位于泉域的东部,共有两条,平行分布于将山后一带,形成将山后断块隆起,阻隔了地下水的运动,形成了地下分水岭,因此,将 F_6 断层作为本泉域的东部边界。



①南白塔-纸坊强径流带;②南冶-曹省庄强径流带;③徐冶-青沙沟强径流带

注:Ar 太古界片麻岩; $\epsilon_2 z^d$ 朱砂洞组白云岩; $\epsilon_3 m$ 馒头组泥页岩; $\epsilon_2 z^d + \epsilon_2 m$ 朱砂洞组、馒头组未分; $\epsilon_3 z$ 张夏组灰岩; $\epsilon_{3-4} g$ 崮山组泥页岩互层; $\epsilon_4 O_1c$ 炒米店组灰岩 O_1s 三山子组白云岩; $\delta_5^3(1)$ 燕山期闪长岩体;Q 第四系松散层。

图 2 泰安纸坊泉域水文地质略图

Fig. 2 The hydrogeological sketch of Tai'an Zhifang spring area

2 纸坊泉域强径流带水文地质特征

泉域内 3 个岩溶水强径流带,其中南白塔-纸坊强径流带,沿着泉域西部 NW 方向断层发育,长约 6 km,宽约 250~600 m,于牛角村一带转向北,纸坊泉群即出露于径流带末端与峻峪岩体的交界位置处。而徐冶-青沙沟及南冶-曹省庄强径流带,长约 2.0 km,宽 100~200 m,呈狭长状。区内岩溶水强径流带水文地质特征明显,归纳如下。

2.1 径流带的系统性和调蓄功能

岩溶水强径流带系统性主要体现在以下 2 个方面。(1)强径流带存在主干与次支,且径流带的主干、次支都直接与其两侧弱径流区相联系,并组成完整的径流带系统。整个泉域,南白塔-纸坊径流带为泉域的主径流通道,长度最大,宽度最宽,主径流带的两侧,分布若干次级径流带及弱径流区,主要起汇集泉域内岩溶地下水的的作用。(2)岩溶含水系统与地下水流系统统一,强径流带系统中,弱径流区的地下水首先就近流向次级径流带,次级径流带向主径流带汇集,再向岩溶大泉输送。泉域内岩溶地下水具有统一的水流,沿水流方向,水量、化学组分等发生有规律的演变,强径流带内具有统一的地下水流场。同时,在整个强径流带内,又有很厚的岩溶含水层作为储存空间,形成一座座具有良好储存和调节功能的“天然地下水库”,如位于主次径流带交汇的地段的南冶、店子等村,这些村子似乎是直接坐落一个“地下水库”之上。经过“地下水库”的调蓄作用,将雨季和丰水期集中补给转化为连续性的地下径流,成为动态稳定的泉水。由此可见,强径流带既是地下水流系统又有巨大调蓄功能的岩溶含水系统,具有双重的系统性。弱径流区对于泉域内地下水主要起涵养和调蓄作用,而狭长的径流带则主要起着汇集和疏导作用,这种系统性在沂蒙山区及大汶河流域各岩溶泉域中表现的非常明显。

2.2 径流带是溶隙网络状的强岩溶带

通过对主干与次支径流带上的钻孔研究发现(图 3):径流带中岩溶普遍发育有溶蚀裂隙以及小型的溶蚀孔洞,以溶蚀裂隙为主,其中溶蚀孔洞直径一般 0.08~0.15 m,多数无充填,仅 1~2 个位于径流带下游以及主、次径流带交汇部位的钻孔中(如牛角村 J137 孔,南冶村 J160 孔),施工时揭露有稍大的溶洞(亦有可能是竖直的大溶隙),径流带内所有钻孔均未见有大型管道状溶洞。强径流带内发育的一系列小型溶洞、溶孔及溶蚀裂隙相互交织形成的网络状的强岩溶带^[6]并通过溶蚀裂隙相互连通。

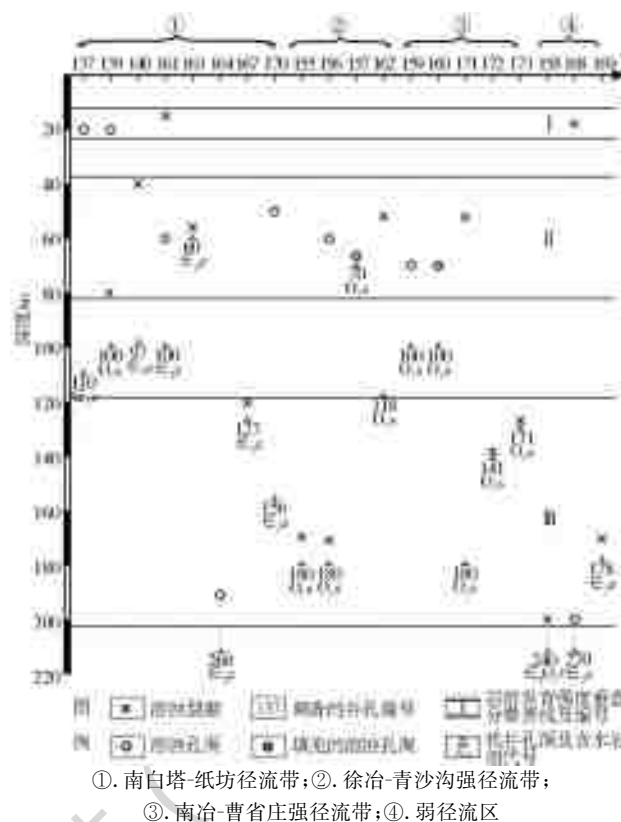


图 3 纸坊泉域钻孔岩溶垂向发育示意图

Fig. 3 The schematic of karst vertical development in Zhifang spring area

2.3 岩溶发育具有垂向分带性及向泉性

图 3 可以看出,该径流带内的岩溶发育共有三层。第一层发育于距地表 17~25 m 深度处,主要发育于纸坊泉群泉口处以及靠近泉口的钻孔中(南白塔-纸坊径流带下游),以未被填充的小型溶洞为主,溶蚀裂隙次之。第二层主要发育于距地表 50~80 m 深度位置,是泉域内岩溶发育最为广泛的一层,溶蚀裂隙及小型的溶蚀孔洞分布广泛且占比相近。第三层主要岩溶发育于距地表 118~200 m 深度,较为分散且溶蚀裂隙占了绝对多数,因此岩溶发育具有明显的垂向分带性且随着深度的增加,岩溶发育有逐渐减弱的趋势。区内岩溶发育深度基本在 200 m 以浅,主要与泉域范围较小溶蚀过程短有关。在平面上,亦可以看出越靠近泉口(径流带的下游),岩溶发育程度越高,以小型的溶蚀孔洞为主,而次级径流带(徐冶-青沙沟径流带,溶蚀孔洞发育较好,与闪长岩体的侵入造成围岩硅化、大理岩化有关)及弱径流区则以溶隙为主,呈现了一种向泉性^[6]的特征。

2.4 径流带为富水带,成井率高

径流带不仅是泉域内地下水的导水通道,更是有巨大调蓄功能的含水系统,研究显示,纸坊-南白塔径流带上(图 2),井孔密布,单井涌水量 1 920~4 320 m³/d,且在连续抽水时,普遍降深不大,其中

位于南白塔村东南强径流带上的 Q17 号岩溶泉, 最枯时间段, 其涌水量约为 $1\ 425\ \text{m}^3/\text{d}$; 如前文所述的南冶、店子等村, 成井率更是达到 100%。徐冶-青沙沟以及南冶-曹省庄径流带同样亦是如此, 井孔整体沿着径流带呈线性分布, 但因汇水面积相对较小, 该两处单井涌水量 $1\ 200\sim 3\ 600\ \text{m}^3/\text{d}$ 。而位于弱径流区的部分井孔(如: 徐冶-青沙沟径流带的外围 J154、J158 孔), 主要岩溶水发育段 $170\sim 200\ \text{m}$, 单井涌水量最高仅 $720\ \text{m}^3/\text{d}$, 旱季时往往不能满管抽水。由此可见径流带内成井率很高, 单井涌水量大, 是泉域内的富水带, 是岩溶水开采的理想地段。

2.5 径流带的出口为泉群, 具承压性

纸坊泉域为封闭式泉排性岩溶水系统。在排泄区纸坊-南角峪村一带, 不到 $1\ \text{km}^2$ 的范围内, 出露的 4 个泉眼(图 1), 该泉群位于碳酸盐岩与燕山期峻岭闪长岩体的接触带, 岩溶地下水运动到此处, 受到闪长岩体的阻截, 使地下水位抬高, 进而随着岩溶裂隙溢出地表成泉, 此类泉为多具承压性的上升泉, 实际调查过程中有气泡、涌砂等现象。泉水动态较为稳定, 其中北滚泉(Q13)20 世纪 50 至 70 年代曾引水进行地下发电。近年来, 随着泉域上游农业及生活用水, 泉水流量已较以前有所减小, 特别干旱年份的枯水期, 泉群偶尔会断流。

从整个泉域来看, 由岩溶大泉集中排泄, 而从排泄区局部来看, 却又是众多泉点组成的泉群分散排泄。因为强径流带不具备地下暗河那样大型的岩溶管道, 而是由众多的溶蚀裂隙、小型溶洞组成的网络状强岩溶带, 每一个分支延伸至地表, 均能形成一个泉点。所以, 本地区内岩溶泉群特别是若干泉组成的大岩溶泉群, 往往是泉域内发育有强径流带的典型标志^[6]。

2.6 径流带内地下水动态稳定, 地下水流面呈槽谷状

强径流带内地下水水位、水量变幅小, 动态稳定, 对于大气降水入渗补给均有明显的滞后反映, 但南白塔-纸坊径流带作为泉域内的主径流通道, 其滞后时间明显要比次级径流带及弱径流区要短。据动态资料分析(图 4), 纸坊-南白塔强径流带地下水位年际变幅 $3.31\ \text{m}$, 动态变化极小, 而徐冶-青沙沟径流带, 因为汇水面积较小, 年际变幅为 $8.75\ \text{m}$, 地下水位动态变化较主径流带稍大。对比二者的动态曲线则可以发现, 南白塔-纸坊径流带年际变化小主要是受次级径流带和弱径流区对径流带内地下水调蓄作用的结果, 由于径流带具有很强的导水性, 狭长的径流带在岩溶泉域内起着排水渠的作用, 不断的汇集又不断排泄。泉域内岩溶地下水的流网形态受

构造和地形控制, 呈自东南向西北径流的总趋势, 其总的特征呈波状起伏的辐型流面, 在强径流带位置顺着径流带方向形成槽谷状地下水面。因为狭长的径流带在岩溶泉域中起着排水渠的作用, 所以不论是丰水期还是枯水期, 径流带内的地下水流面总是保持槽谷状的形态, 这种较为稳定的地下水谷形态是径流带地下水面的典型特征。

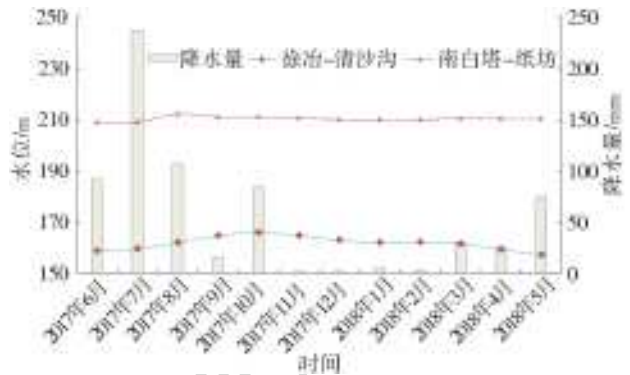


图 4 泉域内不同岩溶水径流带地下水动态-降水关系
Fig. 4 The relationship between groundwater dynamics and precipitation from different karst waterrun-off belts in Zhifang spring area

2.7 径流带地下水具有宏观的渗流性质

强径流带中的岩溶地下水在局部较大的溶洞中呈紊流状态, 但在水流通过溶洞之间的裂隙或者较小溶孔时则为层流渗透运动, 所以在整个溶隙网络中地下水仍以层流为主, 具有宏观的渗流性质。以泉域内 11 月份统测为例: 纸坊-南白塔径流带的水力梯度明显地分为上中下游三段: 自 J137 孔至泉口排泄点为下游段, 水力梯度为 $3.4\%\sim 4.6\%$, 自 J137 孔至 J161 孔为中游段, 水力梯度为 4.8% , 自 J161 孔至 Q17 为上游段, 水力梯度为 2.96% 。徐冶-青沙沟以及南冶-曹省庄径流带因径流带较短, 其水力梯度分别为 3.4% 、 2.9% 。而弱径流区(J154 孔)与最近的徐冶-青沙沟径流带的水力梯度为 7.4% 。由此可知, 因径流带导水性强, 有巨大的调蓄功能, 所以水力梯度一般较为平缓且相较于弱径流区的水力梯度要小很多, 在强径流带的不同段中, 往往水力梯度越小, 显示其地下水的富水性越好。

3 强径流带的成因分析

在发育有径流带的岩溶泉域中, 径流带系统及径流带位置的分布是岩溶选择性发育的结果^[6]。刘光亚先生曾将岩溶径流带的成因类型总结为以下几类^[15]: 接触带型、断裂带型、岩溶河谷型、河流渗漏集中补给型、浅拗向斜型、复合型。依据泉域内地层岩性、构造条件等, 纸坊泉域的径流带的类型可以概括为接触带型、断裂型以及复合型(图 5)。

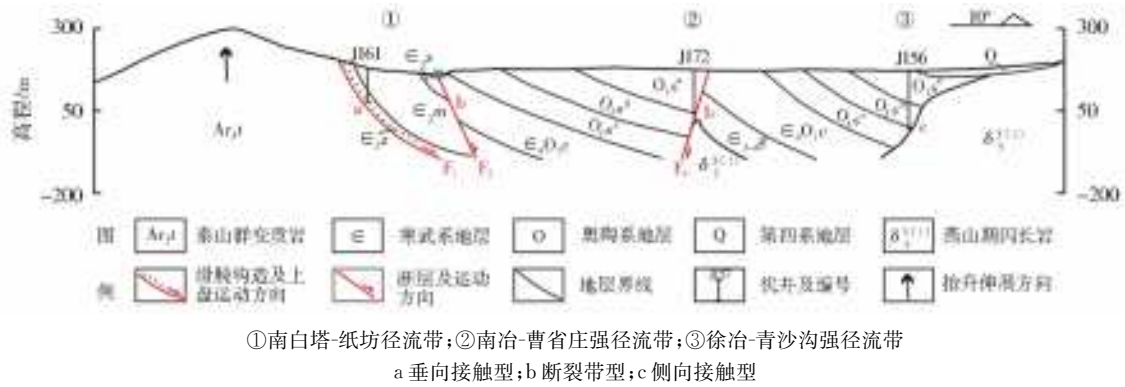


图 5 纸坊泉域岩溶水强径流带成因类型剖面示意图

Fig. 5 The schematic diagram of the genetic types of karst water strong run-off belts in Zhifang spring area

(1)接触带型。可以分为垂向接触型(a)和侧向接触型(c)。垂向接触型(a):南白塔-纸坊径流带中上游(图 2, J137 孔至 Q17 段)其含水岩组为寒武系下统朱砂洞组($E_2^{z^d}$)灰岩、白云岩,其直接与下伏泰山期的黑云变粒岩等隔水基底接触,径流带集中发育于底板隔水层面之上,形成清楚的径流带底界面,所以寒武系下统朱砂洞组这一含水岩组,在鲁中南地区,富水性普遍较好,形成了典型的“似层状”的岩溶蓄水构造,是区内重要的供水目的层。分析其原因主要有三方面:①该套地层沉积时间较早,经历了多期的构造运动,节理裂隙发育,易于岩溶发育;②该套地层与太古界接触面上,普遍发育着较为特殊的缓波状的滑脱构造^[16-17],属脆性断裂特征,沿不整合面发育有碎裂岩类构造岩,并同时伴有动力变质作用,滑脱构造造成了上覆朱砂洞组地层构造复杂,下伏地层构造简单,进一步加剧了该层的岩溶发育;③该组与太古界基底直接接触,上部岩溶水聚集且易通过节理、裂隙等得太古界变质岩山区的地表水直接入渗补给,亦进一步的促进了朱砂洞组地层的岩溶发育。侧向接触型(c)徐冶-青沙沟径流带属于侧向接触型,其北侧为燕山期崮崮闪长岩体,岩体侵入于奥陶系下统三山子组(O_1s)细晶白云岩。岩体与白云岩接触部位,发生热液蚀变作用,形成大理岩化和硅化,硅化会使岩性变硬、变脆,在以后的构造发育中,易形成裂隙发育带;而大理岩化的地层又易于岩溶发育,因此在闪长岩体与白云岩的接触部位岩溶发育程度好,形成了典型的接触型径流带。

(2)断裂带型(b)。南冶-曹省庄径流带即为断裂带型。该径流带整体狭长,宽度小,含水介质的各向异性^[18-19]最为明显。强径流带沿 NE 方向的构造断裂带延伸,据 J172 号机井揭露,该孔施工至 141 m 左右,碰见有断层,为该孔的主要出水段,位于该径流带的钻孔,基本都位于该正断层的迎水

侧^[20-21]。

(3)复合型。往往是由多种径流带类型组合而成。南白塔-纸坊径流带中,虽其主要含水岩组为朱砂洞组的灰岩、白云岩,具垂向接触型的特征,但沿该径流带,除与泰山期变质岩接触部位发育有舒缓状的滑动构造外,另发育有 1~2 条 NW 方向的断层构造,整体呈张性、张扭性,可见有明显的构造角砾岩,沿断层见有泉水出露(如店子村东断层泉等)。对于径流带内岩溶地下水的补径排, NW 方向断层仍是起着主导的作用。南白塔-纸坊径流带为断裂型、垂向接触型二种成因类型的组合,所以,将该径流带的成因类型定义为复合型。

4 结 论

纸坊泉域内岩溶水强径流带是以溶隙为主,与溶孔及小型溶洞交织组成的并发育于浅部地下水积极交替带的网络状强岩溶含水带。强径流带主要受构造裂隙控制,主干裂隙往往形成强径流带(径流通道),而次级裂隙多为径流带两侧的弱径流区。平面上,纸坊泉域内主径流带分布与区内主要控水构造方向一致,呈 NW 向,各向异性明显;垂向上,岩溶水径流带则受隔水层控制,往往集中发育在底板(Ar_3t)隔水层面之上,形成清楚的径流带底界面。岩溶水强径流带为富水带,有较好的调蓄功能,地下水动态稳定,成井率高,单井涌水量大,是本地区岩溶水水源地开采的理想场所。鲁中南地区广泛分布寒武、奥陶系碳酸盐岩,是我国北方岩溶发育具有代表性地区之一,其水文地质条件亦较为典型^[22],强径流带系统是开展该区岩溶地下水研究的关键点之一,因此查明区内强径流带的分布、成因类型、水文地质特征等对于本地区以及北方岩溶水的开发利用具有重要意义。

致谢:对参与野外调查及室内资料整理的项目组成员,成文过程中论文审阅人表示感谢。

参考文献(References):

- [1] 廖资生. 论北方岩溶水资源的开发与管理问题[J]. 中国岩溶, 1985(Z1): 107-114. (LIAO Z S. On the development and management of karst water resources in northern China[J]. Chinese Karst, 1985(Z1): 107-114. (in Chinese))
- [2] 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. Division and system characteristics of karst water system in northern China[J]. Earth Journal, 2010, 31(6): 860-868. (in Chinese))
- [3] 袁道先. 中国岩溶学[M]. 北京: 地质出版社, 1986. (YUAN D X. Chinese karstology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986. (in Chinese))
- [4] 张凤岐, 李博涛. 中国北方岩溶地下水系统和开发利用中的几个问题[J]. 中国岩溶, 1990(1): 9-16. (ZHANG F Q, LI B T. Several problems in karst groundwater system and development and utilization in northern China[J]. Chinese Karst, 1990(1): 9-16. (in Chinese))
- [5] 王维泰, 梁永平, 王占辉, 等. 中国北方气候变化特征及其对岩溶水的影响[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(6): 6-10, 28. (WANG W T, LIANG Y P, WANG Z H, et al. Characteristics of climate change in northern China and its impact on karst water[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(6): 6-10, 28. (in Chinese))
- [6] 刘光亚. 岩溶地下水径流带系统[J]. 河北地质学院学报, 1986(Z1): 305-326. (LIU G Y. Karst groundwater run-off belts system[J]. Journal of Hebei Institute of Geology, 1986(Z1): 305-326. (in Chinese))
- [7] 裴捍华, 杨亲民, 郭振中, 等. 山西岩溶水强径流带的成因类型及其水文地质特征[J]. 中国岩溶, 2003(3): 55-60. (PEI H H, YANG Q M, GUO Z Z, et al. Genetic types and hydrogeological characteristics of karst water and strong run-off belts in Shanxi[J]. Chinese Karst, 2003(3): 55-60. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-4810, 2003. 03. 008.
- [8] 方向清, 傅耀军, 华解明, 等. 北方岩溶地下水系统模式及特征[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2011, 34(2): 286-291. (FANG X Q, FU Y J, HUA J M, et al. Model and characteristics of karst groundwater system in the northern China[J]. Journal of HeFei University of Technology (Natural Science), 2011, 34(2): 286-291. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-5060, 2011. 02. 030.
- [9] 高宝玉, 梁永平, 王维泰. 柳林泉域岩溶水特点与地质背景条件分析[J]. 中国岩溶, 2008(3): 209-214. (GAO B Y, LIANG Y P, WANG W T. Analysis of karst water characteristics and geological background conditions in Liulin spring area[J]. Chinese Karst, 2008(3): 209-214. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-4810, 2008. 03. 003.
- [10] 梁永平, 王维泰, 赵春红, 等. 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 Y P, WANG W T, ZHAO C H, et al. Variation characteristics of karst water in northern China and its environmental problems[J]. Chinese Karst, 2013, 32(1): 34-42. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-4810, 2013. 01. 006.
- [11] 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, 45. (GUO G X, LIU W C, XIN B D, et al. The status quo and thinking of karst water exploration and development in Beijing[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(2): 33-36, 45. (in Chinese)) DOI: 10. 3724/SP. J. 1201. 2011. 02033.
- [12] 刘建立, 朱学愚, 钱孝星. 中国北方裂隙岩溶水开发和保护中若干问题的研究[J]. 地质学报, 2000(4): 344-352. (LIU J L, ZHU X Y, QIAN X X. Study on some problems in the development and protection of fractured karst water resources in northern China[J]. Acta Geologica Sinica, 2000(4): 344-352. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 0001-5717, 2000. 04. 007.
- [13] 陈梁, 夏家璐. 泰安幅 1:20 万区域水文地质调查报告[R]. 山东: 山东省地质局, 1979. (CHEN L, XIA J L. A regional hydrogeological survey of the Tai'an area at 1:20 0000 scale[R]. Shandong: Geological Bureau, 1979. (in Chinese))
- [14] 贺可强, 刘炜金, 邵长飞. 鲁中南岩溶水综合类型及合理调蓄研究[J]. 地球学报, 2002(4): 369-374. (HE K Q, LIU W J, SHAO C F. Study on comprehensive types and rational storage of karst water resources in central and southern Shandong Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2002(4): 369-374. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1006-3021, 2002. 04. 015.
- [15] 刘光亚. 中国北方的岩溶水强径流带[J]. 河北地质大学学报, 2017, 40(2): 15-19. (LIU G Y. Karst water strong run-off belts in northern China[J]. Journal of Hebei University of Geology, 2017, 40(2): 15-19. (in Chinese)) DOI: 10. 13937/j. cnki. hbdzdx. 2017. 02. 003.
- [16] 吕朋菊, 王念宝. 不整合面上的滑脱构造[J]. 山东矿业学院学报, 1985(2): 81-83. (LYU P J, WANG N B. Slip-page structure on unconformity surface[J]. Journal of Shandong Mining Institute, 1985(2): 81-83. (in Chinese))
- [17] 李理, 张进江, 钟大赉, 等. 鲁西地区沿寒武系/太古宇不整合面滑脱构造的主要特征及形成机制[J]. 地质科学, 2007(2): 335-352. (LI L, ZHANG J J, ZHONG D L, et al. Main features and formation mechanism of detachment structures along the Cambrian / Archean unconformity in western Shandong Province[J]. Geological Science, 2007(2): 335-352. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 0563-5020, 2007. 02. 008.

(下转第 195 页)

- 87-94. (in Chinese)) DOI:10.11660/slfdx.20160611.
- [7] 章军军,毛欣炜,毛根海,等. 侧式短进出水口水力试验及体型优化[J]. 水力发电学报,2006,25(2):38-41. (ZHANG J J, MAO X W, MAO G H, et al. Experimental research and shape optimization on lateral short inlet/outlet[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006,25(2):38-41. (in Chinese))
- [8] 高学平,叶飞,宋慧芳. 侧式进/出水口水流运动三维数值模拟[J]. 天津大学学报,2006,39(5):518-522. (GAO X P, YE F, SONG H F. 3D numerical simulation on the flow in side inlet/outlet[J]. Journal of Tianjin University,2006,39(5):518-522. (in Chinese))
- [9] 王晨茜,张晨,张翰,等. 侧式进/出水口流动分离现象研究[J]. 水力发电学报,2017,36(11):73-81. (WANG C X, ZHANG C, ZHANG H, et al. Flow separation in side inlets/outlets of pumped storage power stations[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2017,36(11):73-81. (in Chinese)) DOI:10.11660/slfdx.20171108.
- [10] GAO X P, TIAN Y, SUN B W. Shape optimization of bi-directional flow passage components based on a genetic algorithm and computational fluid dynamics[J]. Engineering Optimization, 2017: 1-17. DOI: 10.1080/0305215X.2017.1400543.
- [11] GAO X P, TIAN Y, SUN B W. Multi-objective optimization design of bidirectional flow passage components using RSM and NSGA II; A case study of inlet/outlet diffusion segment in pumped storage power station[J]. Renewable Energy, 2018(115):999-1013. DOI:10.1016/j.renene.2017.09.011.
- [12] 高学平,李建国,孙博闻,等. 利用多岛遗传算法的侧式进/出水口体型优化研究[J]. 水利学报,2018,49(2):186-194. (GAO X P, LI J G, SUN B W, et al. Optimization of the shape of lateral intake/outlet using multi-island genetic algorithm[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(2): 186-194. (in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.20170650.
- [13] 孙双科,柳海涛,李振中,等. 抽水蓄能电站侧式进/出水口拦污栅断面的流速分布研究[J]. 水利学报,2007,38(11):1329-1335. (SUN S K, LIU H T, LI Z Z, et al. Study on velocity distribution behind the trashrack in lateral intake/outlet of pumped storage power station[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007,38(11):1329-1335. (in Chinese))
- [14] 张从联,朱红华,钟伟强,等. 抽水蓄能电站进出水口水力学试验研究[J]. 水力发电学报,2005,24(2):60-63. (ZHANG C L, ZHU H H, ZHONG W Q, et al. Experimental research on inlet/outlet hydraulics of pump storage power plants[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2005,24(2):60-63. (in Chinese))
- [15] 邱彬如,刘连希. 抽水蓄能电站工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2008. (QIU B R, LIU L X. Engineering technology of pumped storage power station[M]. Beijing:China Electric Power Press,2008. (in Chinese))
- [16] 张春生,姜忠见. 抽水蓄能电站设计[M]. 北京:中国电力出版社,2012. (ZHANG C S, JIANG Z J. The design of pumped storage power station[M]. Beijing: China Electric Power Press,2012. (in Chinese))
- [17] 王福军. 计算流体动力学分析:CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004. (WANG F J. Computational fluid dynamics analysis: principle and application of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2004. (in Chinese))

(上接第 188 页)

- [18] 乔光建,梁韵,王斌,邢台百泉岩溶水库蓄水构造特征分析及功能评价[J]. 南水北调与水利科技,2010,8(1):139-143. (QIAO G J, LIANG Y, WANG B. Characteristics analysis and functional evaluation of water storage structure of Xingtai Baiquan karst reservoir [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(1): 139-143. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1672-1683.2010.01.038.
- [19] 束龙仓,张颖,鲁程鹏. 管道-裂隙岩溶含水介质非均质性的水文效应[J]. 南水北调与水利科技,2013,11(1):115-121. (SHU L C, ZHANG Y, LU C P. Hydrological effect of heterogeneity of pipeline-fractured karst aqueous media[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology,2013,11(1):115-121. (in Chinese)) DOI:10.3724/SP.J.1201.2013.01115.
- [20] 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 characteristics analysis of Beijing karst water system[J]. Urban Geology 2016, 11(3): 8-15. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-1903.2016.03.002.
- [21] 胡海涛,许贵森. 论构造体系与地下水网络[J]. 水文地质工程地质,1980(3):1-7. (HU H T, XU G S. Discussion of tectonic systems and groundwater networks [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1980(3):1-7. (in Chinese))
- [22] 奚德荫. 鲁中南地区岩溶水文地质条件及其特征[J]. 中国岩溶,1988(3):43-48. (XI D Y. Karst hydrogeological conditions and their characteristics in the central and southern Shandong[J]. Chinese Karst, 1988(3):43-48. (in Chinese))