

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201911066

大武水源地断裂带关键水动力参数确定及污染防治对策

包锡麟^{1,2}, 费宇红¹, 李亚松¹, 曹胜伟¹

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 大武水源地地处山东省淄博市, 区内建有某大型石化基地。水源地断裂带附近地下水曾受到来自地面石油化工污染物影响, 亟需针对性治理修复。精准确定开采背景下岩溶水的实际流向、径流速度和渗透系数等关键参数是污染治理研究的关键。基于国际新兴的井孔地下水胶体探测技术, 在该水源地断裂带污染段布设 7 眼探测孔, 开展 21 个层位的原位系列探测, 应用优势流理论和地质统计学方法确定关键水动力参数。结果表明: (1) 大武岩溶水源地断裂带附近含水层强径流层位(易污染段)位于奥陶系八陡组下部($O_{2-3}b$)至奥陶系闾庄组(O_2g)上部地层, 65 m 以浅的侧向流入补给是该水源地岩溶地下水污染的主要来源; (2) 该水源地断裂带附近岩溶地下水具有多元质点流向, 不同区段或层位实际水流方向和流速差异较大, 揭示了断裂带对水源地的非单一层位影响, 指明了水力屏障井混合开采的不利影响; (3) 建议调整水力屏障井的抽排层位与强度, 加强 70 m 以浅的抽排强度, 使得 SW95 正西方向上的径流流速明显小于 50.30 m/d; 减小 80 ~ 110 m 深度的抽排强度, 使得 SW99 正西方向上的径流流速明显小于 49.38 m/d。

关键词: 大武水源地; 断裂带污染段; 胶体探测; 关键水动力参数

中图分类号: P641.73

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)05-0056-08

Determination of the key hydrodynamic parameters of the fault zone using colloidal borescope in the Dawu well field and strategies for contamination prevention and control

BAO Xilin^{1,2}, FEI Yuhong¹, LI Yasong¹, CAO Shengwei¹

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, China Academy of Geosciences, Shijiazhuang, Hebei 050061, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The Dawu well field is located in a large petrochemical production base area near the city of Zibo. Groundwater near the fault zone in the well field area was affected by the surface petrochemical pollutants, and it is in urgent need of targeted treatment. However, how to accurately determine the actual flow velocity, runoff velocity and hydraulic conductivity in the karst aquifer under the background of large-scale pumping is the key for effective pollution control. In this paper, based on the newly developed technology of colloidal borescope, seven detection wells are arranged in the selected 21 layers in the polluted section of the fault zone in the well field area and the dominant flow theory and geostatistical method are employed. The results show that (1) the strong runoff layer (easily polluted) of the aquifer near the fault zone in the Dawu karst groundwater well field area is located from the lower part of the Badou Formation ($O_{2-3}b$) to the upper part of the Gezhuang Formation (O_2g), and groundwater within 65 m is the main water source of karst groundwater pollution in the area. (2) Groundwater near the fault zone has multiple particle flows, and the runoff direction

收稿日期: 2019-11-13; 修订日期: 2019-12-09

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07109-004); 国家自然科学基金项目资助(41907175); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190335)

第一作者: 包锡麟(1994-), 男, 硕士, 主要从事岩溶水文地质研究。E-mail: baoxilin12345@hotmail.com

通讯作者: 费宇红(1960-), 女, 博士, 二级研究员, 主要从事水循环与水资源评价研究。E-mail: yuhong_fei@163.com

and flow velocity in different sections are quite different, which is related to the pumping intensity. (3) In the treatment of groundwater pollution in the Hougao section, optimization and adjustment of groundwater exploitation should be made; the transportation of shallow flow (70 m) should be reduced to greater than the runoff velocity of SW95 (50.30 m/d), and the transportation of 80 ~ 110 m should be reduced to less than the runoff velocity of SW99 (49.38 m/d).

Keywords: Dawu well field; pollution section of the fault zone; colloidal detection; key hydrodynamic parameters

大武水源地断裂带发育,不同地段或深度连通性和渗透性差异较大。因工业生产与常年开采,水源地存在水质恶化的趋势。目前在水源地金岭断裂带堍皋地段已采取强排方式(即水力屏障)控制岩溶地下水污染,但由于水源地地下水的运移规律认识不足,治理效果有待进一步提高。精准掌握开采背景下不同深度岩溶地下水径流速度和渗透系数,才能在该水源地断裂带岩溶水污染段有针对性地优化水力屏障等治理措施,为大武水源地进一步节约成本、高效治理地下水污染提供依据。因此,获取原位可靠的岩溶地下水流向流速信息,对于开展断裂带污染段关键水动力参数研究具有十分重要的意义^[1]。

水源地水质治理修复效果与水文地质参数确定的精确程度密切相关^[2]。地下水实际流向流速,即质点流向流速,是岩溶水污染治理中最为关键的水动力参数。它不仅指明岩溶水污染的来源和去向,还关系治理措施的关键技术或优化方案选定^[3]。传统抽水试验确定的渗透系数,反映的是开采层位多层含水组的混合渗透能力,难以反映不同深度的实际流向流速^[4]。目前,比较成熟的地下水流向流速测量方法有示踪法^[5-6]、自然电位物探法^[7]和充电物探法^[8-9]等,但都需要大量的前期准备与持续的观测,且易受外部条件干扰。示踪法如荧光剂^[10]、同位素^[11]和粒子示踪剂法^[12-13],在测定时无法及时获取结果,且多为揭示整个含水层混合的流向流速。国际上新兴的井孔胶体探测技术,由 Peter M Kearn 在 20 世纪 90 年代提出,近年来投入商业使用^[14-15],此技术是利用高倍光学放大镜,捕获天然状态下地下水流动中裹挟的中性胶体粒子^[16],连续拍摄影像,通过应用优势流理论和地质统计学方法确定地下水实际流向流速^[17-18],不仅可以原位、即时探测,而且精确度更高^[19]。2016 年,北京地铁穿河冻结工程中采用该技术探测地下水实际流向流速^[20],确定了施工地层的渗透性,为施工提供了参考。

目前应用井孔胶体探测技术研究地下水流态较

多,而应用于识别和确定断裂带水动力参数、指导岩溶地下水污染治理的研究较少。本文基于井孔胶体探测技术,以大武岩溶水源地金岭断裂带的堍皋地段为研究区,布设 7 眼探测孔,获得 21 个优势流层位岩溶地下水流向流速的探测数据,计算了开采背景下断裂带污染段岩溶水的实际流向、径流速度和渗透系数等水动力参数,进行了岩溶水污染水力屏障治理指导的应用研究,为该水源地污染优化治理提供了重要依据。

1 研究区与试验概况

1.1 研究区概况

大武水源地位于山东省淄博市某大型石油化工基地(图 1a),为特大型岩溶地下水水源地。该区南部高北低,南部为低山-丘陵,出露奥陶系上统马家沟群(O_1-2m)石灰岩,地表及地下岩溶发育;北部为山前倾斜平原,第四系覆盖层较薄,向北厚度增大。水源地内分布有金岭断裂、边河断层和王寨断层等,均为平推正断层,对地层分布和地下水运动具有一定控制作用。大气降水入渗和淄河渗漏补给是该水源地主要补给来源,目前水源地以人工集中开采为主要排泄途径。大武水源地开发利用程度较高,20 世纪 90 年代开采量达 $5.2 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$,在主要开采区形成多个地下水水位降落漏斗;至 2001 年引黄工程以来,开采量仍为 $4.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ 。试验期间,局部依然存在地下水漏斗,地下水水位标高低于 0 m^[21-22]。

试验选择在大武水源地的金岭断裂带堍皋地段(图 1b)。堍皋地段曾是大武水源地岩溶地下水污染最为严重的区域^[23],该区地层剖面示意图,见图 2。20 世纪 80 年代中期, $3.0 \times 10^6 \text{ t}$ 乙烯工程在堍皋地段落成,由于管道多处损坏等原因,有机、无机污染物渗入了该地段地下水含水系统^[24]。目前,该地段采用水力屏障方法治理岩溶地下水污染^[25],试验研究区内设置水力截获强排井(简称“水力屏障井”,编号 SW98)。

1.2 试验过程

在流向流速探测试验中,主要用 AquaVision 胶体

试验利用研究区已有钻孔资料的水位观测孔,布置了7眼探测孔,分布于SW98的上游与下游,分别为

上游的 SW74、SW75、SW95,下游的 SW86、SW88、SW99 和 WK04。在开展不同层位(深度)岩溶地下水流向流速探测之前,7 眼探测孔都进行过专项抽水试验,计算获得了各探测孔全层渗透系数。整个流向流速探测试验,2018 年 3 月 15 日开始,2018 年 4 月 13 日结束。试验期间研究区未降雨,且开采稳定。

2 关键水动力参数分析

2.1 流向流速

本次试验获取了 7 眼探测孔的 21 组优势层位数据,其中 SW74 探测孔 5 组、SW88 探测孔 4 组、

SW75 和 WK04 探测孔各 3 组,以及 SW86、SW95 和 SW99 探测孔各 2 组(表 1)。探测孔位置分布与试验结果见图 4。

7 眼探测孔流速较快的层位对应奥陶系八陡组下部($O_{2-3}b$)至奥陶系阁庄组(O_2g)上部地层,分别为 WK04 的 110 m、SW74 的 168 m、SW75 的 74 m、SW86 的 145 m、SW88 的 85 m、SW95 的 70 m 和 SW99 的 110 m(表 1)。这是大武水源地金岭断裂带坳陷地段岩溶地下水的主径流层位,是该地段地下水强烈开采的层位,也是与地下水污染途径密切相关和污染治理的重点层位。

表 1 各探测孔胶体探测流向流速试验结果表

Table 1 Results of velocity and direction detection by colloidal borescope											
探测孔 编号	监测 深度/m	地层 代号	探测 流向/(°)	探测流速/ ($\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	日实际流速/ ($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)	投影换算的径流 速度/($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)	不同探测孔最大径 流流速/($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)	岩溶率	水力 梯度	探测试验 K / ($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)	抽水试验 K / ($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)
WK04	110		33.58	1 153.53	99.66	37.87				4.60	
	186	O_2w	47.74	766.04	66.19	39.36	67.64	0.001	0.026	3.05	2.98
	259		57.68	1 080.50	93.36	67.64				4.31	
SW74	140		328.02	194.69	16.82	-11.52				59.37	
	150		53.37	647.83	55.97	37.54				197.55	
	168	O_2g	196.15	1 749.43	151.15	-12.91	69.06	0.060	0.017	533.47	203.90
	169		109.63	807.91	69.80	69.06				246.37	
	171		79.16	602.52	52.06	48.24				183.73	
SW75	43	$O_{2-3}b$	95.80	607.69	52.50	52.27				74.61	
	74		117.29	632.98	54.69	52.56	52.56	0.027	0.019	77.72	0.14
	110	O_2g	157.70	738.44	63.80	35.26				90.66	
SW86	106	$O_{2-3}b$	94.19	980.93	84.75	84.11	129.54	0.015	0.028	45.40	53.12
	145		102.40	1499.62	129.57	129.54				69.41	
SW88	85		104.48	622.71	53.80	53.72				201.76	
	100	$O_{2-3}b$	19.74	413.75	35.75	5.28	53.72	0.045	0.012	134.06	190.89
	102		120.17	501.88	43.36	41.02				162.61	
	131	O_2g	169.74	754.04	65.15	23.89				244.31	
SW95	65	$O_{2-3}b$	284.29	582.95	50.37	-50.30	-50.30	0.108	0.020	271.98	11.80
	70		222.21	911.18	78.73	-40.5				425.12	
SW99	80	$O_{2-3}b$	284.13	476.86	41.20	-41.15	-49.38	0.042	0.018	160.22	161.45
	110	O_2g	265.40	594.12	51.33	-49.38				199.62	

注:1. $O_{2-3}b$ 为奥陶系八陡组粉晶灰岩; O_2g 为奥陶系阁庄组粉晶白云岩; O_2w 为奥陶系五阳山组云斑灰岩。2. 最大径流流速中“-49.38”的负号表示流向与径流流向相反,速度为 49.38 m/d。3. 在探测试验 K 值计算中,岩溶率使用钻孔资料计算的溶孔、溶洞、溶隙的长度之和与钻孔揭露灰岩地层的长度之比,流速为本次探测的实际流速,水力梯度使用 2018 年枯水期统测的资料进行计算。

假定地下水径流方向为东,通过投影计算,得到各探测孔地下水径流方向的径流速度(表 1 中投影换算的径流速度)。可以发现:

(1)7 眼探测孔计算确定的地下水径流方向的径流速度为 52.56~129.54 m/d。存在最大径流速度的探测孔位于金岭断裂右盘、距断层 0.24 km 处的 SW86 孔,探测深度 145 m,径流速度为 129.54 m/d,对应地层为奥陶系八陡组($O_{2-3}b$)粉晶灰岩,表征金岭断裂影响的强渗透性。

(2)远离水力屏障开采井的 SW88 孔、WK04 孔的

实际水流流向与地下水径流流向基本相同,地下水径流方向的流速分别为 53.72 m/d 和 67.64 m/d,对应探测深度分别为 85 m 和 259 m,地层分别为奥陶系八陡组上部($O_{2-3}b$)和奥陶系五阳山组(O_2w),表明两个层位岩溶含水层组尚未受到金岭断裂的显著影响,岩溶地下水运动方向仍主要受地势和地层产状等因素控制。

(3)SW74 孔、SW95 孔和 SW99 孔探测到实际水流方向,明显不同于地下水径流流向,探测最大流速方向分别为 196.15°、284.29°和 265.4°,对应探测深度



图4 研究区7眼探测孔实际水流方向及其与岩溶地下水动力场流向之间关系

Fig.4 Relationship between the runoff direction of 7 exploratory boreholes and the groundwater dynamic field in the study area

注:地下水等水位线依据2018年枯水期50余眼开采井统测地下水位绘制。

分别为168,65,110 m,对应地层分别为奥陶系阁庄组上部(O_{2g})、奥陶系八陡组下部($O_{2.3b}$),说明金岭断裂的影响显著。由图4可以发现,治理污染的水力屏障开采井(SW98)强烈影响SW74孔、SW95孔和SW99孔的地下水流方向。从SW99探测孔的探测结果看出,污染段下游的未污染的岩溶水被本来为上游的SW98开采井排出;SW95的探测结果显示,断层西侧的地下水未受到开采井影响,污染有向西扩散的可能,说明开采治理不合理。

2.2 关键参数的确定

渗透系数(K)是大武水源地金岭断裂带埃皋污染段岩溶地下水污染治理、水力屏障开采井布局和开采强度优化调整的关键参数之一。应用本次胶体探测结果,依据达西定律计算了7眼探测孔的21个优势流层位岩溶水含水介质渗透系数。依据7眼探测孔成井时的抽水试验资料计算了渗透系数,进行对比分析。计算对比认为,抽水试验获得的渗透系数与基于胶体探测地下水水质点速度获得的渗透系数较为接近。但SW75与SW95的两组渗透系数差异较大。经分析发现,SW75与SW95为1993年同一时段成井,钻孔资料中地层编录的部分较为粗略,抽水试验计算时使用的含水层厚度值过大,导致计算后的渗透系数过小。其他5孔的探测结果计算渗透参数范围与抽水试验计算的渗透系数相符。

经流向流速分析与关键参数确定,可以认为大武水源地金岭断裂带埃皋污染段的岩溶水污染治理优化调整深度为169 m以浅层位,此层位既为奥陶系八陡组下部($O_{2.3b}$)至奥陶系阁庄组(O_{2g})上部地层流速较快的层位,也为渗透系数较大的层位。该层水动力条件复杂,受生产、断层、水力屏障等多重因素影响。

3 岩溶水污染治理对策

3.1 断裂对水源地影响的非单一层位性

大武水源地金岭断裂带埃皋地段是该水源地岩溶水污染最为严重的区域,自1988年以来,由于苯、氨氮等污染,该段地下水水质长期处于V类水。目前SW98孔作为岩溶地下水污染治理的水力屏障开采井,其上游段的SW74、SW75孔岩溶水实际流速方向与SW98水力屏障开采井的汇水方向基本相同,分别为 109.63° 和 117.29° (表2和图5)。SW74孔的径流流速和渗透系数分别为69.80 m/d和246.37 m/d,SW75孔的值分别为52.56 m/d和77.72 m/d,对应深度分别为169 m和74 m。呈现出金岭断裂影响下SW74、SW75孔所在区域岩溶地下水穿越金岭断裂带向东,补给下游开采井的强渗透-径流能力,而且分别发生在不同层位(74 m和169 m),表现出金岭断裂对大武水源地地下水非单一层位的影响。

3.2 水力屏障井混合开采的治理不利性

介于SW75孔与SW98孔之间的SW95孔,其径流速度最大的层位流向为 284.29° ,换算的径流流速和渗透系数分别为-50.37 m/d和271.98 m/d,对应深度65~70 m。SW95孔不仅实际水流方向与SW74、SW75孔的实际水流方向和SW98水力屏障开采井的汇流方向相反,而且,径流流速和渗透系数也明显大于SW75探测孔的相应参数。由此表明,SW98水力屏障开采井采用的全裸孔抽排控制岩溶地下水污染的方式,未能高效控制浅部(70 m深度以浅)侧向流入该水源地的易污染水源。从距金岭断裂约1.03 km处的SW99探测孔的岩溶地下水水流方向、径流流速和渗透系数来看,整体的水流方向与区域地下水流向相反,且其径流流速和渗透系数分别达49.38 m/d和199.62 m/d(对应深度110 m)。表明SW98水力屏障井在80~110 m层段的开采强度过大(与潜水泵位置有关),以至造成大武水源地核心区岩溶地下水倒流,导致水源地核心区水质较好的中深层岩溶地下水被输排。而金岭断裂带附近浅部水质较差的水源侧向流入水源地状况尚未得到高效控制。

表 2 研究区探测孔不同深度岩溶地下水含水层渗透系数差异特征

探测孔编号	SW74	SW75	SW86	SW88	SW95	SW99	WK04
探测孔位置	金岭断裂的左盘 0.39 km 处	金岭断裂左盘, 断层附近	金岭断裂的右盘 0.24 km 处	金岭断裂的右盘 0.98 km 处	金岭断裂的右盘, 断层附近	金岭断裂的右盘 1.03 km 处	金岭断裂的右盘 1.15 km 处
与 SW98 水力屏障开采井的位置关系	上游	上游	无关	无关	上游	下游	无关
流速最大的层位流向/(°)	109.63	117.29	102.40	104.48	284.29	265.40	57.68
径流流速/(m·d ⁻¹)	69.80	52.56	129.54	53.72	-50.30	-49.38	67.64
抽水试验 K/(m·d ⁻¹)	203.90	0.14	53.12	190.89	11.80	161.45	2.98
不同深度							
< 75 m	/	74.61 ~ 77.72	/	/	271.98 ~ 425.12	/	/
75 ~ 110 m	/	90.66	45.40	134.06 ~ 201.76	/	160.22 ~ 199.62	4.60
探测试验							
110 ~ 150 m	59.37 ~ 197.55	/	69.41	214.71 ~ 244.31	/	/	/
K 值范围/							
150 ~ 186 m	183.73 ~ 533.47	/	/	/	/	/	/
(m·d ⁻¹)							
> 186 m	/	/	/	/	/	/	3.05 ~ 4.31

注:“/”为没有探测到优势水流,未计算相关水动力参数。

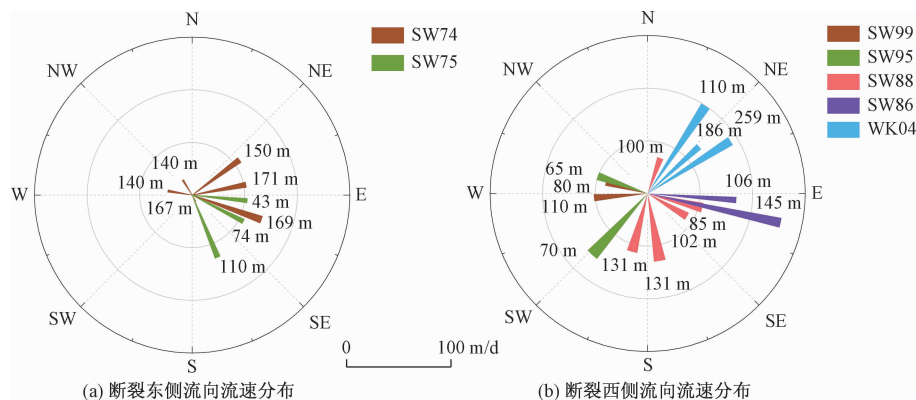


图 5 探测孔不同探测深度的岩溶地下水流向分布特征

Fig.5 Distribution of flow direction of groundwater with different exploratory holes and different depths

3.3 优化水力屏障井抽排层段及开采强度

为优化水力屏障井的治理效果,应调整其抽排层段与开采强度,需加强断裂带上游段 70 m 以浅的侧向流入水量的抽排开采强度,减小 80 ~ 110 m 深度的抽排强度。其中应增大 70 m 以浅的抽排强度,至 SW95 正西方向上的径流流速明显小于 50.30 m/d,使得金岭断裂带对 SW95 影响减小;减小 80 ~ 110 m 的抽排强度,使得 SW99 正西方向的径流流速明显小于 49.38 m/d,避免未受污染的岩溶水倒流。由此,不仅可以提高大武水源地埃皋污染段岩溶水污染治理效果,而且还会降低治理成本和规避不必要的优质岩溶水资源浪费。

4 结论

(1)研究区含水层强径流层位(即易污染段)位于奥陶系八陡组下部(O₂₋₃b)至奥陶系阁庄组(O₂g)上部地层,65 m 以浅的侧向流入补给是该水源地岩溶地下水污染的主要来源。

(2)水源地金岭断裂带附近岩溶地下水具有多元质点流向,不同区段或层位的水流方向和速度差异较大;断裂带以西的 SW74 的 169 m 层位、SW75 的 74 m 层位实际水流流向与径流流向相符,揭示了断裂带的导水性以及对水源地的非单一层位影响;SW99 实际水流流向与地下水径流流向相反,指明了水力屏障井混合层位开采的不利。

(3)应加强 70 m 以浅的抽排强度,使得 SW95 正西方向上的径流流速明显小于 50.30 m/d,减小金岭断裂带强导水影响;减小 80 ~ 110 m 深度的抽排强度,使 SW99 正西方向上径流流速明显小于 49.38 m/d 以避免水质较好的地下水倒流。

致谢:感谢中国地质科学院博士生导师张光辉研究员对本论文的悉心指导和修改;感谢山东省地质调查院杨丽芝研究员的悉心指导,朱恒华所长,刘春华、刘治政副所长、淄博市水资源管理办公室边农方处长对大武水源地调查与试验进行的技术指导;感谢济南大学刘迪、李军来同学的野外工作支持。

参考文献 (References):

- [1] 刘建立,朱学愚,钱孝星. 中国北方裂隙岩溶水资源开发和保护中若干问题的研究[J]. 地质学报, 2000,74(4):344-352. [LIU J L, ZHU X Y, QIAN X Q. Study of some problems on the development and protection of fracture-karst water resources in north China[J]. Acta Geologica Sinica, 2000, 74 (4): 344-352. (in Chinese)]
- [2] 王昭,石建省,张兆吉,等. 华北平原地下水中有有机物淋溶迁移性及其污染风险评价[J]. 水利学报, 2009,40(7):830-837. [WANG Z, SHI J S, ZHANG Z J, et al. Leachability and pollution risk assessment of organic contaminants in ground water in the North China Plain [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2009,40(7):830-837. (in Chinese)]
- [3] 方国华,钟淋涓,吴学文,等. 水资源利用和水污染防治投入产出最优控制模型研究[J]. 水利学报, 2010, 41 (9): 1128 - 1134. [FANG G H, ZHONG L J, WU X W, et al. Optimal control model for water resources utilization and water pollution control of input-output [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41 (9): 1128 - 1134. (in Chinese)]
- [4] WEN Z, HUANG G H, ZHAN H B. Non-Darcian flow to a well in a leaky aquifer using the Forchheimer equation[J]. Hydrogeology Journal, 2011, 19 (3): 563-572.
- [5] 韩庆之,陈辉,万凯军,等. 武汉长江底钻孔同位素单井法地下水流速、流向测试[J]. 水文地质工程地质, 2003,30(2):74-76. [HAN Q Z, CHEN H, WAN K J, et al. Determination of the velocity and direction of the groundwater flow using single well method in Changjiang River, Wuhan City [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2003,30(2): 74-76 (in Chinese)]
- [6] 靳孟贵,高云福,王文峰,等. 用同位素测井技术确定地下水侧向补给量[J]. 水文地质工程地质, 2005,32(4):32-36. [JIN M G, GAO Y F, WANG W F, et al. Determination of lateral groundwater recharge using single well techniques of a radioactive isotope [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005,32(4):32-36 (in Chinese)]
- [7] 张开伟,赵海超,杨灵杰. 自然电位法在岩溶地区地下水流向调查中的应用[C]//2016年全国工程勘察学术大会. 太原,2016. [ZHANG K W, ZHAO H C, YANG L J. Application of spontaneous potential in investigation of groundwater flow direction in karst area [C]//National Engineering Survey Academic Conference. Taiyuan, 2016. (in Chinese)]
- [8] 马安丽. 利用充电法测定地下水的流速流向[J]. 地下水, 2011,33(5):5. [MA A L. Determination of flow velocity of groundwater by charging method [J]. Ground Water,2011,33(5):5. (in Chinese)]
- [9] 张道清,王润潮. 环形自然电场法和充电法在确定地下水流速和流向中的应用[J]. 水文地质工程地质, 1992,19(4):56-57. [ZHANG D Q, WANG R C. Determination of flow direction and velocity of groundwater by charging method and spontaneous potential [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1992,19(4):56-57 (in Chinese)]
- [10] 吕全标,胡晓农,曹建华,等. 基于钻孔抽水试验和示踪试验的岩溶地区含水层结构研究[J]. 中国岩溶, 2017, 36(5):727-735. [LYU Q B, HU X N, CAO J H, et al. Aquifer structure of karst areas derived from borehole pumping and tracer tests [J]. Carsologica Sinica, 2017, 36 (5): 727 - 735 (in Chinese)]
- [11] 赵鹏宇,翟召怀,步秀芹,等. 滹沱河源头地下水硝酸盐污染的氮氧同位素示踪[J]. 水资源与水工程学报, 2017,28(6):83-89. [ZHAO P Y, ZHAI Z H, BU X Q, et al. Traceability of Nitrogen-Oxygen isotope on nitrate-contaminated groundwater of Hutuo River Source [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28 (6): 83 - 89. (in Chinese)]
- [12] 沈欢,黄勇,周志芳. 基于示踪试验的多重裂隙网分级与渗透参数确定[J]. 人民长江, 2018,49(14):95-99. [SHEN H, HUANG Y, ZHOU Z F. Classification of multi-layered fracture network and determination of its permeability parameters based on tracer tests [J]. Yangtze River, 2018,49(14):95-99. (in Chinese)]
- [13] 张劲松,杨玫. 人工示踪试验方法在岩溶地下水调查中的应用[J]. 地质论评, 2017,63(增刊1):335-336. [ZHANG J S, YANG M. Applications of tracing test in karst groundwater investigation [J]. Geological Review, 2017,63(Sup1):335-336. (in Chinese)]
- [14] KEARL P M, KORTE N E, CRONK T A. Suggested modifications to ground water sampling procedures based on observations from the colloidal borescope [J]. Ground Water Monitoring & Remediation, 2010,12(2):155-161.
- [15] KORTE N, KEARL P M, SIEGRIST R L, et al. An evaluation of horizontal recirculation using single-well tests, pumping tests, tracer tests, and the colloidal borescope. [J]. Groundwater Monitoring &

- Remediation, 2000, 20(1): 78–85.
- [16] 张文静, 周晶晶, 刘丹, 等. 胶体在地下水中的环境行为特征及其研究方法探讨[J]. 水科学进展, 2016, 27(4): 629–638. [ZHANG W J, ZHOU J J, LIU D, et al. A review: research methods that describe the environmental behavior of colloids in groundwater. [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4): 629–638 (in Chinese)]
- [17] BINTI GHAZALI M F, BIN ADLAN M N, BIN SAMUDING K, et al. Direct determination of groundwater direction and velocity using colloidal borescope at Jenderam Hilir, Selangor [J]. Applied Mechanics & Materials, 2015, 802: 640–645.
- [18] PARK D K, BAE G O, JOUN W, et al. An integrated approach on groundwater flow and heat/solute transport for sustainable groundwater source heat pump (GWHP) system operation [M]. Agu Fall Meeting, 2015.
- [19] 杨丽芝, 刘迪, 刘本华, 等. 胶体探孔器在观测岩溶水流速流向中的应用[J]. 工程勘察, 2019, 47(4): 35–39. [YANG L Z, LIU D, LIU B H, et al. Application of colloidal borescope in observing the velocity and direction of karst fissure water [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2019, 47(4): 35–39. (in Chinese)]
- [20] 张昊, 敖松, 刘俊洋. 北京地铁下穿运河区间地下水流速流向测试[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(7): 27–29. [ZHANG H, AO S, LIU J Y. Test of groundwater velocity and flow direction in river-crossing section of Beijing metro [J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(7): 27–29. (in Chinese)]
- [21] 尚宇宁. 淄博市大武水源地岩溶水水位多年动态变化分析研究[J]. 山东国土资源, 2013, 29(9): 44–47. [SHANG Y N. Study on karst water level dynamic change for many years of Dawu water resource area in Zibo City [J]. Shandong Land and Resources, 2013, 29(9): 44–47. (in Chinese)]
- [22] 郭达鹏, 康凤新, 陈免良, 等. 山东淄博沭水泉域岩溶水系统模拟及水源地优化开采预测[J]. 中国岩溶, 2017, 36(3): 327–338. [GUO D P, KANG F X, CHEN H L, et al. Numerical simulation and optimal exploitation scheme for the karst groundwater recourses system of Fengshui Spring basin in Zibo Region, Shandong Province, China [J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(3): 327–338. (in Chinese)]
- [23] 吴庆, 郭永丽, 翟远征, 等. 大武水源地地下水中 NO_3^- -N 动态变化特征及其影响因素分析[J]. 水文, 2017, (6): 68–73. [WU Q, GUO Y L, ZHAI Y Z, et al. Dynamic variation characteristics of NO_3^- N in groundwater of Dawu water source and influencing factors [J]. Journal of China Hydrology, 2017, (6): 68–73. (in Chinese)]
- [24] 朱学愚, 刘建立. 山东淄博市大武水源地裂隙岩溶水中污染物运移的数值研究[J]. 地学前缘, 2001, 8(1): 171–177. [ZHU X Y, LIU J L. Numerical study of contaminants transport in fracture-karst water in Dawu well field, Zibo City, Shandong Province [J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8(1): 171–177. (in Chinese)]
- [25] 任增平, 李广贺, 张戈. 大武水源地堠皋地区水力截获工程运行的数值模拟[J]. 地下水, 2002, 24(1): 14–15. [REN Z P, LI G H, ZHANG G. Numeric simulation of waterpower intercept and capture engineering running in Hougao area in Dawu water resources area [J]. Ground Water, 2002, 24(1): 14–15. (in Chinese)]
- [26] KEARL P M, KORTE N E, CRONK T A. Suggested modifications to ground water sampling procedures based on observations from the colloidal borescope [J]. Groundwater Monitoring & Remediation, 1992, 12(2): 155–161.
- [27] 郭绪磊, 朱静静, 陈乾龙, 等. 新型地下水流速流向测量技术及其在岩溶区调查中的应用[J]. 地质科技情报, 2019, 38(1): 243–249. [GUO X L, ZHU J J, CHEN Q L, et al. Flow direction and its application in the investigation of karst area [J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(1): 243–249. (in Chinese)]
- [28] 刘洪. 优势渗流通道的试井解释方法研究[J]. 石油地质与工程, 2015, 29(2): 98–100. [LIU H. Well testing interpretation method research of preferential seepage channels [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2015, 29(2): 98–100 (in Chinese)]
- [29] 汪庐山, 关悦, 刘承杰, 等. 利用油藏工程原理描述优势渗流通道的新方法[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(5): 1155–1159. [WANG L S, GUAN Y, LIU C J, et al. A method of describing preferential flowing path by reservoir engineering principles [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(5): 1155–1159 (in Chinese)]
- [30] 主恒祥, 邢立亭, 相华, 等. 示踪试验在济南泉群优势补给径流通道研究中的应用[J]. 地下水, 2017, 39(2): 5–7. [ZHU H X, XING L T, XIANG H, et al. Application of tracer test in the study of preferential runoff path of Ji'nan spring group [J]. Ground Water, 2017, 39(2): 5–7. (in Chinese)]