

钟骏,晏锐,周志华,等,2020.河北邢台水位抬升现象的水化学成因分析.中国地震,36(2):284~294.

河北邢台水位抬升现象的水化学成因分析

钟骏¹⁾ 晏锐¹⁾ 周志华¹⁾ 田雷¹⁾ 罗娜²⁾

1)中国地震台网中心,北京 100045

2)河北省地震局红山基准台,河北邢台 054000

摘要 2018年9月以来,河北省邢台市出现了地下水位大幅回升、多口干涸泉眼复涌等宏观异常现象。为判定异常现象是否与区域内构造活动和地下应力改变有关,2019年4~6月进行了3期现场调查,并对3口灌溉井和6处地表水进行水样采集,分析了水化学离子浓度和氢氧稳定同位素等水化学数据。结果表明,3口灌溉井具有地表水的特征,补给来源相似且与地下水存在一定的水力联系;受区域煤矿资源丰富及人类活动的影响,水体中富含 SO_4^{2-} 离子。结合异常出现前的生态补水资料,分析认为2018年9月以来河北省邢台市水位抬升现象可能是由邢台地区生态补水引起的,与区域内构造活动和地下应力改变没有直接联系,排除其是地震宏观前兆的可能。

关键词: 邢台 水位抬升 水化学 异常成因

[文章编号] 1001-4683(2020)02-0284-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地下流体作为地壳介质中最活跃的组分之一,具有很高的流动性和灵敏性。在孕震过程中,应力、应变的积累作用使地下流体的物理、化学性质出现不同程度的变化(陈运泰,2009)。根据感知方式不同,异常可分为微观异常和宏观异常,其中比较常见的宏观异常有井、泉、河流异乎寻常的涨落,井、泉变色变味、翻花冒泡、水温突变等(吴中海等,2013)。据不完全统计,1966年邢台7.2级、1975年海城7.3级、1976年唐山7.8级、2008年汶川8.0级地震震前均存在丰富的宏观异常(中国地震局监测预报司,2010)。长期以来,地震宏观异常一直受到地震学家的普遍关注(张国民等,1987;Scholz,1997;Woith et al,1999;车用太等,2012)。然而,地下流体也常受到降雨、河流、开采等水文或人为因素的影响,导致异常既有可能由地震活动引起,也有可能由环境或人为干扰引起,还有可能由其他某种原因引起(孙小龙等,2013)。因此,如何有效地识别流体异常变化的成因,排除干扰因素,挖掘地震前兆异常信息,对于地震短临预测的判定具有重要作用。

[收稿日期] 2019-12-13; [修定日期] 2020-04-07

[项目类别] 中国地震科学实验场的地震可预测性国际合作研究(2018YFE0109700)、中国地震局震情跟踪定向工作任务(2019010310)和中国地震台网中心青年科技基金(QNJJ201809)共同资助

[作者简介] 钟骏,男,1988年生,硕士,助理研究员,主要从事地震地下流体研究。E-mail: zjadvance@126.com

晏锐,通讯作者,男,1978年生,正研级高级工程师,主要从事地震地下流体与地震预测研究。

E-mail: yanrui@seis.ac.cn

水化学分析方法作为区别构造活动与非构造活动因素的重要手段之一,能够指示地下水的成因与补给过程(蒋凤亮等,1989)。地下水组分记录了流体来源、运移及岩石圈内的重要信息(Reddy et al,2011a、2011b)。在地下水循环过程中,水化学成分和环境同位素作为水循环研究中的示踪剂,在一定程度上记录着地下水运移、转化的历史,为判定地下水类型、成因以及水岩反应程度等地球化学特征提供依据(杜建国等,2003; Song et al,2006; 张磊等,2014; 孙小龙等,2016)。离子交换反应(Ca/Mg、Na/K 和 TDS 等)以及环境同位素(^{18}O 、 ^2H 和 ^3H)能指示地下水、河水和地表径流之间的关系(Grasby et al,1999; 苏小四等,2009; 张磊等,2019)。研究表明地震前后地下水的组分发生变化与断层封闭性的改变和流体的运动有一定关系(Tsunogai et al,1995; Claesson et al,2004; Reddy et al,2011a、2011b; 晏锐等,2015)。前人在地下水的成因、形成过程和水岩平衡作用、地下水受大气降水和抽(蓄)水的干扰影响、地震前后的水化学变化特征等方面开展了详细的研究,认为水化学方法在判定地下水异常与地震孕育过程的构造活动以及地震的发生关系等方面能够发挥重要作用(张磊等,2016)。

20 世纪 80 年代后,随着工农业的发展和人口的增加,地下水超采严重,邢台地区地下水埋深呈现多年持续下降趋势,导致泉水减小乃至断流(刘光伟等,2010)。然而,2018 年 9 月邢台地区地下水位出现明显回升现象。经大面积调查后发现,自 2018 年 9 月开始邢台市隆尧县尹村镇地下水位大幅回升,多口灌溉井水位埋深由 80m 上升至 20m 左右,泚河河道由几近干涸变为水面宽阔;邢台市多口常年干涸的泉眼复涌,七里河河道水位大幅度上升。研究上述异常现象是否由地下构造活动引起或是受生态补水影响,对认识和了解邢台地区地下水动态变化及地震前兆异常识别均具有重要意义。本文主要利用水化学分析方法,研究区域地下水与地表水的补给关系及水循环状态。

1 水文地质概况

河北省邢台市中西部位于太行山东麓山前冲、洪积平原,属于山区至平原区的过渡带,地势西高东低,南高北低,海拔 40~100m,坡降为 1/500~1/2000,也称山前倾斜平原(柴建峰,2003)。区内主要被新生界第四系松散沉积层覆盖,第四系与下伏地层呈不整合接触,地层自老至新为太古界(Ar)、长城系(Ch)、寒武-奥陶系(E-O)、奥陶系(O)、侏罗系(J)、第四系(Q)。第四系为一套松散多层结构的泥质、砂质沉积物,地层自下而上划分为下更新统(Q_1)、中更新统(Q_2)、上更新统(Q_3)和全新统(Q_4)(图 1)。

下更新统(Q_1)底界埋深 480~560m,厚度 200~220m,以棕红、黄棕亚黏土、黏土为主,含水层多为风化中粗砂,透水性差。中更新统(Q_2)底界埋深 220~420m,厚度 140~180m,下部多为棕褐、红棕色亚黏土,上部为黄棕、棕色亚黏土夹亚砂土,砂层多为中砂。上更新统(Q_3)底界埋深 40~280m,厚度 20~200m,为棕黄、灰黄色亚黏土夹亚砂土及砂层,砂层在山前以砂砾、中粗砂为主。全新统(Q_4)厚度总体上西薄东厚,山前厚度仅几米,甚至有基岩出露,向东厚度逐渐加大,最大厚度 60m 左右,岩性由灰色、灰黄色亚黏土、淤泥质亚黏土、亚砂土及砂层组成,结构松软,具水平层理,砂层由山前的粗砾向东渐变为中细砂,一般厚度 10~15m(赵婕等,2017)。

山前平原区含水层大致可分为两组,即松散岩类孔隙含水岩组和碳酸盐岩类裂隙岩溶

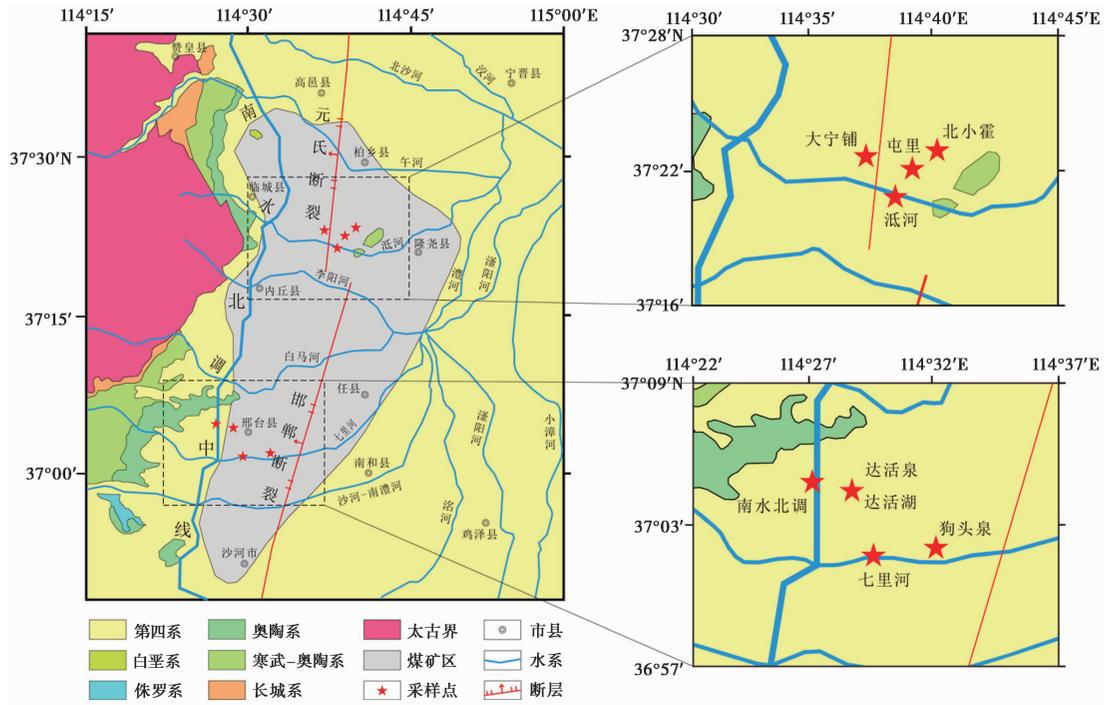


图 1 邢台地区地质构造及采样分布示意图

水含水岩组。松散岩类孔隙含水岩组主要由河流冲积、洪积作用形成的第四系松散沉积物构成。含水层岩性多为卵砾石、粗、中砂组成,粒度粗,厚度大,由单层向多层过渡,呈扇状分布,垂向展布明显。含水层上覆多为透水能力较强的砂和亚砂,有利于降水补给,在垂向上透水能力相当强。

山前平原在第四系下有隐伏的碳酸盐岩类裂隙岩溶水含水岩组分布,含水体以中奥陶系灰岩为主,岩溶裂隙发育良好,单井出水量大于 $1000\text{m}^3/\text{d}$,表现出较强的富水性。由于该区岩性颗粒较粗,地下水补给来源以降水入渗补给为主,兼有地表水入渗、侧向和越流补给(山前地带下伏的岩溶水以侧向补给为主),排泄形式主要为人工开采。在天然状态下,地下水流向总趋势与地面倾斜方向以及河流走向一致,即由西向东继而转东北(刘克岩,2002)。

邢台市成矿地质条件良好,矿产资源丰富,开发历史悠久,是河北省矿产资源大市之一(尚敬等,2013)。优势矿产有煤、铁、石膏、水泥用灰岩、岩盐、陶瓷土等。其中,煤矿资源广泛分布于沙河市、邢台县、隆尧县、临城县、内丘县和桥西区等6个县市区(图1)。

2 样品采集与测试

为判断地下水大幅回升及干涸泉眼复涌的原因是由于生态补水还是地球深部构造活动,分别于2019年4月20日、5月10日、6月5日对邢台地区进行了3期现场调查,并采集水样。沿泚河流域分别在北小霍村、屯里村、大宁铺村及泚河布点采样,沿七里河流域分别在狗头泉、达活泉、达活湖及七里河布点采样,同时在南水北调干渠布点采样。其中,北小霍村、屯里村、大宁铺村为地下井水,泚河、狗头泉、达活泉、达活湖、七里河及南水北调干渠为地表水(图1)。

样品采集选用 50mL 聚乙烯塑料瓶,采集前用采集点的水流振荡清洗采样瓶及瓶盖 3 次,采样时使水缓缓流入采样瓶,采满后封好瓶口,贴上标签,及时送往实验室测试。水化学组成和氢氧同位素测试在中国地震局地壳应力研究所(地壳动力学重点实验室)进行,使用 Dionex ICS-2100 离子色谱仪,测试水化学离子组分包括 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- ,浓度检测限为 0.01mg/L, HCO_3^- 采用酸、碱中和滴定法求得。使用 LGR LWIA-24-EP 激光液态水稳定同位素分析仪,测定同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD ,精度分别小于 0.1‰和 0.4‰。

3 结果与分析

3.1 水化学特征

研究区水体总溶解固体(TDS)分布在 165.85 ~ 703.92mg/L 范围,平均值为 430.13mg/L,属于低矿化度淡水;平均阳离子浓度总和($\text{TZ}^+ = \text{Ca}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Mg}^{2+}$)约为 130.55mg/L,平均阴离子浓度总和($\text{TZ}^- = \text{HCO}_3^- + \text{Cl}^- + \text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$)约为 379.15mg/L。阳离子质量浓度呈现出 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$,其中 Ca^{2+} 质量浓度约为 81.56mg/L,约占 62.5%,在阳离子中占明显优势,其次是 Mg^{2+} 和 Na^+ ,两者质量浓度接近,分别约为 23.59mg/L 和 22.20mg/L,约占 18.1%和 17%;阴离子质量浓度呈现出 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$,其中 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 在阴离子中占明显优势,质量浓度分别约为 204.89mg/L 和 120.46mg/L,约占 54.0%和 31.8%(表 1)。

Schoeller 图由一组垂直平行线组成,横坐标上每条线代表一种化学成分,纵坐标为离子含量,用折线将各种离子含量的点连接在一起。Schoeller 图可直观反映不同水体的水化学组分随时间的变化规律以及各水体之间可能存在的关系。同源水体在稀释水混合后曲线仅在垂向移动而不改变其形态(Truesdell, 1991)。研究区水体 Schoeller 图如图 2 所示(图例中数字代表期数,后同),除泚河和狗头泉的 SO_4^{2-} 浓度存在明显差异外,研究区大部分水体的水化学变化趋势基本相同,表明了采样点水体具有相似的补给来源。泚河和狗头泉 SO_4^{2-} 浓度较高,可能受工业开采和废水排污等人类活动影响,与其他物质混入有关。

Piper 三线图可以直观判断水化学类型,反映水化学离子的相对含量和分布特征,进而分析水化学成分的演化规律(Piper, 1944)。已有研究表明,邢台市山前倾斜平原地下水水化学类型以 $\text{Mg} \cdot \text{Ca} \cdot \text{HCO}_3$ 为主(王琪等,2013)。而本次研究区水体主要处于 Piper 三线图中的 5 区,少数处于 6 和 9 区(图 3),以碱土金属离子和弱酸根离子为主,碳酸盐硬度大于 50%。同一采样点 3 期水化学数据落在菱形区域相近位置,表明在该时间段各点的离子含量未发生明显变化。但是,泚河流域和七里河流域沿线各采样点水化学类型发生了明显的变化,主要表现在阴离子的变化上,分别是泚河流域沿南水北调干渠—大宁铺—北小霍—屯里—泚河方向及七里河流域沿南水北调干渠—七里河—达活湖—达活泉—狗头泉方向, HCO_3^- 毫克当量浓度(meq/L)逐渐降低, SO_4^{2-} 毫克当量浓度(meq/L)逐渐增加。由此导致水化学分布在 Piper 图上逐渐向右上偏移,水化学类型由 $\text{Mg} \cdot \text{Ca} \cdot \text{HCO}_3$ 型经 $\text{Mg} \cdot \text{Ca} \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3$ 型向 $\text{Mg} \cdot \text{Ca} \cdot \text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ 型过渡。这种变化特征可能反映了不同流域的径流特征。

SO_4^{2-} 含量较以往大幅增加,可能与煤系地层富含硫有关。地下水中的 SO_4^{2-} 主要来自含石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)或其他硫酸盐的沉积岩的溶解(王大纯等,1995)。前人对邯郸市峰峰

表 1 各采样点水化学离子含量(单位:mg/L)

地点	Ca ²⁺			Mg ²⁺			Na ⁺			K ⁺			HCO ₃ ⁻		
	1期	2期	3期	1期	2期	3期	1期	2期	3期	1期	2期	3期	1期	2期	3期
南水北调	37.61	37.91	38.48	9.21	9.38	9.20	6.26	8.27	8.69	1.93	3.14	2.40	152.54	146.44	146.44
大宁铺	75.12	75.43	76.71	19.68	22.96	19.92	28.66	25.70	32.24	1.05	1.92	1.83	250.17	213.56	250.17
北小霍	150.72	142.02	148.02	34.27	32.73	33.88	32.64	35.33	37.21	2.06	2.53	3.14	341.70	274.58	341.70
屯里	151.55	149.08	154.20	33.88	34.10	35.08	29.17	32.72	32.10	2.13	2.76	2.34	317.29	274.58	323.39
派河	91.63	82.50	79.80	24.65	24.23	25.54	26.74	26.69	30.10	6.71	6.60	6.86	158.64	115.93	128.14
七里河	30.49	61.00	25.45	10.44	16.51	12.03	9.77	31.04	17.54	1.94	3.50	3.07	128.14	164.75	113.65
达活泉	61.33	47.87	84.46	20.81	20.18	21.90	16.81	17.47	19.43	2.64	3.50	1.76	195.25	152.54	250.17
达活湖	53.01	56.19	72.93	14.71	17.11	21.04	10.89	15.25	17.71	1.90	2.62	2.34	195.25	176.95	237.97
狗头泉	78.80	71.30	68.59	25.24	24.31	26.41	26.85	27.08	34.67	4.83	4.83	5.80	183.05	146.44	152.54
地点	SO ₄ ²⁻			Cl ⁻			NO ₃ ⁻			TDS					
	1期	2期	3期	1期	2期	3期	1期	2期	3期	1期	2期	3期	1期	2期	3期
南水北调	30.80	31.31	31.90	6.21	9.23	10.30	4.49	4.52	3.91	172.78	176.98	178.10			
大宁铺	79.08	103.55	86.43	22.07	26.43	27.03	31.48	18.24	30.13	382.23	381.01	399.38			
北小霍	192.22	194.44	207.70	36.08	41.95	41.13	71.45	69.82	52.75	690.29	656.11	694.68			
屯里	209.89	214.38	227.93	49.61	55.25	53.05	45.06	40.06	37.52	679.94	665.64	703.92			
派河	204.58	211.04	225.02	29.02	32.27	39.64	10.02	8.16	5.64	472.67	449.46	476.67			
七里河	38.18	96.78	51.72	9.32	36.70	17.50	1.64	9.44	0.81	165.85	337.35	184.95			
达活泉	69.06	69.32	71.98	30.29	32.70	34.31	20.51	16.68	34.04	319.08	283.99	392.97			
达活湖	50.97	61.49	77.27	16.44	24.89	30.66	6.06	8.15	10.66	251.61	274.18	351.60			
狗头泉	132.89	133.06	149.42	52.93	55.91	73.45	8.67	6.36	2.08	421.74	396.07	436.69			

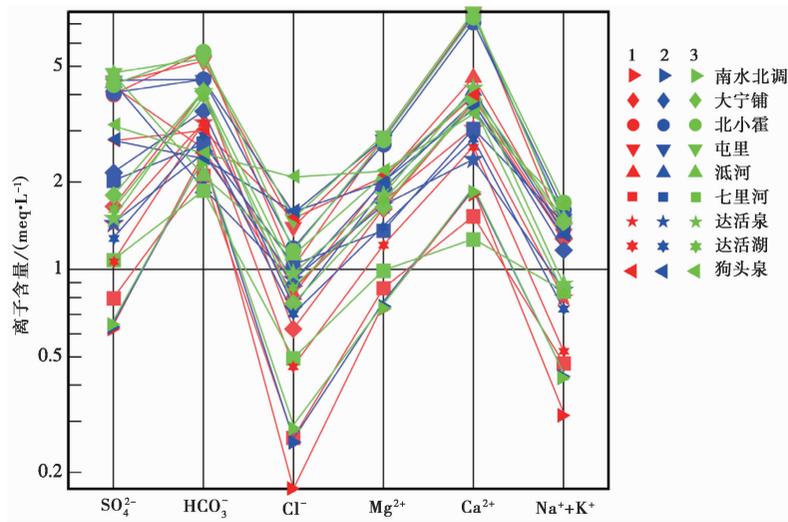


图 2 研究区水体 Schoeller 图

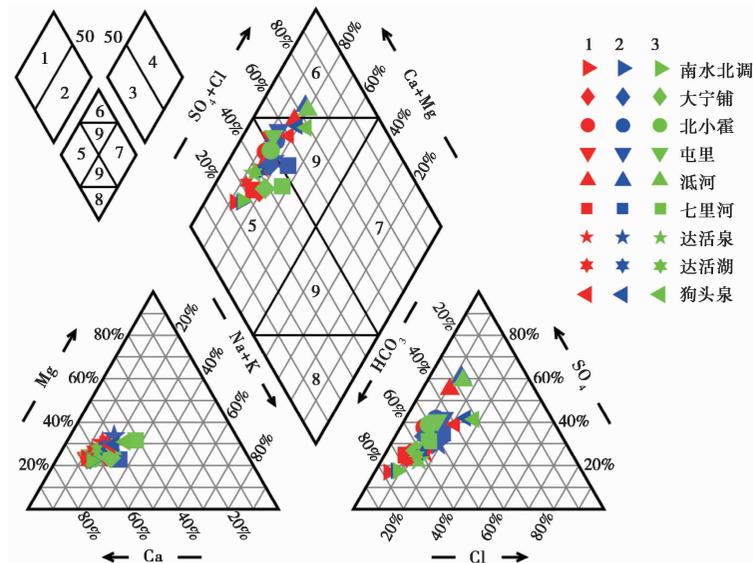


图 3 研究区水体 Piper 三线图

1 区碱土金属离子超过碱金属离子;2 区碱大于碱土;3 区弱酸根超过强酸根;4 区强酸大于弱酸;5 区碳酸盐硬度超过 50%;6 区非碳酸盐硬度超过 50%;7 区碱及强酸为主;8 区碱土及弱酸为主;9 区任一对阴阳离子含量均不超过 50%毫克当量百分数

煤矿研究发现,长期煤矿开采会导致奥陶系灰岩地下水中的 SO_4^{2-} 含量逐渐上升,水化学类型由 $Mg \cdot Ca-HCO_3$ 型变为 $Mg \cdot Ca-HCO_3 \cdot SO_4$ 型(闫玉梅等,2010)。邢台地区煤矿资源丰富,煤系地层中的硫酸盐及氧化后的硫化物随着开采大量溶入水中,造成煤矿废水的 SO_4^{2-} 含量大幅上升,变化范围为 $0 \sim 1187.47 \text{mg/L}$ (刘猛,2015)。矿区排出的废水一部分用于农田灌溉,其余部分排入河道(康彦付,2013),因此,造成区域浅层地下水中 SO_4^{2-} 含量增大。

3.2 氢氧稳定同位素特征

在水循环转化过程中,发生氢氧同位素分馏作用导致不同的水具有不同的氢氧稳定同位素比值,利用这种差异可以有效地研究各种水的来源。前人研究表明,变质水的 δD 值为 $-65\text{‰} \sim -20\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 值为 $3\text{‰} \sim 25\text{‰}$;原生岩浆水的 δD 值为 $-80\text{‰} \sim -40\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 值为 $5.5\text{‰} \sim 9\text{‰}$;建造水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值变化范围较大,表示大气降水和其他来源水的混合,或与围岩发生了同位素交换作用(Rollison,2000)。中国大气降水 δD 含量为 $-190\text{‰} \sim 20\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 含量为 $-24\text{‰} \sim 2\text{‰}$ (郑淑蕙等,1983)。本研究中,采样水体的 δD 值为 $-61.3\text{‰} \sim -33.9\text{‰}$,平均值 -48.9‰ , $\delta^{18}O$ 值为 $-8.5\text{‰} \sim -3.2\text{‰}$,平均值 -6.4‰ (表 2),属于建造水(图 4(a)),且均在中国大气降水的变化范围之内。据此推测,研究区水体可能是以大气降水成因为主。

表 2 各采样点稳定氢氧同位素组成(单位:‰)

地点	δD_{V-SMOW}			δD_{V-SMOW} StDev			$\delta^{18}O_{V-SMOW}$			$\delta^{18}O_{V-SMOW}$ StDev		
	1期	2期	3期	1期	2期	3期	1期	2期	3期	1期	2期	3期
南水北调	-48.6	-48.4	-47.2	0.1	0.1	0.8	-7.1	-7.2	-6.9	0.0	0.1	0.1
大宁铺	-59.5	-58.6	-60.0	0.1	0.5	0.4	-8.0	-7.9	-8.2	0.0	0.1	0.1
北小霍	-55.9	-56.2	-55.6	0.1	0.2	0.6	-7.5	-7.7	-7.6	0.1	0.1	0.2
屯里	-50.5	-50.6	-49.9	0.4	0.3	0.3	-6.4	-6.6	-6.6	0.1	0.1	0.1
泚河	-44.0	-38.0	-35.0	0.3	0.2	0.2	-6.1	-4.5	-4.1	0.1	0.1	0.1
七里河	-45.4	-49.7	-33.9	0.1	0.4	0.3	-6.3	-6.9	-3.9	0.0	0.2	0.1
达活泉	-52.3	-49.8	-61.3	0.5	0.2	0.4	-6.6	-6.2	-8.5	0.1	0.1	0.1
达活湖	-46.6	-46.8	-48.7	0.2	0.1	0.3	-6.1	-6.1	-6.1	0.0	0.2	0.1
狗头泉	-42.0	-39.4	-34.5	0.2	0.2	1.0	-5.1	-4.5	-3.2	0.1	0.1	0.1

注:V-SMOW 代表维也纳标准海水,StDev 代表标准差。

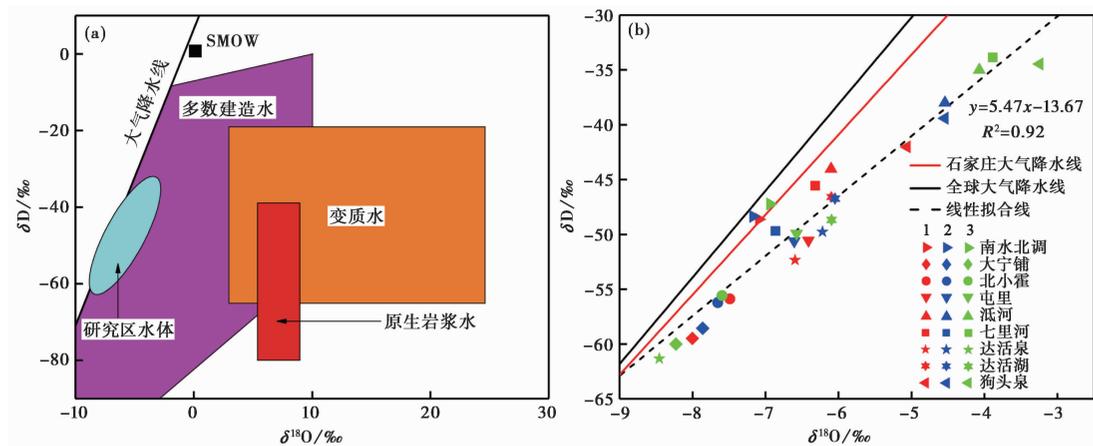


图 4 不同种类水(a)(据 Rollison(2000)修改)及研究区水体(b) δD - $\delta^{18}O$ 关系图

SMOW 代表平均海水;前期研究过程中,未找到邢台区域大气降水线,以石家庄大气降水线代替

根据研究区水体氢氧稳定同位素数据,得到线性拟合方程: $\delta D = 5.47\delta^{18}O - 13.67$, $R^2 = 0.92$,说明 δD 和 $\delta^{18}O$ 相关性显著,如图 4(b)所示。由于邢台市地处半干旱内陆地区,纬度

效应和大陆效应明显,蒸发作用强烈,大气降水同位素相对富集,研究区水体的斜率和截距小于全球大气降水线和石家庄大气降水线。南水北调干渠 3 期的氢氧同位素组成均落在全国大气降水线上,指示其源于大气降水;其余水体 3 期的氢氧同位素组成均偏离大气降水线并处于其右下方,且大致位于一条直线上,表明地下水与地表水补给来源相近且较为单一,在南水北调干渠补给后经历了不同程度的蒸发,引起了同位素的分馏作用,体现了不同水体循环过程的差异性。近些年,河北省地表和地下水资源的变化趋势与降雨量均呈动态减少趋势,且蒸发作用强烈,反映了干旱背景下稳定同位素不平衡分馏效应的存在(郝跃颖,2017)。

4 讨论

4.1 生态补水影响

邢台地区水资源短缺,地表水先天不充足。市区用水以开采岩溶水为主,20 世纪 70 年代有泉水出露。随着社会经济发展迅速,水资源需求量大,供需矛盾日益激化。地下水长期超采,补给量不足,引发了地下水水位大幅度下降、地面沉降、降落漏斗等一系列问题。自 1978 年以来,地下水水位以每年 1.6~1.8m 的速度下降,1995 年地下水最大埋深已达 85.06m,邢台市经历了多次水荒,“百泉”泉水早已干涸(刘克岩,2002)。

2018 年,南水北调中线工程向邢台市生态补水 3.37 亿 m^3 。其中,泚河和七里河补水量分别为 9982.65 万 m^3 和 4953.12 万 m^3 ,远多于 2017 年的补水量 1231.32 万 m^3 和 917.47 万 m^3 。补水前,邢台市隆尧县尹村 6 口机井全部工作,蓄水池水位仅为 1m,供水严重不足。补水后,仅 3 口机井工作,蓄水池水位就能达到 3m,供水充足稳定(马彦铭,2018)。泚河河道两岸 2km 范围内的地下水水位与 2016 年同期相比回升超过 20m,百泉水位与 2016 年同期相比上升了 47m,狗头泉等断流多年的泉眼实现稳定出水(黄清标,2019)。七里河水量的 90% 来源于南水北调工程,水深长期保持在 1.5m 左右(杨永丽,2018)。同时,邢台市关停矿山和自备井,大力开展地下水超采治理及节水灌溉等项目,水生态系统得到了很大程度保护与修复。因此,可以初步判定生态补水是造成本次邢台地区地下水水位明显回升的主要原因。

4.2 水化学成因分析

地下水水化学演化过程受地下水补给、径流、排泄特征及地质构造和人类活动等多种因素的影响,不同地区经受着不同水文地球化学过程的影响(沈照理,1983)。研究区含水层主要由冲、洪积作用形成的以中粗砂夹砾石层为主的松散堆积物组成,含水层发育、透水性好,砂层间连通性好,其下隐伏的碳酸盐类含水层以中奥陶系灰岩为主,为承压含水层,渗透性强。补给方式以降水入渗为主,兼有地表水入渗和侧向补给。2018 年 4~6 月泚河、七里河在生态补水后水位迅速下降,甚至出现无流水的情况(刘岚,2018),表明枯水期水体流经以砂、砾石层为主的河道时,垂向快速渗漏,对碳酸盐含水层进行补给,地下水水位开始上升。当河道水位快速下降甚至出现断流时,地下水水位相对较高,通过河底和两岸斜坡反向渗透补给地表径流,增加河道流量。因此,研究区地下水与地表水存在一定的水力联系。

一般而言,对于区域性地下水流动系统,由于矿物成分的不断溶解、溶滤和蒸发浓缩,由补给区到径流区再到排泄区,地下水中 TDS 的含量会不断增大(Wu et al,2014)。研究区属于山前倾斜平原,地势西高东低,地下水径流方向自西向东。结合 Piper 三线图(图 3)和水

化学离子浓度特征(表1)分析发现,除沘河外,七里河流域和沘河流域沿各自径流方向的TDS和大部分离子含量呈上升趋势,地下水化学类型由 $Mg \cdot Ca-HCO_3$ 型经 $Mg \cdot Ca-SO_4 \cdot HCO_3$ 型向 $Mg \cdot Ca-HCO_3 \cdot SO_4$ 型转变,整体上呈现明显补给-径流-排泄特征。其中,七里河流域由南水北调进行补给,流经七里河、达活湖和达活泉,最终在狗头泉排泄;沘河流域由南水北调进行补给,流经大宁铺、北小霍、屯里,最终在沘河排泄。在这个过程中,碳酸盐岩裂隙中运动的地下水中的 CO_2 会使灰岩的主要成分 $CaCO_3$ 、 $MgCO_3$ 溶解($Ca(Mg)CO_3 + CO_2 + H_2O = Ca^{2+}(Mg^{2+})^+ + HCO_3^-$),使水中出现比例较大的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- (臧红飞,2015)。而从表1可以看出,沘河的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 离子含量相对较低,这可能是由于沘河受到地下水反向渗透补给和南水北调直接补给的共同影响,南水北调水对地下反向渗透水产生了稀释作用造成的。因此,本次水位抬升现象与区域内构造活动和地下应力改变没有直接联系,可能是由邢台地区生态补水所致。

5 结论

通过上述地球化学分析方法,对异常成因进行研究,得到以下主要结论:

(1)3口灌溉井具有地表水的特征,补给来源相似且与地下水存在一定的水力联系。

(2)沘河流域和七里河流域呈现明显的径流特征。其中,沘河流域的径流方向是从南水北调干渠补给经大宁铺、北小霍、屯里,最终在沘河排泄;七里河流域是从南水北调干渠补给经七里河、达活湖和达活泉,最终在狗头泉排泄。

(3)邢台地区煤矿资源丰富,工业开采及废水排污等人类活动的影响是区域水体富含 SO_4^{2-} 并导致水化学类型改变的主要原因。

(4)水位抬升现象与区域内构造活动和地下应力改变没有直接联系,可能是生态补水所致。邢台地区以松散岩类孔隙含水层和碳酸盐岩类裂隙岩溶水含水层为主,垂向透水能力强。河道补水后快速下渗补给地下水,当地下水位相对较高时,通过河底和两岸斜坡反向渗透补给地表径流,增加河道流量。因此,排除其是地震宏观前兆的可能。

致谢:河北省地震局地震预测研究中心、邢台市应急管理局和红山基准台的异常核实人员在本次工作中给予支持和配合,中国地震台网中心姚琪副研究员在绘图中提供帮助,匿名审稿专家对论文修改提出中肯的意见与建议,在此一并表示感谢。

参考文献

- 柴建峰,2003.河北平原活断层评价及区域构造应力场分析.硕士学位论文.唐山:河北理工学院.
- 车用太,鱼金子,刘成龙,2012.地震宏观异常与临震预测成功的希望.国际地震动态,(6):138.
- 陈运泰,2009.地震预测:回顾与展望.中国科学D辑:地球科学,39(12):1633~1658.
- 杜建国,刘丛强,2003.同位素地球化学在地震研究方面的作用.地震,23(2):99~107.
- 郝跃颖,2017.气候变化对河北水资源及承载力的影响.水科学与工程技术,(2):44~47.
- 黄清标,(2019-05-23).200万人受益!邢台2018年江水消纳比例居全省第一.河北新闻网.<http://news.eastday.com/s/20190523/u1ai12532402.html>.
- 蒋凤亮,李桂如,王基华,等,1989.地震地球化学.北京:地震出版社.
- 康彦付,2013.矿山疏干水排放对百泉泉水复涌的影响分析.地下水,35(3):32~35.
- 刘光伟,甄立伟,郑世泽,2010.超采地下水对邢台市水文地质情况的影响.陕西水利,(3):114~115.

- 刘克岩,2002. 南水北调中线山前平原受水区地下水调控能力分析. 河北水利水电技术,(1):9~10.
- 刘岚,(2018-07-18). 3.51 亿 m^3 ! 河北畅饮丹江水. 河北新闻网. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1606300468463078094>.
- 刘猛,2015. 邢台矿区水化学特征及综合水源判别模型研究. 硕士学位论文. 邯郸:河北工程大学.
- 马彦铭,(2018-07-18). 南水北调中线一期工程向北方生态补水以来 3.51 亿 m^3 长江水润泽燕赵. 河北日报. <https://www.nsbid.cn/news/medias/20180718/1244621.shtml>.
- 尚敬,郭树斌,王敏,2013. 邢台市矿产资源整合及效益分析. 中国国土资源经济,26(3):36~39.
- 沈照理,1983. 水文地球化学基础(一). 水文地质与工程地质,(3):54~57.
- 苏小四,王玉玉,董维红,等,2009. 马莲河河水与地下水的相互关系:水化学和同位素证据. 吉林大学学报(地球科学版),39(6):1087~1094.
- 孙小龙,刘耀炜,晏锐,2013. 云南姚安井 2009 年 10 月后水位下降的成因分析. 地震学报,35(3):410~420.
- 孙小龙,王广才,邵志刚,等,2016. 海原断裂带土壤气与地下水地球化学特征研究. 地学前缘,23(3):140~150.
- 王大纯,张人权,史毅红,等,1995. 水文地质学基础. 北京:地质出版社.
- 王琪,武玉璞,杨学亮,等,2013. 邢台市平原区地下水水质分析. 地下水,35(2):19~20,52.
- 吴中海,赵根模,2013. 地震预报现状及相关问题综述. 地质通报,32(10):1493~1512.
- 晏锐,官致君,刘耀炜,2015. 川西温泉水温观测及其在芦山 $M_s7.0$ 地震前的异常现象. 地震学报,37(2):347~356.
- 闫玉梅,秦鹏,吴振岭,等,2010. 峰峰矿区煤炭开采对岩溶地下水环境的影响研究. 中国矿业,19(增刊):120~125.
- 杨永丽,(2018-11-22). 生态补水,让七里河水“活”起来. 邢台日报. http://www.xtrb.cn/xt/2018-11/22/content_660630.htm.
- 臧红飞,2015. 柳林泉域岩溶地下水水文地球化学特征及演化规律研究. 博士学位论文. 太原:太原理工大学.
- 张国民,陈章立,1987. 我国地震前兆和预报的探索. 中国地震,3(增刊):3~13.
- 张磊,刘耀炜,任宏微,等,2016. 氢氧稳定同位素在地下水异常核实中的应用. 地震地质,38(3):721~731.
- 张磊,刘耀炜,任宏微,等,2019. 水化学分析方法在地下水异常核实中的应用. 地震,39(1):29~38.
- 张磊,刘耀炜,孙小龙,等,2014. 基于水化学和物理方法的井水位异常分析. 地震地质,36(2):513~522.
- 赵婕,曹颐,2017. 邢台地区水文地质条件分析. 科技风,(12):132.
- 郑淑蕙,侯发高,倪葆龄,1983. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究. 科学通报,(13):801~806.
- 中国地震局监测预报司,2010. 地震宏观异常摘编. 北京:地震出版社.
- Rollison H R. 2000. 岩石地球化学. 杨学明,杨晓勇,陈双喜,译. 合肥:中国科学技术大学出版社.
- Claesson L, Skelton A, Graham C, et al, 2004. Hydrogeochemical changes before and after a major earthquake. Geology, 32(8): 641~644.
- Grasby S E, Hutcheon I, McFarland L, 1999. Surface-water-groundwater interaction and the influence of ion exchange reactions on river chemistry. Geology, 27(3):223~226.
- Piper A M, 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. Eos, Trans Am Geophys Union, 25(6): 914~928.
- Reddy D V, Nagabhushanam P, 2011a. Groundwater electrical conductivity and soil radon gas monitoring for earthquake precursory studies in Koyna, India. Appl Geochem, 26(5):731~737.
- Reddy D V, Nagabhushanam P, Sukhija B S, 2011b. Earthquake ($M5.1$) induced hydrogeochemical and $\delta^{18}O$ changes: validation of aquifer breaching-mixing model in Koyna, India. Geophys J Int, 184(1):359~370.
- Scholz C H, 1997. Whatever happened to earthquake prediction. Geotimes, 42(3):16~19.
- Song X F, Liu X C, Xia J, et al, 2006. A study of interaction between surface water and groundwater using environmental isotope in Huaisha River Basin. Sci China Ser D: Earth Sci, 49(12):1299~1310.
- Truesdell A H, 1991. Effects of physical processes on geothermal fluids. In: D'Amore F. Application of Geochemistry in Geothermal Reservoirs Development. Rome:UNITAR/UNDP Publication, 71~92.
- Tsunogai U, Wakita H, 1995. Precursory chemical changes in ground water; Kobe Earthquake, Japan. Science, 269(5220):61~63.
- Woith H, Milkereit C, Maiwald U, et al, 1999. Physico-chemical behaviour of underground waters after the October 1, 1995 Dinar earthquake, SW Turkey. Il Nuovo Cimento C, 22(3~4):387~392.
- Wu J H, Li P Y, Qian H, et al, 2014. Using correlation and multivariate statistical analysis to identify hydrogeochemical processes affecting the major ion chemistry of waters: a case study in Laoheba phosphorite mine in Sichuan, China. Arab J Geosci, 7(10): 3973~3982.

Hydrochemical Analysis on the Cause of Water Level Rising in Xingtai City, Hebei Province

Zhong Jun¹⁾ Yan Rui¹⁾ Zhou Zhihua¹⁾ Tian Lei¹⁾ Luo Na²⁾

1) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

2) Hongshan Benchmark Seismic Station of Hebei Earthquake Agency, Xingtai 054000, Hebei, China

Abstract The macro anomalies, such as rise of groundwater level, re-gushing of several dry-up springs have occurred in Xingtai city, Hebei Province since September 2018. The field investigations were conducted in three times in order to determine whether such anomalies are related to regional tectonic activity or change of underground stress. We collected 3 samples from irrigation well water and 6 samples from surface water. Hydrochemical ion concentration and isotopic ratios of the samples were analyzed. The results are as follows: ① samples from 3 irrigation wells show the similar supply source and a certain hydraulic connection with ground water; ② the enrichment of SO_4^{2-} in water is caused by the richness of coal resources and human activity. We conclude that the anomaly phenomena probably were caused by ecological water supplement project based on ecological water supplement data before occurrence of anomalies, and no evidence was found to support the correlation between the cause of anomalies and regional tectonic activity or change of underground stress. Consequently, the possibility of seismic macro precursor anomaly is eliminated.

Keywords: Xingtai; Water level rising; Hydrochemistry; Cause of anomaly