

石伟,李永生,欧阳兆国,等. 2022. 依兰—伊通断裂北段地下水化学特征[J]. 地震研究, 45(2): 257–263, doi: 10. 20015/j. cnki. ISSN1000–0666. 2022. 0024.

Shi W, Li Y S, Ouyang Z G, et al. 2022. Hydrochemical characteristics in the north segment of the Yilan–Yitong Fault[J]. *Journal of Seismological Research*, 45(2): 257–263, doi: 10. 20015/j. cnki. ISSN1000–0666. 2022. 0024.

## 依兰—伊通断裂北段地下水化学特征\*

石伟, 李永生, 欧阳兆国, 胡宝慧, 高峰

(黑龙江省地震局, 黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要:** 在位于依兰—伊通断裂北段的4个地震流体观测站及其附近地区采集了19个水样, 对水样的水化学组分及氢氧同位素组成进行分析, 对该地区地下水类型及成因等地球化学特征进行了研究。结果表明: ①取样点水温变化为 $8.5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 23.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 水样的矿化度为 $32 \sim 568\text{ mg/L}$ , 全部为低矿化度水; ②水样分为10种化学类型, 水—岩反应均未达到完全平衡; 通河台井水属于部分平衡水, 具有深部来源特征; ③ $\delta\text{D}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值的分别为 $-100.24\text{ }^{\circ}\text{‰} \sim -65.46\text{ }^{\circ}\text{‰}$ 和 $-13.47\text{ }^{\circ}\text{‰} \sim -8.53\text{ }^{\circ}\text{‰}$ , 表明所测水样的补给源主要为大气降水。

**关键词:** 依兰—伊通断裂; 水化学特征; 同位素; 地下水

**中图分类号:** P315.724

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000–0666(2022)02–0257–07

doi: 10. 20015/j. cnki. ISSN1000–0666. 2022. 0024

### 0 引言

地下水化学组分受地下应力和构造活动等的控制, 能够灵敏、直观地反映地壳的应力、应变状态及地震活动(苏鹤军等, 2010; 杜建国等, 2018; 高小其等, 2018; Zhou et al, 2021)。含水层的受力状态发生改变以及深部流体混入等因素的影响, 在地震孕育和发生过程中, 均会引起观测井水化学组分发生变化, 因此, 研究地下水组分变化与地震的关系, 在震前预测、震后趋势判断和流体异常核实中具有重要的意义(刘耀炜等, 2009; 付虹等, 2014; 孙小龙等, 2016, 2020; 晏锐等, 2018; Zhou et al, 2020)。地下水组分及同位素组成的变化特征是识别地下水来源、追踪水化学演化的基本手段(杜建国, 刘丛强, 2003; 周志华等, 2014; 刘轶男等, 2017; 钟骏等, 2021; 丁风和等, 2021), 研究无震期间地震台站观测井及周边的地下水化学特征, 取得观测点的地球化学背景数据, 能够为流体前兆

异常核实提供重要的依据。

依兰—伊通断裂北段是我国东北地区地震活动最活跃的地区之一, 加强对该地区的流体地球化学监测, 对判定该地区的地震活动形势具有重要意义。目前, 在依兰—伊通断裂北段有4口国家流体台网观测井, 分别为萝北井、鹤岗井、通河井和延寿井, 只开展水物理观测, 积累了一定的水温和水位资料。由于社会经济的发展, 这些观测井均受到不同程度干扰, 例如萝北井受降雨和农业灌溉影响、鹤岗井受周边企业用水影响、通河井受“农村饮水安全工程”打井抽水影响、延寿井受周边水库蓄水的影响, 这些干扰已经严重影响到异常核实和震情跟踪工作, 迫切需要引入地球化学观测来补齐短板, 但目前对依兰—伊通断裂北段地震流体观测井地下水化学类型与成因尚没有系统研究。本文分析了这4个流体观测站及其附近地区水样的地球化学组分和同位素组成, 总结该地区的地下水类型及成因等地球化学特征, 以为震情跟踪和流体异常核实提供基础资料及科学依据。

\* 收稿日期: 2021–11–16.

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划项目(XH20017)资助。

第一作者简介: 石伟(1971–), 高级工程师, 主要从事地下流体预报工作. E-mail: 417795902@qq.com.

## 1 地震地质概况

郯庐断裂带是东亚大陆上的一条主干断裂带,全长约 5 000 km,在中国境内长约 2 400 km,受西太平洋板块俯冲影响,郯庐断裂带在辽宁沈阳以北分为两支,分别为 NE 向的依兰—伊通断裂和 NEE 向的敦化—密山断裂,这两条断裂构成了郯庐断裂带北段的主体部分。依兰—伊通断裂是东北地区规模最大的断裂,沿断裂分布有沈阳市、佳木斯市、鹤岗市等许多人口密集、经济发达的城市。依兰—伊通断裂北段指该断裂自南北河—勃利断裂以北区域,该区域自 1973 年有地震台网记录以来,地震活动以中小地震为主,未发生过 5 级以上地震。根据对历史地震的发掘和古地震的考察发现该断裂具备大地震的发震背景。1963 年 6 月黑龙江省萝北县发生 5.8 级地震,是新中国成立以来依兰—伊通断裂北段发生的最大的浅源地震。距今 1700 年前,在依兰—伊通断裂北段通河县城内发生过 1 次 7 级以上的古地震事件(闵伟等,2011),表明依兰—伊通断裂北段全新世以来局部地区有过强烈地震活动。

## 2 样品采集与测试

2021 年 8 月 23—26 日,在依兰—伊通断裂北段的 4 个地震流体观测站及其附近地区共采集了 19 个水样,包括 4 个观测井水、12 个周边民用井水、1 个地表水、1 个河水和 1 个水库水(图 1)。每个采样点用两种规格容器采集水样,30 mL 塑料瓶水样用于氧同位素分析,150 mL 塑料瓶水样用于水化学组分测定。采集过程中首先用采样水将干净的聚乙烯瓶润洗 2~3 遍,然后注满整个瓶体,排除顶空,避免空气对水样的影响,并在现场测定水样的温度和总溶解固体(TDS)。

采集到的水样由应急管理部自然灾害研究院地球化学实验室分析测定。用滴定法测定  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  浓度,用 Dionex ICS-900 型离子色谱仪测定  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{Cl}^-$  浓度,测试结果的闭合度(ib)在  $\pm 10\%$  以内;用 LGR912-0008 氢氧稳定同位素分析仪

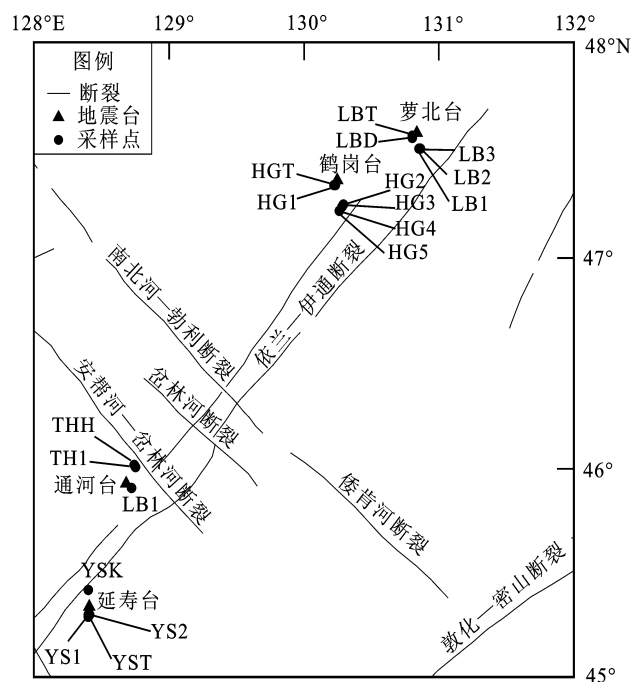


图 1 依兰—伊通断裂北段采样点分布

Fig. 1 Sampling points in the north segment of the Yilan - Yitong Fault

测定氢氧同位素组成,  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  使用 V-SMOW 作为标准,  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  值的测试误差分别为  $\pm 0.1\text{‰}$  和  $\pm 0.5\text{‰}$ 。

## 3 水化学组分特征分析

### 3.1 水质类型及成因分析

19 个水样分析结果见表 1。从表中可见,依兰—伊通断裂北段流体观测井以及附近民用井的水温基本都在  $10\text{℃}$ ,均为低温地下水。地表水由于受太阳照射的影响,水温相对较高,但最高不超过  $25\text{℃}$ 。TDS 值为  $32\sim 568\text{ mg/L}$ ,全部为淡水,水样中主要离子浓度的变化范围比较大,其中  $\text{Na}^+$  为  $1.68\sim 61.22\text{ mg/L}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  为  $2.17\sim 130.15\text{ mg/L}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  为  $0.03\sim 27.22\text{ mg/L}$ 、 $\text{K}^+$  为  $0.16\sim 4.41\text{ mg/L}$ 、 $\text{Cl}^-$  为  $0.84\sim 132.81\text{ mg/L}$ 、 $\text{F}^-$  为  $0.06\sim 9.97\text{ mg/L}$ 、 $\text{NO}_3^-$  为  $0.08\sim 283.59\text{ mg/L}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  为  $0.12\sim 143.21\text{ mg/L}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  为  $18.31\sim 132.65\text{ mg/L}$ ,  $\delta\text{D}$  值为  $-100.24\text{‰}\sim -65.46\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  值为  $-13.47\text{‰}\sim -8.53\text{‰}$ 。

依据舒卡列夫分类法将水样分为 10 种水化学类型,多数水样的水化学类型以  $\text{HCO}_3-\text{Ca}$  为主(表 1、图 2)。

表 1 样品水化学分析结果  
Tab. 1 Results from the hydrochemical analysis of the water samples

采样号	位置	水井深度/ m	$\lambda_E/$ ( $^{\circ}$ )	$\varphi_N/$ ( $^{\circ}$ )	水温/ $^{\circ}\text{C}$	离子浓度/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )											$\delta\text{D}$ ( $\text{‰}$ )	$\delta^{18}\text{O}$ ( $\text{‰}$ )	水化学类型	
						TDS	$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{F}^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{NO}_3^-$	$\text{HCO}_3^-$				$\text{CO}_3^{2-}$
HGT	鹤岗地震台	160	130.24	47.35	9.1	52	11.35	1.10	1.36	1.57	8.40	0.88	7.83	0.17	0.08	54.92	0.00	-84.72	-11.50	$\text{HCO}_3-\text{Na}\cdot\text{Ca}$
HG1	鹤岗民用井1	80	130.24	47.35	9.3	46	10.81	0.57	1.40	9.77	47.94	0.34	39.02	26.18	76.87	69.54	0.00	-81.23	-11.11	$\text{NO}_3\cdot\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}-\text{Ca}$
HG2	鹤岗民用井2	50	130.28	47.23	10.2	148	9.89	0.71	2.65	5.71	31.33	0.26	14.24	35.30	45.00	52.15	0.00	-84.53	-11.46	$\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{NO}_3-\text{Ca}$
HG3	鹤岗民用井3	20	130.30	47.25	10.5	568	54.36	0.00	4.32	27.22	130.15	0.14	132.81	143.21	283.59	70.21	0.00	-80.63	-10.83	$\text{NO}_3\cdot\text{Cl}-\text{Ca}$
HG4	鹤岗民用井4	20	130.31	47.26	10.5	170	9.61	0.26	2.00	7.78	39.97	0.33	15.38	17.57	121.09	35.61	0.00	-83.10	-11.14	$\text{NO}_3-\text{Ca}$
HG5	鹤岗民用井5	110	130.31	47.26	10.6	145	7.53	0.53	2.34	7.56	36.52	0.25	8.28	19.32	81.64	65.24	0.00	-84.67	-11.55	$\text{NO}_3\cdot\text{HCO}_3-\text{Ca}$
HGD	鹤岗地表水	—	130.25	47.35	18.2	145	12.71	0.00	4.41	5.71	28.68	0.74	10.47	11.42	3.36	126.35	0.00	-75.17	-9.81	$\text{HCO}_3-\text{Ca}$
LBT	萝北地震台	269	130.82	47.57	9.1	128	30.05	0.91	2.68	8.22	12.34	0.70	48.65	0.12	0.30	86.24	0.00	-82.83	-11.10	$\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}-\text{Na}$
LBD	萝北地表水	—	130.82	47.58	23.4	46	1.68	1.00	1.90	0.61	9.26	0.06	0.84	2.65	0.08	36.51	0.00	-65.46	-8.53	$\text{HCO}_3-\text{Na}$
LB1	萝北民用井1	30	130.87	47.52	10.6	165	21.86	0.00	3.81	11.58	27.77	0.25	27.78	35.89	47.63	73.22	0.00	-80.96	-10.62	$\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Na}$
LB2	萝北民用井2	25	130.88	47.52	10.3	146	19.67	0.78	3.81	11.38	26.14	0.24	29.33	41.36	43.25	66.24	0.00	-82.27	-11.01	$\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Na}$
LB3	萝北民用井3	30	130.88	47.52	16.2	158	19.34	0.69	2.72	10.20	23.85	0.25	28.25	27.64	38.54	63.24	0.00	-82.35	-11.01	$\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$
THT	通河地震台	200	128.74	45.92	9.7	118	58.62	0.00	3.61	0.03	2.59	9.97	1.16	0.47	0.22	132.54	6.00	-83.91	-11.56	$\text{HCO}_3-\text{Na}$
TH1	通河民用井1	180	128.76	46.03	10.9	116	61.22	0.00	0.16	0.13	2.17	9.64	1.49	0.69	0.17	132.65	6.00	-83.10	-11.41	$\text{HCO}_3-\text{Na}$
THH	岔林河水	—	128.77	46.02	20.2	60	2.87	0.00	1.30	1.43	5.99	0.23	1.49	6.91	2.88	18.31	0.00	-84.58	-11.62	$\text{HCO}_3-\text{Ca}$
YST	延寿地震台	200	128.42	45.3	8.5	32	7.72	1.19	2.26	0.06	3.53	0.27	1.77	1.04	0.11	30.51	0.00	-81.72	-11.34	$\text{HCO}_3-\text{Na}\cdot\text{Ca}$
YS1	延寿民用井1	72	128.42	45.31	10.1	88	8.13	0.00	2.89	4.02	18.25	0.40	4.03	17.13	11.82	67.12	0.00	-86.60	-11.98	$\text{HCO}_3-\text{Ca}$
YS2	延寿民用井2	78	128.43	45.31	10.6	102	6.54	0.75	2.48	5.80	25.64	0.71	4.30	23.60	15.90	65.89	0.00	-100.24	-13.47	$\text{HCO}_3-\text{Ca}$
YSK	新城水库	—	128.42	45.43	21.6	46	5.45	0.37	2.04	3.07	12.08	0.16	4.30	13.98	1.46	37.25	0.00	-76.63	-9.80	$\text{HCO}_3-\text{Ca}$

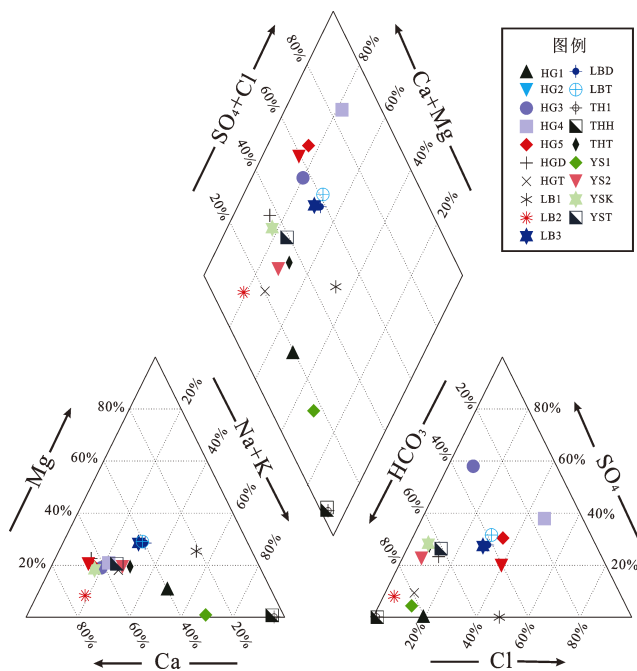


图2 研究区水样 Piper 图

Fig. 2 Piper diagram of the water samples in the study area

鹤岗地震台 (HGT) 观测井水为花岗闪长岩裂隙水, 井深 160 m, 水化学类型为  $\text{HCO}_3 - \text{Na} \cdot \text{Ca}$  型, 该井水属于承压水, 水中  $\text{Na}^+$  及  $\text{HCO}_3^-$  来自岩浆岩地区含钠矿物的风化溶解, 形成低矿化的地下水。鹤岗地震台的生活井 (HG1) 以及台站周边的民用井 (HG2、HG3、HG4、HG5) 中,  $\text{NO}_3^-$  浓度较高, 为 45.00 ~ 283.59 mg/L, 水中的  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  以及一部分的  $\text{Cl}^-$  主要来源为畜牧养殖、农田施肥以及污水排放等。鹤岗地震台前地表水 (HGD)  $\text{HCO}_3^-$  含量高, 为 126.35 mg/L, 其成因为大气降水从地表渗入补给地下水的过程中, 与土壤发生相互作用, 土壤中的微生物在降解土壤有机物时产生  $\text{CO}_2$ , 从而降低水的 pH 值, 并向水中提供  $\text{HCO}_3^-$ , 因此  $\text{HCO}_3^-$  是地下水中最普遍及浓度最高的阴离子。

萝北地震台 (LBT) 观测井水为花岗岩裂隙水, 井深为 269 m, 水化学类型为  $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl} - \text{Na}$  型, 该井水属于承压水, 在岩浆岩地区,  $\text{Na}^+$  来自含钠矿物的风化溶解, 酸性岩浆岩中有大量含钠矿物 (如钠长石), 在  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  的参与下, 将形成低矿化的以  $\text{Na}^+$  及  $\text{HCO}_3^-$  为主的地下水。 $\text{Cl}^-$  来自岩浆岩中含氯矿物的风化溶解和工业、生活

污水等人为污染。萝北台附近的地表水 (LBD) 水质清澈, TDS 值为 46 mg/L, 水质类型为  $\text{HCO}_3 - \text{Na}$ , 地表水的补给是大气降水, 未受到工业和农业生产等人为污染。萝北台附近的民用水井 (LB1、LB2、LB3) 井深均较浅, 大约 30 m, TDS 值为 146 ~ 165 mg/L, 含水层岩性为第三系中粗砂岩孔隙水, 地下水中的  $\text{Ca}^{2+}$  来源于碳酸盐类沉积物及含石膏沉积物的溶解,  $\text{Mg}^{2+}$  来源于含镁的碳酸盐类沉积,  $\text{Na}^+$  来自沉积岩中岩盐及其它钠盐的溶解。

通河地震台 (THT) 观测井水为泥岩裂隙水, 井深为 200 m, 水质浑浊, TDS 值为 118 mg/L, 水化学类型为  $\text{HCO}_3 - \text{Na}$ ,  $\text{Na}^+$  来自沉积岩中岩盐及其它钠盐的溶解。通河台的水位观测受到距台站 100 m 左右“农村饮水安全工程”新打水井 (TH1) 的影响, TH1 井的水化类型与通河地震台井水一致, 并且 TDS 值只相差 2 mg/L, 完全验证了 TH1 井对 THT 井的干扰。距离 THT 井 200 m 左右的岔林河水化学类型为  $\text{HCO}_3 - \text{Ca}$ , 与 THT 井水化类型不同, 补给源主要是大气降水。

延寿地震台 (YHT) 观测井水为砂砾岩裂隙水, 井深为 200 m, 水质清澈, TDS 值为 32 mg/L, 水化学类型为  $\text{HCO}_3 - \text{Na} \cdot \text{Ca}$ ,  $\text{Na}^+$  来自沉积岩中岩盐及其它钠盐的溶解。延寿地震台附近的民用井 (YS1、YS2) 井深分别为 72 m 和 78 m, 相对较浅, 水化学类型为  $\text{HCO}_3 - \text{Ca}$  型, 补给源主要是大气降雨。

### 3.2 水-岩化学平衡分析

Na-K-Mg 三角图最早由 Giggenbach (1988) 提出, 被用来评价水-岩平衡状态和区分不同类型的地下水。将研究区取样点的 Na、K、Mg 组成绘制于三角图中, 大多数样品落在 Mg 端元附近 (图 3), 表明为浅层的地下水, 主要受大气降水的补给, 循环周期相对较快, 水-岩之间尚未达到离子平衡状态, 水-岩作用仍在进行。而通河台观测井水 (THT) 落在了部分平衡水的范围内, 表明其地下水的补给来源中除了大气降水外, 还存在较深层地下水的混入, 水-岩反应相对较弱, 水流系统较为稳定, 不易受到外界干扰。

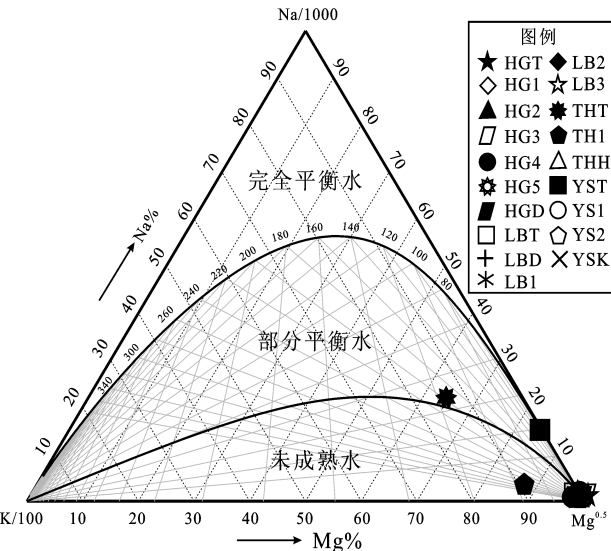


图3 研究区水样 Na-K-Mg 三角图

Fig. 3 The triangle diagram of Na-K-Mg of the water samples in the study area

3.3 地下水热储温度及循环深度估算

热储温度是划分地下热水系统成因类型不可缺少的重要参数，地球化学温标是估算这一参数的有效方法。Na-K 阳离子热储温度是利用地下水成分中阳离子比值与温度之间的关系建立的温标方法，全部阳离子温标法均为经验性的近似方法，阳离子温标建立在阳离子交换反应的基础上，反应平衡常数随温度的改变而改变（刘永涛，2009）。由于通河井位于部分平衡水区域，因此可以采用阳离子温标法来计算水的热储温度。据刘永涛（2009）给出的7个Na-K阳离子温标计算公式（表2），分别求取通河台井水热储温度，可得平均温度为170.7℃。

表2 通河井水阳离子温标计算结果

Tab. 2 Cation geothermometers of the water in Tonghe well		
序号	公式	温度/(℃)
1	$t = 956 / (0.857 + \lg \text{Na/K}) - 273.15$	140.8
2	$t = 883 / (0.780 + \lg \text{Na/K}) - 273.15$	170.3
3	$t = 933 / (0.933 + \lg \text{Na/K}) - 273.15$	162.1
4	$t = 1\,319 / (1.699 + \lg \text{Na/K}) - 273.15$	180.1
5	$t = 1\,217 / (1.483 + \lg \text{Na/K}) - 273.15$	178.6
6	$t = 1\,178 / (1.470 + \lg \text{Na/K}) - 273.15$	166.2
7	$t = 1\,390 / (1.750 + \lg \text{Na/K}) - 273.15$	196.3

地下水的温度受其赋存与循环处的地温控制，根据地下水的温度可以大致推算出地下水的循环深度（王大纯等，1980）。当已知地下水水温 $T$ 、年平均气温 $t$ 、地温梯度 $r$ 和年常温带深度 $h$ 时，就能够推算出地下水的大致循环深度 $H$ ，即

$$H = \frac{T - t}{r} + h$$

(1)

通过查阅相关文献得到，通河地区年平均气温 $t$ 为2.4℃（杨娟等，2017），年常温带深度 $h$ 为20 m（周静等，2016），地温梯度 $r$ 为4.0℃/100 m（刘玉，2014），地下水水温取170.7℃，计算求得通河台观测井水最大循环深度为4 227 m。

4 同位素组成特征分析

地下水形成后，经过蒸发、径流和水-岩相互作用等环节不断发生循环和演化，氢氧同位素在此过程中会发生动力分馏，与高温岩石等其它物质发生交换和反应，从而造成地下水中的氢氧同位素组成与大气降水线发生一定的偏离，因此，氢氧同位素作为示踪剂，可以用来分析地下水补给后的循环和演化特征。在水循环过程中，由于同位素成分的动力学分馏作用，各地区的大气降水线均不相同。全球大气降水的氢氧同位素组成呈正相关关系（图4）： $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$ （Craig，1961），中国东北地区大气降水线为： $\delta D = 7.2\delta^{18}O + 2.39$ （李小飞等，2012），GMWL表示全球大气降水线，LMWL表示中国东北地区大气降水线。从图4可见，研究区大气降水线斜率小于全球降水线斜率，这要归因于水汽运移和水循环中发生的同位素分馏。所采的水样均分布于当地大气降水线和全球大气降水线附近，表明水样的主要来源是大气降水。

为了比较与计算不同地区大气降水蒸发、凝结过程的不平衡差异，Dansgaard（1964）提出了氘盈余公式： $d = \delta D - 8\delta^{18}O$ ，较高的氘盈余意味着相对湿度较低的干旱气候地区水受蒸发的影响，或者雨水中具有内陆蒸发水（高宗军等，2017）。当 $-10‰ < d < 10‰$ 时，表示正常大气降水；当 $d > 10‰$ 时，表示与现今不同气候条件下的降水或不

同来源水混合;当 $d < -10‰$ 时,表示干热气候条件下的大气降水或蒸汽凝结水。研究区的水样属于同一气候环境,因此季节气候的影响可以忽略,所取水样的 $d$ 值为 $1.81‰ \sim 9.28‰$ ,表明水样主要源于大气降水。

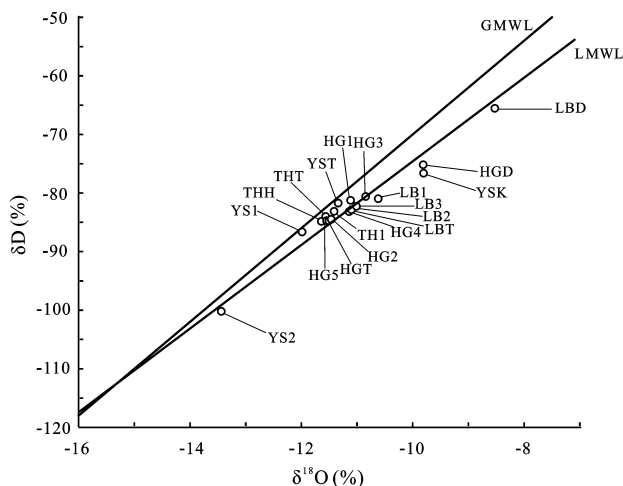


图4 研究区水样的氢氧同位素组成

Fig. 4 Composition of the isotopes of hydrogen and oxygen of the water samples in the study area

## 5 结论

本文对依兰—伊通断裂北段地区4口地震监测井及其周边水样进行水化学离子浓度及氢氧同位素分析,得出以下结论:

(1) 黑龙江省依兰—伊通断裂北段地区19个水样的离子组分以 $\text{HCO}_3^-$ 和 $\text{Ca}^{2+}$ 为主,TDS值为 $32 \sim 568 \text{ mg/L}$ ,全部为低温淡水,水化学类型比较复杂,共有10种,多数水样的水化学类型以 $\text{HCO}_3-\text{Ca}$ 为主。

(2) 研究区所测水样主要来源于大气降水补给,氢氧同位素组成均分布于大气降水线附近,氡盈余也验证了这一点;通河台观测井水处于水-岩部分平衡状态,表明该井除大气降水补给外,还有较深层地下水的混入,其余水样均为浅层的地下水,主要为大气降水的补给。利用阳离子温标法,计算求得通河台井水的热储温度为 $170.7^\circ\text{C}$ ,其最大循环深度为 $4\,227 \text{ m}$ 。

(3) 依兰—伊通断裂北段地区目前只开展水物理观测,水化学观测尚处于空白,建议对上述

台站增加连续的水化学组分观测项目,丰富地下流体监测信息,从而更好地进行该地区的震情跟踪和异常核实工作。

## 参考文献:

- 丁风和,罗国富,戴勇. 2021. 地震观测井地下水承压性判定方法研究与实例[M]. 北京:地震出版社.
- 杜建国,李营,崔月菊,等. 2018. 地震流体地球化学[M]. 北京:地震出版社.
- 杜建国,刘从强. 2003. 同位素地球化学在地震研究方面的作用[J]. 地震,23(2):99-107.
- 付虹,洪敏,王光明. 2014. 云南区域强震活动中短期异常的共性特征及应用研究[J]. 地震研究,43(2):241-252.
- 高小其,刘耀炜,孙小龙,等. 2018. 我国地震构造地球化学监测研究现状[J]. 国际地震动态,(8):111-112.
- 高宗军,于晨,田禹,等. 2017. 中国大陆大气降水线斜率分区及其水汽来源研究[J]. 地下水,39(6):149-152,177.
- 李小飞,张明军,马潜,等. 2012. 我国东北地区大气降水稳定同位素特征及其水汽来源[J]. 环境科学,33(9):2924-2931.
- 刘耀炜,任宏微,王博. 2009. 环境同位素及其示踪技术在地震预测研究中的应用前景[J]. 地学前缘,16(2):369-377.
- 刘铁男,孙凤霞,崔月菊,等. 2017. 吉林省松原地区地震监测台站水化学特征[J]. 地球科学进展,32(8):810-817.
- 刘永涛. 2009. 云南省龙陵县邦腊掌温泉水文地球化学与间歇喷泉研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),34.
- 刘玉. 2014. 黑龙江省依舒断裂带汤原陷地热能资源评价[J]. 科技创新与应用,7:109.
- 闵伟,焦德成,周本刚,等. 2011. 依兰—伊通全新世活动的新发现及其意义[J]. 地震地质,33(1):74-79.
- 苏鹤军,张慧,史杰. 2010. 祁连山断裂带中东段地下水地球化学特征研究[J]. 西北地震学报,32(2):122-128.
- 孙小龙,刘耀炜,付虹,等. 2020. 我国地震地下流体学科分析预报研究进展回顾[J]. 地震研究,43(2):216-231.
- 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[J]. 地学前缘,23(3):140-150.
- 王大纯,张人权,史毅红. 1980. 水文地质学基础[M]. 北京:地质出版社,50-55.
- 晏锐,田雷,王广才,等. 2018. 2008年汶川8.0级地震前地下流体异常回顾与统计特征分析[J]. 地球物理学报,61(5):1907-1921.
- 杨娟,刘泽恩,陶铮. 2017. 通河县近30年气候变化特征分析[J]. 南方农业,11(36):75-76.
- 钟骏,王博,晏锐,等. 2021. 洱源温泉水氢预测效能检验及其水化学特征[J]. 地震研究,44(4):564-571.
- 周静,刘锡明,崔利锋. 2016. 黑龙江矿区应用储冷降温技术自然因素分析[J]. 能源研究与信息,32(1):11-14.
- 周志华,王海燕,薛艳. 2014. 辽宁中南部地下井泉水化学组成特征

- [J]. 生态学杂志, 33(6):1601–1605. (12):2749–2765.
- Craig H. 1961. Isotopic variations in meteoric waters [J]. Science, 133 (3465):1702–1703.
- Dansgaard W. 1964. Stable isotopes in precipitation [J]. Tellus, 16(4): 436–468.
- Giggenbach W F. 1988. Geothermal solute equilibria: derivation of Na–K–Mg–Ca geothermometers [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 52 (12):2749–2765.
- Zhou Z H, Tian L, Zhao J, *et al.* 2020. Stress-Related Pre-Seismic Water Radon Concentration Variations in the Panjin Observation Well, China (1994–2020) [J]. Frontiers in Earth Science, 8:596283.
- Zhou Z H, Zhong J, Zhao J, *et al.* 2021. Two Mechanisms of Earthquake-Induced Hydrochemical Variations in an Observation Well [J]. Water, 13:2385.

## Hydrochemical Characteristics in the North Segment of the Yilan – Yitong Fault

SHI Wei, LI Yongsheng, OUYANG Zhaoguo, HU Baohui, GAO Feng  
(Heilongjiang Earthquake Agency, Harbin 150090, Heilongjiang, China)

### Abstract

In this paper we analyze the hydrochemical composition and the composition of the isotopes of hydrogen and oxygen of 19 water samples collected at 4 observation stations for underground fluid and their neighbouring points in the north segment of the Yilan – Yitong Fault in Northeast China, and study the types and genesis of the groundwater in the fault zone. The results indicate that: ① The water temperature at these sampling points ranges from 8.5 °C to 23.4 °C. The total dissolved solids (TDS) of the water samples, all of which are low salinity water, ranges from 32 to 568 mg/L. ② The water samples can be classified into 10 chemical types, and the water – rock reaction does not reach complete equilibrium. The sample at Tonghe station belongs to “partial equilibrium water” and features deep source. ③ The  $\delta D$  – value ranges from –100.24‰ to –65.46‰, and  $\delta^{18}O$  from –13.47‰ to –8.53‰, indicating that the recharge source of the samples is mainly atmospheric precipitation.

**Keywords:** the Yilan – Yitong Fault; hydrochemical characteristics; isotope; underground water