



Selection of
Hydrogeology and
Engineering Geology

水文地質工程地質
论丛

4

地质出版社



水文地质工程地质论丛

(4)

《水文地质工程地质》编辑部

地 质 出 版 社

21771/31

水文地质工程地质论丛

(4)

《水文地质工程地质》编辑部

责任编辑：黎育宁 汪福忻 王亚明

地质出版社出版发行

(北京西四)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店总店科技发行所经销

开本：787×1092¹/₁₆印张：10¹/₈字数：239,000
1988年5月北京第一版·1988年5月北京第一次印刷

印数：1—1,820册 国内定价：2.45元

ISBN 7-116-00171-9/P·155



目 录

华北地区地下热水氢、氧同位素特征及其成因的初步探讨.....	
.....李桂如 高文学等 (1)	
求解二维水质模型特征-矩形有限元法的改进.....	焦赳赳 陈崇希 (13)
扇形含水层的三个综合性稳定井流公式.....	潘元伯 (25)
从第五届国际水-岩作用学术讨论会论地热研究的多重地质意义	姚足金 (33)
城市工程地质环境质量评价与区划.....	谭周地 (41)
论工程地质制图中的岩体工程地质划分.....	刘广润 (51)
小浪底水电站地下厂房围岩稳定的有限元分析.....	吕 明 (61)
大岗山电站花岗岩的风化带划分及其测试指标的对比研究.....	向桂馥 梁 虹 (83)
山东蓬莱与庙岛群岛的黄土.....	张宗祜 张之一等 (97)
长江水下三角洲沉积特征及其工程地质意义.....	黄慧珍 高鸿安 (111)
长江口南岸第四纪海侵层位的初步研究.....	唐保根 (123)
庐山冰期气候可以发育冰川.....	吴锡浩 (137)
倾斜地层的地震折射资料微机反演方法.....	袁明德 金 石 (151)

CONTENTS

The Characteristics of Isotopic Compositions of Hydrogen and Oxygen of Geothermal Waters in North China and Their OriginLi Guiru Gao Wenxue et al. (12)	(12)
An Improved Characteristic-Rectangular Finite Element Method in the Solution of Two-Dimensional Water-Quality Model Transport problems..... Jiao Jiujiu Chen Chongxi (24)	(24)
Three Synthetic Formulae of Well Flow with Steady Flow within Fan Aquifer..... Pan Yuanbo (32)	(32)
On Multifarious Geologic Significance of Geothermal Research as Viewed from the Fifth International Symposium on Water-Rock Interaction.....Yao Zujin (40)	(40)
Evaluation of Urban Engineering geological Environmental Quality and Zoning.....Tan Zhouli (50)	(50)
Engineering Geologic Division of Rockmasses for Engineering Geologic Mapping..... Liu Guangrun (59)	(59)
Finite Element Analysis of Surrounding Rock Stability of Underground Factory Building in Xiaolangdi Hydropower Plant.....Lü Ming (82)	(82)
Comparison of Measurement Indices and Classification of Weathering Zones of Granite at the Dagangshan Hydropower plantXiang Guifu Liang Hong (96)	(96)
Loess in Penglai and Miaodao Islands, Shandong ProvinceZhang Zonghu Zhang Zhiyi et al. (110)	(110)
Geotechnical Implication of the Sedimentary Characteristics of the Subaqueous Changjiang River Delta..... Huang Huizhen Gao Hongan(122)	(122)
Quaternary Transgressive Layers on the Southern Bank of Changjiang River Mouth.....Tang Baogen(136)	(136)
Paleoclimate of the Ice Age Permitted the Development of Glaciers in Lushan Mt..... Wu Xihao(150)	(150)
A Inversion Procedure With Micro-Computer for Seismic Refraction in Inclined Layers.....Yuan Mingde Jin Shi(157)	(157)

华北地区地下热水氢、氧同位素特征 及其成因的初步探讨

李桂如 高文学 蒋凤亮 张培仁 王基华

(国家地震局地质研究所)

提 要

我们共测定了15个冷水及57个热水样品的D/H和 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比值。根据同位素组分,北京地区和郯庐断裂带地下热水为大气成因,并反映了纬度效应和高程效应对同位素组分的影响。冀中拗陷地下热水 δD 分布特征表现出从边缘到中心有规律地增加。随着含水层埋深增大,水的 δD 值也增加。拗陷下第三系砂岩地层水和部分上元古界白云岩热水具有高矿化度和高 Cl^- 含量,并具有较高的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值。有些样品表现了大的氧-18漂移,这些水可能含有部分封存水成分。总之,冀中拗陷各含水层热水主要为大气成因。拗陷中央具有高 δD , $\delta^{18}\text{O}$ 值的深部地下水可能为封存水和占大气水混合成因。

一、氢氧同位素数据与测定

本文共分析了地表水和浅层地下水数据15个,热水数据57个(表1)。

水中氢氧同位素组分的测定是在MM602D质谱计上进行。测定结果采用国际通用标准(SMOW)进行计算处理。水样转换为氢气是通过 H_2O 与金属铀在 700°C 反应而成的。质谱测量氢同位素的精度为 $\pm 1\%$ 。对每个样品平行测定两次。两次分析结果偏差不超过 $\pm 2\%$ 。质谱分析氧同位素样品为二氧化碳。测定水中氧用 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 平衡法。质谱分析精度为 $\pm 0.2\%$ 。分析结果分别以 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的千分数表示。

$$\delta\text{D}\text{‰} = \frac{(\text{D}/\text{H})_{\text{样品}} - (\text{D}/\text{H})_{\text{SMOW}}}{(\text{D}/\text{H})_{\text{SMOW}}} \times 1000$$

$$\delta^{18}\text{O}\text{‰} = \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{样品}} - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}}{(\text{D}/\text{H})_{\text{SMOW}}} \times 1000$$

二、华北地区地表水及浅层地下水氢、 氧同位素组成及分布特征

克雷格(H. craig 1961a)对世界各地大气降水同位素组分测定结果表明,未受不平衡蒸发和同位素交换影响的大气降水及其直接补给的地表水和浅部地下冷水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈直线关系。世界平均大气降水的公式可写做

$$\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$$

郑淑惠等(1982年)对我国一些地区大气降水进行氢、氧同位素比值测定的结果得出了类

表1 华北地区地下水氢、氧同位素组分及部分化学组分

序号	样品号	钻孔号	取样地点	取样深度 (米)	含水层情况		水温 ℃	矿化度	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	相对SMOW, ‰	
					年代	岩性					毫克/升	
		冷水	北京地区									
1	B1	河水	永定河军庄点								-58.5	-8.3
2	B2	泉水	秦城		Z	白云岩		323	10	225	-61.6	-8.9
3	B3	泉水	黑龙潭		O	灰岩	18.0	674	16	226	-65.8	-9.7
		热水										
4	B5	沙河一1	沙河102队		O	灰岩	26.0	399	14	226	-70.5	-10.3
5	B6	太平庄一1	太平庄		Jr	构造角砾	31.5	388	14	249	-79.4	-11.6
6	B7	良修一1	良乡修造厂		Z	白云岩	35.5	598	35	265	-71.0	-10.8
7	B8	小汤山一1	小汤山疗养院		Z	白云岩	54.0	570	32	283	-75.4	-10.7
8	B9	京棉一1	京棉一厂	1070.0—1096.0	Z	白云岩	40.1	774	84	294	-79.1	-10.8
9	B10	光华一1	光华印染厂	700.0—800.0	Z	白云岩	41.5	718	77	282	-79.5	-11.2
10	B12	呼浴一1	呼家楼浴池	833.0—940.0	Z	白云岩	51.0	760	82	278	-80.7	-10.9
		冷水	冀中拗陷									
11	J1	湖水	白洋淀					243.3	19.1	137.9	-43.6	-6.1
12	J2	雁1—7	雁翎	215.0	Q	细砂	24.9	403.6	24.2	230.7	-80.2	-11.3
13	J3	电1	任邱	200.0	Q	细砂	17.0	416.9	42.1	209.3	-75.2	-10.7
		热水										
14	J4	新电1	任邱	301.0	Q	粉沙	31.4	430.7	44.3	207.6	-75.8	
15	J5	水55	任邱	620.0	Q+N	砂岩		1329.0	394.0	476.0	-71.5	
16	J6	雁1—3	雁翎	615.0	N	砂岩	32.0	520.0	36.9	279.2	-78.1	
17	J7	留38	留路	1757.0—1770.0	N	粉砂岩		1515.0	461.5	549.0	-64.5	
18	J8	留45-2	留路	1536.4—1543.0	N	粉砂岩		1365.5	418.9	488.0	-64.6	-7.8
19	J9	留18	留路	2995.6—3004.0	E	砂岩		6045.1	3101.9	427.1	-63.2	-0.3
20	J10	留45-1	留路	2276.6—2287.0	E	砂岩		21071.6	10916.3	2287.5	-58.0	-3.7
21	J11	留3—1	留路	3184.2—3219.4	E	砂岩		10540.0	4165.0	2660.0	-67.6	
22	J12	留3—2	留路	4444.0—4587.0	Z	白云岩		24510.0	13515.0	1342.0	-49.8	
23	J13	岔11	岔河	2385.0—2388.2	E	砂岩		5117.7	2130.0	1128.5	-65.7	-4.9
24	J14	岔32	岔河	3082.6—3098.0	E	砂岩					-69.9	-2.5
25	J15	宁6	肃宁	3206.2—3224.0	E	砂岩		7818.8	4437.6	381.5	-62.9	-8.4
26	J16	宁4	肃宁	4502.6—4719.9	Z	白云岩	163.0	6277.6	2800.6	939.7	-6.77	-6.5
27	J17	任60	任邱	2875.6—2900.4	E	砂岩					-69.9	
28	J18	任84	任邱	3956.0—3960.0	O	灰岩	136.9	2427.0	1331.3	152.5	-63.2	-9.3
29	J19	任805	任邱		Z	白云岩					-71.5	-5.7
30	J20	任热1	任邱		N	砂岩					-71.6	-7.8
31	J21	泽芯1	深县	3102.4—3110.4	E	砂岩		28543.0	16662.0	647.0	-67.2	
32	J22	泽8	深县		Z	白云岩					-70.1	-3.8
33	J23	坝81	坝县	2073.3—2126.0	O	灰岩		3489.6	1497.8	679.2	-68.3	-8.6
34	J24	坝25	坝县								-76.4	-8.9
35	J25	晋2	晋县	1539.4—1960.7	Z	白云岩		2589.0	975.0	665.0	-69.5	
36	J26	晋43	晋县								-73.9	-8.3
37	J28	马54	南马庄								-75.5	-8.9
38	J29	马17	南马庄								-71.0	-6.9
39	J30	高4	高阳								-69.3	-5.4
40	J31	高8	高阳								-50.5	

续表

序号	样品号	钻孔号	取样地点	取样深度 (米)	含水层情况		水温 ℃	矿化度	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	相对SMOW, ‰	
					年代	岩性					毫克/升	
		冷水	北京地区									
41	J 32	郑17	郑州								-58.5	-1.8
42	J 33	浅牛3	雄县	808.5—1018.6	Z	白云岩	70.0	2888.0	1163.0	714.0	-65.2	-8.1
43	J 34	浅牛1	雄县	528.0—534.4	Z	白云岩	73.0	2852.0	1418.0	495.6	-65.9	-9.0
44	J 35	极4	蒿城北	2112.0—3226.2	O + E	灰岩		7073.0	2588.0	1446.0	-65.2	
45	J 41	强2	武强	2864.8—2868.8	E	砂岩		50620.0	30133.0	830.0	-61.0	
		冷水	郟庐断裂带									
46	T 1	泉水	泰山南天门		Ar	花岗片麻岩					-75.1	-10.1
47	T 2	江水	庐江水								-40.0	-6.3
48	T 4	即墨井	即墨		Q	砂						-6.8
49	T 5	临沂井	临沂		Q	砂					-50.3	-7.4
50	T 6	蓬莱井	蓬莱		Q	砂						-8.2
51	T 7	汤冈子井	汤冈子		Q	砂					-69.7	-9.4
52	T 8	江水	松花江								-79.5	
53	T 9	招远井	招远		Q	砂					-46.5	-7.2
54	T 10	温泉井	威海温泉公社井		Q	砂						-8.5
		热水										
55	T 13	南京1	南京汤山83医院	52.0	C	灰岩					-56.7	-8.7
56	T 14	庐江	庐江温泉	65.5							-61.4	-8.9
57	T 15	半汤	半汤温泉	60.0	P	灰岩					-54.3	-8.5
58	T 16	即墨	即墨温泉	71.0	Jr	火山岩					-68.5	-8.6
59	T 17	文登1	文登北大营温泉	69.0	Ar	花岗片麻岩					-68.2	-8.6
60	T 18	威海1	威海疗养院温泉	80.0	Ar	花岗片麻岩					-47.3	-5.8
61	T 19	威海2	威海市委院内孔	80.0	Ar	花岗片麻岩					-44.1	-5.8
62	T 20	威海3	威海温泉公社温泉	65.0	Ar	花岗片麻岩					-67.2	-8.8
63	T 21	蓬莱	蓬莱村里集温泉	45.0	Ar	花岗片麻岩					-72.7	-10.1
64	T 22	栖霞	栖霞艾山144医院温泉	48.0	Ar	花岗片麻岩					-69.1	-9.9
65	T 23	临沂	临沂温泉	65.5	Ar	花岗片麻岩					-67.9	-9.2
66	T 24	招远	招远电站热水	90.0	Ar	花岗片麻岩					-65.2	-9.3
67	T 25	鞍山	汤冈子温泉	73.0	Pr	混合花岗岩					-77.4	-10.9
68	T 26	东海	东海温泉	80.0	Ar	花岗片麻岩					-63.3	-9.0
69	T 27	文登2	文登水道温泉	60.0	Ar	花岗片麻岩					-62.6	-8.7
70	T 28	沂南	沂南铜矿热水井	75.0	Ar	花岗片麻岩					-69.6	-9.6
71	T 29	香泉	香泉温泉		C	灰岩					-55.6	-8.6
72	T 30	乳山	乳山温泉	55.0	Ar	花岗片麻岩					-63.6	-8.6

似的直线方程。我们根据华北地区部分水样的分析结果绘制了该区地表水及浅层地下冷水的δD和δ¹⁸O关系图(图1)。从图1中看出研究地区的地表水和浅层地下冷水的δD、δ¹⁸O值都落在克雷格大气降水线上或附近,表明研究地区的地表水和浅层地下水的氢氧同位素组成特征遵循着普遍的规律。图1还表明郟庐断裂带中南段的水的δD、δ¹⁸O值多集中于直线的上端,具有相对高的δD、δ¹⁸O值。而北京地区的水样δD、δ¹⁸O值多落在直线下端,具有相对低的δD和δ¹⁸O值。这也是由同位素分馏效应所决定的。引起同位素分馏的诸因素中温

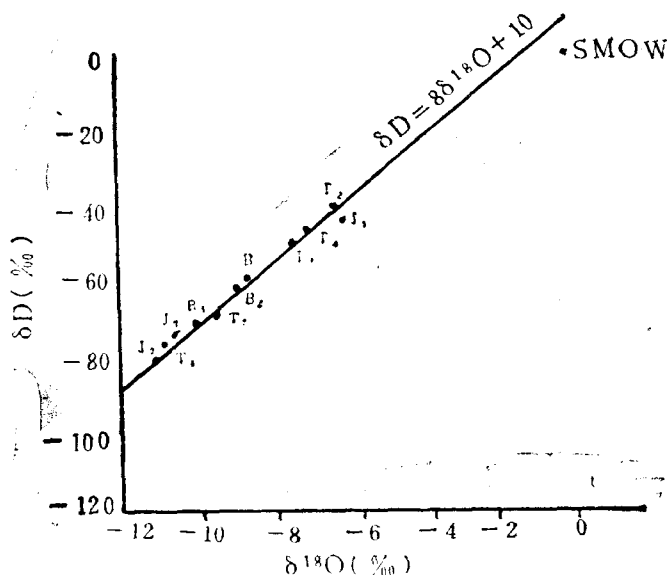


图1 华北地区地表水及浅层地下冷水 δD - $\delta^{18}O$ 关系

度起主要作用。水样点所处的地理位置(纬度和高程)又直接与气温和水温有关。水样点的纬度愈高,气温愈低,水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值也愈低。高程效应也是如此。福利得曼曾详细研究过高程效应对水中 δD 的影响,认为每升高100米可能使水的 δD 降低2‰左右。郯庐断裂带中南段的水样点大都处于北纬 38° 以南,而北京地区水样点则处于北纬 40° 以北。因而从纬度效应和高程效应就不难理解不同地区水样的 δD 与 $\delta^{18}O$ 值的分布特征。还有一点值得提出的是,北京地区永定河水(B_1),冀中拗陷白洋淀湖水(J_1)以及郯庐断裂带南段的安徽庐江水(T_2)的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值分别都为各区最高值,除反映了纬度效应(随纬度的增高, δ 值减少)外,蒸发效应是主要原因。因此,一般来说地表水不能代表大气降水的同位素比值。最好的代表者应当是降雨后未受蒸发就沿裂隙渗入到地下的浅层地下冷水。这种地下水的 δD 值在下的水循环过程中永远不变,除非遇到不同 δD 值的其他水的混合。根据地下水(包括热水)的 δD 值可以判断其来源和混合作用的依据就在于此。

另外,图1和表1还说明,华北地区浅层地下冷水的氢氧同位素组分与水样点距海洋的远近有关。例如,距海较近的 T_4 、 T_5 、 T_6 、 T_9 、 T_{10} 的 δD 和 $\delta^{18}O$ 普遍高于北京地区的 B_2 和 B_3 。这主要可由补给这些水点的大气降水的初始同位素比值不同来解释。距海近处的降水主要是由海水蒸发冷凝而成,稍富D和 ^{18}O ;而远离海洋的(北京地区)降水则主要为内陆地表水蒸发凝聚而成,稍贫D和 ^{18}O 。当然还需综合考虑大气环流的方向、风向、季节等气象因素。

总之,在分析地表水、浅层地下冷水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值及分布特征时,需综合考虑取样点的纬度、高程,蒸发效应以及大气降水的同位素比值等诸因素。

三、华北地区地下热水氢氧同位素组成及其成因

研究地区共有六个地下热水含水组合。太古界花岗片麻岩热水含水组合主要分布于郯

庐断裂带中段及胶东地区；震旦亚界硅质白云岩溶洞裂隙热水含水组合主要见于北京和冀中拗陷；古生界热水含水组合分布于冀中拗陷和郑庐带南段；侏罗系火山碎屑岩裂隙热水偶见于北京及胶东地区；下第三系油田热水砂岩含水组合主要分布于冀中拗陷；第四系冲积层含水组合只见于冀中拗陷沉积盖层中。

假设地下热水为大气降水成因，那么在没有蒸发也无同位素组分不同的水混合，热水的 δD 值应与补给区当地浅层地下冷水一致。与围岩同位素交换对水的 δD 值影响不大。因为岩石矿物中极少含有氢原子。但对于水中氧同位素组分来说，与围岩的同位素组分交换则使水富集 $\delta^{18}O$ ，使其 $\delta^{18}O$ 值增高，这称做氧漂移（oxygen shift）为了阐明华北地区热水氢氧同位素组分特征及其成因，我们根据几年来的分析结果绘制了该区热水 δD 与 $\delta^{18}O$ 成因关系图（图2）。

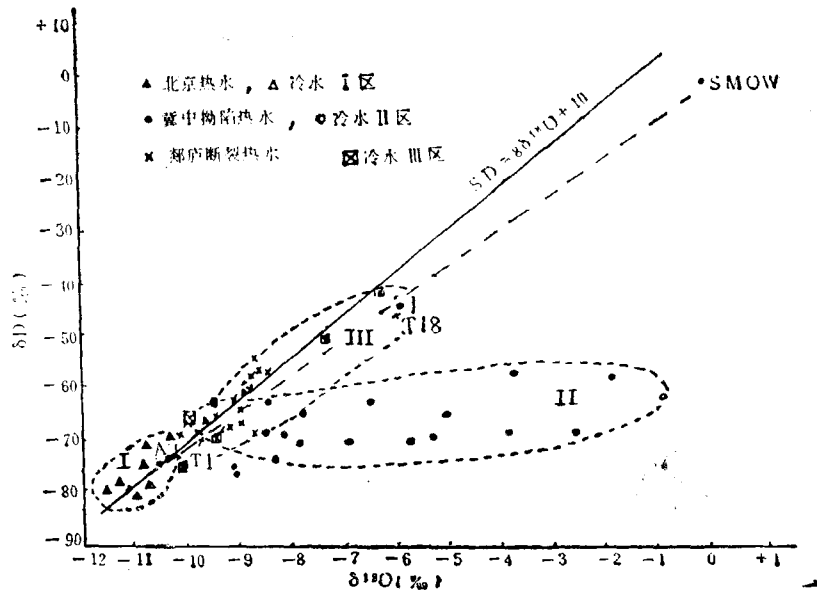


图 2 华北地区地下热水 δD - $\delta^{18}O$ 关系

从图 2 中可见，华北地区地下热水大都落在世界平均降水线上或附近，说明它们主要为大气降水成因。其中冀中拗陷大部分水样有不同程度的氧漂移（II区）。与当地浅层水类似，北京地区热水（I区）多集中在直线下端、具有研究地区最低的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值。 δD 处于 -79% 至 -81% 之间； $\delta^{18}O$ 变化于 -10% 至 -11% 之间，它们分别比当地地下冷水低 10% 和 2% 左右。这可能是由于北京地区热水除接受当地西部和北部山区补给外，还可能接受更高的太行山和燕山山脉的补给。

郑庐断裂带热水（III区）稳定同位素特征基本与北京地区相似。其大部分水同位素比值落在大气降水线附近，但水点分布比北京地区分散。 δD 变化于 -77% 至 -54% 之间，个别高达 -44% ； $\delta^{18}O$ 一般为 -10% 至 -8% 之间，个别高达 -5% 。这种特点与该带的冷水情况相似，可能与郑庐带所处的地理位置及构造条件有关。例如地处北纬 41° 的鞍山汤岗子热水具有较低的同位素比值（ $\delta D = -77.7\%$ ； $\delta^{18}O = -10.9\%$ ），而安徽半汤温泉处于

北纬32°, 其 δD 和 $\delta^{18}O$ 值都较前者高($\delta D = -5.4\%$, $\delta^{18}O = -5.5\%$), 表明了明显的纬度效应。郯庐断裂带有些温泉热水表现出海水的影响。其中T18, T19两点的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值为研究地区最高者, 分别为 $\delta D = -47.3\%$ 和 -44.1% ; $\delta^{18}O = -5.8\%$ 。从图2上清楚看到: 郯庐断裂带热水大部分落在T18与SMOW连线的延长线上。该线与克雷格直线相交于A点, 该点的 $\delta D = -75\%$, $\delta^{18}O = -10.8\%$, 恰与T1, 即泰山南天门冷泉水的同位素比值($\delta D = -75.1\%$, $\delta^{18}O = -10.1\%$)相近。由此可以认为A点及T1点的氢氧同位素比值基本代表郯庐断裂带热水补给区大气降水的同位素组分。根据混合定律粗略估算T18、T19约含36%海水。

为了进一步证实这些热水与海水之关系, 还分析了热水 B^- 及 Sr^{+2} 含量, 因为这两个离子在海水中含量都较普通水高。分析结果T17, T18, T19, T24, T27和T30的 Sr^{+2} 含量均大于10毫克/升, 其中T18, T19两个水样的 Sr^{+2} 含量远远超过10毫克/升。同时这两个水样的 B^- 含量也比其它水样高许多。这一切均表明, T18, T19受海水混入的比例最大; 并且热水 δD 、 $\delta^{18}O$ 与 B^- 含量呈正相关关系。

表2 郯庐断裂带热水 BO_3^- 、 Sr^{+2} 含量分析结果

样品号	取样地点	毫克/升	
		BO_3^-	Sr^{+2}
T17	文登北大营	0.115	>10
T18	威海温泉疗养院	0.768	>>10
T19	威海市委院内	0.806	>>10
T20	威海温泉公社	0.130	2.03
T21	蓬莱村里集	0.134	6.00
T22	栖霞艾山144医院	0.106	1.65
T24	招远电站	0.230	>10
T27	文登水道	0.336	>10
T30	乳山县温泉	0.211	>10

四、冀中拗陷地下热水氢氧同位素特征及成因

冀中拗陷是华北地震活动监视区的重要组成部分, 也是渤海湾油气田的一部分。地下热水资源丰富, 埋藏条件复杂。根据同位素组成可将拗陷范围内的含水岩系划分为三个不同含水组合, 即第四系与第三系含水组合, 它由第四系平原组的松散砂砾、砂及亚砂土和上第三系明化镇组的红色泥岩夹砂岩组成, 厚800—1900米。地下热水温度不高, 一般在30—40℃之间, 同位素比值较低(δD 变化于-75%至-64%之间; $\delta^{18}O$ 约在-7%至-8%之间), 与当地浅层地下水的同位素比值相近, 为明显的大气成因的热水。下古生界与震旦亚界含水组合由白云岩、泥质白云岩, 石英砂岩及砂岩、页岩等组成, 并构成区域油气储集层, 该层地下热水的 δD 值变化于-62%至-76%之间, 最高者为-50%; $\delta^{18}O$ 一般在-8%以上, 个别为-5.7%, 下第三系含水组合主要由砂泥岩, 页岩组成, 为拗陷的主要生油层。该层地下热水矿化度较高(一般都在10克/升以上, 最高达117克/升, 例J₁₇)。

水温也较高(最高达 163°C 如 J_{16})。 Br^- 、 BO_3^{3-} 等微量元素含量较高。氢氧同位素组分也明显区别于第四系热水, δD 变化于 -57% 至 -7% 之间。有不同程度的氧漂移。 $\delta^{18}\text{O}$ 最高者达 -0.77% ($T9$), 从以上水文地球化学特征来看其成因明显不同于第四系热水, 这就牵涉到高矿化卤水及油田水的成因问题。这个问题虽然从四十年代起就开始研究, 但至今尚未取得一致的见解。希辰(Hitchen, 1969)提出了大气降水与古沉积水的混合模式。他指出, 如果混合作用没有伴随任何引起同位素分馏或富集过程, 水样点应落在混合线上或附近。如果混合作用伴随着只引起氢同位素分馏和富集过程, 水样点应落在混合线的左上区。相反, 如果混合作用伴随着只引起氧同位素分馏和富集的过程, 水样点应落在混合线的右下区。根据实测数据, 参照上述模式, 我们绘制了冀中拗陷地下热水 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 成因关系图(图3)。

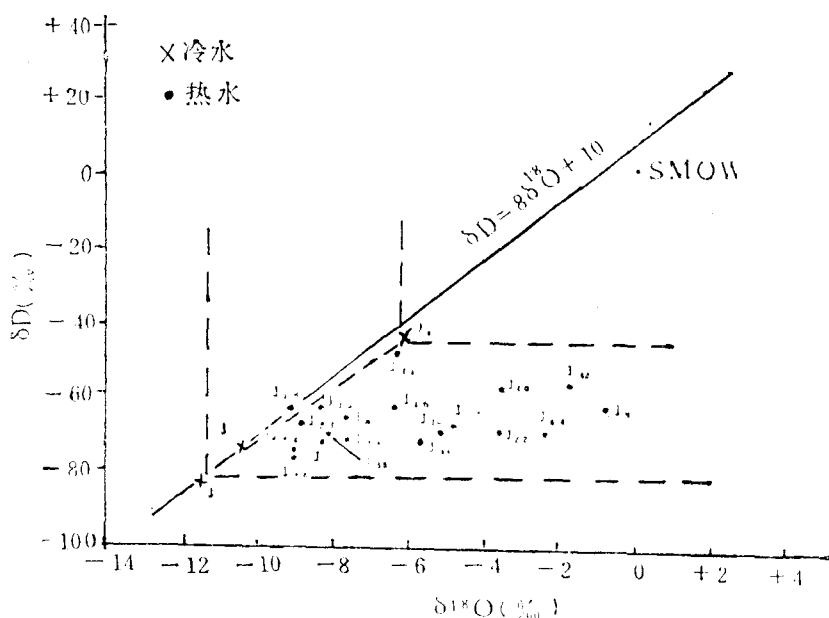
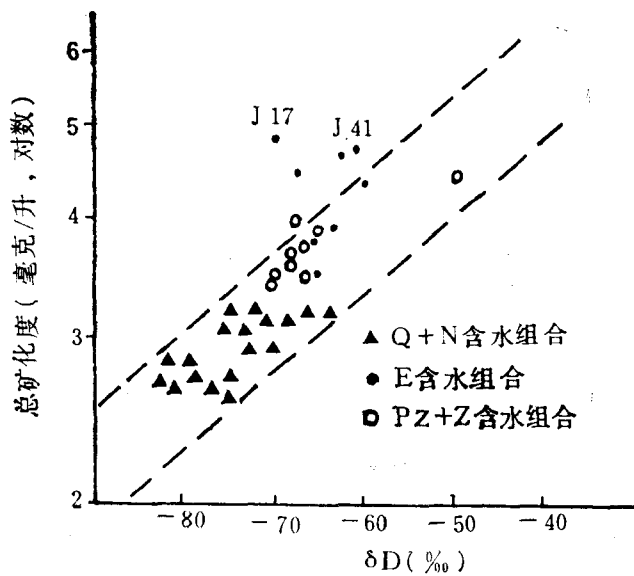
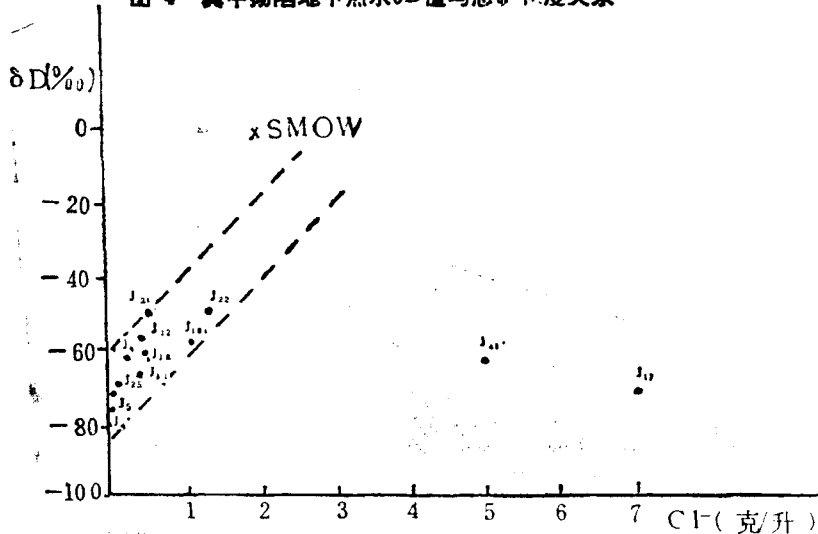


图3 冀中拗陷地下热水 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 成因关系图

假定该区地下热水是由古沉积湖水〔假定其 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 与白洋淀湖水(J_1)相近, 并且当时的气候条件与现在相似〕与大气成因的水(J_2)混合而成。 J_1 和 J_2 的连接线是混合线。从图3中不难看出冀中拗陷的热水基本落在 J_1 - J_2 线的右下区(即自 J_1 、 J_2 两点分别划出两条平行于X轴和Y轴的直线以内的区域)。按照Hitchen模式, 这就意味着冀中拗陷地下热水基本属于由 J_1 和 J_2 类型的水混合而成。混合过程只引起氧同位素分馏和富集过程, 也就是水与围岩之间发生了氧同位素交换, 使热水具有不同程度的氧漂移, 氧漂移的程度不仅与水/岩比例有关, 还随地下水温度增加而增加; $\delta^{18}\text{O}$ 与 HCO_3^- 浓度、 δD 值与总矿化度及 Cl^- 离子含量值均与同位素交换程度密切相关而呈正相关关系。

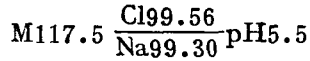
从图4和图5上明显看出, $Q+N$ 含水组及 $Pz+Z$ 含水组的水点均落在混合区范围内。但老第三系含水组中的地下水只有少数落在混合区内, 而有许多水点落在区外, 呈不规则分

图4 冀中拗陷地下热水 δD 值与总矿化度关系图5 冀中拗陷热水 δD 与 Cl^- 含量的关系

布。例如 J_{17} , T_{41} 点明显偏离了混合趋势线。假如这两个水样代表的热也是混合成因, 图4上的 J_{41} 的 δD 值不应是实测的 -61% , 而应上升到大约 -20% 左右, 同理, J_{17} 的 δD 也不是 -69.9% , 而应变成约 $+40\%$ 左右。这样富氘的水在冀中拗陷这样的地理气候区是罕见的。鉴于 J_{17} 均取自下第三系沙二段含水组合, 后者直接与古潜山油藏接触, 与生油层属同一时代, 因此这层地下热水的成因可能与冀中拗陷的形成历史以及石油的生成和运移, 封存条件有密切关系。很可能保存了部分未受大气降水稀释的同生封存水和深部成因的高矿化卤水。下面我们以后以 J_{17} 水样为例做进一步讨论。

J_{17} 取样点位于冀中拗陷任丘油田古潜山油藏区。该水样取自下第三系沙二段含水组

合。含水层岩性为深灰色砂岩体，属深湖相沉积。热水总矿化度达117克/升，离子组分以 Cl^- ， Na^+ 为主。为典型高矿化氯化钠型油田卤水，其水化学类型可写做：



δD 值为 -69.9% 。单从氢同位素特征看，该水落入大气降水范围内。但水中的高盐度如何形成？关于水中溶解固形物的来源问题，希列兹贡诺夫（1978）认为油田水的成因或是溶解地层中的蒸发岩或是因页岩的过滤使本身盐分含量增高，这无法解释 J_{17} 的高矿化度。因为任丘油田地层部面中基本无盐岩沉积。塔盖耶娃（1955）强调高矿化卤水都是水与含吸附阳离子的粘土、淤泥之间进行阳离子交换引起变质作用而成的。当然，阳离子交换只能解释水中 Na^+ 离子的来源，一般指海盆地而言。高含量的 Cl^- 离子的来源简直无法解释。看来上述这几种观点不能圆满地解释 J_{17} 的成因。自从全球板块构造学说盛兴以来，关于地幔物质是形成油气矿床原生物质源的理论随之兴起，哥德（Gold, 1980）声称：有许多证明表明：地震释放出地幔深部的各种气体可能有非生物成因的甲烷，它可能是巨大的燃料资源。加夫里连科（1975）充分肯定了地幔水的存在，强调了地幔初始水在矿产资源形成中的作用。他从板块构造观点阐述了油田的形成过程。他认为，深成水和碳氢化合物一起进入储油构造时，将原来存在于其中的同生沉积水排挤出去（或排挤一部分）。当石油及天然气矿床形成后，在构造中除石油、天然气外，还将有两种类型的水：第一种水是同生沉积水，第二种类型的水是随同原生碳氢化物从地壳深部沿构造破碎带或深大断裂带上升进入构造中的水。这第二种水可能直接与油矿体接触，形成油气藏的边缘水或底水。这种深成水矿化度高，多为 $\text{Cl}-\text{Na}$ 型。并富含多种微量元素，在区域水化学背景上形成异常点。而第一种同生沉积水可能处于储油构造之外，成为边外水，其化学组分可能与区域水化学背景相似，并呈区域性分布。

哥德和加夫里连科的假说对于解释冀中拗陷高矿化 $\text{Cl}-\text{Na}$ 型卤水（ J_{17} ）的成因有一定参考价值。首先，石油非有机成因所强调的成油最佳构造部位是大陆边缘或弧后拉张盆地。冀中拗陷恰处于太平洋板块与欧亚板块的边界地带，与此相对应的还有美国西海岸和海岸山后大面积油田，这些构造为深部原生水（初始水）和碳氢化物向上运移提供有利条件。也可能正是由于地幔物质上涌使地壳减薄而形成了深大断裂和裂谷带。第二点是 J_{17} 恰处于任丘断裂和拗陷的边界主断裂附近，直接与古潜山油藏接触，为边缘水，这与加里连科描述的深部水沿断裂上升形成油田水的形成过程相似。第三点是古潜山水的高矿化异常点和下第三系卤水异常点的出现暗示深部水上涌的可能性。第四点， J_{17} 的化学组分和矿化度与苏联一些深源岩石和矿物的液态包体的成分非常一致。

根据以上四点可以设想，冀中拗陷下第三系地下热水可能有部分未受解释的原生沉积水和深部成因的高矿化卤水。当然，只根据几个水样确定地下热水的成因是远远不够的，它只能提供一些深部信息，为进一步探讨非大气成因的地下水来源提供依据。

五、结 束 语

通过对华北地区地下热水氢、氧同位素组分的分布特征及成因的初步研究，我们认为

该区地下热水主要为大气降水成因。 δD 的差别反映了纬度效应并与补给区所处的高程有关。 $\delta^{18}O$ 偏高是水与围岩(碳酸盐岩)进行氧同位素交换的结果。郯庐断裂带的热热水表现出明显的纬度效应。其中威海地区热水稳定同位素比值为全区最高者。可能由海水混入所致。冀中拗陷下第三系高矿化Cl—Na型卤水(J₁₇)水可能包含了部分原生沉积水或深部来源的水成分。深入研究华北地区深部热水的来源将有助于水化学观测孔的选择和干扰因素的识别,提高地震预测水平,同时将对华北盆地的演化历史,构造变动及古水文地质条件的研究提供可证资料,从而进一步推动华北地区地下水资源,地热资源及石油资源的开发与利用。

致谢:邱纯一、张仲录、刘北辅、王红力、于景堂、王庆龙、高松声等同志在氢、氧同位素分析及部分水样的采集中给予了大力协助。华北油田指挥部谢家声,赵宝忠等同志提供了有关水样和地质、水化学资料。朱克文帮助绘制部分图件、在此特表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 李桂如、邱纯一、张仲录、刘素芳1981, 北京地区天然水氢同位素特征, 地震地质。第3卷第1期。
- [2] 李平 郟庐断裂带温泉中氢氧同位素初步研究, 1982, 第二届全国同位素地球化学学术讨论会论文(摘要)汇编。
- [3] 孙杉、谢家声、李桂如、邱纯一, 1982, 冀中拗陷, 地下水的氢和氧同位素组成与成因, 石油与天然气地质, 第三卷第三期。
- [4] 郑淑惠、侯发高、倪葆龄, 1982, 我国大气降水的氢氧同位素研究, 第二届全国同位素地球化学学术讨论会论文(摘要)汇编。
- [5] Craig, H. Isotopic variation in meteoric waters, 1961a Science 133, 1702.
- [6] Gold, T. 1980 Hypotheses of gases from deep earth. Scientific American, V242. N6.
- [7] Hitchen, B. et Friedman, I. 1969, Geochemistry and origin of formation waters in the Western Canada Sedimentary Basin. Geochimica et Cosmochemica Acta.
- [8] Брезгунов В., 1978, Изотопия природных вод, М. Недра.
- [9] Гавриленко, 1975, Гидрогеология тектоносферы "Наукова Оумка".
- [10] Тагеева Н. В., 1955, Труды Лабор. гидрогеол. проб. АН СССР.

THE CHARACTERISTICS OF ISOTOPIC COMPOSITIONS OF HYDROGEN AND OXYGEN OF GEOTHERMAL WATERS IN NORTH CHINA AND THEIR ORIGIN

Li Guiru Gao Wenxue Jiang Fengliang Zhang Peiren
and Wang Jihua

(Institute of Geology, State Seismological Bureau)

ABSTRACT

15 cold water samples and 57 geothermal water samples have been measured for D/H and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios. Geothermal waters of Beijing area and Tancheng-Lujiang fault zone are considered to be of meteoric origin on isotopic grounds and the influence of latitude and altitude on isotopic composition is reflected.

The distribution of δD values of geothermal water of Jizhong (central Hebei) depression is characterized by regular increase from the margin to the center of the depression. In addition, δD value of water is increasing with the increase of the occurrence depth of aquifers. Meanwhile, the formation water from the Lower Tertiary sandstone aquifer and parts of geothermal water from the Upper Proterozoic dolomite aquifer are highly mineralized with high concentration of Cl^- ions, and high δD and $\delta^{18}\text{O}$ values as well. Some samples show large oxygen-18 shift, which may have incorporated confined water. Conclusively it is suggested that geothermal waters in Jizhong depression are meteoric in origin. Deep-seated water with high concentrations of D and ^{18}O in the center of depression may have resulted from the mixing of paleometeoric water and confined water.