

江苏丹阳千年“沸井”的地质成因与形成机理

姜月华,周权平,李云,苏晶文,张泰丽,贾军元,葛伟亚,杨辉,刘林,杨国强,金阳

中国地质调查局南京地质调查中心,南京,210016

内容提要:通过采用无机和有机化学分析、可控源音频大地电磁测深、高密度电阻率和氦气测量等地质地球化学和地球物理方法,对江苏丹阳九里村六口相距 30~200 cm 不等的“沸腾”了 2000 多年的古井及其周围地质环境进行了详细勘查,研究发现:①“沸井”沸腾的气体主要为 CO₂,此外,还有微量氦气和总挥发性有机物(TVOC),这些气体组分在临近的非“沸井”的民用水井中均未检出。②“沸井”水样中游离二氧化碳、钙、铁、锰、总溶解固体、总硬度、重碳酸根、稀土元素等含量均明显高于“沸井”周围其他民用水井和湖水。③“沸井”井水温度(夏天约 19℃)与周围其他民用水井基本一致,未见异常情况。④“沸井”地下深部存在玄武岩岩体和茅东断裂的次级断裂,在这些断裂地表出露处氦气含量明显高于其他地方。⑤“沸井”的存在与茅东活动断裂有着密切的联系,“沸井”中沸腾的气体主要来源于地壳深部或上地幔,气体沿断裂带上升而逸出地表。⑥六口“沸井”井水味道各不相同,系因各“沸井”井水中游离二氧化碳、钙、铁、锰等含量及 pH 值不一所致。“沸井”井水“三清三浊”,主要与井水中铁含量高有关,三口铁含量高的井水因暴露于空气中氧化为三价铁沉淀,是井水浑浊的主要原因。

关键词:“沸井”;古井;茅东断裂;千年之谜;九里村

江苏省丹阳市延陵镇九里村,因季子庙而闻名,在季子庙东南约百米的地方,有六口古井,这六口井分布在 10 多平方米的范围内(图 1),呈近南北向分布,相距不超过 2 m,最近的只有三四十厘米,井深均在 3~4 m 左右,井水温度(夏天)约 19℃。这六口古井里的井水,常年“沸腾”涌动,如同煮水锅刚刚烧开的滚水,故而得名“沸井”。更奇怪的是,这六口井的井水“三清三浊”,味道各不相同,北面三口为清水井(井水味道依次为啤酒味、柠檬味、雪碧味),南面三口为浊水井(井水味道依次为铁锈味、苦味、麻辣味)。据史料记载,“沸井”有 2000 年以上的历史,早在南朝初期已成为季子庙的重要景观,当时井有百余口,其中一部分是“沸井”,由于历史变迁等原因,“沸井”大多被掩埋。直到 2001 年,丹阳季子庙景区开始大规模整修,相继发现并清理出目前的 6 口“沸井”。这些“沸井”不是泉点,其特征和成因完全不同于济南趵突泉和南京珍珠泉,笔者通过查阅国内外相关文献,尚未发现有类似丹阳九里村“沸

井”的地质现象的文献报道。

关于这六口古井井水的“沸腾”、井水的清澈与浑浊,以及具有各不相同的味道,到目前为止始终无解,成为了千年之谜。如针对井水沸腾出的气体,当地老乡认为是,地下“龙”呼出的气体;有地理和旅游工作者认为是当地沼泽经过物理化学作用后形成沼气、CO₂ 等气体;也有认为气体可能来源于地下深部。这背后到底隐藏怎样的地质奥秘?本次研究旨在查明“沸井”中沸腾气体与地下水组成基础上,结合“沸井”区的构造地质条件,进一步科学解释“沸井”的地质成因与形成机理。

1 地质背景

江苏丹阳地区的“沸井”分布于茅山山脉东侧的“茅东断裂带”上(图 2)。钻孔资料显示,该区的下部地层为白垩系粉砂岩、砂岩和泥岩,上部为古近系和第四系松散沉积物,主要为粉质黏土夹粉砂和砂层。另外,在“沸井”西侧的茅山地区还出露有一套

注:本文为中国地质调查局长三角环境地质调查项目(编号 1212010914006、1212011220002、DD20160246)和长江经济带地质环境综合调查工程项目(编号 0531)资助成果。

收稿日期:2018-06-08;改回日期:2019-05-09;网络发表日期:2019-05-20;责任编辑:周健。

作者简介:姜月华,男,1963年生。研究员,主要从事水文地质、工程地质和环境地质调查。Email:316664105@qq.com。

引用本文:姜月华,周权平,李云,苏晶文,张泰丽,贾军元,葛伟亚,杨辉,刘林,杨国强,金阳. 2019. 江苏丹阳千年“沸井”的地质成因与形成机理. 地质学报, 93(7):1778~1791, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019078.

Jiang Yuehua, Zhou Quanping, Li Yun, Su Jingwen, Zhang Taili, Jia Junyuan, Ge Weiya, Yang Hui, Liu Ling, Yang Guoqiang, Jing Yang. 2019. Geological origin and formation mechanism of the millennium “boiling well” in Danyang, Jiangsu Province. Acta Geologica Sinica, 93(7):1778~1791.

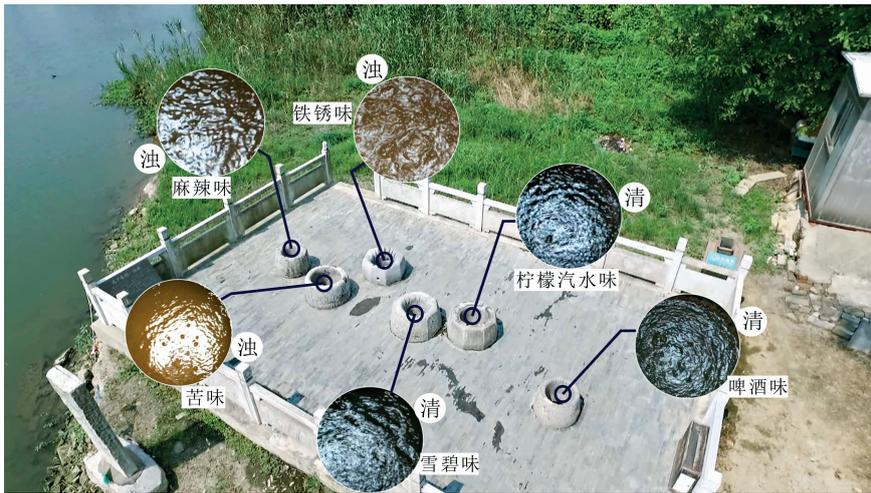


图 1 江苏省丹阳市延陵镇九里村六口“沸井”

Fig. 1 Location map of 6 “boiling wells” in Jiuli Village, Yanling Town, Danyang City, Jiangsu Province

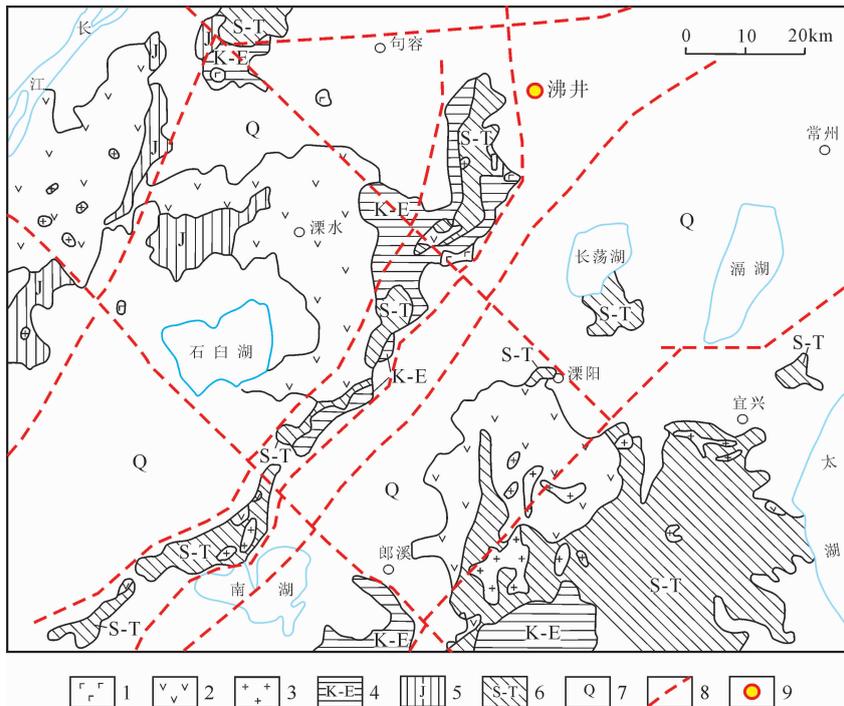


图 2 江苏丹阳“沸井”及周边区域地质简图

Fig. 2 Geological map of the “boiling wells” in Danyang City, Jiangsu Province and its surrounding area

- 1—新生代火山岩; 2—中生代火山岩; 3—中酸性侵入岩; 4—中生代红层; 5—象山群; 6—高家边-范加塘组; 7—第四系; 8—断裂; 9—沸井
- 1—Cenozoic volcanic rocks; 2—Mesozoic volcanic rocks; 3—intermediate-acidic intrusive rocks; 4—red layer of Mesozoic era;
- 5—Xiangshan Group; 6—Gaojiabian-Fanjiatang Group; 7—Quaternary; 8—fault; 9—boiling well

古生代—中生代沉积地层。“沸井”挖掘于第四系表层地层中，“沸井”井水系潜水。

茅东断裂位于茅山东侧山麓,断续出露,辗转曲折,向北北东方向延展,向北穿过宁镇山脉、长江,延至苏北兴化附近(Li Qitong et al., 1983; Bureau of Geology and Mineral Resources of Jiangsu Province, 1984; Gao Zhonghe et al., 1989; Zong

Kaihong et al., 2016),全长 300 多千米,向南被安徽境内的青阳-宁国近东西向断裂所截。在高淳花山、溧水芝山、溧阳竹簧煤矿分别见白垩系浦口组与三叠系下统的灰岩、二叠系龙潭组呈断层接触。

从布格重力异常图^①可以发现,研究区处于重力高值区和低值区的分界处,西侧为句容市重力高,东侧为上沛埠东重力低(图 3a);从航空磁测结果来

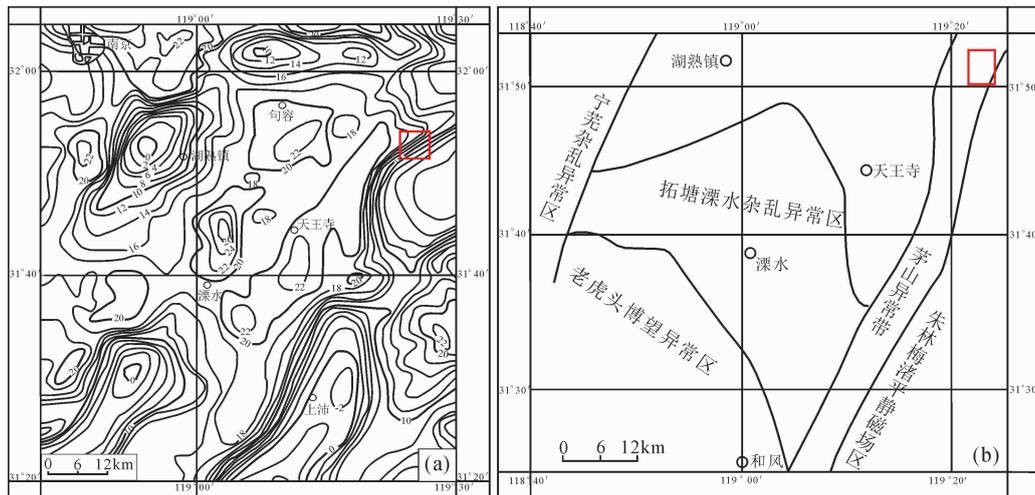


图3 溧水地区布格重力异常平面图(a,据江苏省地质矿产局地球物理化学探矿大队综合分队,1991^[1])和航磁异常分区示意图(b,据冶金部物探公司航测二队,1975)(红框为研究区)

Fig. 3 The map of Bouguer gravity anomaly (a, according to the Comprehensive Detachment of the Geophysical and Chemical Prospecting Brigade of the Bureau of Geology and Mineral Resources of Jiangsu Province, 1991) and sketch of aeromagnetic anomaly zoning (b, according to the Aerial Survey Team 2 of Geophysical Survey Company of Ministry of Metallurgy, 1975) in Lishui area (red frame is the research area)

表1 茅东断裂带中强地震

Table 1 The middle-strong earthquakes in Maodong fault zone

序号	发震时间			震中位置			地震震级 (M_s)
	年	月	日	东经	北纬	参考地名	
1	1624	02	10	119°24'	32°24'	江苏扬州	6
2	1676	06	11	119°24'	32°24'	江苏扬州	4.75
3	1679	12	26	119°30'	32°24'	江苏溧阳	5.25
4	1748	06	30	118°24'	30°42'	江苏泾县	5
5	1839	10	12	119°12'	31°30'	江苏溧阳西	4.75
6	1872	07	24	119°18'	32°12'	江苏镇江	4.75
7	1913	04	3	119°24'	32°12'	江苏镇江	5.5
8	1930	01	3	119°24'	32°12'	江苏镇江	5
9	1974	04	22	119°19'	31°28'	江苏溧阳上沛	5.5
10	1979	07	9	119°15'	31°27'	江苏溧阳上沛东南	6
11	2012	07	20	119°36'	33°00'	江苏省扬州市高邮市、宝应县交界	4.7

看,研究区处在茅山异常带上(图3b),西侧为反映火山岩分布的杂乱磁异常区,东侧反映为与红层(上白垩统一下第三系)有关的正磁异常带^②。

中更新世开始,茅东断裂重新活动,导致西侧的茅山山脉持续隆升,而东侧的直溪凹陷表现为持续下降,接受了近千米厚度的第三纪和第四纪松散沉积物。茅山东侧的直溪桥-桤溪港凹陷现在仍在以约1.25 mm/a的速度下沉(国家地震局地壳应力研究所情报资料室编译,1988)。另据地震资料显示,在溧阳、溧水、镇江、扬州等沿断裂带曾多次发生破坏性地震,微震亦明显地呈带状分布(表1,图4)。

钻孔揭示茅东断裂断面陡立,有时翻转,形成急

剧拐弯的弧形弯曲。此外,从茅山山体一系列呈边幕式排列的逆冲断裂和倒转褶皱与该断裂的组合关系分析,该断裂具强烈左行平移性质。物探推断断裂深切上地壳。因此,该断裂是一条燕山期—喜马拉雅期多期活动的具左行平移特征的压性正断层(早期拉张,晚期挤压)。且在茅山北段表现为由一组断裂组成的断裂带。

2 研究方法

本次研究除了充分收集利用前人区域地质调查、重力、航空磁测和钻探等资料外,针对“沸井”及其周围地质环境进行了详细地质地球化学和地球物理勘查,包括对“沸井”及其周围其他民用水井水

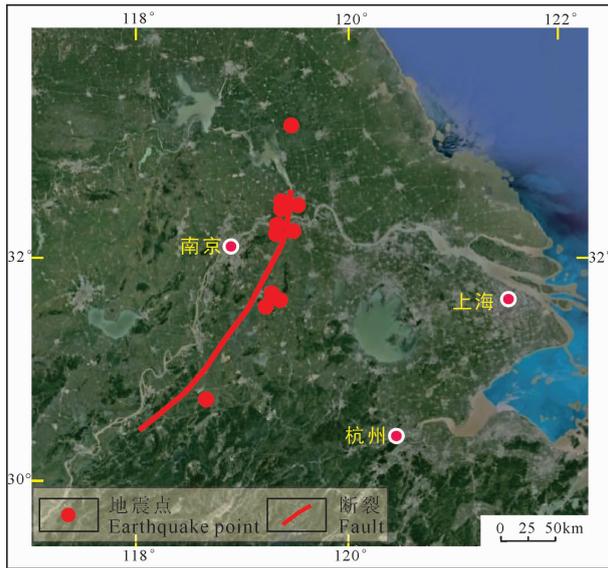


图 4 茅东断裂带中强地震分布示意图

Fig. 4 Sketch of the distribution of the middle-strong earthquakes in Maodong fault zone

和湖水进行化学分析、可控源音频大地电磁测深、高密度电阻率和氦气测量等,在此基础上对“沸井”形成的成因机理进行综合研究和分析。国土资源部华东矿产资源监督检测中心承担了水样品化学分析,无机化学组分主要由电感耦合等离子体光谱仪、原子荧光光谱仪、离子色谱仪、紫外分光光度计等仪器测试。中国地质调查局南京地质调查中心承担了高密度电阻率、氦气和总挥发性有机物(TVOC)等测量,其中,TVOC由英国生产的PhoCheck Tiger便携式VOC气体检测仪测试,氦气由美国Durrige公司生产的RAD7氦气检测仪测量,高密度电阻率仪为国产“DUK-2高密度电法测量系统”。江苏省地质勘查技术院资源物探研究所负责可控源音频大地电磁法(CSAMT)勘探,仪器为加拿大凤凰地球物理有限公司生产的V8电法系统。

3 研究结果

3.1 茅东断裂带及其特征

笔者沿茅东断裂带及“沸井”通过实测 4 条可控源音频大地电磁(CSAMT)测量剖面(图 5),在茅山山脉两侧发现了明显的低阻向高阻变化情况,并可清晰识别出北北东走向的茅西断裂(F1)和茅东断裂(F2)(图 6)。

“沸井”距茅东主断裂约 6km。横穿过“沸井”的可控源音频大地电磁(CSAMT)测量剖面显示,在九里村地区存在茅东断裂的次级断裂(F11 和

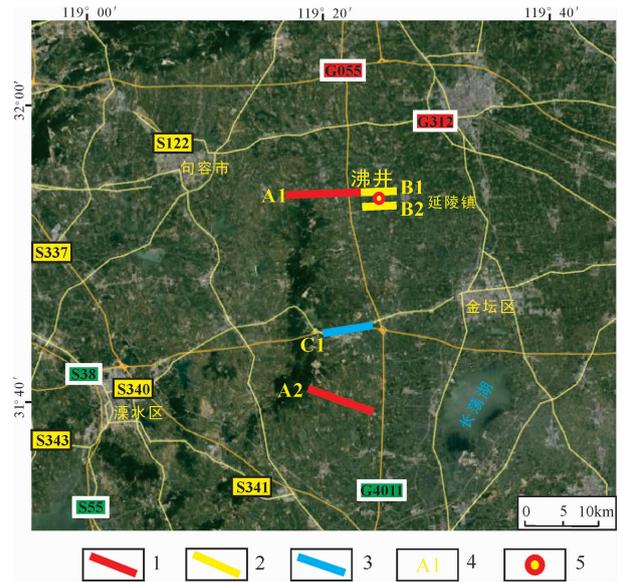


图 5 茅东断裂可控源音频大地电磁测线布置图

Fig. 5 Sketch of the controlled source audio magnetotelluric (CSAMT) survey lines in Maodong fault zone

1—2014年完成的CSAMT勘查线;2—2013年完成的CSAMT勘查线;3—已收集CSAMT勘查线;4—CSAMT勘查线;5—沸井位置

1—CSAMT exploration line completed in 2014; 2—CSAMT exploration line completed in 2013; 3—the CSAMT survey line has been collected; 4—CSAMT exploration line number; 5—location of boiling wells

F12)(图 7),呈北东向展布。九里村处于直溪桥凹陷北西缘盆地内,上部覆盖较厚(约 800~1000m)的古近系(E)、第四系(Q),下部(约 1000~1200m)为白垩系上统(K₂)。图 7 大致反映了直溪桥断陷内白垩系上统(K₂)顶界由北西至南东呈由浅到深特征。在古近系(E)内,两条测线下部高程约-400~-600m处存在明显高阻异常,视电阻率值大于40Ω·m。参考本区已有延陵 743 孔等钻孔资料及物性资料,古近系(E)中玄武岩电阻率及密度明显高于其他岩性,该局部高阻异常在 1:5 万重力剩余异常上也表现为高值特征,1:5 万航磁也存在局部高值异常,推断该高阻体可能为古近系(E)中的玄武岩(β₂)。

3.2 “沸井”水质异于民用水井和湖水

为了对比“沸井”井水与其周围其他民用水井井水以及湖水的差异,分别采集各自水样,通过化学分析发现,“沸井”井水中游离二氧化碳、重碳酸根离子、钙离子、溶解性总固体、总硬度、铁、锰、轻稀土等各化学组分的含量明显高于民井和湖水(表 2),如“沸井”游离二氧化碳含量在 439~491 mg/L 之间,民井和湖水游离二氧化碳含量<4 mg/L;“沸井”重

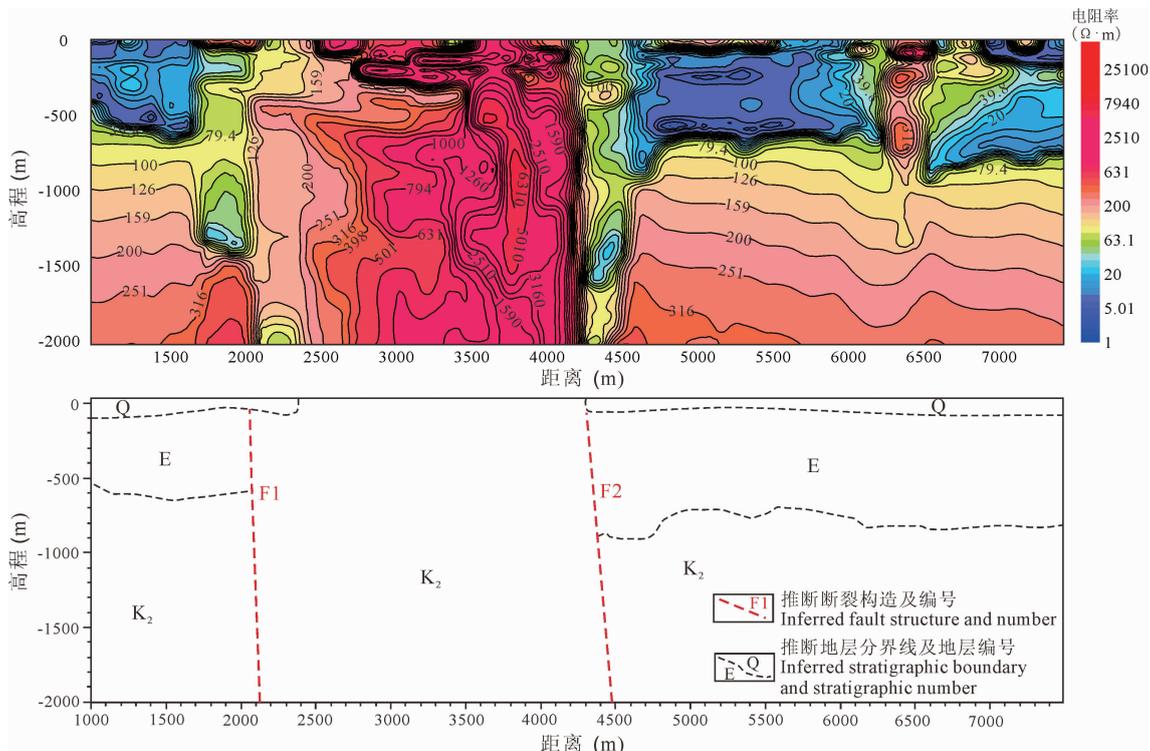


图 6 茅东断裂可控源音频大地电磁测深剖面 (A1) 及地质推断图 (剖面位置见图 5)

Fig. 6 Sketch of controlled source audio magnetotelluric profiles (A1) and geological inferences in Maodong fault zone (the section position is shown in Fig. 5)

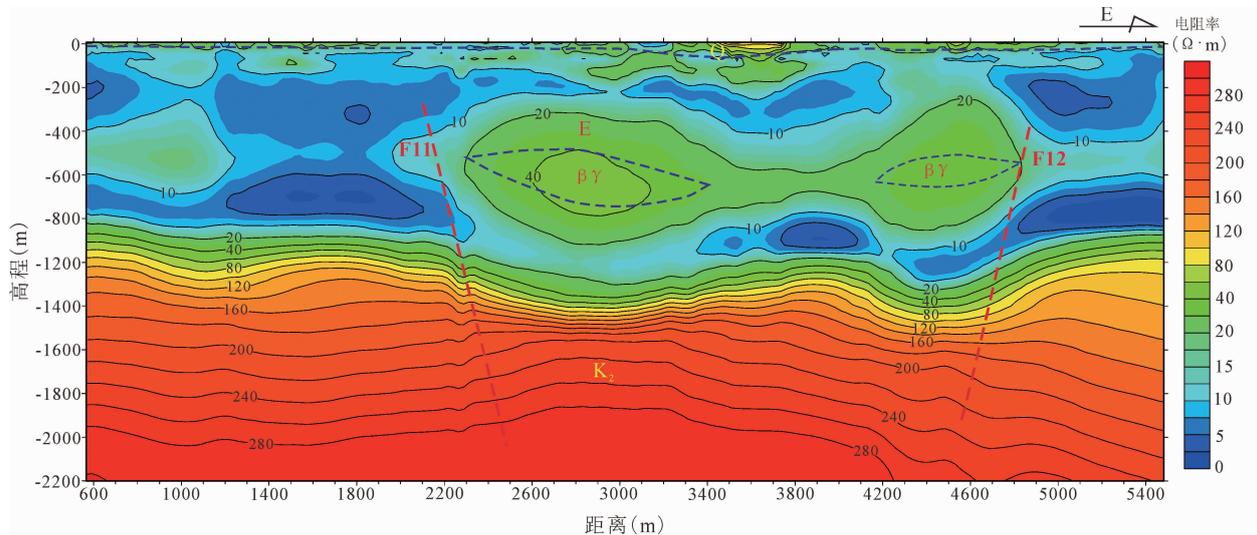


图 7 横穿江苏丹阳“沸井”的可控源音频大地电磁测深剖面 (B1) 及地质推断图 (剖面位置见图 5)

Fig. 7 Sketch of controlled source audio magnetotelluric profiles and geological inferences across “Boiling wells” in Danyang City, Jiangsu Province (the section position is shown in Fig. 5)

碳酸根离子含量在 618~1289 mg/L 之间,民井和湖水 <156 mg/L。其中,铁、锰、总溶解固体、总硬度的含量超《地下水质量标准》(GB/T14848-2007) 中三类水标准。另外,在民井和湖水中还分别检出氯仿和二氯甲烷,应属于经济活动行为污染所致。总体上,检测的民井水质偏碱性,pH 值达 8.88,而

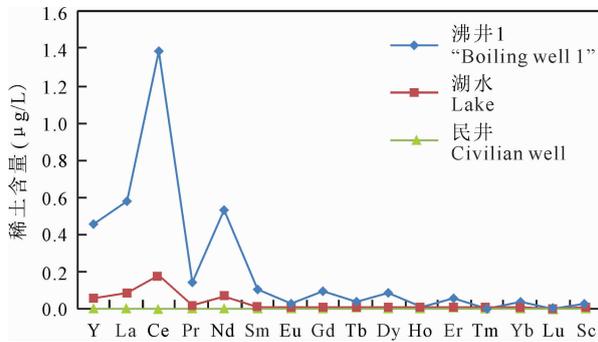
“沸井”和湖水井水偏酸性,pH 值在 4.52~6.54 之间。同时发现,在六口“沸井”中,颜色浑浊的三口井的水中铁含量相对较高(平均 13.23 mg/L),而三口清水井则铁含量相对较低平均 5.75 mg/L。据此推断,铁含量高的井水因暴露在空气中快速氧化为三价铁沉淀,可能是形成井水浑浊的主要原因。

表 2 江苏丹阳“沸井”及民井水样的水化学组分(mg/L)

Table 2 Hydrometetic components (mg/L) of “boiling well” and civil well water samples in Danyang City, Jiangsu Province

编号	重碳酸根	游离二氧化碳	钙	铁	锰	溶解性总固体	总硬度	有机物	pH
沸井 1	618	439	203.000003	4.65	5.75	1012	702	未检出	6.25
沸井 2	1289	476	375.05	9.61	3.41	1386	1102	未检出	6.54
沸井 3	1214	464	356.3	2.98	1.20	1340	1044	未检出	5.61
沸井 4	974	453	282.5	10.96	3.03	1102	870	未检出	6.00
沸井 5	985	491	284.6	11.78	3.32	1118	876	未检出	4.52
沸井 6	979	447	292.2	16.96	3.74	1102	915	未检出	5.12
湖水	150	<4	50.9	0.58	0.07	326	186	二氯甲烷	5.24
民井	156	<4	57.7	<0.05	0.02	396	196	氯仿	8.88

与民用井水以及湖水相比,“沸井”井水中的轻稀土组分 Y、La、Ce、Pr、Nd、Sm 等含量高出(图 8)民井几百倍,比湖水也高出数倍至数十倍不等。并且对比可知,研究区民井井水中的稀土含量与内蒙古河套平原(Guo Huaming et al., 2010)、大同盆地(Xie Xianjun et al., 2012)、南京轿子山岩溶区(Yang et al., 2012)和皖北许疃煤矿区(Chen Song et al., 2017)等地区地下水的稀土含量(0.0186~3.4470 $\mu\text{g/L}$)基本在一个等级,清晰地显示出非“沸井”的民用井地下水中稀土元素含量总体较低的特征。

图 8 江苏丹阳“沸井”井水与民用井井水和湖水稀土含量($\mu\text{g/L}$)对比Fig. 8 Comparison of rare earth content ($\mu\text{g/L}$) between “boiling well” and civilian well water and lake water in Danyang City, Jiangsu Province

3.3 “沸井”气体组分特殊

研究发现,“沸井”沸腾出的气体成分主要为 CO_2 ,将燃烧的蜡烛、打火机等可燃物伸进“沸井”内,通常在井口以下 10 cm 左右的地方,均熄灭。

通过对“沸井”现场沸腾出的气体进行有机物测量,发现在气体中存在持续性出现的低含量总挥发性有机物(TVOC)。“沸井 1” TVOC 含量主要在 $0.003 \times 10^{-6} \sim 0.02 \times 10^{-6}$ 之间,平均 0.013×10^{-6} ，“沸井 5” TVOC 含量主要在 $0.016 \times 10^{-6} \sim$

0.029×10^{-6} 之间,平均 0.014×10^{-6} ,含量随着时间呈现锯齿状波动(图 9a、b,表 3),但是始终存在,而湖水与民井空气中则未检测到总挥发性有机物。

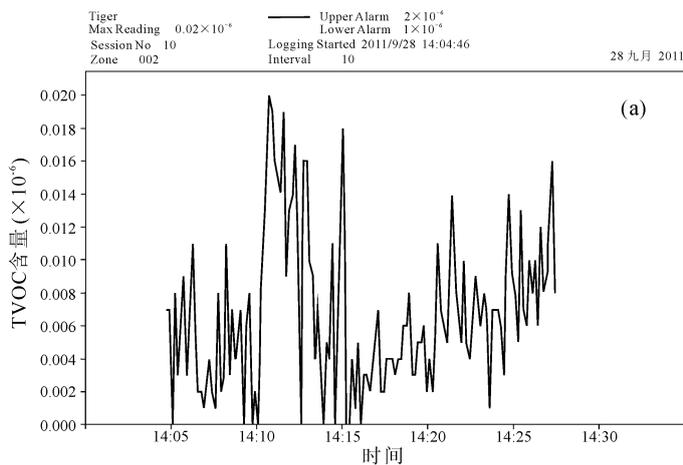
表 3 不同水样 TVOC 平均值含量($\times 10^{-6}$)及其沸腾和浑浊状态Table 3 Average TVOC content of different water samples ($\times 10^{-6}$) and their boiling and turbid states

送样号	TVOC 平均值 ($\times 10^{-6}$)	沸腾状态	浑浊状态
沸井 1	0.013	沸腾强烈	清澈
沸井 2	0.021	沸腾强烈	清澈
沸井 3	0.015	沸腾较弱	清澈
沸井 4	0.014	沸腾强烈	浑浊
沸井 5	0.017	沸腾最弱	浑浊
沸井 6	0.019	沸腾较弱	浑浊
湖水	未检出	无沸腾	清澈
民井	未检出	无沸腾	清澈

本次研究对“沸井”及其周围地区开展了氦气测量。氦因具有化学性质稳定、迁移能力强、能沿活断层及其周围破碎带向地表迁移和释放的特点,常被用来作为深部信息来源的指示元素。通过氦气测量可以查明地下活断层的空间位置,对断层的活动性做出评价。当前利用断层氦气释放强度、范围、成分等的变化来寻找覆盖区断裂(带)的空间分布位置及分析评价其相对活动性,已逐渐在国内外得到较广泛应用(Lombardi et al., 1990; Wang Hualing et al., 1991; King et al., 1996; Suzuki, 1996; Zhao Hongmei, 1996; Wang Qiuliang et al., 2010)。我国一些学者也尝试将此方法应用于城市活断层探测,并初步取得了一些成果。

氦气测量结果显示,“沸井”溢出的氦气浓度较大(表 4),而周围空气、湖水和民井井水中氦气浓度几乎为 0。不过,各“沸井”溢出的氦浓度具有一定差异,其中,“沸井 1”浓度最大,为 962 pCi/L,“沸井 5”浓度最小,为 520 pCi/L,显然,这与各“沸井”沸腾的激烈程度有关,沸腾越激烈,溢出的氦浓度就越

Date Time	TVOC($\times 10^{-6}$)
2011/9/28 14:24:06	0.007
2011/9/28 14:24:16	0.006
2011/9/28 14:24:26	0.003
2011/9/28 14:24:36	0.011
2011/9/28 14:24:46	0.014
2011/9/28 14:24:56	0.009
2011/9/28 14:25:06	0.008
2011/9/28 14:25:16	0.005
2011/9/28 14:25:26	0.013
2011/9/28 14:25:36	0.007
2011/9/28 14:25:46	0.006
2011/9/28 14:25:56	0.010
2011/9/28 14:26:06	0.008
2011/9/28 14:26:16	0.010
2011/9/28 14:26:26	0.006
2011/9/28 14:26:36	0.012
2011/9/28 14:26:46	0.008
2011/9/28 14:26:56	0.009
2011/9/28 14:27:06	0.013
2011/9/28 14:27:16	0.016
2011/9/28 14:27:26	0.008



Date Time	TVOC($\times 10^{-6}$)
2011/9/28 14:28:27	0.016
2011/9/28 14:28:37	0.016
2011/9/28 14:28:47	0.015
2011/9/28 14:28:57	0.017
2011/9/28 14:29:07	0.027
2011/9/28 14:29:17	0.004
2011/9/28 14:29:27	0.021
2011/9/28 14:29:37	0.016
2011/9/28 14:29:47	0.018
2011/9/28 14:29:57	0.029
2011/9/28 14:30:07	0.000
2011/9/28 14:30:17	0.019
2011/9/28 14:30:27	0.021
2011/9/28 14:30:37	0.019
2011/9/28 14:30:47	0.016
2011/9/28 14:30:57	0.021
2011/9/28 14:31:07	0.022
2011/9/28 14:31:17	0.017
2011/9/28 14:31:27	0.001
2011/9/28 14:31:37	0.018
2011/9/28 14:31:47	0.017

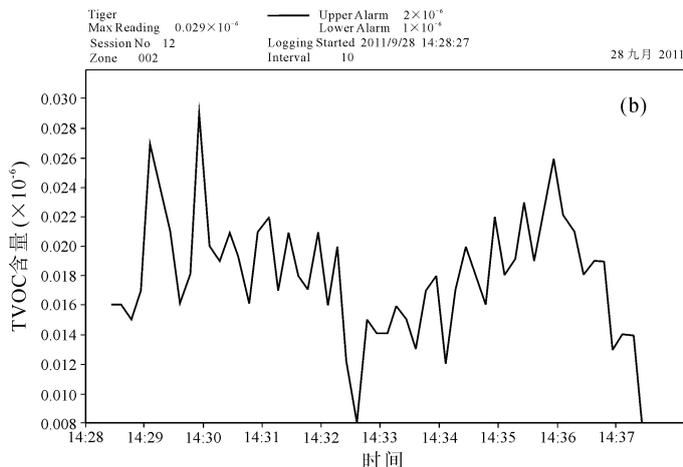


图9 江苏丹阳“沸井1”(a)和“沸井5”(b)总挥发性有机物(TVOC)含量变化图

Fig. 9 Variation of total volatile organic compounds (TVOC) in “boiling well 1” (a) and “boiling well 5” (b) in Danyang City, Jiangsu Province

高。“沸井”沸腾的激烈程度可能主要受气体逸出通道的缝孔隙密度高低控制,缝孔隙密度越高,沸腾越激烈,反之则沸腾弱。

表4 江苏丹阳“沸井”及周围空气中氡气浓度值

Table 4 Radon concentration in the “boiling well” and surrounding air in Danyang City, Jiangsu Province

编号	X	Y	浓度(pCi/L)
沸井1	730593	3532427	962
沸井2	730587	3532425	693.5
沸井3	730587	3532424	709
沸井4	730586	3532423	857
沸井5	730588	3532423	520
沸井6	730589	3532420	843
周围空气	—	—	几乎为0

沿“沸井”周围布设的土壤氡气剖面测量结果也发现存在4处异常高值点(图10,图11),结合研究区地质构造分布可以看出,该四处高值点位置分别与研究地区F8、F7、F3、F6等四条推断隐伏断裂(图12)和土壤氡气测量线交汇的四个位置相重合。“沸

井”位于F3和F6交汇处。显然,氡气异常高值点与断裂的分布相一致。

调查发现,沿断裂走向出现的“沸井”、湖、塘和沟均存在冒“气泡”现象(图13),高密度电阻率剖面也反映出在断裂分布处因气体相对聚集而出现低阻现象(图14)。

4 讨论

4.1 “沸井”中CO₂的成因

关于盆地地层中富含CO₂的问题曾经一度成为国内外地球科学界与环境科学界共同关注的热点问题(Dai Jinxing et al., 1994; Tu Guangzhi, 1996; Harper et al., 1996; Zhu Yuenian et al., 1997; Wychedey et al., 1999; Ballentine et al., 2000; Cheng Youyi, 2000; Liu Baoming et al., 2004)。前人针对我国东部及近海陆架盆地赋存的CO₂气藏及高含CO₂油气藏的研究显示(Dai Chunshen et

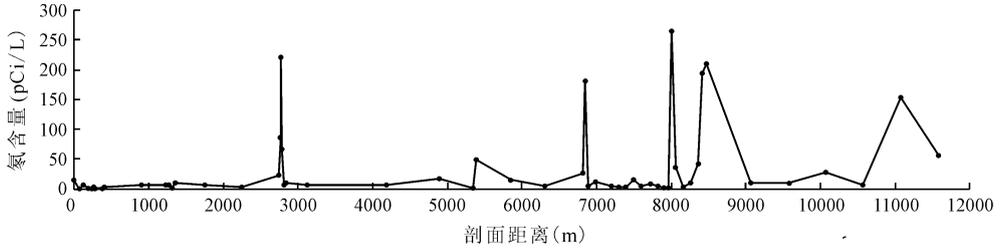


图 10 江苏丹阳“沸井”周围土壤氡浓度异常剖面图

Fig. 10 An abnormal profile of radon concentration in soil around the “boiling well” in Danyang, Jiangsu Province

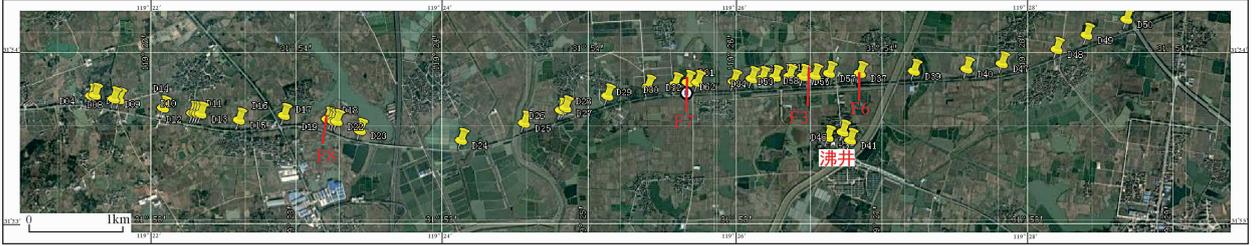


图 11 江苏丹阳“沸井”周围土壤氡测线及推断断裂位置图

Fig. 11 Soil radon measurement line and fault location map around the “boiling well” in Danyang, Jiangsu Province

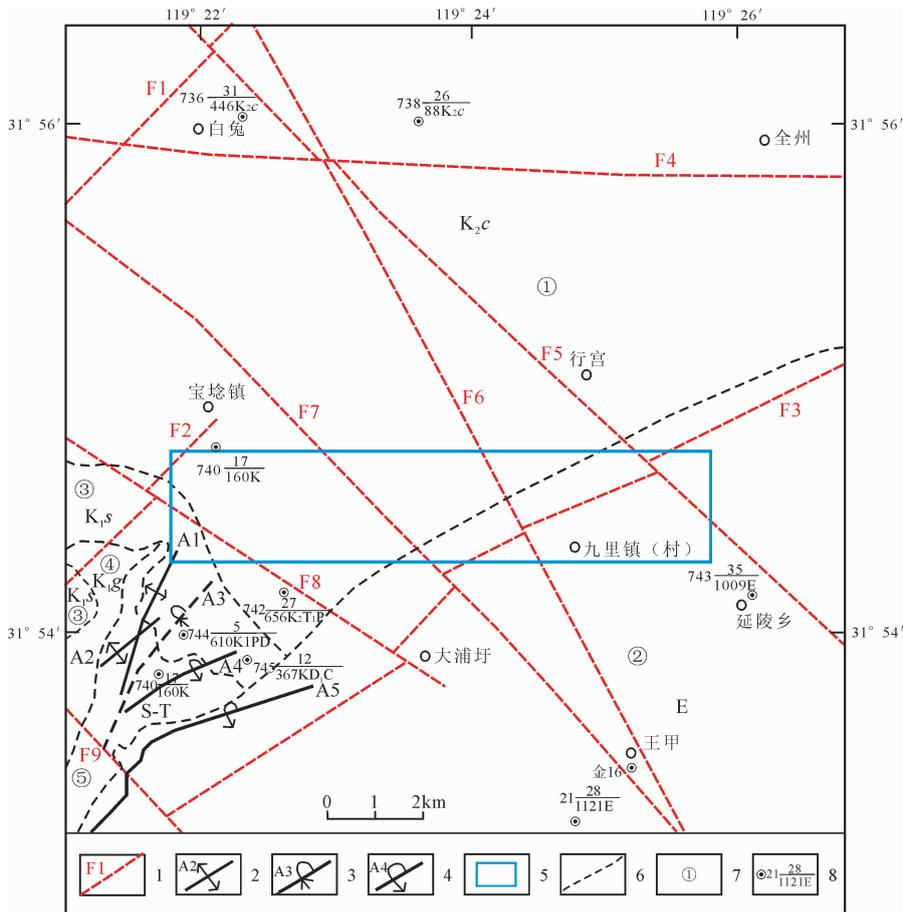


图 12 九里镇地区地质构造示意图

Fig. 12 Geological structure diagram in Jiuli Town

1—推测隐伏断层及其编号; 2—隐伏背斜构造; 3—倒转向斜构造; 4—倒转背斜构造; 5—研究区; 6—盆地、凹陷、山体界线;
7—盆地(①③④)、凹陷(②)、山体(⑤)编号; 8—钻孔位置及编号

1—Inferred concealed faults and their serial numbers; 2—concealed anticline; 3—inverted steering oblique structure; 4—inverted anticline;
5—research area; 6—boundary lines of basins, depressions and mountains; 7—number of basin (①③④),
depression(②) and mountain(⑤); 8—drilling location and number



图 13 江苏丹阳“沸井”和湖、塘冒“气泡”现象

Fig. 13 Bubbling phenomenon in “boiling well” and lakes and ponds in Danyang City, Jiangsu Province

(a)—距离沸井 5 m 的湖中出现的“气泡”;(b)—距离沸井 20 m 的塘中出现的“气泡”;(c)——测量沸井 1 总挥发性有机物;
(d)——沸井 2 沸腾冒“气泡”现象

(a) —“bubble” in the lake five meters away from the boiling well; (b) —“bubbles” in ponds 20 meters away from the boiling well; (c) —measurement of total volatile organic compounds in boiling well 1; (d) —bubbling phenomenon in boiling well 2

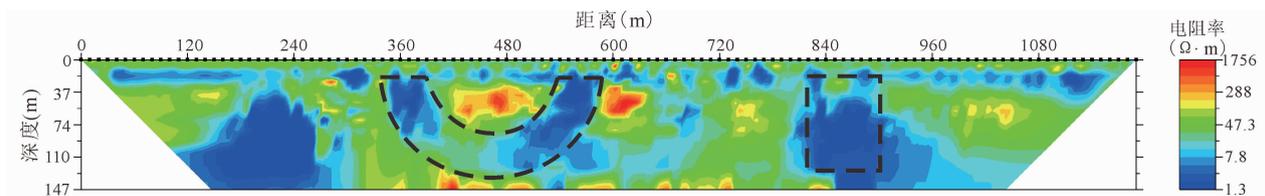


图 14 江苏丹阳“沸井”及其周缘高密度电阻率剖面影像图(蓝色低阻区气体相对聚集)

Fig. 14 “Boiling well” and its peripheral high-density resistivity profile (gas concentration in blue low-resistance zone) in Danyang City, Jiangsu Province

al. , 1995; Li Xianqi et al. , 1997; He Jiaxiong et al. , 2005; Lin Songhui, 2005; Wang Jie et al. , 2007, 2008),我国东部陆上早第三纪一晚中生代盆地所形成的 CO₂ 气藏,和沿海海域第三纪东海盆地、珠江口盆地中深大断裂附近所形成的 CO₂ 气藏及高含 CO₂ 油气藏,其 CO₂ 主要属幔源-岩浆成因类型。

从全球范围看,幔源 CO₂ 释放点的分布还常与地震活动断裂带分布相一致(Zhang Jiagui et al. , 1999; Liu Baoming, 2004; Lin Songhui, 2005; Tao Mingxin et al. , 2005; Wang Jie et al. , 2007, 2008; Liao Fengrong et al. , 2012)。Zhu Yuenian

and Wu Xingnian (1994)研究了全球高含 CO₂ 天然气的分布特点后也发现,CO₂ 气的聚集与深大断裂带的展布关系密切,其分布明显地受控于区域性大断裂。显然,“沸井”位于茅东断裂及其次级断裂上,结合“沸井”附近的湖、塘、沟沿一定走向也存在冒“气泡”的沸腾现象,推断 CO₂ 气的来源也很可能与断裂带导气作用有关。

4.2 “沸井”中的氦气以及地下水轻稀土富集现象的成因

氦气测量作为一种研究隐伏断裂的方法,已得到国内外地学界的重视(Lombard et al. , 1990;

King et al., 1996; Wang Qiuliang et al., 2010), 美、日等国学者先后将此方法应用在圣安德列斯断层、中央大断层等断层活动性研究中(Suzuki, 1996)。我国一些学者也尝试将此方法应用于城市活断层探测, 并初步取得了一些成果(Wang Hualing et al., 1991; Zhao Hongmei, 1996; Gao Qingwu et al., 2003; Wang Zhicheng, 2006)。本次研究在“沸井”及其周围地区开展的氦气测量结果显示, 在“沸井”及土壤氦剖面上均出现高异常的氦值点, 这些点恰恰与茅东断裂带中的次级断层有关, 这进一步反映氦气很可能是来自于深部并沿断层泄出的。

对“沸井”沸腾出的气体进行测试发现, 所有 6 口“沸井”气体中均有持续性出现的低含量总挥发性有机物(TVOC)存在, 而在对附近民井的检测中却未见同样现象, 并且“沸井”及其周围没有发现人为有机污染, 因此, 其来源可能也是来自深部。资料显示, 赋存于深部地幔脱气带的非生物成因的无机烃已为很多学者研究过(Guo jingyi, 1996; Luo Qun, 2010), 并曾提出断裂控烃理论(Luo Qun, 2010)。因此, “沸井”气体中这种出现持续不间断的低含量总挥发性有机物(TVOC)的存在, 也可能反映了其来源于深部地幔。

“沸井”井水中轻稀土组分(Y、La、Ce、Pr、Nd、Sm 等)与民用井井水以及湖水相比, 含量分别高出

几百倍和几倍, 这是否也意味着高含量的轻稀土也是来自地球深部? 这似乎可以从“攀西裂谷带集中分布的牦牛坪、大陆槽及攀枝花等轻稀土矿床其轻稀土矿化与地幔过程之间存在着成因联系, 轻稀土矿床成矿流体稀土元素是深源的, 其成矿物质来自地幔(Niu Hecai et al., 2002, Tian Shihong et al., 2006)”等研究中获得相应的启示。

4.3 茅山断裂切割深度和第四纪活动性

茅山断裂(包括茅东和茅西断裂)是由一系列相互平行、呈阶梯状错落的正断层组成, 断裂总体呈北北东走向, 倾向南东。关于茅山断裂切割深度和活动性, 前大多数看法相一致, 沿断裂有始新世和中新世玄武岩断续分布(Jiang Gangren, 1989), 玄武岩内含有上地幔物质——二辉橄岩包体, 推测岩浆岩深度在 50km 以下, 反映了该断裂深度已达地幔(Gao Yanglin, 1993; Guo Yang et al., 1989; Hu Lianying et al., 2001; Zong Kaihong et al., 2016)。茅山断裂的主要活动年代为更新世晚期, 但在近百年来该断裂沿线发生过 6 级以上地震, 说明在第四纪晚期仍具有活动性(Ding Guoyu et al., 1979; Guo Yang et al., 1989; Zong Kaihong et al., 2016; Wu Zhonghai et al., 2016; Jiang Yuehua et al., 2017)。Ye Hong et al. (1979) 根据水准资料, 认为茅山山脉(最高海拔 410 m)与茅东盆地之间的相对垂直运动

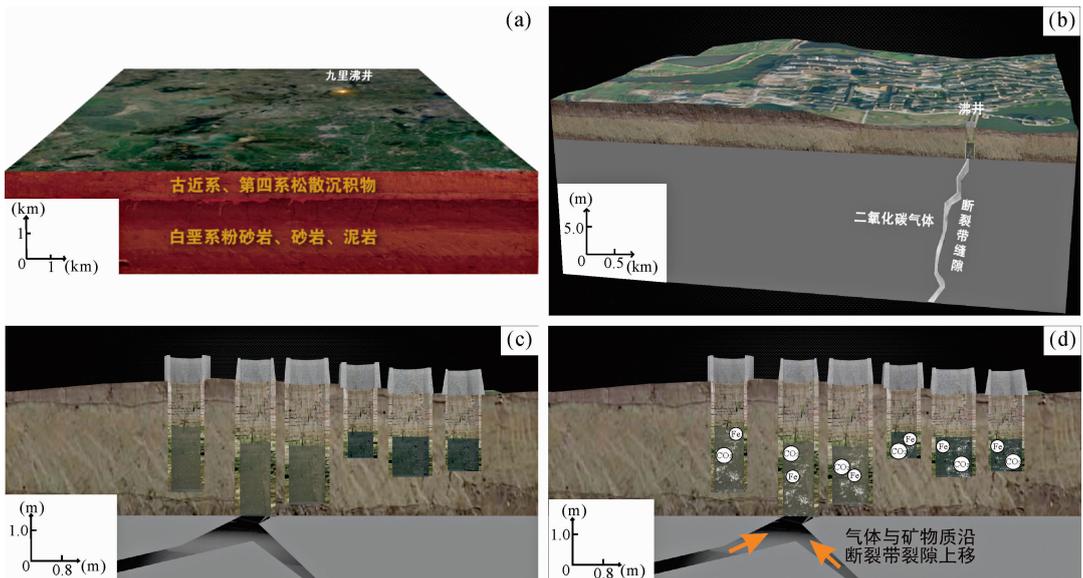


图 15 江苏丹阳“沸井”形成机理示意图

Fig. 15 Schematic diagram of formation mechanism of “boiling well” in Danyang City, Jiangsu Province

(a)—Stratigraphic structure (upper Quaternary and Paleogene, lower Cretaceous siltstone, sandstone and mudstone); (b)—forming

fault zones and fractures; (c)—a group of wells dug above the fault; (d)—gas and minerals move up the fault zone

(a)—Stratigraphic structure (upper Quaternary and Paleogene, lower Cretaceous siltstone, sandstone and mudstone); (b)—forming fault zones and fractures; (c)—a group of wells dug above the fault; (d)—gas and minerals move up the fault zone

速率约为每年 1~2 mm, Sun Shoucheng(1983)认为平均位移速率 2~2.5 mm/a. Wang Bin et al. (2008)认为茅山断裂带深度较大,是苏南地区一条重要的重力梯度带和航磁负异常带,断裂带在新生代以前或中生代期间主要表现为逆冲活动,第四纪以来表现为正断层活动。

4.4 “沸井”的成因机理

通过上述研究分析,笔者认为“沸井”及其附近湖、塘、沟沸腾冒气泡位置均分布于茅东活动断裂及其次级断裂带上,“沸井”沸腾出的 CO₂ 气体和少量氦气、持续性出现的低含量总挥发性有机物(TVOC)以及“沸井”地下水中富集的轻稀土可能均属于沿断裂带上升的地幔深部来源(图 15)。“沸井”不是温泉点,井水主要来自于潜水含水层,井水温度与当地民井温度相一致。大量气体的溢出导致“沸井”出现沸腾现象,“沸井”各不相同的味道是由于“沸井”井水中游离二氧化碳、重碳酸根离子、钙离子、溶解性总固体、总硬度、铁、锰等各化学组分的含量和 pH 值不同所致。“沸井”井水的清澈与浑浊主要与井水中二价铁含量的高低有关,三口二价铁含量高的井水由于暴露在空气中氧化为大量三价铁沉淀,是形成井水浑浊的主要原因。

5 结论

(1)在江苏省丹阳市延陵镇九里村存在超过 2000 年之久的“沸井”,其沸腾出的气体主要为 CO₂,此外,还存在着与其临近非“沸井”民用水井中没有的高异常氦气和总挥发性有机物(TVOC)气体组分。

(2)“沸井”水样中游离二氧化碳、钙、铁、锰、总溶解固体、总硬度、重碳酸根、稀土元素等含量均明显高于“沸井”周围其他民用水井。特别是“沸井”井水中轻稀土组分(Y、La、Ce、Pr、Nd、Sm 等)与民用水井相比,含量高几百倍。

(3)“沸井”不是温泉点,其成因完全不同于济南趵突泉和南京珍珠泉等泉水成因,“沸井”的存在与茅东活动断裂有着密切的联系,“沸井”地下深部存在玄武岩岩体和茅东活动断裂的次级断裂,“沸井”中沸腾的 CO₂、氦气和总挥发性有机物(TVOC)等气体组分和“沸井”水样中轻稀土组分均主要来源于地壳深部或上地幔,系沿断裂带上升而逸出地表。

(4)六口“沸井”井水味道各不相同,系因各“沸井”井水中游离二氧化碳、钙、铁、锰等含量及 pH 值不一所致。“沸井”井水“三清三浊”,主要与井水中

铁含量高低有关,铁含量高的三口井水因暴露于空气中氧化为三价铁沉淀,是井水浑浊的主要原因。

致谢:中国地质调查局水环部郝爱兵主任和林良俊处长等在工作中给予了指导和帮助,中国地质调查局南京地质调查中心刘红樱、常晓军、邢怀学、田福金、张宝松、赵牧华和华东有色金属地质勘查局杨贵芳、钱晓程、齐秋菊等参与了野外调查和部分图件编制工作,在此一并表示衷心感谢!

注释

- ① 江苏省地矿局地球物理化学探矿大队综合分队. 1991. 江苏省溧水地区 1:5 万重力测量.
- ② 江苏省地质调查研究院. 2001. 1:25 万常州市幅区域地质调查报告.

References

- Ballentine, C J, Schoell, M, Coleman D, Cain B A. 2000. Magmatic CO₂ in natural gases in the Permian basin, West Texas: Identifying the regional source and filling history. *Journal of Geochemical Exploration*, (69~70): 59~63.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Jiangsu Province. 1984. *Regional Geological Records of Jiangsu and Shanghai*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Chen Song, Gui Herong. 2017. Rare earth elements characteristics of groundwater in coalfield: a case from Xutuan coal mine in northern Anhui province. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 35(2): 294~300 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Youyi. 2000. Origins of carbon dioxide in petroliferous basins. *Advance in Earth Sciences*, 15(6): 684~686 (in Chinese with English abstract).
- Dai Chunshen, Sun Yan. 1995. Genetic characteristics and distribution of carbon dioxide gas reservoirs in eastern China. *Science in China (Series D)*, 25(7): 764~771 (in Chinese).
- Dai Jinxing, Dai Chunshen, Song Yan, Hong Feng. 1994. CO₂ gas reservoirs of inorganic origin and their characteristics in eastern China. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 8(4): 215~222 (in Chinese with English abstract).
- Ding Guoyu, Li Yongshan. 1979. Seismicity and the recent fracturing pattern of the earth crust in China. *Acta Geologica Sinica*, 53(1):22~34 (in Chinese with English abstract).
- Gao Qingwu, Shanguan Zhiguan, Hu Jinwen. 2003. Activities of volcanoes and faults in northern Hainan island-radioactive trace of radon and thorium gasses. *Seismology and Geology*, 25(2): 280~288 (in Chinese with English abstract).
- Gao Yanglin, Hu Lianying, Xu Xuecheng. 1993. The fault movement of the faults on the eastern side of Maoshan and its dynamic model related with Liaoyang earthquake. *Journal of Seismology Research*, 16(4): 401~409 (in Chinese with English abstract).
- Gao Zhonghe, Hu Lianying, Sun Shoucheng, Zheng Qianli. 1989. On the relations between deep-seated crustal structures and genesis of Liyang earthquakes in Maoshan area-a new ideas. *Journal of Seismology*, (2): 37~47 (in Chinese with English abstract).
- Guo Huaming, Zhang Bo, Li Yuan, Wei Liang, Zhang Yang. 2010. Concentrations and patterns of rare earth elements in high arsenic groundwaters from the Hetao Plain, Inner Mongolia. *Earth Science Frontiers*, 17(6):59~65 (in Chinese with English abstract).
- Guo jingyi. 1966. Study on the theory and application of abiogenic natural gas. *Advances in Earth Science*, 11(2): 224~224 (in Chinese).

- Guo Yang, Li Qitong. 1989. The study history on seismo-geology and its relation to the occurrence of earthquakes in Maoshan district. *Journal of Seismology*, 10(1): 1~5 (in Chinese with English abstract).
- Harper Jr C L, Jacobsen S B. 1996. Noble gases and Earth's accretion. *Science*, 273: 1814~1818.
- He Jiaxiong, Xia Bin, Liu Baoming, Zhang Shulin. 2005. Origin, migration and accumulation of CO₂ in east China and offshore shelf basins. *Petroleum Exploration and Development*, 32(4): 42~49 (in Chinese with English abstract).
- Hu Lianying, Xu Xuesi. 2001. An analysis of geological factors for the occurrence and gestation in Liyang earthquake. *Journal of Jiangsu Geology*, 25(1): 11~16 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Gangren. 1989. A exploration of recent tectonic stress field from remote sensing geology in Maoshan and adjacent region. *Journal of Seismology*, (2): 65~68 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Yuehua, Lin Liangjun, Chen Lide, Ni Huayong, Ge Weiya, Cheng Hangxin, Zhai Gangyi, Wang Guiling, Ban Yizhong, Li Yuan, Lei Mingtang, Tan Chengxuan, Su Jingwen, Zhou Quanping, Zhang Taili, Li Yun, Liu Hongying, Peng Ke, Wang Hanmei. 2017. Research on conditions of resources and environment and major geological problems in the Yangtze River Economic Zone. *Geology in China*, 44(6): 1045~1061 (in Chinese with English abstract).
- King C K, King B S, Evans W C, Zhang W. 1996. Spatial radon anomalies on active faults in California. *Applied Geochemistry*, 11(4): 497~510.
- Li Qitong, Zhu Qingliang, Hu Lianying. 1983. Review on geological and seismic studies in Maoshan, Jiangsu Province. *Journal of Seismology*, (2): 63~71 (in Chinese).
- Li Xianqi, Dai Jinxing. 1997. Geochemical characteristics and genetic analysis of CO₂ fields (pools) in east China. *Experimental Petroleum Geology*, 19(3): 215~221 (in Chinese with English abstract).
- Liao Fengrong, Wu Xiaoqi, Huang Shipeng. 2012. Geochemical characteristics of CO₂ gases in eastern China and the distribution patterns of their accumulations. *Acta Petrologica Sinica*, 28(3): 939~948 (in Chinese with English abstract).
- Lin Songhui. 2005. Fault and magmatic activity as control of mantle source CO₂ gas accumulation: a case study of Jiyang depression. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(4): 473~479 (in Chinese with English abstract).
- Liu Baoming, He Jiaxiong, Xia Bin, Zhang Shulin. 2004. Recent studying situation and progress tendency of carbon dioxide. *Natural Gas Geoscience*, 15(4): 412~417 (in Chinese with English abstract).
- Lombardi S, Reimer G M. 1990. Radon and helium in soil gases in the Phlegrean fields, central Italy. *Geophysical Research Letters*, 17(6): 849~852.
- Luo Qun. 2010. Concept, principle, model and significance of the fault controlling hydrocarbon theory. *Petroleum Exploration and Development*, 37(3): 316~324 (in Chinese with English abstract).
- National Seismological Bureau Crustal Stress Institute Information Room Compiled. 1988. *Modern Crustal Movements*. Beijing: Earthquake Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Niu Hecai, Shan Qing, Chen Xiaoming, Zhang Haixiang. 2002. The relation between light rare earth deposits and mantle processes in the Pangxi rift zone. *Science in China (Series D)*, 32 (Supplement): 33~40 (in Chinese).
- Sun Shoucheng. 1983. The average slip-rate along the southern segment of Maoshan fault zone. *Journal of Seismology Research*, 6(3): 349~352 (in Chinese with English abstract).
- Suzuki K, et al. 2000. Case studies of electrical and electromagnetic methods applied to mapping active faults beneath the thick Quaternary. *Engineering Geology*, 56(1): 29.
- Tao Mingxin, Xu Yongchang, Si Baoguang, Jiang Zhongtie, Sheng Ping, Li Xiaobin, Sun Mingliang. 2005. The characteristics of mantle degassing and deep geological structure in different types of fault zones in China. *Science in China, Series D*, 35(5): 441~451 (in Chinese).
- Tian Shihong, Ding Tiping, Yuan Zhongxin. 2006. Mantle fluids in the Maoniuping LREE deposit, Sichuan Province: Evidence of Pb-Sr-Nd, He-Ar isotopes and REE. *Acta Geologica Sinica*, 80(7): 1035~1044 (in Chinese with English abstract).
- Tu Guangzhi. 1996. The discussion on some CO₂ problems. *Earth Science Frontiers*, 33(3~4): 54~61 (in Chinese with English abstract).
- Wang Bin, Liang Xueping, Zhou Jian. 2008. Analysis on relationship between fault activity and earthquakes in Jiangsu province and its adjacent areas. *Plateau Earthquake Research*, 20(1): 38~43 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jie, Liu Wenhui, Qin Jianzhong, Zhang Jun. 2007. Mantle-derived gas reservoir and its forming rules in eastern China. *Natural Gas Geoscience*, 18(1): 19~26 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jie, Liu Wenhui, Qin Jianzhong, Zhang Jun, Shen Baojian. 2008. Reservoir forming mechanism and origin characteristics in Huangqiao carbon dioxide gas field, north Jiangsu Basin. *Natural Gas Geoscience*, 19(6): 826~833 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hualing, Geng Jie. 1991. Application of fault gas measurement to study active faults in plain area. In: Wang Chengming et al., eds. *Application of Fault Gas in Seismic Science*. Beijing: Seismological Press (in Chinese with English abstract).
- Wang Quliang, Wang Hengxi, Chen Yuanyuan, Song Chen, Yu Min. 2010. Application of soil radon measurement in urban fault surveying. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 30(1): 38~42 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhicheng. 2006. Preliminary application of soil radon measurement method in active fault survey in Haikou city. *South China Journal of Seismology*, 26(4): 61~66 (in Chinese with English abstract).
- Wu Zhonghai, Zhou Chunjing, Tan Chengxuan, Sun Yujun, Ma Xiaoxue. 2016. The active tectonics and regional crustal stability features in the area of Yangtze River economic belt. *Journal of Geomechanics*, 22(3): 379~411 (in Chinese with English abstract).
- Wycherley H, Fleet A, Shaw H. 1999. Some observations on the origins of large volumes of carbon dioxide accumulations in sedimentary basins. *Marine and Petroleum Geology*, 16(6): 489~494.
- Xie Xianjun, Wang Yanxin, Li Junxia, Su Chunli, Wu Ya, Yu Qian, Li Mengdi. 2012. Characteristics and implications of rare earth elements in high arsenic groundwater from the Datong basin. *Earth Sciences—Journal of China University of Geosciences*, 37(2): 281~290 (in Chinese with English abstract).
- Yang Guifang, Jiang Yuehua. 2012. REE characteristics and indicate function in groundwater of Jiaozishan landfill site environs of Nanjing, China. *Advanced Materials Research*, 518~523: 2712~2717.
- Ye Hong, Zhang Wenyou, Yu Zhishui, Xia Qing. 1980. On the source tectonics of 1979 Liyang earthquake of magnitude 6. *Seimology and Geology*, 2(4): 27~38 (in Chinese).
- Zhang Jiagui, Hu Haitao. 1999. Summarization on the researches of the releasing process of the mantle-originated CO₂ through deep faults. *Carsologica Sinica*, 18(1): 95~102 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Hongmei. 1996. Anlysis of the test for the fault product gas in Pinggang, Guangdong province. *Seimology and Geology*, 18(4): 414~416 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Yuenian, Wu Xingnian. 1994. *Geological Study of Carbon Dioxide*. Lanzhou: Lanzhou University Press (in Chinese with English abstract).

English abstract).

- Zhu Yuenian. 1997. Significance of studying CO₂ geology and the global distributive features of high CO₂ bearing gas. *Advance in Earth Sciences*, 12(1): 26~31 (in Chinese with English abstract).
- Zong Kaihong, Zong Wen, Kang Congxuan, Bai Shibiao. 2016. Research on the Major active faults in Zhenjiang, Jiangsu and their late Quaternary activities. *Journal of Geomechanics*, 22(3): 439~453 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 陈松, 桂和荣. 2017. 煤矿区地下水稀土元素地球化学特征: 以皖北许疃矿为例. *中国稀土学报*, 35(2): 294~300.
- 程有义. 2000. 含油气盆地二氧化碳成因研究. *地球科学进展*, 15(6): 684~686.
- 戴春森, 孙岩. 1995. 中国东部二氧化碳气藏成因特点及分布规律. *中国科学: D辑*, 25(7): 764~771.
- 戴金星, 戴春森, 宋岩, 洪峰. 1994. 中国东部无机成因的 CO₂ 气藏及其特征. *中国海上油气(地质)*, 8(4): 215~222.
- 丁国瑜, 李永善. 1979. 我国地震活动与地壳现代破裂网格. *地质学报*, 53(1): 22~34.
- 高清武, 上官志冠, 胡金文. 2003. 琼北火山及断裂的活动性——氦、钍气体放射性示踪. *地震地质*, 25(2): 280~288.
- 国家地震局地壳应力研究所情报资料室编译. 1988. 现代地壳运动. 北京: 地震出版社.
- 郭华明, 张波, 李媛, 魏亮, 张扬. 2010. 内蒙古河套平原高碑地下水中稀土元素含量及分异特征. *地学前缘*, 17(6): 59~65.
- 郭进仪. 1996. 非生物成因天然气理论和应用研究. *地球科学进展*, 11(2): 224~224.
- 郭扬, 李起彤. 1989. 茅山地区地震地质工作及其与地震关系的研究史略(代前言). *地震学刊*, 10(1): 1~5.
- 高祥林, 胡连英, 徐学思, 孙寿成. 1993. 茅山东侧断裂的断层运动及其与溧阳地震关系的动力学模型. *地震研究*, 16(4): 401~409.
- 高中和, 胡连英, 孙寿成, 郑千里. 1989. 茅山地区地壳深部构造与溧阳地震关系新见. *地震学刊*, (2): 37~47.
- 何家雄, 夏斌, 刘宝明, 张树. 2005. 中国东部及近海陆架盆地 CO₂ 成因及运聚规律与控制因素研究. *石油勘探与开发*, 32(4): 42~49.
- 胡连英, 徐学思. 2001. 江苏溧阳地震孕育和发生的地质因素剖析. *江苏地质*, 25(1): 11~16.
- 姜刚仁. 1989. 江苏地区地表早第三纪玄武岩之探索. *地震学刊*, (2): 65~68.
- 江苏地质矿产局. 1984. 江苏及上海市区域地质志. 北京: 地质出版社: 1~857.
- 姜月华, 林良俊, 陈立德, 倪化勇, 葛伟亚, 成杭新, 翟刚毅, 王贵玲, 班宜忠, 李媛, 雷明堂, 谭成轩, 苏晶文, 周权平, 张泰丽, 李云, 刘红樱, 彭柯, 王寒梅. 2017. 长江经济带资源环境条件与重大地质问题. *中国地质*, 44(6): 1045~1061.
- 李起彤, 竺清良, 胡连英. 1983. 江苏茅山地质和地震研究述评. *地震学刊*, (2): 63~71.
- 李先奇, 戴金星. 1997. 中国东部 CO₂ 气田(藏)的地化特征及成因分析. *石油实验地质*, 19(3): 215~221.

- 廖凤蓉, 吴小奇, 黄士鹏. 2012. 中国东部 CO₂ 气地球化学特征及其气藏分布. *岩石学报*, 28(3): 939~948.
- 林松辉. 2005. 断裂及岩浆活动对幔源 CO₂ 气成藏的作用——以济阳拗陷为例. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(4): 473~479.
- 刘宝明, 何家雄, 夏斌, 张树林. 2004. 国内外 CO₂ 研究现状及发展趋势. *天然气地球科学*, 15(4): 412~417.
- 罗群. 2010. 断裂控烃理论的概念、原理、模式与意义. *石油勘探与开发*, 37(3): 316~324.
- 牛贺才, 单强, 陈小明, 张海祥. 2002. 攀西裂谷带轻稀土矿床与地幔过程的关系. *中国科学(D辑)*, 32(增刊): 33~40.
- 孙寿成. 1983. 茅山断裂带南段平均位移动速率. *地震研究*, 6(3): 349~352.
- 陶明信, 徐永昌, 史宝光, 蒋忠惕, 沈平, 李晓斌, 孙明良. 2005. 中国不同类型断裂带的地幔脱气与深部地质构造特征. *中国科学: D辑*, 35(5): 441~451.
- 田世洪, 丁梯平, 袁忠信. 2006. 四川牦牛坪轻稀土矿床地幔流体特征——铅铋钨和氦氩同位素及稀土元素证据. *地质学报*, 80(7): 1035~1044.
- 涂光炽. 1996. 关于 CO₂ 若干问题的讨论. *地学前缘*, 33(3~4): 54~61.
- 王斌, 梁雪萍, 周健. 2008. 江苏及其周边地区断裂活动性与地震关系的分析. *高原地震*, 20(1): 38~43.
- 王杰, 刘文汇, 秦建中, 张隽. 2007. 中国东部幔源气藏存在的现实性与聚集成藏的规律性. *天然气地球科学*, 18(1): 19~26.
- 王杰, 刘文汇, 秦建中, 张隽, 申宝剑. 2008. 苏北盆地黄桥 CO₂ 气田成因特征及成藏机制. *天然气地球科学*, 19(6): 826~833.
- 王华林, 耿杰. 1991. 断层气测量在平原地区活断层研究中的应用. 见: 汪成民等著. 断层气在地震科学中的应用. 北京: 地震出版社.
- 王秋良, 王恒希, 陈圆圆, 宋琛, 余敏. 2010. 土氦测量在城市断层探测中的应用. *大地测量与地球动力学*, 30(1): 38~42.
- 王志成. 2006. 土氦测量在海口市活动断层探测中的初步应用. *华南地震*, 26(4): 61~66.
- 吴中海, 周春景, 谭成轩, 孙玉军, 马晓雪. 2016. 长江经济带地区活动构造与区域地壳稳定性基本特征. *地质力学学报*, 22(3): 379~411.
- 谢先军, 王焰新, 李俊霞, 苏春利, 吴亚, 余倩, 李梦娣. 2012. 大同盆地高碑地下水稀土元素特征及其指示意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 37(2): 281~290.
- 叶洪, 张文郁, 于之水, 夏勤. 1980. 1979年溧阳6.0级地震震源构造研究. *地震地质*, 2(4): 27~38.
- 张加桂, 胡海涛. 1999. 深大断裂对幔源 CO₂ 释放作用研究综述. *中国岩溶*, 18(1): 95~102.
- 赵红梅. 1996. 广东平冈断裂断层气测试结果分析. *地震地质*, 18(4): 414~416.
- 朱岳年, 吴新年. 1994. 二氧化碳地质研究. 兰州: 兰州大学出版社.
- 朱岳年. 1997. 二氧化碳地质研究的意义及全球高含二氧化碳天然气的分布特点. *地球科学进展*, 12(1): 26~31.
- 宗开红, 宗雯, 康从轩, 白世彪. 2016. 江苏镇江地区主要活动断裂及其晚第四纪活动性研究. *地质力学学报*, 22(3): 439~453.

Geological origin and formation mechanism of the millennium “boiling well” in Danyang, Jiangsu Province

JIANG Yuehua* , ZHOU Quanping, LI Yun, SU Jingwen, ZHANG Taili, JIA Junyuan,
GE Weiya, YANG Hui, LIU Ling, YANG Guoqiang, JING Yang
Nanjing Geological Survey Center, China Geological Survey, Nanjing, 210016

** Corresponding author : 316664105@qq.com*

Abstract

By means of inorganic and organic chemical analysis, controlled source audio magnetotelluric sounding, high density resistivity and radon gas measurements, this study carried out detailed geological investigation for six ancient wells in Jiuli village, Danyang City, Jiangsu Province. The six wells with interval spaces ranging from 30 to 200 cm have been boiling for more than 2000 years. The study found that (1) boiling gas in “boiling well” is mainly CO₂, accompanied by a trace amount of radon gas and total volatile organic compounds (TVOC). All of the gas components in the “boiling well” have not been detected in nearby civil wells. (2) The contents of free carbon dioxide, calcium, iron, manganese, total dissolved solids, total hardness, bicarbonate, rare earth element etc. in “boiling well” water samples are significantly higher than that of other civil wells and lake water around the boiling wells. (3) The temperature of the well water in “boiling well” (about 19 degrees Celsius in summer) is basically the same as that of other civilian wells, with no anomaly observed. (4) The secondary faults of Maodong fault and basalt rock mass occur beneath the boiling well, and the concentrations of radon escaped to surface from the fault are significantly higher than that in other areas. (5) The existence of “boiling well” is closely related to the Maodong active fault. The boiling gas in “boiling well” comes mainly from deep crust or upper mantle, with the gas rising up along the fault zone to the earth surface. (6) The water in the six “boiling wells” tastes different because of the various contents of free carbon dioxide, calcium, iron, manganese and pH values. “Three clear three turbidity” features of the “boiling well” well water are closely related to iron content in wells. Three wells with high Fe contents are characteristic of turbid water and this may attribute to precipitation of ferric iron due to oxidation when water is exposed to air.

Key words: “boiling well”; ancient well; Maodong fault; millennium mystery; Jiuli village

《地质学报》(中文版)征稿简则

《地质学报》是中国地质学会主办的地质科学学术刊物。《地质学报》反映地质科学各分支学科及边缘学科中最新、最高水平的基础理论研究和基本地质问题研究成果。《地质学报》(中文版)和《地质学报》(英文版)分别独立刊载论文。

一、《地质学报》编辑部与作者约定如下:

1. 作者应保证稿件不一稿两投,并对所投稿件拥有无可争议的著作权。

2. 所有文章均需通过网上办公系统投稿,《地质学报》中文版请投 <http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>;《地质学报》英文版: <http://www.geojournals.cn/dzxben/ch/index.aspx>;《地质论评》: <http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>。

网上投稿,请将文、图、表放入同一个 Microsoft Word 文件中(请作者自留原始文件,以备修改,详细投稿办法见网站说明)。投稿被接收与否以编辑部网上收妥回信为准。

3. 不得将投向本编辑部的稿件同时投至其他刊物,否则视为一稿两投。

4. 编辑部承诺一般在 90 日内给出刊用与否的通知。作者在 90 日内,不应将稿件另投他刊。

5. 对决定录用的稿件,作者应根据编辑部提供的修改意见修改后,向编辑部提交论文 Word 文档、清绘好的 CorelDRAW 图件。

6. 稿件文责自负,若做实质性修改,须征得作者同意。

7. 稿件刊出后,将按规定支付稿酬。

二、对投稿内容的要求:

每篇文章需包含下列要素:文章题目(不多于 25 个汉字)、作者、作者单位、内容提要(不少于 400 个汉字)、关键词(5 个左右)、引言(本刊不标“引言”字样,但必须有引言节)、正文、图表、致谢、参考文献、注释、英文摘要(同中文摘要)、作者简介。重要内容说明如下:

1. **正文:**长度不限。应有地质背景、研究方法、研究结果、讨论、结论等几部分。

投向《地质学报》(英文版)的稿件,行文必须规范、通顺,请附相应的中文稿,以备准确理解原文含意。

2. **图件:**① 凡涉及国界的图件必须绘制在地图出版社公开出版的最新地理底图上。② 图件请用 CorelDraw X4 版本格式最好(且不是导入的)。若为其他软件编成的图件,需提供 600 dpi 的 TIF 格式的文件。彩色照片(包括图版)需提供 600 dpi 以上的 JPG 格式文件。③ 图件大小:排半栏时:图宽不超过 80mm,最高

245mm;排通栏:图宽不超过 168mm,最高 245mm;整版卧排:图宽不超过 235mm,最高 170mm(以上高度均含中英文图名和说明)。中文字体请用宋体,英文和数字请用 Time New Roman,字号为 6~8p 大小。④ 图件不同区域可用通用地质花纹(或符号)区分,除照片外,一般不用灰度图。若必须用灰度图表示不同区域时,灰阶应尽量少,阶差应尽量地大。⑤ 图件若为彩色照片者,可选择集中制成图件。⑥ 图名、图说明、图例注释都应有相应的英文说明。

3. **参考文献:**本刊采用著者-年制,正文中用圆括号列出第一作者和年代,均用英文名或华人西文名,例:“(Li Siguang, 1945)”、“(Huang Jiqing, 1978, 1984; Huang Jiqing et al., 1983; Смирнов, 1986; Smith et al., 1990, 1992, 1996; Иванов и др., 1999)”,“Song Biao et al. (2002)指出采样方法……”(同时列出多篇文献时,次序按年代先后)。

中文文献均需提供英译,所有英文文献均放在“References”标题之下。英文文献按“第一作者字母序十年代”排列,其后其他文种放在“参考文献标题之下,按中文、日文、西文、俄文、其他文排列。中文文献按“第一作者姓名汉语拼音字母十年代”先后排列。其他文均按各自第一作者姓名字母顺序排列。若是投《地质学报(英文版)》无须考虑上述情况。

文章请列出全部作者。但专著可按原书封面样式给出,其中的论文写“见:XXX 主编。”项时,指明主编一人即可(“见:XXX 等主编。”)。每一条文献的列出格式请参照我刊 2016 年以来的文章。书籍的引用,分两种情况:a、书籍本身有相应英文名的,引用按正常要求;b、书籍本身没有相应英文名的,尽量不引用此文献,若必须引用,则仅在中文参考文献中列出,正文中的出现用中文引用。

4. **注释:**引用非公开出版物时在文后单列注释一栏,格式与参考文献相同。参考文献及注释详细格式可见《地质学报》修改注意事项。

5. **英文摘要:**在《地质学报》中文版和《地质论评》上发表的论文必须提交英文摘要,包括题名、作者、作者单位、内容提要和关键词。作者和作者单位均应为全名,内容提要要与相应中文提要一致,最好更为详细。

6. **作者简介:**主要介绍作者的学术经历,自 1998 年起增加了电话、电子信箱、传真等,便于读者与作者直接联系。