

五大连池尾山地区存在干热岩资源的可能性探讨

李胜涛, 张森琦, 贾小丰, 田蒲源, 金晓琳, 张超

中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 保定 071050

摘要 干热岩被视为未来的清洁能源, 是地热资源的重要组成部分, 极具研究价值和开发前景。中国现阶段干热岩调查研究应遵循“面上开展, 点上突破”的原则。基于“点上突破”原则, 本文选取中国最新的火山群——五大连池火山群开展前期研究, 通过搜集分析区域地质条件、岩石地球化学、深部 CO₂ 气体, 区域地球物理资料, 探讨了五大连池尾山地区存在干热岩的可能性。研究表明, 五大连池火山属于非深源火山, 具备存在干热岩的可能, 热源机制属于岩浆余热型, 第四纪火山岩浆囊所处的深度上限值为 3.3~3.4 km。区内深部 CO₂ 气体来源于地幔岩浆冷却成岩过程中的脱排气作用, 是幔源岩浆囊中岩浆结晶分异的结果。W8 勘探孔及附近供水井发现高浓度 CO₂ 的事实表明, 在尾山与五大连池农场七分场之间的地下可能存在正在冷却成岩的岩浆囊。

关键词 五大连池; 尾山; 第四纪火山; 地热; 干热岩; 岩浆囊

干热岩是指埋藏于距地表 2~6 km 深处、温度为 150~650℃、无裂隙、没有水或蒸汽的热岩体。因其具有的“资源量巨大、地理分布广、零污染排放、安全性好、热能连续性好、利用效率高和利用成本低”等优势, 受到世界各国的广泛关注。1973 年以来, 发达国家如美国、日本、法国、德国和澳大利亚等投入巨资开展研究, 还建设了一批试验性干热岩/增强型地热系统, 甚至将其纳入国家开发计划^[1]。

对于能源消耗结构长期以来“以煤为主”的中国而言, 在面临资源枯竭、经济发展和环境保护的三重压力下, 寻找并开发利用新型清洁能源是关系国计民生和社会可持续发展的紧迫任务, 具有突出的战略意义。

21 世纪以来, 中国已经开展了一定的干热岩勘查研究, 并取得了初步成效。具有代表性的有汪集暘等估算了中国 0~10 km 干热岩资源潜力^[2-3]。2014 年, 青海省钻探获取了 181℃ 干热岩。现阶段, 由于全国性干热岩调查评价地质基础薄弱、深部地质构造和热源机制不清等问题存在, “面上开展, 点上突破”是中国干热岩资源调查研究的必要途径。

本文本着“点上突破”的目的, 选取中国最新的火山群——五大连池火山群开展研究, 通过搜集分析区域地质条件、岩石地球化学、深部气体, 区域地球物理资料, 探讨了五大连池尾山地区存在干热岩的可能性, 为下一步开展更详细的勘查研究工作奠定了基础。

1 研究区概况

五大连池地区位于黑龙江省中北部, 地处松嫩平原北东缘。五大连池火山区由 14 座新老期火山组成, 是中国著名的第四纪火山群, 1996 年被评为“中国矿泉水之乡”, 2004 年被评为世界地质公园。尾山位于火山群最北端(图 1)。

尾山地区属寒温带大陆季风气候, 多年平均气温在 -0.4℃, 多年平均降水量 467.8 mm, 多年平均蒸发量 1253 mm。全年多风, 年平均风速 2.1~2.4 m/s。冻结期为年际间 10 月—翌年 4 月, 最大季节性冻土深度 2.30 m, 平均无霜期 136 天。

尾山为单期火山, 火山锥体与熔岩台地发育较为典型, 锥体位于中心, 熔岩台地环带状环绕四周, 东缘以张通世沟环状构造裂隙为界, 熔岩南界抵达三池子, 面积约 112.0 km²(图 2)。火山锥海拔 516.4 m, 火山底座直径 750 m, 火口内径 325 m, 比高 89 m, 火口深 56 m。尾山火口呈卵形孤山, 山顶呈平顶状, 火山锥坡角 25°~30°。平面上, 尾山呈穹窿状, 长轴方向北西—南东向, 轴长约 1300 m。尾山表面有羊尾沟发育, 北西部及东部发育有石龙熔岩, 外围是宽广的熔岩盾形台地^[4-5]。

尾山地区地表主要出露尾山玄武岩(βQ_2w)、中—晚更新世哈尔滨组(Q_{2-3h})、早全新世高漫滩堆积层(Q_4^1)和晚全新世低漫滩堆积层(Q_4^2)。尾山西部和北东部分别出露晚三叠世

收稿日期: 2015-05-16; 修回日期: 2015-09-15

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(12120114025001, 12120115046201)

作者简介: 李胜涛, 工程师, 研究方向为水工环地质调查与热储工程, 电子信箱: lishengtao@chegs.cn; 张森琦(通信作者), 教授级高级工程师, 研究方向为地下空间资源开发利用与保护, 电子信箱: zhangsenqi@chegs.cn

引用格式: 李胜涛, 张森琦, 贾小丰, 等. 五大连池尾山地区存在干热岩资源的可能性探讨[J]. 科技导报, 2016, 34(5): 67-73; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.05.007

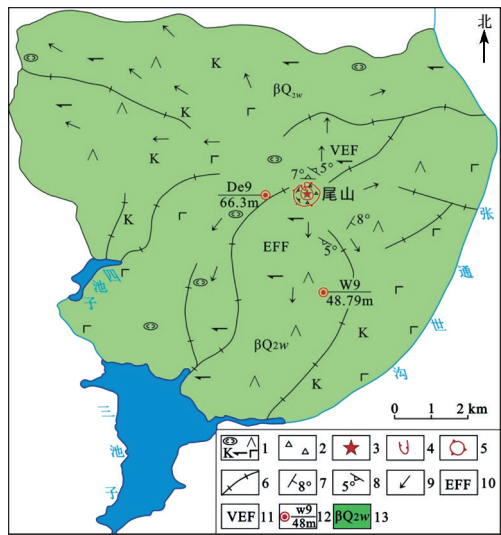
五池子序列九曲湾单元(T_3Jq)和小洪山单元(T_3Xh)侵入体^[3]。

因火山熔岩对断裂构造的覆盖与熔岩侵入愈合作用,尾山地区地表仅发育一些规模小、延伸短的裂隙级别的高角度正断层和走滑断层。据推测,尾山位于北东向与北西向断裂的交汇部位,且过尾山的北西向断裂为推测隐伏南西倾张性



图1 五大连池地区火山口位置示意

Fig. 1 Distribution map of volcanoes in Wudalianchi area

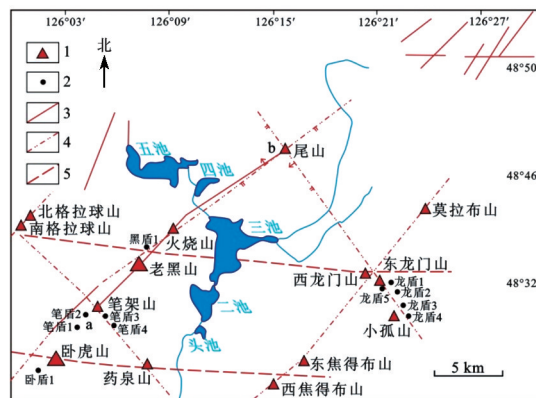


1—气孔状辉橄至长玄武岩;2—浮岩质砾块;3—火山口;4—溢出通道;5—火山锥;6—放射状火山断裂;7—地层产状;8—岩流产状;9—岩流方向;10—溢流相;11—爆发空落相;12—钻孔位置、编号及玄武岩厚度;13—中更新世尾山玄武岩

图2 中更新世尾山火山构造

Fig. 2 Volcanic structure of Weishan in the mid Pleistocene

断裂;北东向断裂为推测隐伏南东倾张扭性断裂,为主控断裂(图3)^[6]。



1—火山锥;2—盾型火山;3—实测断裂;4—推测断裂;5—推测E-W向断层

图3 五大连池地区火山—断裂构造分布

Fig. 3 Distribution map of volcanoes and faults in Wudalianchi area

尾山地区地下水的形成与分布受控于地形地貌、气象水文、地质构造、地层岩性等因素。主要发育第四系松散堆积孔隙潜水含水岩组、第四系玄武岩孔隙裂隙潜水含水岩组、晚白垩系嫩江组砂岩砾岩孔隙裂隙承压水含水岩组、新元古代一早寒武世北宽河组变质岩裂隙承压水含水岩组以及花岗岩裂隙承压含水体系^[3]。

2 区域地热地质条件与热源机制分析

从区域地质条件上看,五大连池地区位于小古里河—科洛—五大连池—二克山新生代富钾火山岩带内,属陆内新生代火山群^[7-10]。火山活动从2.07 Ma一直持续到公元1721年。第四纪以来,岩石圈处于引张减薄状态,导致幔源岩浆部分熔融,形成富钾岩浆,导致五大连池火山群的形成。岩浆演化趋势表明,五大连池裂谷带将持续演化而不会夭折^[9]。因此,五大连池地区具备存在残留岩浆囊或正在冷却中的岩浆囊的可能,热源机制属岩浆余热型。基于前述,建立的五大连池地区干热岩热源概念模型见图4。现有技术、经济条件下,钻探可及深度内是否存在正在冷却中的岩浆囊决定了该地区干热岩是否存在。

3 火山岩岩石地球化学提供的热源证据

夏林圻等^[11]对五大连池地区岩浆包裹体及其主矿物橄榄石的化学成分开展了火山岩浆演化温压历史的重溯研究。主要样品包括药泉山中更新世早期富钾玄武质浮岩、笔架山中更新世晚期气孔状富钾玄武岩全新世早期石龙熔岩流玻质外壳、1719—1721年石龙熔岩流玻质外壳等。

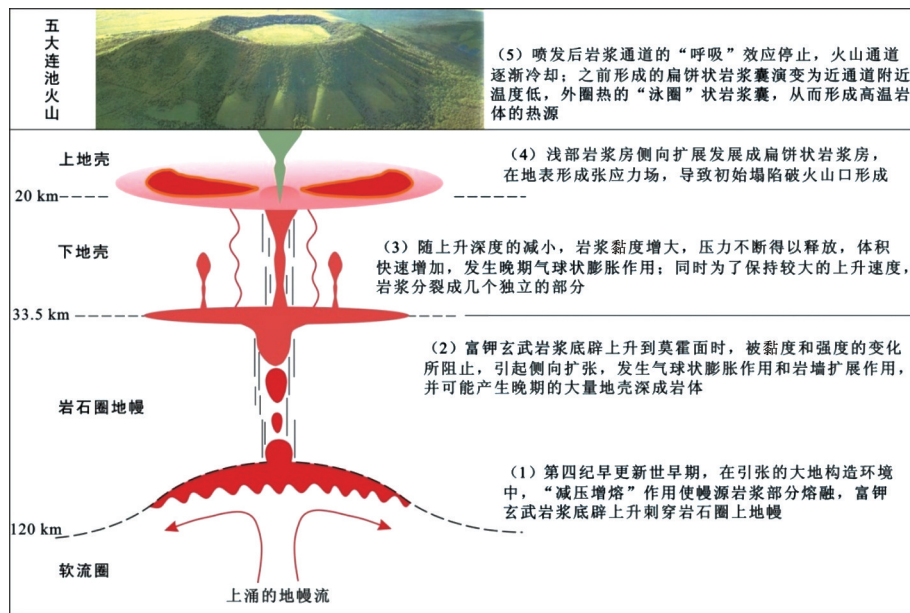


图4 五大连池地区干热岩系统构造概念模型

Fig. 4 Conceptual model of HDR geothermal system in Wudalianchi area

研究表明,五大连池地区火山岩浆的结晶作用发生于地表—浅部低压 (< 100 MPa)环境。若根据最晚(1719—1721年)喷溢的熔岩流中首晶相橄榄石结晶时的压力值91~96 MPa推断,五大连池地区第四纪火山岩浆囊所处深度的上限值为3.3~3.4 km。这个深度具备了钻探可达条件。

4 区域地球物理勘查提供的热源线索

五大连池地区火山岩浆囊探测具有代表性的工作有:詹艳等^[12,13]开展的大地电磁测深(MT)和张风雪等^[14]实施的天然地震台阵监测等工作。

4.1 五大连池地区火山岩浆囊探测提供的区域热岩线索

1997年,中国地震局地质研究所与黑龙江省地震局对五大连池火山群开展了7条大地电磁测深剖面探测(图5^[12])。2006年,对数据进行了重新处理解译。通过对EW1、EW2、EW3这三条剖面非线性共轭梯度方法反演得到的二维电性结构,进一步绘制出五大连池火山群地下结构示意图(图6)^[12,13]。

穿过老黑山的EW2剖面以老黑山为中心,该段在几百米深度到4 km深度(即铆钉的帽部, A1),电阻率值达几kΩ·m;在深度4~8 km,铆钉状块体仅有铆钉的主体为高阻,电阻率值约为1000 Ω·m,在铆钉主体东、西两侧出现电阻率约为1 Ω·m的低阻区块(B和C),低阻区块B的深度较C稍深;在8~12 km,铆钉主体(A2)的电阻率值从上千Ω·m逐渐减小到几百Ω·m。在12~20 km深度范围内,铆钉的主体不再是高阻,反而其电阻率值减小且低于其东、西两侧区域,并形成电阻率约为1 Ω·m的低电阻圈闭(A3);在20~30 km的深度范围,

电性结构等值线仍然显示铆钉的主体下方(A4)有向深处延伸的趋势^[13]。推测这个低阻体可能是正在冷却中的岩浆囊,也有可能是上次火山喷发的岩浆固结造成原始的岩浆通道阻塞,下部岩浆在寻找到新的上涌通道前聚集形成的新岩浆囊^[13]。

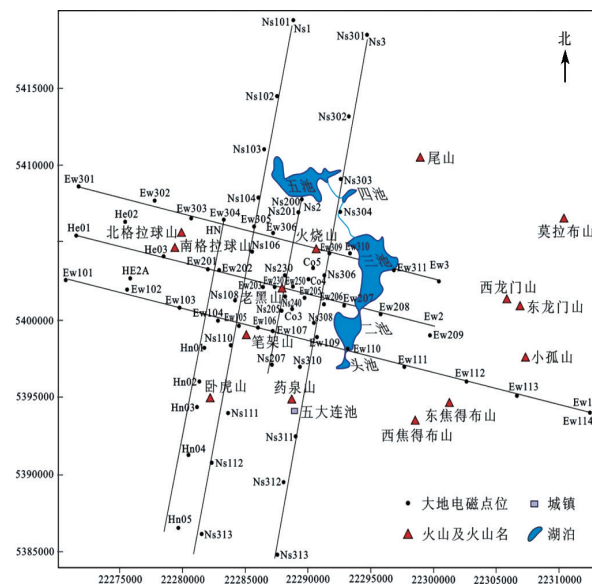


图5 五大连池火山群大地电磁测深测线分布

Fig. 5 Exploration lines using MT method in Wudalianchi area

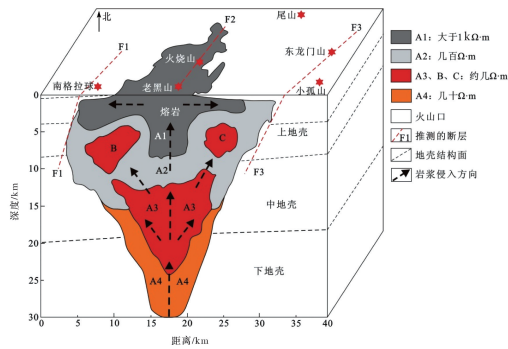


图6 根据二维电性结构推测的五大连池火山群地下结构示意图
Fig. 6 Underground tentative structure of volcanic area through 2D electrical structure

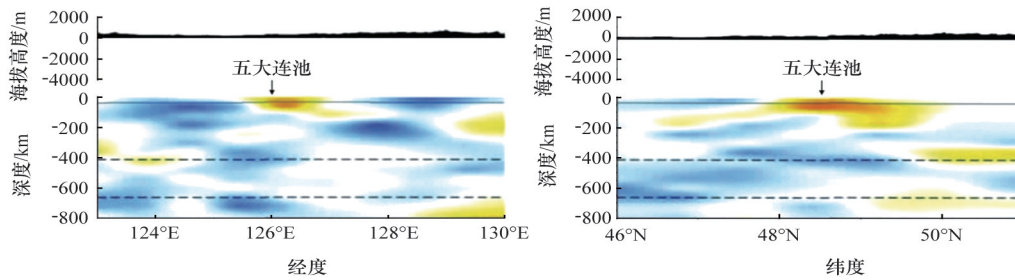


图7 层析成像结果垂直剖面
Fig. 7 Vertical profile map of teleseism tomography

5 幔源CO₂提供的热源证据及其地热学意义

五大连池地区地表地热显示微弱,以往及2014年度野外调查均表明,本区无明显的地热异常现象。井、泉水温度为2~6℃,“冷泉现象”明显^[4,5]。2014年浅部测温显示,靠近尾山火山锥温度均有微弱的增温趋势,但受气温、下垫面结构、植被盖度、土壤结构和地下水活动等因素影响明显。如何甄别深部地热在地表的显示标志是本研究的关键。

5.1 五大连池地区的气泉与钻孔中的CO₂现象

五大连池地区发育北饮泉、南饮泉、桦林沸泉、翻花泉等气泉,泉水气体成分以CO₂为主,占气体含量的80%以上,其次是N₂、O₂,还有微量气体He、Ar等,为典型的火山活动晚期或休眠期的气体组成特征^[15-17](表1^[17])。

除气泉外,在一些水文地质钻孔中也发现了CO₂气体现象。据《五大连池地区矿水水文地质普查报告》,CO₂气体含量随着深度的增加,地下水中的CO₂含量逐渐增多,在花岗岩长岩侵入接触面附近,地下水中的CO₂含量最高,穿过接触带,CO₂气体含量逐渐降低;以本区W29井为例,该井深度447 m,CO₂浓度随深度变小,含水量也减小,但447 m以下仍有CO₂气体溢出。在水平方向,上CO₂气体含量随着离火山区断裂构造距离增大逐渐降低。据调查访问,尾山南部的五大连池农场七分场W8号勘探井,1974年凿成后曾发生过CO₂

4.2 宽频带层析成像提供的区域热源线索

张风雪等^[14]利用中国东北流动和固定台网的234个宽频带地震仪记录的远震波形数据,采用波形相关方法拾取了57251个有效相对走时残差数据,进一步采用远震层析成像方法反演获取了研究区深达800 km的P波速度结构(图7)。图7上部为地形,下部为速度异常图,中间为主要地质构造的标识,虚线是410 km和660 km的间断面。

结果显示,五大连池下方发育一个低速异常,这个低速异常并没有延伸到较深的深度,显著的低速异常止于约200 km的深度上,表明五大连池火山区的热源较浅,或者说它是一个非深源成因的火山^[14]。

井喷现象。CO₂气体是本区变化最大的气体,不论是在水平还是垂直方向。

5.2 CO₂成因分析

根据CO₂形成的地质条件及地球化学特征分类,CO₂主要有火山幔源型、壳源型及壳幔混合型三大类。其中,火山幔源型可进一步分为火山岩浆脱气型和幔源原始气型。壳源型则可分为壳源有机型和壳源无机型,壳源有机型是指由有机质热降解及高温裂解作用或微生物氧化作用所形成的CO₂;壳源无机型即碳酸盐岩热变质及热分解、碎屑岩系中钙质胶结物及分散的碳酸盐矿物热分解和低温水解作用所形成。壳幔混合型则为火山幔源型与壳源型两者的过渡混合成因类型。必须强调指出的是,地质条件下CO₂往往为多源混合成因^[18]。

根据氦同位素比值(³He/⁴He)及R/Ra值和δ¹³C_{CO₂}等参数综合判识与确定CO₂成因的方法属于较成熟的CO₂成因判识方法^[18]。本文采用的主要判识准则为:1)以天然气中CO₂含量作为其确定划分CO₂类型的基本参数和参考依据;2)以CO₂碳同位素指标作为其判识划分成因类型的主要参数和重要依据;3)以其伴生稀有气体氦同位素比值(³He/⁴He)及R/Ra值作为进一步判识划分火山幔源型成因与壳源型岩石化学成因及壳幔混合型成因CO₂的最直接、最重要的指标和参

表1 五大连池火山区气体组分(体积分数)及同位素组成
Table 1 Volume ratio and isotope composition of gas in Wudalianchi area

样品号	采样位置	CO ₂ /%	N ₂ /%	Ar/%	O ₂ /%	He /10 ⁻⁶	CH ₄ /10 ⁻⁶	³ He/ ⁴ He /10 ⁻⁶	R/Ra	⁴ He/ ²⁰ Ne	O ₂ /Ar	N ₂ /O ₂	N ₂ /Ar	δD (SMOW, %)	δ ¹⁸ O (SMOW, %)	δ ¹³ C _{CO₂} (PDB, %)
1	北饮泉	98.47	1.47	0.044	—	0.7	180	2.17±0.06 1.647±0.310*	1.18*	0.85	—	—	33.4	-8.84	-1.22	-0.707* -0.67
2	地震台 观测井	96.64	2.76	0.05	0.53	110	74	3.87±0.10		1011	10.6	5.2	55.2	-8.72	-1.25	-0.74** -0.77
3	二龙眼	13.37	67.51	1.53	17.59	5	4	1.71±0.05 3.726±0.439*	2.66*	1.09	11.5	3.8	44.1	-8.78	-1.21	-0.93** -1.671*
4	桦林 沸泉	85	11.98	0.16	2.84	150	29	4.55±0.12 4.17±0.12* 3.641±0.091*	3.06*	103	17.8	4.2	74.9	-7.79	-1	-0.46** -0.526* -0.55
5	翻花泉	84.51	10.65	0.24	4.55	380	150	4.53±0.12 4.43±0.12* 4.057±0.295*	2.90*	207	19	2.3	44.4			-0.539* -0.42
6	老黑山	0.51	77.87	0.93	20.69	4	1	1.48±0.04		0.35	22.2	3.8	83.7			-0.96
7	南饮泉	97.8	2.13	0.066	0.002 7	8	47	4.52±0.12 3.904±0.370*	2.79*	55.4	0.03	788.9	32.3	-9.01	-1.22	-0.51** -0.687* -0.695*
8	南洗泉	81.98*	16.76*	0.4*	0.7*	3.5*		4.624±0.298 4.624±0.298*	3.30*							-0.824*
9	对流层 空气	0.0374	78.08	0.93	20.95	5.24	1.4	1.4		0.32	22.43	3.73	83.96			

注:4、5、6号样品为游离气;标※者据上官志冠(1995);标◆者据戴金星(1992);标★者据钱丽萍等(2007)。

数;4) 根据世界范围内大量样品分析数据的统计规律及样品所处不同母源物质环境与油气地质条件,参照国内外有关CO₂成因判识划分的主要参数及基本原则与划分判识方案,综合确定CO₂成因类型判识划分。

具体原则及分类标准是:对于有机与无机成因CO₂大类的判识划分,以CO₂碳同位素值为主要分类依据,即无机成因CO₂,其δ¹³C_{CO₂}均大于-8%,天然气中CO₂含量一般大于10%;有机成因CO₂,其δ¹³C_{CO₂}均小于-1%,天然气中CO₂含量一般小于8%。对于如何区分和鉴别其有机与无机成因CO₂的母源物质类型及地质条件,以及在地球圈层中的分布位置,则应以其伴生的稀有气体氦同位素比值(³He/⁴He)及R/Ra值,作为判识划分CO₂成因及分布和来源的主要依据和准则,并作出如下明确界定。即来源于地壳沉积圈层的壳源型有机成因CO₂,除δ¹³C_{CO₂}小于-1%外,氦同位素比值R/Ra均小于1。而壳源型无机成因(岩石化学成因即变质成因)CO₂,则δ¹³C_{CO₂}均大于-0.8%,氦同位素比值R/Ra亦小于1;对于火山幔源型成因CO₂,则除了δ¹³C_{CO₂}大于-0.8%外,其氦同位素比值R/Ra均大于2;而壳幔混合(过渡)型成因CO₂,由于来源于火山幔源活动与岩石化学作用两种因素共同作用的结果,其δ¹³C_{CO₂}

亦大于-0.8%,但其氦同位素比值R/Ra则介于上述壳源型与幔源型两者之间,即R/Ra值处于1~2范围之内。

按前述判别准则,五大连池地区泉水CO₂气体中的δ¹³C_{CO₂}值除二龙眼、老黑山、南洗泉外,北饮泉、地震台观测井、桦林沸泉、翻花泉、南饮泉水CO₂气体中的δ¹³C_{CO₂}值均大于-0.8%;除北饮泉外,地震台观测井、二龙眼、桦林沸泉、翻花泉、老黑山、南饮泉和南洗泉氦同位素比值R/Ra均大于2,表明北饮泉、地震台观测井、桦林沸泉、翻花泉、南饮泉水CO₂气体为火山幔源型,故本区泉水中的CO₂气体直接来源于幔源岩浆成岩过程中的脱排气作用。

五大连池地区泉水气体中主要以CO₂为主(>80%),δ¹³C_{CO₂}值比较重(-0.426%~-0.77%),属于幔源CO₂;He同位素特征(R/Ra)变化在2.66~3.06之间,均大于2,有幔源He的加入。因此,五大连池地区泉水气体CO₂来源于地幔岩浆冷却成岩过程中的脱排气作用,是幔源岩浆房中岩浆结晶分异的结果。

5.3 幔源CO₂的地热学意义

若气泉气体CO₂来源于地幔岩浆冷却成岩过程中的脱排气作用,是幔源岩浆囊中岩浆结晶分异的结果的推断成立,

那么幔源成因的CO₂气体在一定程度上表征了深部可能存在的岩浆囊。

以CO₂可作为深部地热显示的标志,五大连池地区现代热水活动可以总结为“水气散逸型”。CO₂在五大连池地区地热地质研究中具两面性。一方面,火山幔源型成因的CO₂气泉可成为判断岩浆囊是否存在的依据之一;另一方面,地下深部超临界态的CO₂在向上释放的过程中相变出现绝热吸热效应,是导致本区低温的一个重要因素。

2014年6月28日在尾山地区南部的五大连池农场七分场W8号勘探孔(1974年发生CO₂井喷)北侧数米远的供水井井口下0.1 m处,实测大气CO₂浓度为3400 mL/m³,明显高于井外大气CO₂浓度背景值的500 mL/m³,表明在尾山与五大连池农场七分场之间的地下可能存在正在冷却成岩的岩浆囊,应是地下岩浆囊在地表的地球化学反映。

6 结论

通过搜集分析区域地质、岩石地球化学、区域地球物理、深部气体资料,探讨了五大连池尾山地区存在干热岩的可能性。

1) 区域地质上,五大连池地区火山活动从2.07 Ma一直持续到公元1721年,属陆内新生代火山群,具备存在残留岩浆囊或正在冷却中的岩浆囊的可能,热源机制属岩浆余热型。基于火山构造理论,建立了五大连池地区干热岩热源概念模型。

2) 根据最晚(1719—1721年)喷溢的熔岩流中首晶相橄榄石结晶时的压力值91~96 MPa推断,五大连池地区第四纪火山岩浆囊所处的深度上限值大约为3.3~3.4 km。

3) 区域大地电磁测深发现五大连池火山下部存在低阻区块和低阻圈闭,可能为正在冷却的岩浆囊;宽频带层析成像发现五大连池火山群下部具有低波速异常特征,表明五大连池火山区的热源较浅,或者说它是非深源成因的火山。

4) 根据CO₂含量、氦同位素比值(³He/⁴He)、R/Ra值及δ¹³C_{co2}等参数综合判识,五大连池地区泉水气体CO₂来源于地幔岩浆冷却成岩过程中的脱排气作用,是幔源岩浆房中岩浆结晶分异的结果。幔源成因的CO₂气体在一定程度上表征了深部可能存在的岩浆囊。

5) 以CO₂可作为深部地热显示的标志,五大连池地区现代热水活动可以总结为“水气散逸型”。CO₂在五大连池地区地热地质研究中具两面性。根据尾山地区南部W8号勘探孔发现高浓度CO₂的线索,推断在尾山与五大连池农场七分场之间的地下可能存在着正在冷却成岩的岩浆囊。

建议在尾山地区开展详细的地热地质调查和地球物理勘查工作,选取有利地区开展钻探验证。

参考文献(References)

[1] Idaho National Laboratory. The future of geothermal energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems(EGS) on the United States in the 21st

century[R/OL]. [2015-01-31]. http://geo-energy.org/reports/future_geo_energy.pdf.

[2] 汪集暘, 胡圣标, 庞忠和, 等. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 26-31.

Wang Jiyang, Hu Shengbiao, Pang Zhonghe, et al. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China[J]. Science and Technology Review, 2012, 30(32): 26-31.

[3] 范建勇, 马峰. 全国地热资源调查评价取得重要进展[N]. 国土资源报, 2014-11-24.

Fan Jianyong, Ma Feng. Important process made in national geothermal survey and evaluation[N]. Land and Resources News, 2014-11-24.

[4] 王允鹏, 于海明. 五大连池矿水水文地质特征及成因初步探讨[R]//中国黑龙江五大连池火山与矿泉科技论文选编. 2000.

Wang Yunpeng, Yu Haiming. Characteristics and formation mechanism of the mineral water in Wudalianchi area [R]//Collected Papers for Wudalianchi Volcanoes and Mineral Water. 2000.

[5] 小仓勉(日). 龙江省五大连池火山地质调查报告[R]. 旅顺: 旅顺工业大学, 1936.

Tsutomu Ogura. Report for volcanic geological survey in Wudalianchi, Longjiang Province[R]. Lüshun: Lüshun University of Technology, 1936.

[6] 毛翔, 李江海, 高危言, 等. 黑龙江五大连池火山群火山分布与断裂关系新认识[J]. 高校地质学报, 2010, 16(2): 226-235.

Mao Xiang, Li Jianghai, Gao Weiyan, et al. Vent distribution of Wudalianchi volcanoes Heilongjiang Province, China and its relation to fault[J]. Geological Journal of China Universities, 2010, 16(2): 226-235.

[7] 巩杰生. 小古里河—科洛—五大连池火山带[J]. 黑龙江地质, 1997, 8(4): 29-33.

Gong Jiasheng. Xiaogulihe-Keluo-Wudalianchi volcanic belt[J]. Heilongjiang Geology, 1997, 8(4): 29-33.

[8] 刘嘉麒. 论中国东北大裂谷的形成与演化[J]. 地质科学, 1989(3): 209-221.

Liu Jiaqi. Formation and evolution of the great valley in NE China [J]. Geological Science, 1989(3): 209-221.

[9] 邵济安, 张文兰, 张聪. 五大连池火山岩带的地幔富集作用[J]. 岩石学报, 2008, 24(11): 2485-2494.

Shao Ji'an, Zhang Wenlan, Zhang Cong. Mantle enrichment of Wudalianchi volcanic rock belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(11): 2485-2494.

[10] 邱家骧, 廖群安, 刘蒙华, 等. 五大连池—科洛—二克山富钾火山岩[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991: 204-207.

Qiu Jiaxiang, Liao Qun'an, Liu Menghua, et al. Wudalianchi-Keluo-Erkeshan potash-rich volcanic rock[M]. Wuhan: Press for China University of Geoscience, 1991: 204-207.

[11] 夏林圻. 论五大连池火山岩浆演化[J]. 岩石学报, 1990(1): 13-29.

Xia Linqi. Evolution of volcanic magma in Wudalianchi [J]. Acta Petrologica Sinica, 1990(1): 13-29.

[12] 詹艳, 赵国泽, 白登海, 等. 黑龙江五大连池火山群大地电磁探测和研究初步结果[J]. 地质论评, 1999, 45(增1): 400-408.

Zhan Yan, Zhao Guoze, Bai Denghai, et al. Tentative results of MT exploration in Wudalianchi volcanoes, Heilongjiang Province [J]. Geological Review, 1999, 45 (Suppl 1): 400-408.

[13] 詹艳, 赵国泽, 王继军, 等. 黑龙江五大连池火山群地壳电性结构[J]. 岩石学报, 2006, 22(6): 1494-1502.

Zhan Yan, Zhao Guoze, Wang Jijun, et al. Crustal electric conductivity structure for Wudalianchi volcanic cluster in the

- Heilongjiang province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(6): 1494-1502.
- [14] 张风雪, 吴庆举, 李永华. 中国东北地区远震S波走时层析成像研究[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(1): 88-101.
Zhang Fengxue, Wuqing Ju, Li Yonghua. A travelttime tomography study by teleseismic S wave data in the NE China area[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(1): 88-101.
- [15] 胡世玲, 王松山, 刘嘉麒, 等. 五大连池新生代玄武岩的K-Ar年龄和锶、氧同位素特征[C]//岩石学研究: 第2辑. 北京: 地质出版社, 1983: 22-29.
Hu Shiling, Wang Songshan, Liu Jiaqi, et al. Age of K-Ar and isotopic characteristics of strontium and oxygen in Wudalianchi Cenozoic volcanic lava rocks[C]//Petrographic Study, Vol 2. Beijing: Geological Press, 1983: 22-29.
- [16] 孔令昌, 赵谊. 五大连池火山地区某些惰性气体同位素比值的研究[J]. *地震地质*, 1993, 15(1): 88-90.
Kong Lingchang, Zhao Yi. Isotopic ratio study on some inert gas in Wudalianchi volcanic area[J]. *Seismic Geology*, 1993, 15(1): 88-90.
- [17] 杜建国, 李圣强, 刘连柱, 等. 五大连池火山区气体地球化学特征[J]. *地球化学*, 1999年(2): 171-176.
Du Jianguo, Li Shengqiang, Liu Lianzhu, et al. Geochemical characteristics of gas in Wudalianchi area [J]. *Geochemistry*, 1999(2): 171-176.
- [18] 何家雄, 祝有海, 崔莎莎, 等. 南海北部边缘盆地CO₂成因及运聚规律与资源化利用思路[J]. *天然气地球化学*, 2009(4): 488-496.
He Jiaxiong, Zhu Youhai, Cui Shasha, et al. Formation, transport and accumulation rules of CO₂ gas in the northern basin edge of Southern Sea and ideas for utilization[J]. *Natural Gas Geochemistry*, 2009(4): 488-496.

Possibility of hot dry rock resources in Weishan volcano area of Wudalianchi

LI Shengtao, ZHANG Senqi, JIA Xiaofeng, TIAN Puyuan, JIN Xiaolin, ZHANG Chao

Centre for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Baoding 071050, China

Abstract As an important part of geothermal resources, hot dry rock(HDR) is regarded as a clean energy for future, with a great research value and development prospect. In the present stage, HDR study in China should not only be carried out across the country, but also be focused on some key spots for breakthrough. According to this principle, this paper takes Wudalianchi volcanic area as a key spot for pilot study. Through analysis of the collected materials including regional geological conditions, rock geochemistry, deep CO₂ gas, regional geophysical data, this paper discusses the existence possibility of HDR resources in Weishan volcanic area of Wudalianchi. The results show that Wudalianchi volcanoes are not deep volcanoes, which indicates the possibility of HDR existence with heat source from shallow residual magma. The ceiling of the quaternary volcanic magma capsule may possibly exist at a depth of 3.3~3.4 km or so. Deep source CO₂ gas, widely discovered in the Wudalianchi volcanic area, is proven to be derived from the exhaust function of mantle magma, which is a diagenetic and cooling process and resulted from magmatic crystallizing differentiation. The fact that high concentrations of CO₂ are found around Well W8 indicates there may be cooling diagenetic magmatic capsule in the underground space between Weishan volcano and Wudalianchi No.7 Farm.

Keywords Wudalianchi; Weishan volcano; quaternary volcano; geothermal; hot dry rock; magmatic capsule

(责任编辑 刘志远)