沉积盆地型与隆起山地型地热系统地表地球化学异常模式差异性分析

王国建[1)],宁丽荣[1)],李广之[1)],吴传芝[1)],朱怀平[1)],胡斌[1)],肖鹏飞[2)],唐俊红[3)]
1)中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所,江苏无锡,214126;
2)中国石化石油物探技术研究院,南京,211100;
3)杭州电子科技大学材料科学与环境工程学院,杭州,310018

内容提要:地球化学勘探技术作为地热资源综合勘查技术之一,在地热勘探开发中发挥了重要作用。沉积盆地型与隆起山地型地热系统由于自身地质特征的不同,必然造成它们的地球化学判识指标和异常模式存在差异。目前国内外尚缺乏对这两种类型地热系统判识指标和地球化学异常模式差异性进行地质地球化学分析,导致针对不同的勘探对象在方法选择和异常解释上依据不足。以典型沉积盆地型地热系统——河北雄县地热系统,隆起山地型地热系统——安徽巢湖半汤地热系统为例,开展地球化学方法试验,建立了两种类型地热系统的地表地球化学异常模式,并从地热系统的地质因素(热源、热水、热储、通道、盖层)出发,对其地表地球化学异常模式差异性进行分析,表明隆起山地型地热系统地表地球化学异常模式为受导水断层、破碎带控制的正异常;沉积盆地型地热系统气体地球化学异常模式为受热储构造控制的正异常,微量元素地球化学异常为受氧化还原环境控制的负异常;二者在有效地球化学指标组合和异常形态上均存在差异。研究结果为不同类型地热系统勘探提供方法和理论依据。

关键词:地热系统;地球化学勘探;沉积盆地型;隆起山地型;异常模式;差异性

从构造成因角度看,地热系统可分为沉积盆地型地热系统与隆起山地型地热系统(朱炳球等,1992;陈墨香等,1996;王钧等,1990;张英等,2017)。沉积盆地型地热系统一般发育于比较稳定的盆地中,构造活动一般较弱,热能传递以热传导方式为主,一般不具有向上运移的流体循环,热背景值较低(阎敦实等,2000;王琦,2010;张英等,2017;张薇等,2019;罗璐等,2019;李泓泉等,2020);隆起山地型地热系统的发育与构造活动密切相关,通常分布于构造活动异常活跃的地区,如板块边缘区以及板内断裂活动异常强烈的地区,往往在地质历史上伴有火山或岩浆活动。异常强烈的构造活动与深大断裂为深部岩浆上涌提供了通道条件,成为深部热源传递并形成地热资源的重要因素(Reed,1983;汪集旸,1996;周立岱,2005;张英等,2017;史猛等,2019;袁利娟等,2020)。地球化学勘探技术作为地热资源综合勘查技术之一,在圈定地热异常区、控热、导热构造,寻找控热断裂,推断地热水的成因和年龄,推断深部热储温度等方面发挥了重要作用,配合地质、地球物理技术,可以提高地热勘探开发的成功率。长期以来,尽管众多研究者进行了不同类型地热系统的地球化学勘探(史长义等,1992;吴述来等,2007;谢学锦等,2009;张元培等,2010;Fourré et al.,2011;Nguyen Kim Phuong et al.,2012;Samuel et al.,2013;吴继新,2013;赵苏民等,2013;韩冀春等,2018),但是都限于勘探找热个例,尚没有对沉积盆地型地热系统和隆起山地型地热系统富热区的地球化学判识指标和地球化学异常模式进行对比,也没有对两种类型地热系统判识指标和地球化学异常模式的差异性原因进行地质地球化学分析,导致针对不同的勘探对象在方法选择和异常解释上尚缺乏依据。因此,开展两种不同类型地热系统地球化学判识指标和异常模式差异性研究具有重要意义。本文以典型沉积盆地型地热系统——河北雄县地热系统,隆起山地型地热系统——安徽巢湖半汤地热系统为例,开展地球化学方法试验,主要包括土壤游离

注:本文为国家重点研发计划课题(编号:2019YFC0604902)和国家自然科学基金资助项目(编号:41872126、U2003101)的成果。
收稿日期:2020-04-16;改回日期:2020-11-24;责任编辑:章雨旭。Doi:10.16509/j.georeview.2021.01.009
作者简介:王国建,男,1972年生,高级工程师,主要从事油气地球化学、地热地球化学勘探、石油实验地质等研究;Email:wanggj.syky@sinopec.com。

气(CH_4、H_2、He、CO_2)、顶空气(CH_4、He、CO_2)、热释汞、酸解烃、碳酸盐(卢丽等,2013),壤气汞、壤气氡、土壤元素(Hg、S、As、Ti、Bi、V、Ni、Sr)(宾德智等,2010)。各方法的地热指标意义分别简述如下:CH_4、H_2、He、CO_2 都是地热系统伴生的重要气体,在地下各种驱动力作用上容易微渗漏扩散到地表形成气体及其衍生物浓度异常(朱炳球等,1992;汤玉平等,2017),如酸解烃为微渗漏扩散甲烷进入矿物晶格形成化学吸附的烃类(杨俊等,2015),碳酸盐为微渗漏扩散的 CO_2 以及 CH_4 被微生物氧化形成的 CO_2 与地表碱土金属阳离子以及非碱金属阳离子反应形成;地热系统中硫化物的存在为亲铜元素提供了来源。Hg 为亲铜元素,它的电离势很高,居亲铜元素的第一位,因而汞易从各种化合物中还原成汞蒸气而进入大气,或以游离的形式赋存于岩石裂隙和土壤颗粒间隙(壤气汞)或被这些介质吸附和吸留(热释汞)(朱炳球等,1992)。氡是放射性元素铀、镭衰变链中的产物,在温差及压驱动下,随地下水沿孔隙或破碎带运移至地表。一些易挥发元素(如亲铜元素)在地热水和构造的作用下,造成元素在空间分布上的变化,通常在地热系统的上方及周围形成分散晕或异常(童运福等,1992;汤玉平等,2017)。通过实测获得的大量地球化学数据对两种类型地热系统的地表地球化学异常模式差异性进行分析。

1 沉积盆地型地热系统——雄县地热系统地球化学异常模式

1.1 地质概况及化探剖面

选择中国石化集团新星公司地热示范基地,沉积盆地型地热系统——冀中坳陷河北雄县地热系统作为本次研究的试验区,化探剖面如图 1 所示。雄县地热系统被认为是一个有共同热源的地质综合体,关于其热源、热储、导水通道、盖层信息等如下(韩征,2009):① 热源:结合区域性氦数据,冀中凹陷地幔热流约占 61%,地壳热流约占到 39%,证明该地区(含雄县地热系统)热源以幔源为主。② 热储:雄县地热系统中包括新近—古近系砂岩孔隙热储和基岩岩溶裂隙热储,特别是蓟县系雾迷山组热储分布范围广、厚度大、岩溶裂隙发育、渗透性良好,是整个地热系统中最重要的热储。在牛驼镇凸起部分仅存在蓟县系热储,其埋藏深度在 950~1050 m 之间,是雄县地热系统开发利用的主要热储层。③ 导水通道:雄县地热系统基岩中的断裂和次生断裂构成了地热水的主要导水通道。④ 热储盖层:雄县范围内第四系地层构成了地热系统的良好盖层。⑤ 热储温度:在雄县的牛驼镇凸起范围,新近—古近系的底板(大部分范围也是蓟县系的顶板)深度一般在 1000 m 左右。因此,1000 m 深度地温等值线相当于新近—古近系热储底板温度和蓟县系热储顶板温度等值线,其最高值为 92 ℃(韩征,2009)。在牛驼镇凸起,蓟县系雾迷山组的底板深度在 2000 m 左右,其温度在凸起的轴部为 90~118 ℃,两侧温度逐渐变低,最低约为 60 ℃。

1.2 雄县地热系统地球化学异常模式

通过对雄县地热系统地表地球化学特征分析表明,能反映地热系统富热区的主要有效地球化学勘探指标有:游离气甲烷(Y-CH_4)、氢气(Y-H_2),微量元素 Sr,氧化还原电位 Eh,其中 Eh 为环境指标。为了消除单点异常的随机性,对剖面上的地球化学数据进行了滑动平均处理,初步建立雄县地热系统地质—地球化学异常模式(图 2、图 3):游离还原性气体指标(CH_4、H_2)在雄县地热系统最有利地热富集区(牛驼镇凸起顶部)为正异常(或顶端块状异常)模式;元素 Sr、环境指标 Eh 在雄县地热系统最有利地热富集区(牛驼镇凸起顶部)为负异常(或环状异常)模式。

雄县地热水和壤气中的高浓度甲烷主要是有机来源(汤玉平等,2017),牛驼镇凸起紧邻霸县凹陷、廊坊固安凹陷,凹陷中的烃源岩生成的气体可能沿牛东断裂、角度不整合面等侧向微运移,以游离态和溶解态聚集在凸起顶部,形成具有指示地热富集部位的甲烷浓度异常。因此从地表探测游离气(CH_4、H_2)的异常峰值主要分布在牛驼镇凸起顶部及其附近区域,较好地响应了凸起上部蓟县系储层与新近—古近系不整合接触的范围,这是基岩岩溶裂隙热储的地表地球化学效应反映。由于游离气 CH_4、H_2 属于还原性气体,在地表的高丰度存在将导致土壤环境相对还原,因而 Eh 相对于背景区明显降低,出现负异常。氧化还原电位变化,从而引起富热区地表 Sr、Ni 等元素活化迁移,在最有利富热部位出现亏损或负异常。牛驼镇凸起顶部的地温梯度最高可达 12 ℃/100 m(韩征,2009),在这样高的地温梯度以及高浓度还原性气体下,使地表产生了响应最有利地热富集部位的地球化学异常模式和环境。

从图 2、图 3 还可以看到,牛驼镇凸起北西翼(即邻近凸起顶部的北西方向)也有较强的还原性气体浓度异常,可能与地热系统的最有利热储——

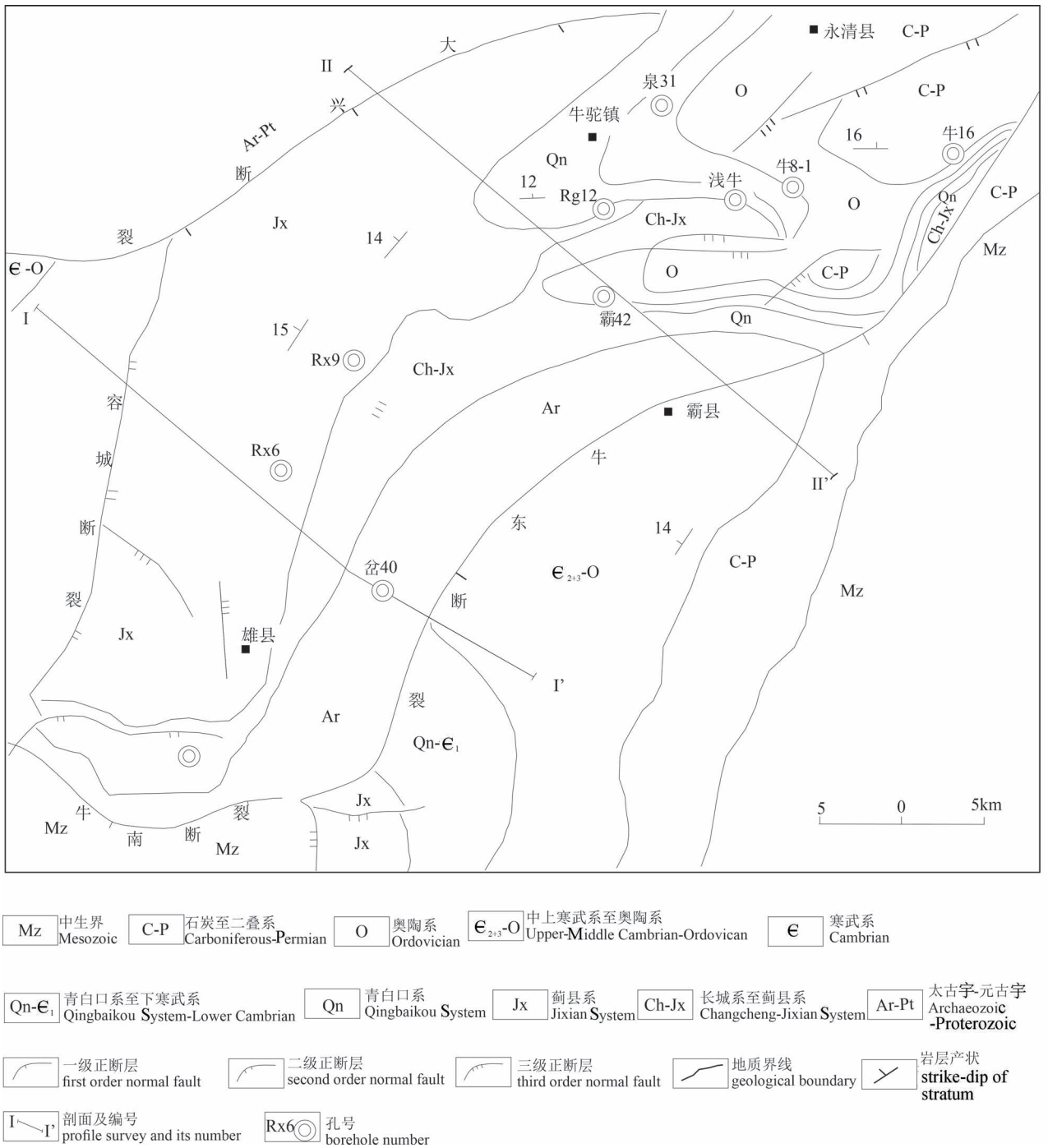


图 1 雄县地热系统基岩地质图及化探剖面位置(据韩征,2009 修改)

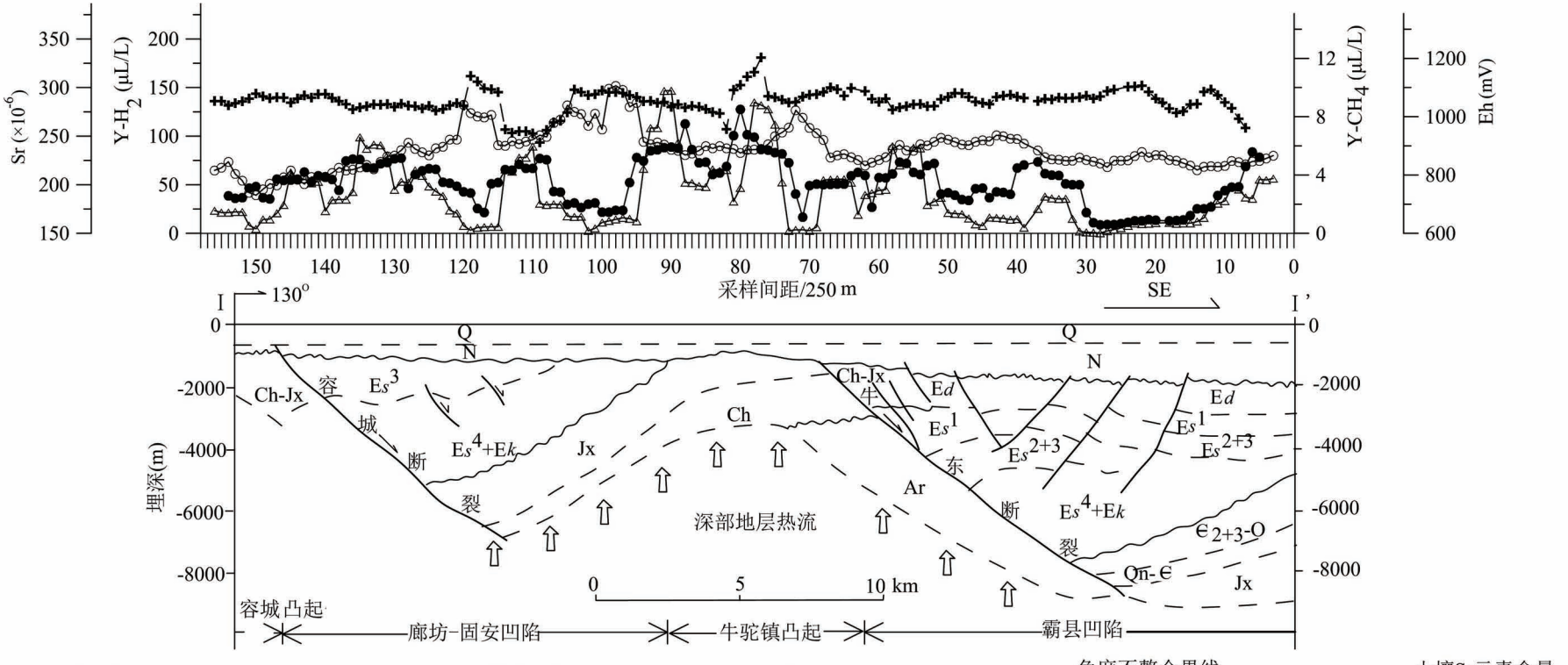
Fig. 1 The location of bedrock geology and geochemical profile of Xiongxian geothermal system (modified after Han Zheng, 2009&)

蓟县系雾迷山组(Jx*w*)岩溶热储主要沿北西翼展布有关;另外在剖面Ⅱ—Ⅱ'上,牛驼镇凸起北西翼还存在一个较大的次级断裂,该断裂断至中上元古界热储和古近系地层,热储中的气体可能沿此通道微渗漏扩散到地表,形成高丰度异常。

2　隆起山地型地热系统——半汤地热系统地球化学异常模式

2.1　地质概况及化探剖面

巢湖半汤地热系统位于安徽省巢湖市汤山背斜



Q 第四系 Quaternary
N 新近系 Neogene
Ed 古近系东营组 Dongying formation of Paleogene
Es1-4 古近系沙河街组一至四段 Section 1 to 4, Shahejie formation of Paleogene
Es4+Ek 古近系沙河街组与孔店组并层 Shahejie and Kongdian formation of Paleogene
C-P 石炭至二叠系未分 Carboniferous to Permian
∈2+3-O 中上寒武系至奥陶系未分 Middle-Upper Cambrian to Ordovician
∈ 寒武系 Cambrian
Qn-∈ 青白口系至下寒武系未分 Qingbaikou System to Lower Cambrian
Qn 青白口系 Qingbaikou System
Jx 蓟县系 Jixian System
Ch-Jx 长城系至蓟县系未分 Changcheng System to Jixian System
Ch 长城系 Changcheng System
Ar-Pt 太古宇至元古宇未分 Archaeozoic to Proterozoic
Ar 太古宇 Archaeozoic
正断层 Normal fault
地层界线 Stratigraphic boundary
平行不整合界线 Parallel unconformity boundary
角度不整合界线 Angular unconformity boundary
I－I' 地质剖面及编号 Geological section and number
130° 剖面方向 Section direction
游离气甲烷浓度曲线 Methane concentration curve of soil gas
游离气氢气浓度 Methane concentration curve of soil gas
土壤氧化还原电位（Eh） Soil REDOX potential (Eh)
土壤Sr元素含量 Sr element content in soil

图2 雄县地热系统 I—I′ 剖面地质－地球化学异常模式 Fig. 2 Geological-geochemical anomaly pattern of the section I—I′ in Xiongxian geothermal system

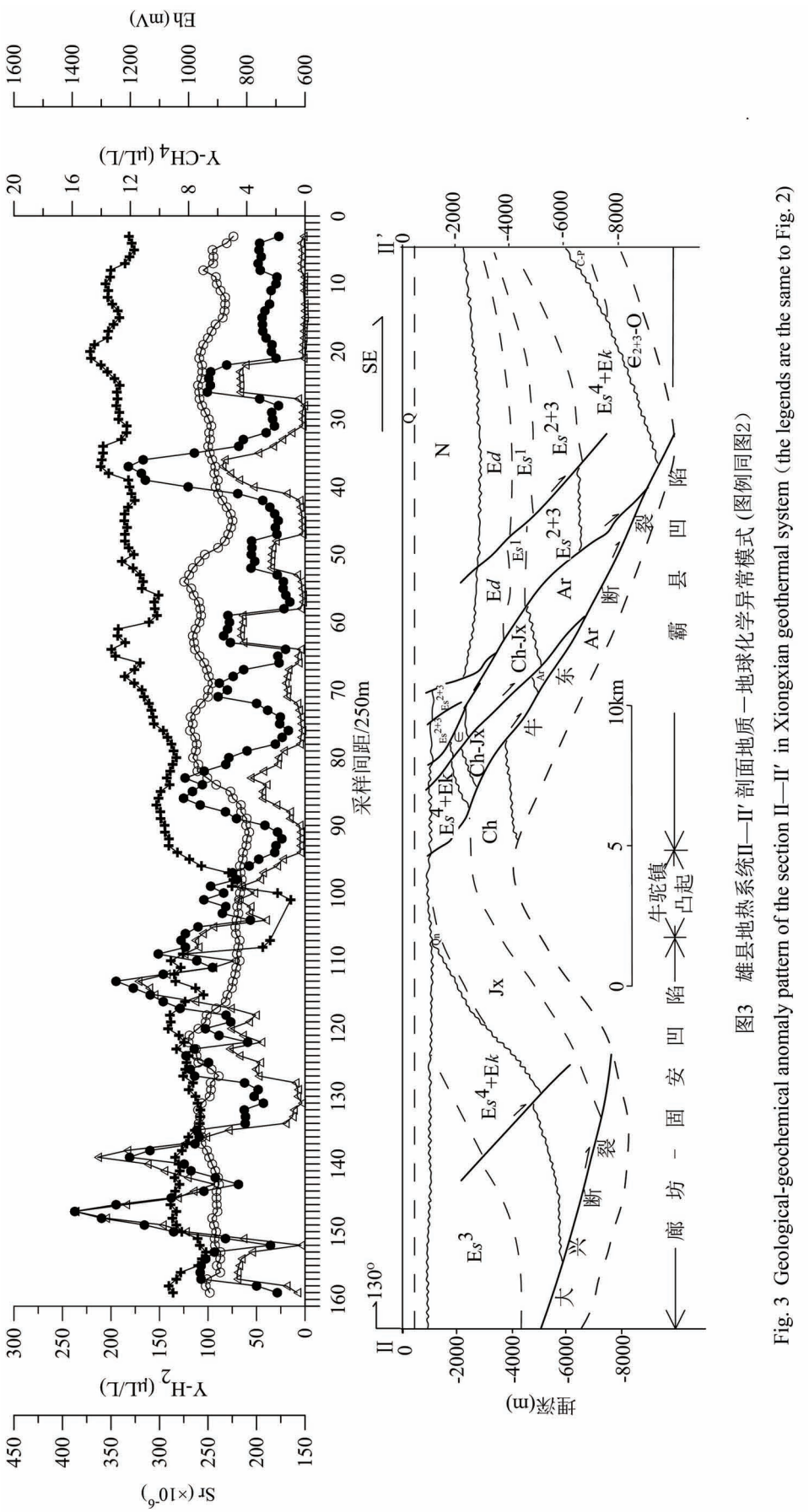


图3　雄县地热系统II—II′剖面地质—地球化学异常模式（图例同图2）

Fig. 3　Geological-geochemical anomaly pattern of the section II—II′ in Xiongxian geothermal system (the legends are the same to Fig. 2)

南西倾伏端,背斜核部由震旦系、寒武系、奥陶系碳酸盐岩类地层组成,南、东、西(背斜两翼)三面则分布着志留系砂质页岩、泥岩等极弱含水层,自然形成一个封闭式储水构造。半汤地热系统的热源是滁河深断裂沟通深部热流,滁河断裂带内次级断层构造、裂隙和岩溶发育,大气降水沿溶孔、溶洞、裂隙向地下深部渗透径流,由于裂隙、岩溶在地下不同标高段发育,具不均匀性。地下水在不同标高深度段的岩溶、裂隙通道内径流、循环、在径流过程中受地热增温率影响,获取热能,温度升高的地下热水,溶解度

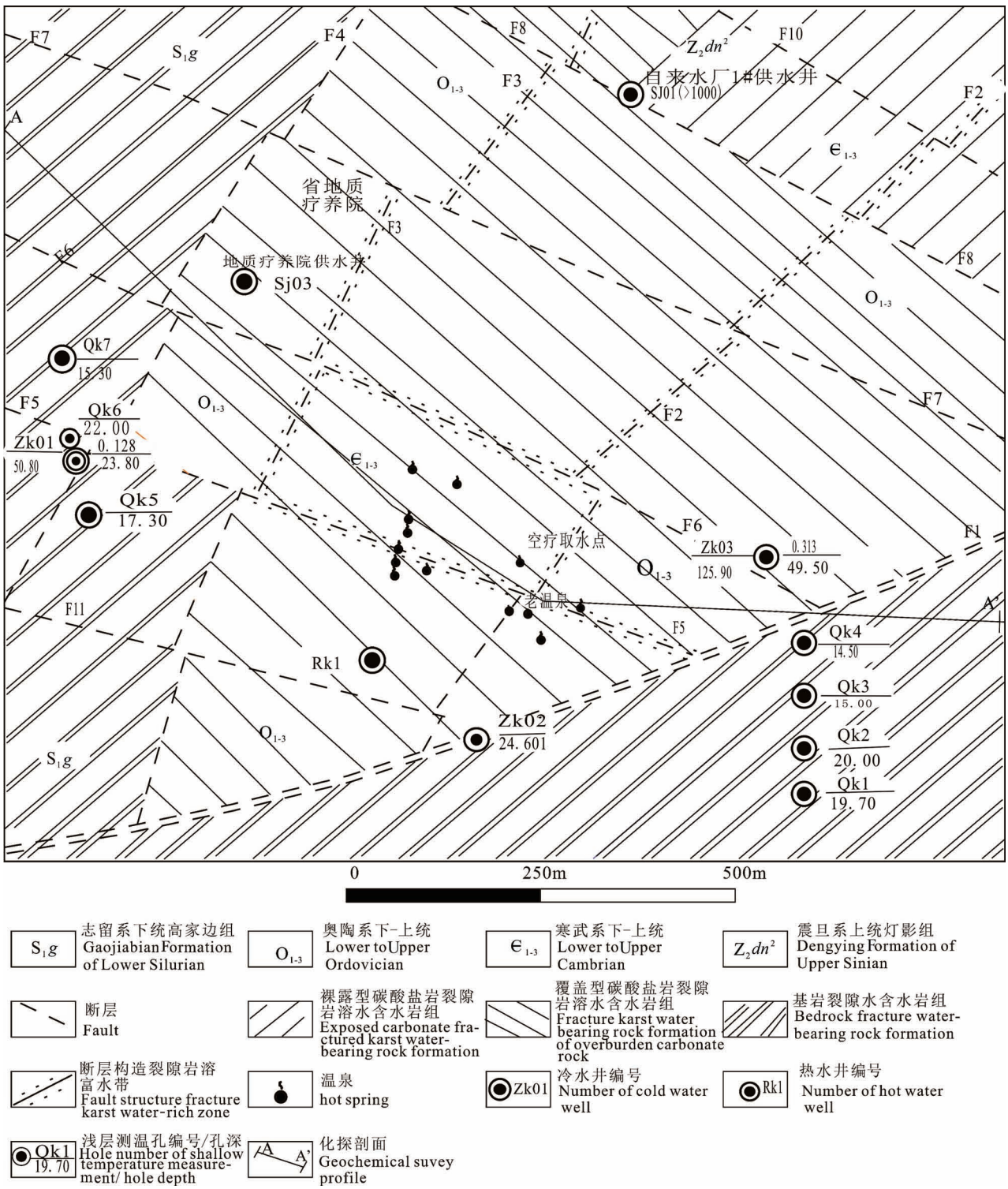


图 4 安徽巢湖半汤地热系统地质图(据刘飞,2008 修改)及化探剖面示意图

Fig. 4 Geological map (modified from Liu Fei, 2008&) and geochemical profile of Bantang geothermal system, Chaohu

增大，溶解了大量的稀有元素、微量元素和金属元素。深部热流体沿 F2、F3 断层由北东向南西径流、运移。当受到深部 F1 断层和志留系地层阻隔后，在补给、排泄区水头差和热对流作用影响下，沿 F5 断层裂隙、岩溶通道迅速向上运移，在受到第四系松散盖层影响后，呈带状分散涌出地表(图 4)。由于地下热流体在不同深度的岩溶、裂隙发育带径流、循环，因而，各温泉涌出地表的水温也各不相同(刘飞等，2008)。本次化探剖面如图 4 所示。

2.2　半汤地热系统地球化学异常模式

通过对半汤地热系统地表地球化学特征分析表明，隆起山地型地热系统地表地球化学指标主要受导水断层控制，以破碎带处地球化学异常显著。主要有效地球化学指标是：酸解烃甲烷，碳酸盐含量，顶空气甲烷，热释汞，壤气汞，壤气氡，元素 Hg、S。因此，隆起山地型地热系统地表地球化学异常模式为：以断层、破碎带控制的多种地球化学指标浓度显著正异常，在剖面上的形态表现为尖峰状(图 5)。

半汤地热系统的地球化学异常模式与局部断裂有关。半汤温泉 F3 断层分布在地热田西部，走向北北东 20°~40°，倾向南东，倾角较陡，性质为压扭性逆断层，断层南东盘为震旦系灯影组和寒武系中上统山凹丁群，北西盘零星出露，为奥陶系下统。该断层在地热田北部空军疗养院山坡，见宽约 15.0 m 的角砾岩带，角砾呈棱角状，

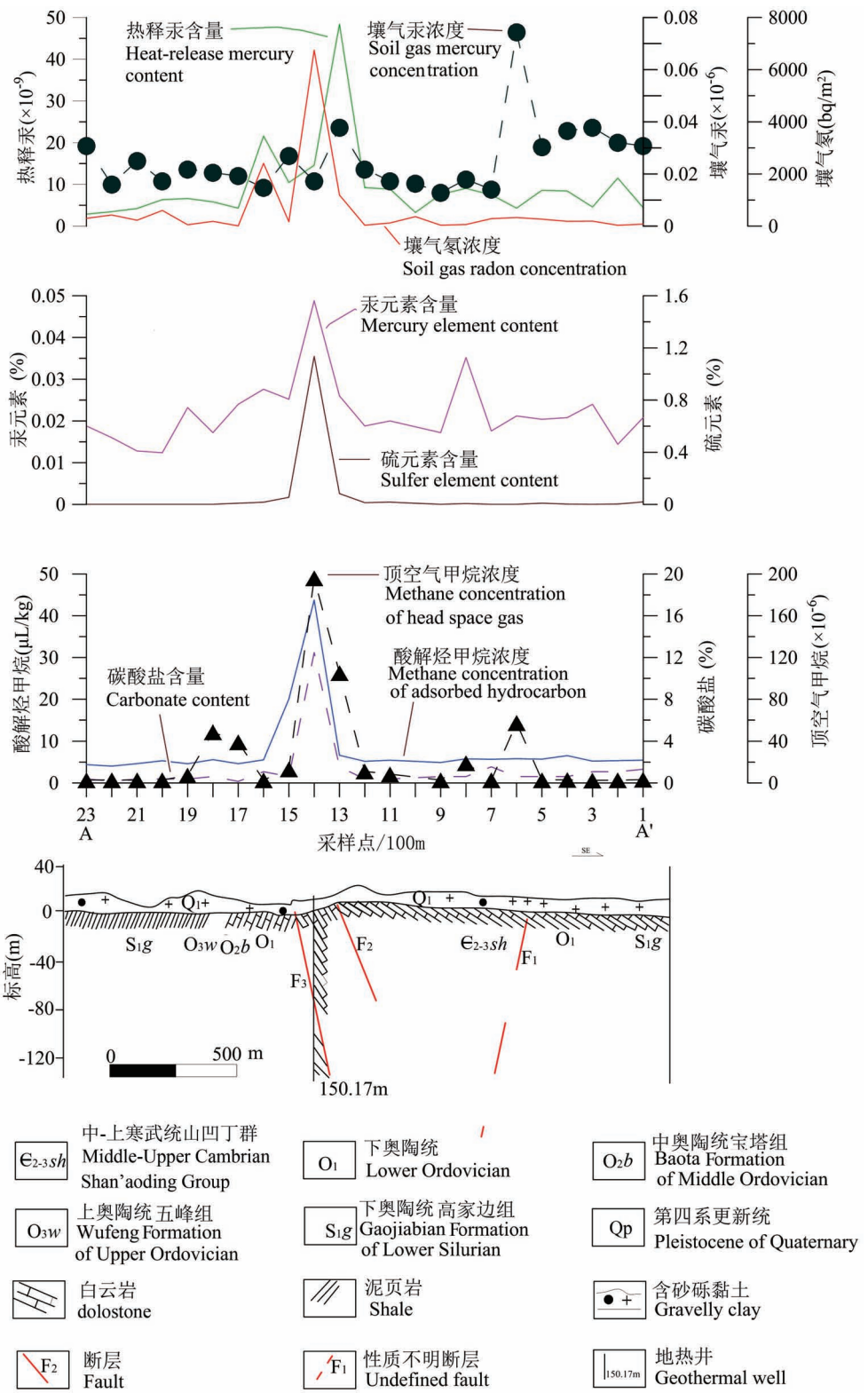


图 5 巢湖半汤地热系统地质—地球化学异常模式

Fig. 5 Geological—geochemical anomaly pattern of Bantang geothermal system, Chaohu

砾径小者 3.0~5.0 mm,大者 2.0 cm 以上,胶结物为细屑白云岩、方解石和铁质氧化物组成。该断层为富水断层,冷泉王泉分布在断层带上。在半汤地表可以见到 F3 断层受到在挤压构造应力场中扭性作用力下地层破碎较为严重,破碎带角砾岩胶结物证明了这一点,同时也证明了 F3 断层是地下与地上的沟通通道。本次半汤地区化探测量的酸解烃甲烷,碳酸盐含量,顶空气甲烷,热释汞,微量元素 Hg、S 等指标在 F3 断层上显示了明显的地球化学异常,化探指标的共同分布特征,反映 F3 断层是地下物质垂向运移至地表的有效通道;而 F3 断层破碎带胶结物为方解石和铁质氧化物的组成,证明了早期高矿化水溶液存在通过断裂系统持续的上渗运移。F3 断层起到了对半汤温泉地表化探异常输送物质和控制化探异常空间分布的决定作用。

3 两种类型地热系统地球化学异常模式差异性分析

上述两种类型地热系统的地球化学勘探试验结果表明,沉积盆地型地热系统——雄县地热系统与隆起山地型地热系统——半汤地热系统的最有利富热部位无论是在有效地球化学判识指标上,还是在地球化学异常模式上均存在很大差异。表 1 将二者的地质特征、地球化学判识指标、地球化学异常模式做了对比。从地热系统的地质因素(热源、热水、热储、通道、盖层)出发,对两类地热系统地球化学异常模式差异性的原因进行探讨。

热源及导热方式差异:隆起山地型地热系统与沉积盆地型地热系统地质构造背景存在差异,在热成因上有着明显的不同。隆起山地型地热系统受板内活动深大断裂控制,地下水深循环对流传热,以深部热流为主,存在上地幔、地壳深部物质加入(如 CO_2、CH_4、H_2S、Hg、Rn 等);沉积盆地型地热系统受盆地沉降活动控制,为地温梯度增温模式,以地幔上隆烘烤岩石层向上部地层传热,缺乏地壳及以下深部物质的加入。

热水伴生物差异:隆起山地型地热系统以深大断裂发育为特征,断裂沟通地壳带来深部物质,如甲烷、二氧化碳、氡、汞气,元素 Hg、S 等地壳深部物质进入热储,这一特征是隆起山地型地热系统地球化学特征;沉积盆地型地热系统,因为热储层附近沉积有一定的生烃潜力有机质,成熟烃类可以游离态、溶解态进入地热水中,因此地热水游离气甲烷、氢气丰富。沉积盆地地热系统是深部幔源热流对上覆地层传导增热,受地层封盖性阻隔,因而热水缺少地壳及以下深部物质指标,此为沉积盆地型地热系统地球化学特征与隆起山地型地热系统地球化学指标组合上的差异。

热储差异:隆起山地型地热系统一般为带状热储,是以对流传热为主、平面上呈条带状延伸、具有有效空隙和渗透性的断裂带构成的热储。尽管断裂带深部也可能存在沉积层状热储,但由于断裂带热储沟通地下层状热储,就地热开发而言,深层层状热储不是最有利的富热部位,也不是被考虑的钻探对

表 1 不同类型地热系统地质特征与地球化学有效指标、异常模式对比表

Table 1 Comparison of geological characteristics, effective geochemical indicators and anomaly patterns of different types of geothermal systems

地热系统类型	河北雄县地热系统(沉积盆地型)	安徽巢湖半汤地热系统(隆起山地型)
热源及导热方式	以地幔上隆烘烤岩石层向上部地层传热,为地温梯度增热,即传导型增热	大断裂沟通深部热源(如地幔热流),地下水深循环对流传热,即对流型增热
储层(热水)	层状热储,以传导热为主、分布面积大并具有有效空隙和渗透性的地层构成的热储。	带状热储,以对流传热为主、平面上呈条带状延伸、具有有效空隙和渗透性的断裂带构成的热储
通道	断裂一般切割部分地层	断裂一般切割上覆所有地层
热体系封闭性	封 闭	半封闭
地表热显示	无明确显示	温泉、热水沼泽
地表地球化学有效指标	游离气甲烷、氢气;元素 Sr 等指标	顶空气甲烷、壤气汞、热释汞、壤气氡,酸解烃甲烷、碳酸盐、元素 Hg、S 等指标
地球化学异常模式	游离还原性气体为正异常(或顶端块状异常)模式;元素 Sr、环境指标 Eh 为负异常(或环状异常)模式	正异常(或峰状异常)模式

象。从地热系统热储中的气体、元素微渗漏扩散来说，因为有断裂带热储的这种优势通道的存在，主要体现的是断裂带热储形成的地球化学异常，深部层状热储的地表地球化学效应相对很微弱。沉积盆地型地热系统为层状热储，以传导热为主、分布面积大并具有有效空隙和渗透性的地层构成的热储。因此二者的地表化探异常模式明显不同，隆起山地型地热系统的异常模式为断裂或破碎带处正异常，在剖面上呈现为峰状异常，在平面上呈现条带状异常；沉积盆地型地热系统的地球化学指标异常模式为层状热储高部位的正异常（或顶端块状异常）或围绕热储构造高部位的环状异常。

通道差异：隆起山地型地热系统一般是深断裂切割所有地层，地表地球化学异常通常沿导水断裂分布；沉积盆地型地热系统断裂一般切割部分地层，保存条件好，热水伴生气体或元素主要沿地层中的微裂隙网络近垂向微渗漏扩散到地表。

热储体系封闭性差异：隆起山地型地热系统为半封闭体系：地热系统因多与深大断裂有关，并且断裂基本延至地表，因此，地热水中富含氡、二氧化碳、以及元素 Hg、S 等。由于断裂沟通地壳与地表，热储中所有化学物质均可释放至地表并发生物理化学沉积和产生化学反应。地热水伴生 CO_2 在地表易形成碳酸，碳酸根离子与地表碱土金属阳离子以及非碱金属阳离子结合生成碳酸盐，导致温泉附近土壤碳酸盐含量升高。碳酸盐含量的升高增加了土壤对地热水伴生甲烷的化学吸附量，因此，温泉附近土壤酸解烃含量升高。同时，潮湿的土壤密封性较好，容易使烃类以物理吸附态、溶解态赋存，因此温泉附近的土壤顶空气甲烷也为高值异常。沉积盆地型地热系统为封闭体系，大多数热储中元素、化合物等难以直接迁移到地表，热储中仅气体类游离气甲烷、氢气、二氧化碳，可通过微裂隙系统近垂向迁移到地表，由于游离气甲烷、氢气迁移至地表，在地表产生次生地球化学效应，如氧化还原电位变化，从而引起富热区地表 Sr、Ni 等元素活化迁移，在最有利富热部位出现亏损或负异常；氡气和汞气在沉积盆地型地热系统上方只反映深大断裂，并不反映最有利的热储部位。热储体系封闭性差异导致地热系统地球化学指标在空间分布上的差异。

4　结论

（1）无论是沉积盆地型地热系统和还是隆起山地型地热系统，从根本上来说，它们的热源基本上一致，均来自岩浆熔融和放射性物质的衰变。隆起山地型地热系统通过深大断裂沟通地壳带来深部物质进入热储，而沉积盆地地热系统是深部幔源热流对上覆地层传导增热，受地层封盖性阻隔，因而热水缺少深部物质指标，其地球化学指标主要与热储、围岩的水岩相互作用或邻近沉积有机质生烃有关，由于两种类型的地热系统的热储中存在的地球化学物质（如元素、气体等）不同，近垂向微渗漏扩散到地表后形成的地球化学效应和有效地球化学指标组合上存在差异。

（2）隆起山地型地热系统一般为带状热储，以对流传热为主、平面上呈条带状延伸、具有有效空隙和渗透性的断裂带构成的热储。沉积盆地型地热系统为层状热储，以传导热为主、分布面积大并具有有效空隙和渗透性的地层构成的热储。由于两种类型地热系统的热储空间形态不同，因而热储中的地球化学物质近垂向微渗漏扩散到地表形成的异常形态不同。隆起山地型地热系统的地球化学异常形态在剖面上呈现为峰状异常，在平面上呈现条带状异常；沉积盆地型地热系统的地球化学异常形态为层状热储高部位的顶端块状异常或围绕热储构造高部位的环状异常。

（3）沉积盆地型地热系统与隆起山地型地热系统的最有利富热部位有效地球化学判识指标，以及地球化学异常模式上均存在很大差异，与地热系统的源、储、通、盖等地质因素息息相关。本研究提出的两种类型地热系统的地球学判识指标和地球化学异常模式，对于相应的地热系统勘探具有指导意义。

致谢：感谢中国石化新星公司河北绿源地热能开发有限公司李小军经理和安徽省地质矿产勘查局 327 地质队刘飞高级工程师对本项工作的支持。作者同时也感谢章雨旭教授和匿名审稿人对文章所提出的修改建议。

参　考　文　献　/　References

（The literature whose publishing year followed by a "**&**" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "**#**" is in Chinese without English abstract）

宾德智，刘延忠，郑克棪，陈培钧，刘久荣，陈红. 2010. GB/T 11615-2010 地热资源地质勘查规范. 北京：中国标准出版社：1~20.

陈墨香，汪集旸，邓孝. 1996. 中国地热系统类型图及其简要说明. 地质科学，31(2)：114~119.

韩冀春，李祥新，于建文. 2018. 综合地物化方法在张家口北部地热资源调查中的应用. 物探化探计算技术，40(3)：372~377.

韩征. 2009. 河北雄县地热信息系统的设计及地热资源评价. 导师：刘久荣. 北京：首都师范大学硕士学位论文：9~16.

江苏省环境监测中心，环境保护部环境标准研究所. 2015. HJ 780-

2015 土壤和沉积物无机元素的测定波长色散 X 射线荧光光谱法. 北京:中国环境科学出版社: 1~14.

李冰,杨红霞,刘崴. 2010. GB/T 14506.30-2010 硅酸盐岩石化学分析方法第 30 部分:44 个元素量测定. 北京:中国标准出版社:1~13.

李泓泉,张树胜,谢明忠,周江,周建飞,贾立新,郝星波,任建帅,刘永平,于丹丹. 2020. 冀西北蔚县盆地地热资源赋存特征及勘查开发方向. 地质论评,66(4):919~931.

刘飞,汪龙虎,洪江生. 2008. 浅论安徽巢湖半汤地热田成因及径流通道问题. 地质学刊,32(3):172~178.

卢丽,宁丽荣,李吉鹏,李武,李广之,胡斌,袁子艳,庄晓蕊,金生,邵海宁,王光华,高国平,史蔚林. 2013. GB/T 29173-2012 油气地球化学勘探试样测定方法. 北京:中国标准出版社:1~15.

罗璐,朱霞,何春艳,毛翔,许振华,汪新伟,朱咸涛. 2019. 陕西咸阳地热田地热流体成因研究. 地质论评,65(6):1422~1430.

史长义,朱炳球,朱立新, 余慧. 1992. 应用气体地球化学测量勘查地热系统断裂构造的研究. 物探与化探,19(5):377~383.

史猛,康凤新,张杰,殷焘,韩明智. 2019. 胶东半岛中低温对流型地热资源赋存机理及找热模型. 地质论评,65(5):1276~1287.

孙雄,柏林,查世新,孙晓雯. 2010. 中国温泉之乡巢湖市的地热资源及其开发利用. 上海地质,31(增刊):258~261.

汤玉平,王国建,唐俊红,黄欣,朱怀平,李吉鹏. 2017. 应用壤中气方法圈定沉积盆地型地热田的地热最有利富集区. 物探与化探,41(1):22~28.

童运福,孙书勤. 1992. 地热系统 Rn、Hg 特征及形成机理探讨. 物探与化探,18(2):154~157.

汪集旸. 1996. 中低温对流型地热系统. 地学前缘, 3(3~4):96~103.

王钧,汪辑安. 1990. 中国地热资源的分布及类型. 新能源,12(6):32~41.

王琦. 2010. 沉积盆地型地热田定量评价系统研究. 导师:施尚明. 黑龙江大庆:大庆石油学院硕士学位论文:5~7.

吴继新. 2013. 地热勘查中各种技术方法的综合运用. 地下水,35(3):105~109.

吴述来,何力. 2007. 地球化学方法在麻林桥低温热水勘查中的应用. 物探与化探,31(3):216~217.

谢学锦,吴传璧,任天祥,李善芳,张立生,郑康乐,朱炳球. 2009. 二十世纪中国化探. 北京:地质出版社:174~187.

阎敦实,于英太. 2000. 京津冀地热资源评价与利用. 武汉:中国地质大学出版社:52~62.

杨俊,沈忠民,王国建,宁丽荣. 2015. 井中岩屑碳酸盐含量与酸解烃关系新认识. 石油实验地质,37(1):92~96.

袁利娟,孔祥军,高剑,沈鹏飞,何云成,冯浩,李文,郝伟俊. 2020. 北京市延庆地热田成因模式. 地质论评,66(4):933~941.

张薇,王贵玲,刘峰,邢林啸,李曼. 2019. 中国沉积盆地型地热资源特征. 中国地质,46(2):255~268.

张英,冯建赟,何治亮,李朋威. 2017. 地热系统类型划分与主控因素分析. 地学前缘,24(3):190~198.

张元培,牛俊强,王炜. 2010. 湖北京山地区地热系统地球化学特征及热源分析. 物探与化探,34(6):806~809.

赵克斌,李武,汤玉平,孙长青,程同锦,夏响华,李双林,王国建,朱怀平,吴传芝,孙忠军,索孝东. 2015. GB/T 31456-2015 石油与天然气地表地球化学勘探技术规范. 北京:中国标准出版社:1~13.

赵苏民,孙宝成,林黎,林建旺,马忠平. 2013. 沉积盆地型地热田勘查开发与利用. 北京:地质出版社:83~84.

周立岱. 2005. 中低温地热系统形成机制及评价研究. 导师:赵明鹏. 辽宁阜新:辽宁工程技术大学博士学位论文:9~10.

朱炳球,朱立新,史长义,余慧. 1992. 地热田地球化学勘查. 北京:地质出版社: 1~13;25~27.

Bin Dezhi, Liu Yanzhong, Zheng Keyan, Chen Peijun, Liu Jiurong, Chen Hong. 2010#. GB/T 11615-2010 Specification for Geological Exploration of Geothermal Resources. Beijing: China Standards Press:1~20.

Chen Moxiang, Wang Jiyang, Deng Xiao. 1996&. The map of geothermal system types in China and it brief explanation. Scientia Geologica Sinica, 31(2):114~119.

Fourré E, Di Napoli R, Aiuppac A, Parello F, Gaubi E, Jean-Baptiste P, Allard P, Calabrese S, Ben Mamou A. 2011. Regional variations in the chemical and helium—carbon isotope composition of geothermal fluids across Tunisia. Chemical Geology, 288:67~85.

Han Jichun, Li Xiangxin, Yu Jianwen. 2018&. The application of comprehensive geophysical and geochemical method in geothermal resources investigation in Northern Zhang Jiakou. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 40(3):372~377.

Han Zheng. 2009&. The Construction of Geothermal Information System and Assessment of Geothermal Resource in Xiongxian County, Hebei Province. Tutor: Liu Jiurong. Beijing: Master degree dissertation submitted to Capital Normal University, 9~16.

Jiangsu Environmental Monitoring Center, Institute of Environmental Standards, Ministry of Environmental Protection of China. 2015#. HJ 780-2015 Soil and Sediment Determination of Inorganic Elements Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry. Beijing: China Environmental Science Press:1~14.

Li Bing, Yang Hongxia, Liu Wei. 2010#. GB/T 14506.30-2010 Methods for Chemical Analysis of Silicate Rocks——Part 30: Determination of 44 Elements. Beijing: China Standards Press:1~13.

Li Hongquan, Zhang Shusheng, Xie Mingzhong, Zhou Jiang, Zhou Jianfei, Jia Lixin, Hao Xingbo, Ren Jianshuai, Liu Yongping, Yu Dandan. 2020&. The occurrence characteristics and exploration and development direction of geothermal resources in Yuxian Basin, northwest Hebei Province. Geological Review, 66(4):919~931.

Liu Fei, Wang Longhu, Hong Jiangsheng. 2008&. On origin of Bantang geothermal field and its run-off passage in Chaohu area, Anhui. Geological Journal, 32(3):172~178.

Lu Li, Ning Lirong, Li Jipeng, Li Wu, Li Guangzhi, Hu Bin, Yuan Ziyan, Zhuang Xiaori, Jin Sheng, Shao Haining, Wang Guanghua, Gao Guoping, Shi Weilin. 2013#. GB/T 29173-2012 The Determination Methods for Samples in Hydrocarbon Geochemical Exploration. Beijing: China Standards Press:1~15.

Luo Lu, Zhu Xia, He Chunyan, Mao Xiang, Xu Zhenhua, Wang Xinwei, Zhu Xiantao. 2019&. Study on the genesis of geothermal fluid in Xianyang geothermal field. Geological Review, 65(6):1422~1430.

Nguyen Kim Phuong, Agung Harijoko, Ryuichi Itoi, Yamashiro Unoki. 2012. Water geochemistry and soil gas survey at Ungaran geothermal field central Java, Indonesia. Journal of Volcanology and Geothermal Research, (229~230):23~33.

Samuel M. Mwangi. 2013. Application of geochemical methods in geothermal exploration in Kenya. Procedia Earth and Planetary Science, (7):602~606.

Reed M J. 1983. Assessment of low-temperature geothermal resources of the United States——1982. U. S. Geological Survey Circular, 892:1~73.

Shi Changyi, Zhu Bingqiu, Zhu Lixin, Yu Hui. 1992&. Gas geochemical exploration of faults in the geothermal system. Geophysical & Geochemical Exploration, 19(5):377~383.

Shi Meng, Kang Fengxin, Zhang Jie, Yin Tao, Han Mingzhi. 2019&. Occurrence mechanism and geothermal exploration model of low—medium temperature geothermal systems of convective type in Jiaodong Peninsula. Geological Review,65(5):1276~1287.

Sun Xiong, Bai Lin, Zha Shixin, Sun Xiaowen. 2010&. Geothermal resource and its development and utilization in Chaohu City, Hot Spring Land in China. Shanghai Geology, 31(Supp.):258~261.

Tang Yuping, Wang Guojian, Tang Junhong, Huangxin, Zhu Huaiping, Li Jipeng. 2017&. Applying soil gas method to delineate the most favorable enrichment region of a geothermal system of sedimentary basin type. Geophysical & Geochemical Exploration, 41(1):22~28.

Tong Yunfu, Sun Shuqin. 1992#. Characteristics of Rn and Hg in geothermal fields and their formation mechanism. Geophysical & Geochemical Exploration, 18(2):154~157.

Wang Jiyang. 1996&. low—medium temperature geothermal system of convective type. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 3(3~4):96~103.

Wang Jun, Wang Jian. 1990#. The distribution and types of geothermal resources in China. New Energy, 12(6):32~41.

Wang Qi. 2010&. Research on Quantitative Evaluation System of Geothermal Fields in Sedimentary Basin. Daqing, Heilongjian: Master degree dissertation submitted to Daqing Petroleum Institute: 5~7.

Wu Jixin. 2013#. Integrated application of various technical methods in geothermal exploration. Ground Water, 35(3):105~109.

Wu Shulai, He Li. 2007&. The application of the geochemical method to the exploration of the Malinqiao low-temperature hot water. Geophysical & Geochemical Exploration, 31(3):216~217.

Xie Xuejin, Wu Chuanbi, Ren Tianxiang, Li Shanfang, Zhang Lisheng, Zheng Kangle, Zhu Bingqiu. 2009 #. China Geochemical Exploration in the 20th Century. Beijing: Geological Press: 174~187.

Yan Dunshi, Yu Yingtai. 2000 #. Evaluation and Utilization of Geothermal Resources in Beijing—Tianjin—Hebei Region. Wuhan: China University of Geosciences Press: 52~62.

Yang Jun, Shen Zhongmin, Wang Guojian, Cheng Tongjin, Lu Li. 2015&. A new viewpoint about the relationship between carbonate content and acidolysis hydrocarbon. Petroleum Geology & Experiment, 37(1):92~96.

Yuan Lijuan,Kong Xiangjun,Gao Jun,Shen Pengfei,He Yuncheng,Feng Hao,Li Wen,Hao Weijun. 2020&. Genetic model of the Yanqing geothermal field, Beijing. Geological Review, 66(4):933~941.

Zhang Wei,Wang Guiling, Liu Feng, Xing Linxiao, Li Man. 2019&. Characteristics of geothermal resources in sedimentary basins. Geology in China,46(2):255~268.

Zhang Ying, Feng Jianyun, He Zhiliang, Li Pengwei. 2017&. Classification of geothermal system and their formation key factors. Earth Science Frontiers, 24(3):190~198.

Zhang Yuanpei, Niu Junqiang, Wang Wei. 2010&. Geochemical characteristics and heat source of the geothermal field in Jingshan area, Hubei province. Geophysical & Geochemical Exploration, 34(6):806~809.

Zhao Kebin, Li Wu, Tang Yuping, Sun Changqing, Cheng Tongjin, Xia Xianghua, Li Shuanglin, Wang Guojian, Zhu Huaiping, Wu Chuanzhi, Sun Zhongjun, Suo Xiaodong. 2015#. GB/T 31456-2015 Technical Specification for Surface Geochemical Exploration for Oil and Gas. Beijing: China Standards Press:1~13.

Zhao Sumin, Sun Baocheng, Lin Li, Lin Jianwang, Ma Zhongping. 2013#. Exploration, Development and Utilization of Sedimentary Basin Type Geothermal Field. Beijing: Geological Publishing House:83~84.

Zhou Lidai. 2005&. Study on generating mechanism and evaluation of low—medium temperature geothermal system. Fuxin, Liaoning: Doctoral degree dissertation submitted to Liaoning University of Technology, 9~10.

Zhu Bingqiu, Zhu Lixin, Shi Changyi, Yu Hui. 1992#. Geochemical Prospecting for Geothermal Field. Beijing: Geological Publishing House:1~13;25~27.

Analysis of the differences of surface geochemical anomaly patterns between the sedimentary basin type geothermal system and the rifted mountain type geothermal system

WANG Guojian[1)], NING Lirong [1)], LI Guangzhi[1)], WU Chuanzhi [1)], ZHU Huaiping[1)], HU Bin[1)], XIAO Pengfei [2)], TANG Junhong[3)]

1) *Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Research Institute of Petroleum Exploration and Production, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu*, 214126;

2) *Geophysical Research Institute, SINOPEC, Nanjing*, 211100;

3) *College of Material & Environmental Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou*, 310018

Objectives: The differences of geochemical indicators and patterns between sedimentary basin type geothermal system and rifted mountain type geothermal system have been lacked geological—geochemical comparison and analysis, which leads to a lack of basis in method selection and anomaly interpretation for different exploration targets. The geochemical methods test was carried out in order to establish the surface geochemical anomaly patterns of the two types of geothermal systems.

Methods: We take typical sedimentary basin geothermal system ——Xiongxian geothermal system, rifted mountain type geothermal system —— Bantang geothermal system as examples, apply eight geochemical methods to

conduct tests over the two geothermal systems, including soil gas, headspace gas , thermally-released mercury, adsorbed hydrocarbon, carbonate, soil gas mercury, soil gas radon, soil elements. The effective geochemical indicators were optimized based on the most favorable heat zone of the thermal reservoirs in response. The differences of surface geochemical anomaly patterns between the two types of geothermal systems was analyzed based on the geological factors.

Results: It shows that surface geochemical anomaly patern of the rifted mountain type geothermal system is positive anomaly controlled by the water transmitting fault and fracture zonel; gas geochemical anomaly pattern of sedimentary basin type geothermal system is positive anomaly controlled by hot water reservoir structure, and geochemical anomaly pattern of the trace elements are negative anomaly controlled by REDOX environment. The effective geochemical indicators and abnormal morphology are different between the two type of geothermal systems.

Conclusions: There are great differences between sedimentary basin type geothermal system and rifted mountain type geothermal system in terms of the effective geochemical identification indicators and geochemical anomaly patterns of the most favorable heat zones, which are closely related to geological factors such as heat source, hot water, thermal reservoir, migration channel, caprock of geothermal system. The results in this study is significant for prospecting for the most favorable heat zones of different types of geothermal systems.

Keywords: geothermal system; geochemical prospecting; sedimentary basin type; rifted moutain type; abnormal pattern; analysis of differences

Acknowledgements: This research was supported by the National Key R & D Project Funding of China(No. 2019YFC0604902)and the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41872126 and U2003101)

First author: WANG Guojian, male, born in 1972, Ph. D., senior engineer, mainly engaged in geochemical exploration and petroleum geological experiment research; Email:wanggj. syky@ sinopec. com

Manuscript received on:2020-04-16;Accepted on: 2020-11-24; Edited by: ZHANG Yuxu

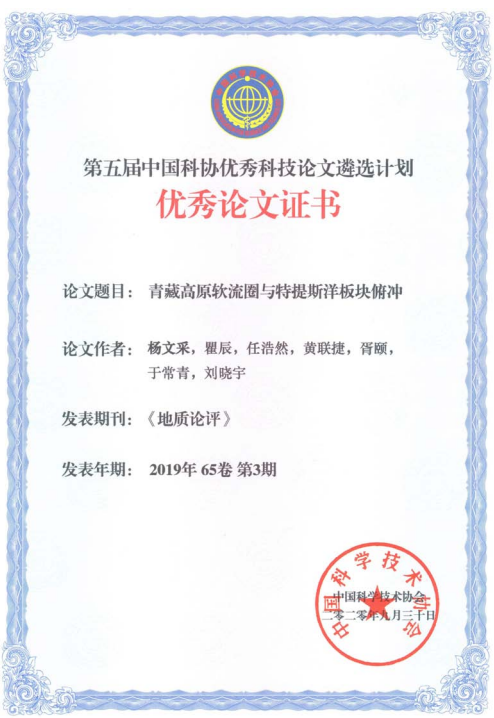
Doi: 10. 16509/j. georeview. 2021. 01. 009

第五届“中国科学技术协会优秀科技论文”评选揭晓

为深入贯彻落实党的十九大精神,服务创新型国家建设,响应习近平总书记“把论文写在祖国大地上”号召,引导更多高水平科研成果在我国科技期刊首发,提高我国科技期刊汇聚科学发现、引领学科发展、培育顶尖人才的能力,中国科学技术协会组织开展了第五届全国优秀科技论文遴选,根据《第五届中国科协优秀科技论文遴选计划实施方案》,经专家推荐, 各学科集群有关学会组织专家遴选,中国科协终审认定等程序,2020年全国共有 96 篇科技论文入选第五届“中国科协优秀科技论文”(https://www. cast. org. cn/art/2020/10/9/art_458_136138. html)。

《地质论评》主编杨文采院士等发表于《地质论评》的“青藏高原软流圈与特提期洋板块俯冲”一文,光荣上榜。《地质学报》、《地质学报》(英文版)、《古生物学报》等地学期刊另有 8 篇论文榜上有名(表 1,见 246 页)。

《地质学报》、《地质学报》(英文版)和《地质论评》三刊编辑部对获奖论文的各位作者表示热烈祝贺,希望各位地学工作者继续支持我刊,将咱们的刊物办得更好。 (刘萌 供稿)



LIU Meng: The fifth “Outstanding scientific papers of *China Association for Science and Technology*” published