

地气探测技术勘查深循环渗入型隐伏温泉的应用示范研究

张 龙

成都理工大学, 四川 成都
Email: 1733262762@qq.com

收稿日期: 2021年4月12日; 录用日期: 2021年5月19日; 发布日期: 2021年5月26日

摘 要

随着国家越来越重视对地热资源的开发利用, 但传统物化探方法对深部隐伏温泉勘查效果不佳。以四川省巴塘县德达乡查清卡温泉作为典型研究对象, 开展了地气测量勘查隐伏温泉应用示范研究工作。通过地气探测技术获得30多种微量元素, 采用综合剖面图等手段提取温泉地气场中的有效指示元素, 并进行稀土元素配分, 对异常资料进行反演, 利用地气异常场分布特征建立隐伏温泉标志, 圈定隐伏温泉带。本研究将地气探测技术从固体矿产勘查成功拓展到新的应用领域, 为探测隐伏温泉提供了一种新的思路与新的技术支撑。

关键词

地气测量, 温泉地气场, 温泉储集层, 技术应用示范

Application Demonstration Research of Geogas Exploration Technology in Deep Circulation Infiltration Type Concealed Hot Springs

Long Zhang

Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan
Email: 1733262762@qq.com

Received: Apr. 12th, 2021; accepted: May 19th, 2021; published: May 26th, 2021

Abstract

With the development and utilization of geothermal resources becoming more and more important in China, the traditional geophysical and geochemical exploration methods are not effective in the exploration of deep hidden hot springs. Taking Chaqingka hot spring, Deda Township, Batang County, Sichuan Province as a typical research object, the demonstration research work on the application of geogas survey and exploration of hidden hot springs was carried out. Obtain more than 30 kinds of trace elements through geogas detection technology, extract effective indicator elements in the hot spring geogas field by means of comprehensive profile diagrams, and carry out rare earth element distribution, invert anomalous data, and use the distribution characteristics of geogas anomaly field to establish Hidden hot spring sign, delineating hidden hot spring belt. This study has successfully extended the geogas detection technology from solid mineral exploration to a new application field, providing a new idea and new technical support for the detection of hidden hot springs.

Keywords

Geogas Measurement, Hot Spring Geogas Field, Hot Spring Reservoir, Technology Application Demonstration

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着社会对地热资源的关注,物探、化探、水文等方法寻找地热资源的技术越来越成熟,近地表(勘查深度 200 m 以内)的地热资源大部分被开发殆尽,国家越来越重视对深循环隐伏型地热资源的开发利用[1]。鉴于传统物化探方法对深部隐伏温泉勘查效果不佳:单一的勘查方法有时具有多解性;在实际的地热资源勘查工作中,受地形或环境条件限制,某些常规物化探方法难以开展[2] [3]。

对此,引入新的、非常规的勘探技术有助于取得好的成果,以四川省巴塘县德达乡 305 道班区域查清卡温泉作为典型研究区,开展了地气探测技术勘查隐伏温泉的应用示范研究工作。

2. 地气探测技术简介

地气流是上世纪 80 年代初被瑞典科学家 Kristansson K 和 Malmqvist L 等提出的一种地球物理现象[4] [5] [6] [7] [8],经过 30 多年深入的研究,其存在和重要意义已得到地球物理学家的认可。地球内部产生的各种气体在地球排气作用下向地表迁移,形成稳定持续上升的地气流,迁移方向基本垂直向上,迁移动力为地球内部的温度梯度和压力梯度;上升地气流经过地质体时会将其中的物质以纳米微粒的形式携带至地表;迁移到地表的地气流中含有多种与其迁移路径上所经过地质体有关的物质,其中一部分被地表覆盖层所吸附,一部分游离于覆盖层空隙中,另一部分则逸散到空气中,共同形成规律性的多元素分布地气场。地气流中的成分既有气态物质(如烃类物质、氦等),又包括多种金属元素(如稀土、Cu、Zn、Pb、Au 等),其在地气场中的浓度和空间分布与深度地质体的种类、位置和赋存状态等存在对应关系[9] [10] [11] [12]。地气测量就是一种通过分析地气物质中痕量元素的异常程度来推测地下对应地质体的探测技术。

3. 研究区温泉勘查实验

3.1. 工作区地质简况

勘查区出露地层主要为一套三叠系的砂板岩, 火成岩主要为细粒斑状黑云母二长花岗岩。区内所辖地域属于川西高山高原区, 该区域经历晋宁到喜马拉雅各旋回构造运动, 褶皱断裂活动频繁, 各种体系的构造和断裂互相重合、交接、穿插, 形变强烈; 而且有多期岩浆岩侵入, 地层普遍变质。各种构造体系互相干扰、穿插、复合在一起, 奠定了中生代以来勘查区地质构造的基本面貌。构造体系的复合, 对地下热水的储存、迁移具有明显的控制作用。在地层各种应力的作用下, 断裂构造相当发育, 各时代的岩石破碎, 岩浆活动频繁, 构成了地下热水的良好通道, 从而热水富集区逐渐形成。而喜马拉雅运动形成的活动性断裂, 切割较深, 为地下热水的成生储存和迁移提供了必要条件。

由于区内喜马拉雅期仍有大量岩浆活动, 于地表形成花岗岩体, 受构造活动的影响和控制, 区内深大断裂发育。大气降水、地表水沿断裂带渗入地下, 顺断层经深循环加热后形成地下水, 地下水沿着断裂带和热储岩层中形成的系统通道迁移, 最后在构造发育地带出露地表形成温泉。因此, 区内温泉的出露均与重要的断裂构造有关且多沿断裂带分布[13]。

区内有北东与北西两组断裂, 温泉受北东向断裂控制。在北东向断裂北侧, 区内发现两个小天然泉眼, 水温 65℃。

3.2. 地气测量工作部署与工作方法

3.2.1. 地气测量工作部署

为了探明查清卡是否存在有开发价值的温泉储集区, 以既控制北东向断裂, 又能适当控制断裂相邻岩层为原则, 根据勘查区的地形地貌及实测断层的走向, 从西到东, 分别布置了 A、B、C、D、E 计 5 条地气测线(见图 1)。

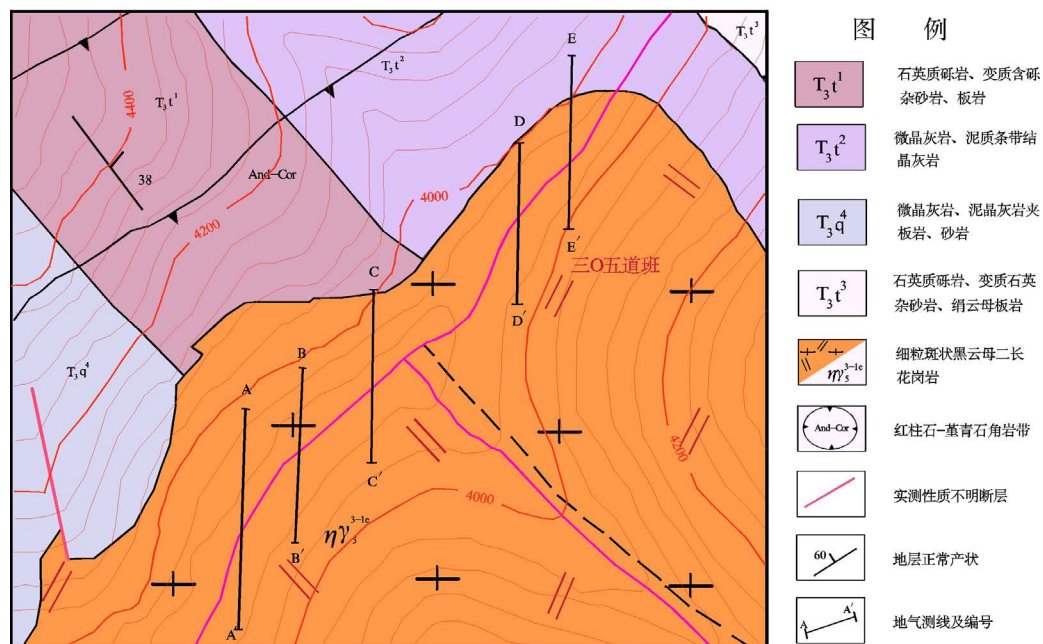


Figure 1. Geogas survey project layout in Chaqingka area, Deda Township, Batang County, Sichuan Province

图 1. 四川省巴塘县德达乡查清卡地区地气测量工程布置

测线的方向与勘查区已知的主要大断裂成 40° 左右的交角，且测线走向均为 NS 走向。开展地气采样时，均以北方端作为起点，采样点距均设置为 10 m。A 线共采集地气样品 35 件，总长 440 m；B 线共采集地气样品 39 件，总长 390 m；C 线共采集地气样品 41 件，总长 380 m；D 线共采集地气样品 31 件，总长 330 m；E 线共采集地气样品 33 件，总长 330 m。5 条测线共采集地气样品 179 件。

3.2.2. 地气测量工作方法

本次研究工作中地气测量采用动态地气采样法，利用采样器在土地表壤层中 80 cm 深处采样，采样速度为 1.5 L/min，采样时间 30 min。捕集剂是由 BV-III 级纯硝酸和高次去离子纯水配置成的低本底 5% 稀硝酸，用量 20 mL。图 2 为动态地气采样系统示意图。

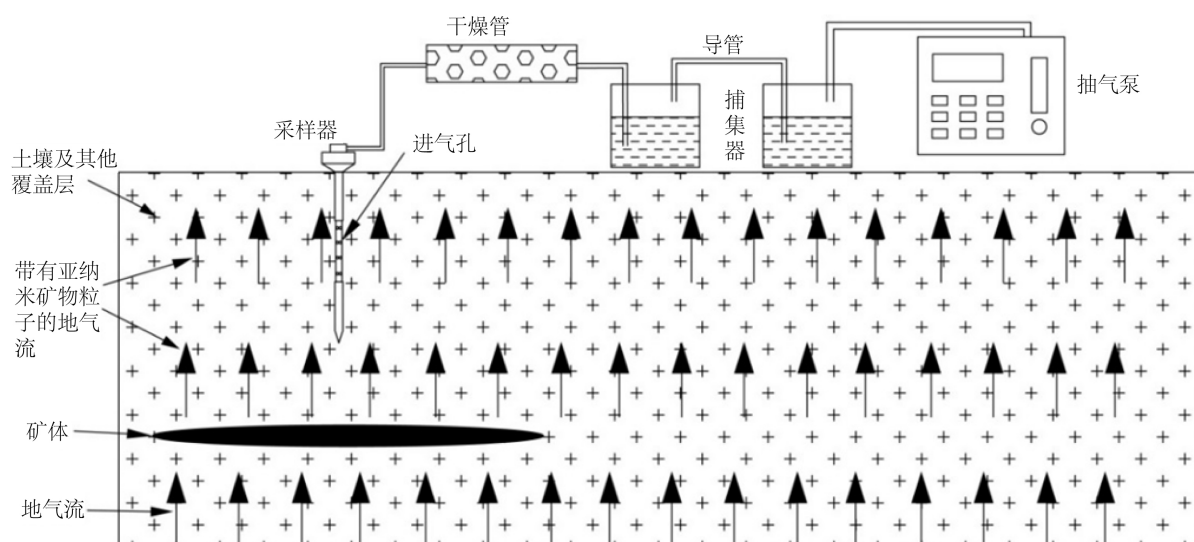


Figure 2. Schematic diagram of dynamic geogas sampling system

图 2. 动态地气采样系统示意图

地气样品分析测量工作由成都理工大学质谱分析实验室完成，使用美国 Perkin-Elmer 公司制造的 ELAN DRC-e 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)。ICP-MS 工作条件采用跳峰模式，进样时间 10 s，测量时间 60 s，清洗时间 10 s，测量的元素包括 15 个稀土元素以及 Cu、Pb、Zn、Cr、Mn、Ni、Co、Au、Ag、Hg、U、Th、Li、Sc、Rb、Sr、Y、Cd、Cs、W、Mo 元素等在内的 38 种元素。

4. 地气异常场特征研究与评价解释

4.1. 有效指示元素选择

为了直观分析各研究元素在相应的剖面线上对已知、未知矿体或已知、未知断裂所出现的异常反应，需要绘制地气测量综合剖面图。

由于地气分析的元素含量属于超痕量范围，元素间的含量数值差异巨大，为了更好地反映异常，便于与不同测线间测量数据进行对比，编制剖面图前，对每条测线每一元素逐一进行了“衬度”处理。衬度处理方法如下：

首先统计要处理元素全区所有测量值的第一轮平均值与第一轮标准方差；以第一轮平均值与 3 倍第一轮标准方差之和作标准，剔除全部大于均值加 3 倍标准差的测量值；将剩余的全部数据统计第二轮平均值与第二轮标准方差；

以第二轮平均值与 3 倍第二轮标准方差之和作标准，剔除全部大于均值加 3 倍标准差的测量值；将剩余的全部数据统计第三轮平均值与第三轮标准方差；

直到剩余数据全部不大于某一轮平均值加 3 倍最标准差为止。将此时的最后一轮平均值做分母，每个测点的原始数据为分子，计算每一个测点该元素的衬度值。最后，以衬度值为参数，编制综合剖面图。

根据应用与研究并举的目的，从已知到未知的原则，选择发现有热水泉眼的 B 测线为标准，对 ICP-MS 检出限内提供的 38 个元素，逐一编制剖面图。

借鉴传统物化探的成果，稀土元素 REE、Th、Sn 和金属元素 Mn、Co、Cu、Zn 等容易出现“群聚”效应，在地气测量中这些元素也能一起表现出较高的异常值；同时为了确保成图的代表性和有效性，以该元素是否有异常显示为依据，参考温泉地气模型实验筛选出的指示元素，决定其是否采用。最后，筛选出的指示元素包括：Li、Co、Mn、Cr、Cu、Zn、Ga、Cd、Sn、Th、REE (稀土元素总量) 计 11 种。

图 3、图 4 为查清卡 B 线的地气测量综合剖面图。

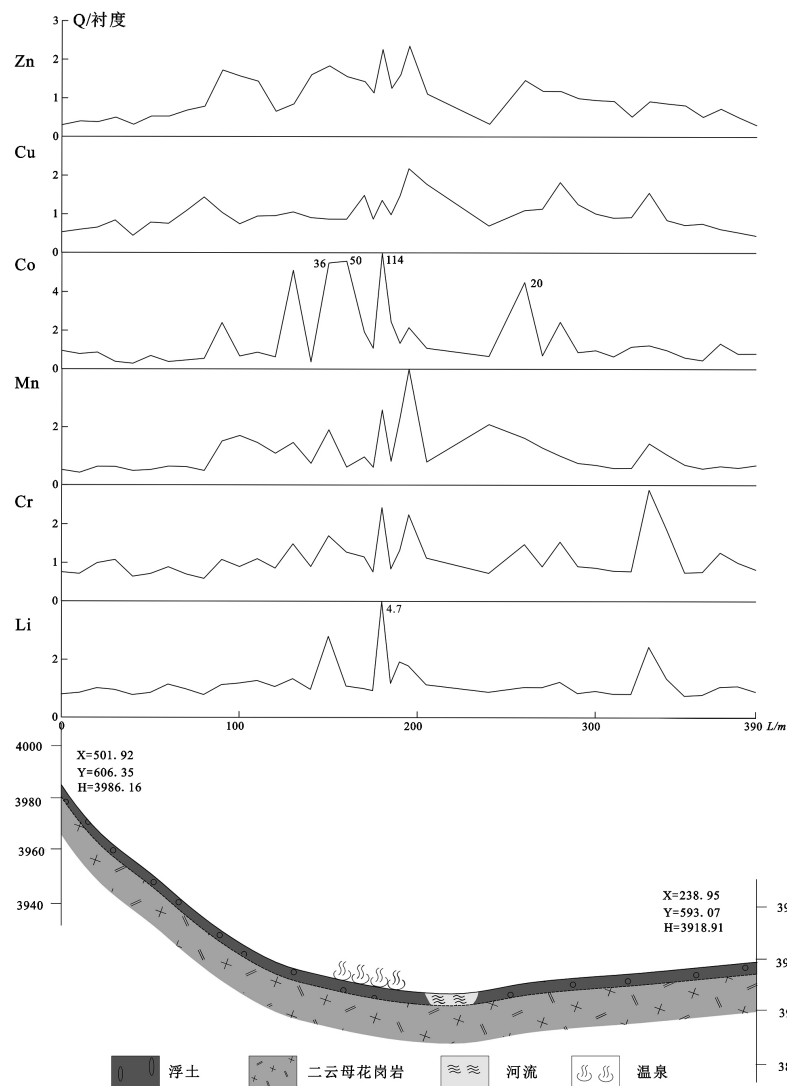


Figure 3. Comprehensive profile of Li, Cr, Mn, Co, Cu and Zn in the geogas measurement of line B on the Chaqingka area

图 3. 查清卡 B 线地气测量 Li、Cr、Mn、Co、Cu、Zn 综合剖面图

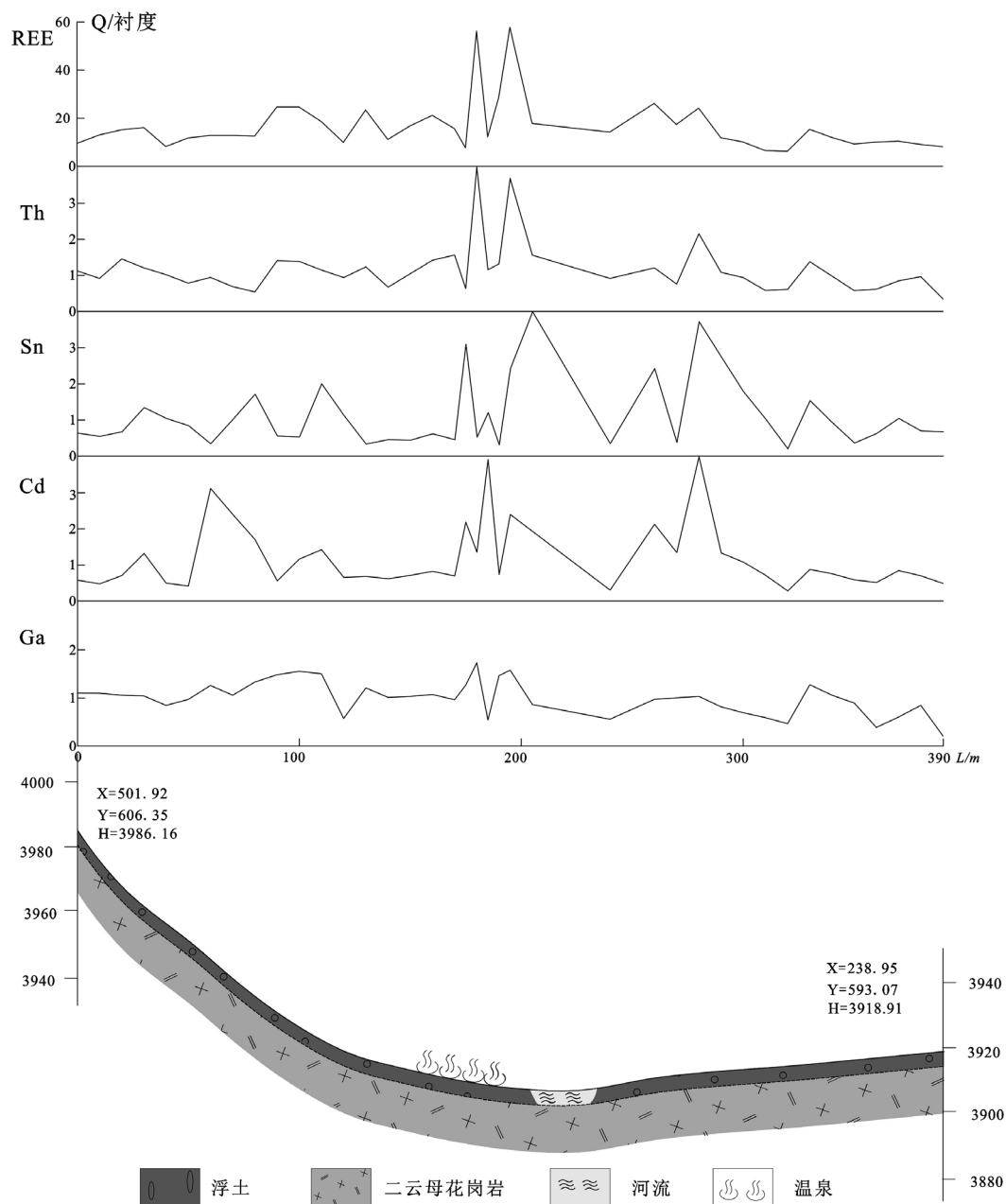


Figure 4. Comprehensive profile of Ga, Cd, Sn, Th and REE measured of line B on the Chaqingka area
图 4. 查清卡 B 线地气测量 Ga、Cd、Sn、Th、REE 综合剖面

4.2. 研究区温泉储集层的圈定

4.2.1. 地气异常场同源性解析

前人的研究已经证实，具有相同来源的地质体中的稀土元素配分模式具有相似性，稀土元素常常被作为矿体物质来源的示踪剂。为此，研究地气异常区的稀土元素配分模式在对地气异常进行评价时具有重要作用。同时稀土分布规律不仅对岩石类型、矿物成因具有指示作用，还能解释地表水、地下水的来源成因问题[14][15]。因此，将其引申至温泉地气异常方面进行应用，以期说明勘查区内 5 条测线上的地气异常是否是同一来源所致。

以 1985 年 Taylor 等学者的球粒陨石数据为标准, 采取分母相乘的参数计算方式, 对研究区内推测的温泉迁移通道所致地气异常点的稀土数据(10^{-12} g/g)进行作图, 得到如表 1、图 5 所示的稀土特征参数和稀土配分曲线。

Table 1. Characteristic parameter table of earth-gas rare earth distribution in the Chaqingka Hot Spring Research Area of Batang, Sichuan

表 1. 四川巴塘查清卡温泉研究区地气稀土配分特征参数表

点号	备注	Σ REE	LREE	HREE	LREE/HREE	LaN/YbN	δ Eu	δ Ce
A09	未知地气异常点	2507.20	2301.80	205.40	11.21	19.64	2.03	0.77
B20	出露温泉眼上方	6447.48	5825.77	621.71	9.37	15.89	0.84	0.91
B23		6520.33	5838.03	682.30	8.56	15.41	0.83	0.90
C24	未知地气异常点	1387.86	1287.47	100.39	12.82	48.27	0.85	0.80
D12	305 道班温泉西北方 25 m 处	6011.26	5285.76	725.50	7.29	11.31	0.89	1.02
E05	未知地气异常点	7283.47	6435.19	848.28	7.59	12.19	0.79	0.83
E06		2850.58	2600.30	250.28	10.39	22.14	0.92	0.88

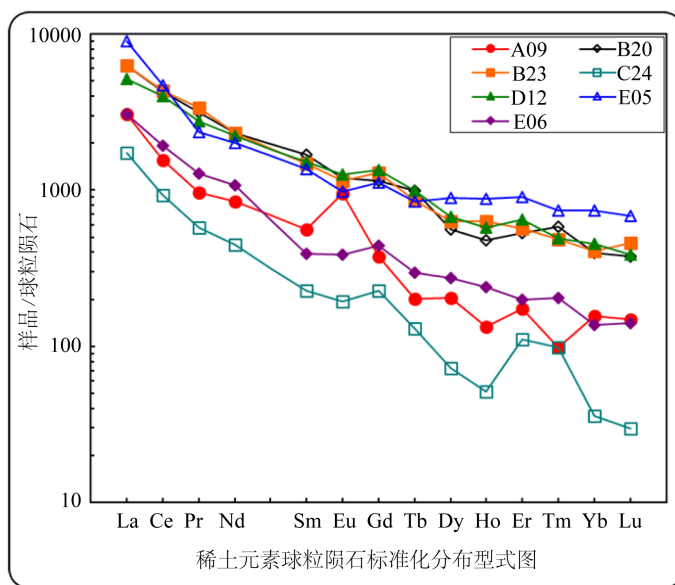


Figure 5. REE distribution curve of geogas in Chaqingka hot spring research area, Batang, Sichuan

图 5. 四川巴塘查清卡温泉研究区地气稀土配分曲线

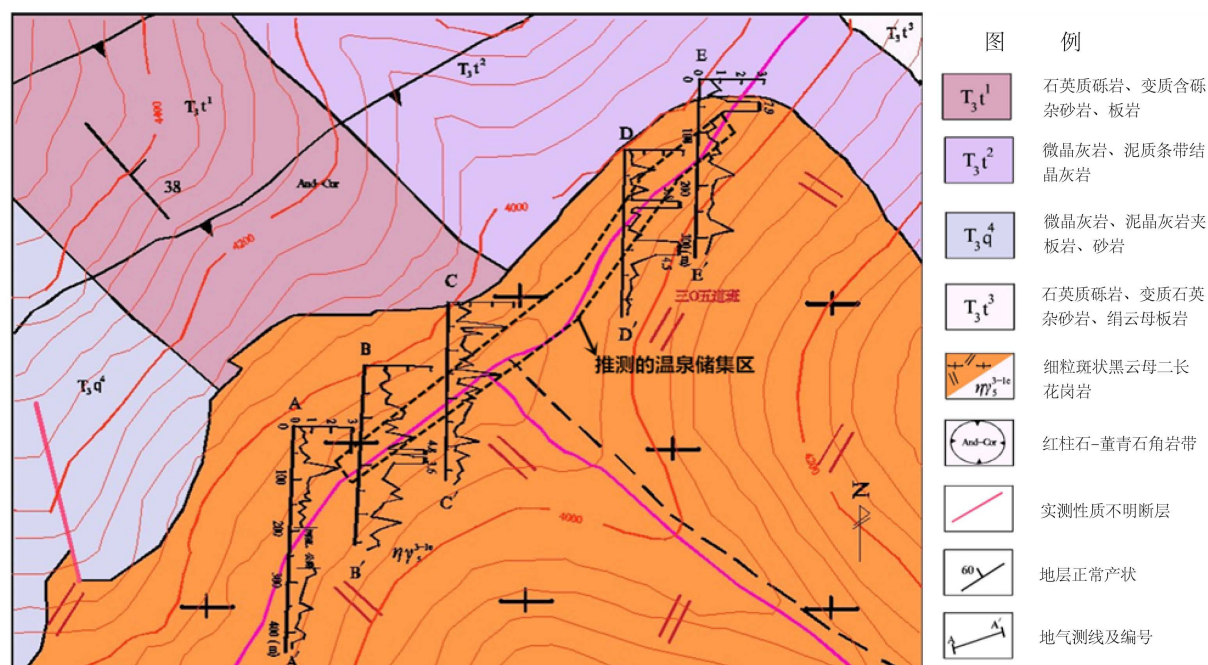
由上图可见: (1) 本区温泉稀土模式呈右倾的海鸥状分布, 这表明稀土族元素整体呈轻稀土富集、重稀土亏损的状态(Σ LREE/ Σ HREE = 6.75~12.82); (2) 在已知温泉或出露温泉眼旁, Eu 呈现出轻微亏损状态且较为稳定(δ Eu = 0.83~0.89), Ce 呈无明显亏损状态且较为稳定(δ Ce = 0.91~1.02); (3) C、E 两线的地气异常点稀土配分模式与已知温泉点和出露温泉眼旁的各种参数特征几乎相同, 这种相似性说明他们具有一定的同源性, 这些异常为温泉迁移通道所控制, 且为同一热水源所导致; (4) A 线地气点与温泉迁移通道控制异常具有明显差异, 虽其稀土配分模式整体仍呈右倾海鸥状, 但 Eu 呈重度富集状态(δ Eu = 2.03), Ce 呈明显亏损(δ Ce = 0.77), 证实两者之间为不同异常源所控制。据四川省地质调查院资料显示: 查清卡

除是温泉勘查区外,也是锡矿点,区内土壤、岩石中 Sn 都呈现明显的异常,区内也发现多处锡矿脉。因此,推测 A 线地气异常主要受到锡矿脉控制。

4.2.2. 温泉靶位的圈定及进一步工作建议

在地气法勘查隐伏金属矿床的研究中,为了增强异常幅度,便于寻找有利成矿地带,通常将相关性好的、能反映出断裂或者地质情况的异常元素进行归一化累加处理,投影到地质平面剖面图上。将这种研究方法引申至地热资源的勘查,我们可以发现圈定温泉形成的有利区域或者储集层的突破口就在于找到温泉指示元素的质量浓度归一化累加处理后共同所形成的异常区段。因此,有必要通过平面剖面图来剖析勘查区的元素异常特征。

图 6 为勘查区地气测量指示元素标准化累加值平面剖面图。



图中地气测量值为: Zn、Cu、Co、Mn、Cr、Li、Ga、Cd、Sn、Th、REE 计 11 个参数的标准化累加值; The geogas measurement value in the figure is: the standardized cumulative value of 11 parameters including Zn, Cu, Co, Mn, Cr, Li, Ga, Cd, Sn, Th and REE.

Figure 6. Indicator element content plane cross-section of Chaqingka area

图 6. 查清卡测区指示元素含量平面剖面图

参考上文所述的温泉地气场与温泉储集层空间关联关系模型,以地气测量实际获取的查清卡 Li、Co、Mn、Cr、Cu、Zn、Ga、Cd、Th、REE 族元素含量,统计了这些元素的异常下限及异常值范围于表 2 中。

Table 2. Statistical table of the location of abnormal interval of geogas survey (the northern starting point of the survey line is 0 m)

表 2. 地气测量异常区间位置统计表(测线北起点为 0 m)

测线	温泉储集区异常位置(m)		异常宽度(m)	异常元素
	北端位置	南端位置		
A	40	90	50	Co、Mn、Cu、Sn、Ga
B	80	210	130	Li、Co、Mn、Cr、Zn、Cd、Sn、Th、REE

Continued

C	40	70	30	Li、Co、Mn、Cr、Ga、Th
	140	220	80	Li、Mn、Cr、Th、REE
D	100	220	120	Co、Mn、Cr、Cu、Zn、Ga、Cd、Th、REE
E	40	70	30	Li、Co、Mn、Cr、Cu、Zn、Ga、Cd、Th、REE

在查清卡地气测量累加值平面剖面图的基础上,综合考虑表 2 结果及地质情况,可以推测出查清卡温泉储集区的平面投影位置(图 6 黑色虚线框内)。

依据勘查区地质概况资料,有以下 3 点认识及进一步工作建议:

(1) 查清卡可能存在的温泉储集层分布在区内东北向主断裂带附近,该断裂带为温泉水的流通提供了良好通道,为主控热水通道,温泉储集层沿着该条断裂带平行分布(见图 6),温泉勘查工作应围绕该断裂,以该断裂南北 100 m 范围为中心开展工作;

(2) 断裂带控制区的热储分布,是寻找地热水的重要标志。由于河谷地带是切割最深最低的侵蚀面,地下热储在此的隔热盖层最薄,地热水离地表最近、最易外泄,所以地热水大部分都在河谷附近出露形成温泉。有利的温泉开发前景区为该断裂带的倾向一侧所对应河流的北岸适合温泉水出露或者堆积的等势面较低的山前、河谷等断裂构造较多的地带;

(3) 沿北东向断裂南侧的地气异常在 E 线尖灭,区内的温泉储集层东端可能就在 D 线附近,继续向东寻找的意义不大;而 A 线在断裂北侧任然有较大幅度地气异常,其南侧由于河水与公路的覆盖无法开展地气测量,情况不明,为勘查查清卡温泉储集层西段的分布,有必要在 A 线以西,按 500 m 左右线距,以主断裂为中心,布设控制长度为 400 m 的测线两到三条。

5. 结论

通过前述讨论与分析,可以得出以下基本结论:

(1) 通过特征元素综合剖面图等手段可以快速直观的选出代表该异常区的地气异常元素,且 Li、Co、Mn、Cr、Cu、Zn、Ga、Cd、Th、REE 族元素是查清卡勘查区温泉地气异常场的指示元素。

(2) 依据温泉地气场的分布特征,可以推测查清卡地区温泉储集层主要沿勘查区内的东北向断裂分布,长度超过 750 m,拥有较为丰富的温泉资源,具有开发利用前景。

(3) 初步形成一套地气勘查深循环渗入型隐伏温泉的方法:先从热储、通道、水源等方面判断该区域是否为地下热水形成的有利地区,再通过建立工作区温泉地气场分布模式、绘制特征元素综合剖面图、稀土配分等手段,最后根据地气场的异常元素特性和地质背景圈定隐伏温泉带。

参考文献

- [1] 张金华,魏伟.我国的地热资源分布特征及其利用[J].中国国土资源经济,2011,24(8):23-24,28.
- [2] 么作庚,孙荣厚,张安合,杜晶.综合地球物理方法在深部地热资源勘查中的应用效果探讨[J].中国科技博览,2016(10):268.
- [3] 黄笑春,林日深,于建军.双频激电法在某地热勘查中的应用[J].工程地球物理学报,2015,12(4):455-458.
- [4] Kristiansson, K., Malmqvist, L. and Persson, W. (1990) Geogas Prospecting: A New Tool in the Search for Concealed Mineralizations. *Endeavour*, **14**, 28-33. [https://doi.org/10.1016/S0160-9327\(05\)80049-3](https://doi.org/10.1016/S0160-9327(05)80049-3)
- [5] Kristiansson, K. and Malmqvist, L. (1987) Trace Elements in Geogas and Their Relation to Bedrock Composition. *Geoexploration*, **24**, 517-534. [https://doi.org/10.1016/0016-7142\(87\)90019-6](https://doi.org/10.1016/0016-7142(87)90019-6)
- [6] Kristiansson, K. and Malmqvist, L. (1982) Evidence for Nondiffusive Transport of ^{222}Rn in the Ground and a New Physical Model for the Transport. *Geophysical*, **47**, 1444-1452. <https://doi.org/10.1190/1.1441293>

-
- [7] Malmqvist, L. and Kristansson, K. (1984) Experiment Evidence for an Ascending Micro-Flow of Geogas in the Ground. *Earth and Planetary Science Letters*, **70**, 407-416. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(84\)90024-4](https://doi.org/10.1016/0012-821X(84)90024-4)
- [8] Malmqvist, L., Kristiansson, K. and Kristiansson P. (1999) Geogas Prospecting—An Ideal Industrial Application of PIXE. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, **150**, 484-490. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(98\)01044-1](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(98)01044-1)
- [9] 童纯菡, 李巨初, 葛良全, 杨凤根. 地壳内上升气流对物质的迁移及地气测量原理[J]. 岩石矿物, 1997, 17(3): 83-88.
- [10] 童纯菡, 李巨初, 葛良全, 杨凤根. 地气物质纳米微粒的实验观测及其意义[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1998, 28(2): 153-156.
- [11] 童纯菡, 李巨初. 地气测量寻找深部隐伏金矿及其机理研究[J]. 地球物理学报, 1999, 42(1): 135-142.
- [12] 童纯菡. 元素迁移的模拟模型实验[J]. 核技术, 2001, 24(6): 49-455.
- [13] 傅广海. 四川省甘孜州温泉类型、成因及旅游开发模式研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2009.
- [14] 谢克文, 周四春, 张文宇, 杨奎. 利用地气场寻找隐伏温泉带——以广东暖水村为例[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(30): 9-13.
- [15] 谢克文, 周四春, 张文宇, 杨奎. 趋势面分析法在温泉地气异常圈定中的应用[J]. 现代矿业, 2015(7): 117-118, 120.