地热与热液型铀矿成因联系:研究现状及解决方法

李燕燕[1,2)],多吉[3)],张成江[4)],池国祥[5)],王贵玲[1,2)],张方方[6)],邢一飞[1,2)],张保建[1,2)]
1)中国地质科学院,中国北京,100037;
2)中国地质调查局中国地质科学院地球深部探测中心,中国北京,100037;
3)西藏地质矿产勘查开发局,中国拉萨,850032;4)成都理工大学,中国成都,610059;
5)里贾纳大学,加拿大里贾纳,S4S 0A2;6)中国地质大学(北京),中国北京,100083

内容提要:地热能作为一种清洁可再生能源已被广泛应用于发电、供暖等领域,放射性产热是地球内热的主要来源。目前,关于放射性产热的研究主要集中于高放射性花岗岩在干热岩资源探测和潜力评价中的应用,而同样作为放射性产热源的热液型铀矿与地热研究不足,二者的成因联系尚缺乏深入研究。为加强对地热与热液型铀矿成因联系的研究,本文收集和整理了国内外大量文献和相关资料,分析了目前的研究进展及存在的问题,创新性地提出了解决二者成因联系的研究方法。可望丰富地热地质理论,为地热与热液型铀矿床的成因联系提供新方法和新参考,同时,为深部地热、干热岩和固体矿产综合找矿,即"热矿共采"提供一定的理论依据。

关键词:地热;热液型铀矿;成因联系;研究现状;解决方法

地热能作为一种清洁可再生能源,因具有热流密度大、参数稳定(流量和温度)及收集输送方便等优点(Wang Kai et al., 2018),在发电、供暖、制冷等领域广泛应用(Zheng Keyan et al., 2015; 多吉等, 2017)。据统计,全球地热发电装机容量已超过12000 MWe,实现发电大于73000 GWh,到2020年装机容量将达21443 MWe(Bertani, 2015)。我国地热资源分布广、储量丰富,如川西康定(张云辉, 2019)、河北马头营(张保建等, 2020)、青海共和盆地(唐显春等, 2020)和胶东半岛(史猛等,2019)等。大力开发利用地热资源对于调整能源供应结构、缓解能源供应压力、保障能源供应安全和促进地区经济发展具重要作用(王贵玲等, 2017, 2018)。

研究发现,放射性元素衰变释放的能量是地球内热和地壳热流的主要来源,而放射性元素中铀元素对生热率的贡献最大(汪集旸和孙占学,2001; Arevalo et al., 2009)。目前,关于放射性产热的研究主要集中于高放射性花岗岩体在干热岩资源探测和潜力评价中的应用(甘浩男等, 2015; 王安东等, 2015; 杨立中, 2016; 杨立中等,2016)。热液型铀矿作为重要的放射性热源,与地热在时空上具有密切联系(徐增亮, 1982; 李学礼, 1992; Hillis et al., 2004; 王微等, 2011; 王俊虎等, 2011)。热液型铀矿是经历热液活动形成的,是在特定地质构造环境中古水热系统活动的产物(李学礼和杨忠耀, 1984),大气降水在这一类铀矿的形成中通常起非常重要的作用(El-Feky, 2011; Helmy et al., 2014),它们的形成不仅需要丰富的铀和迁移富集的介质,而且还应具有良好的热源,以促使铀的活化迁移成矿。水热型地热资源大部分是因大气降水深循环加热而形成的(罗璐等, 2019; 袁利娟等, 2020; 李泓泉等, 2020)。热液型铀矿与地热之间的相关性很可能预示二者在成因上的密切联系,但目前关于二者的成因联系尚缺乏系统的研究。通过对地热与热液型铀矿成因联系的研究将为我国华南地区热液型铀矿与地热的成因联系研究提供新方法和新参考,可望丰富地热地质理论。同时,为深部地热、干热岩和固体矿产综合找矿,即"热矿共采"提供一定理论依据。

1 地热与铀矿关系研究现状

注:本文为国家重点研发计划项目(编号:2019YFB1504102)、中国地质科学院基本科研业务费项目(编号:JKY202018,YWF201903-01)和中国地质调查局项目(编号:DD20189114)的成果。
收稿日期:2020-05-06;改回日期:2020-08-08;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2020.05.020
作者简介:李燕燕,女,1988年生,博士,助理研究员,现主要从事地热地质学研究;Email: liyanyan@cags.ac.cn。

1.1 地热与铀矿空间关系

大凡盛产铀矿的地方,特别是与热液活动有关的铀矿,一般伴随大量的热泉、温泉或高温围岩蚀变等地热异常分布(李庆阳等, 2010),中国许多热液型铀矿区现今仍是热高场区,仍有许多热泉分布(陈友良, 2008),例如,华南地区热液型铀矿分布广泛、类型多(花岗岩型、火山岩型和碳硅泥岩型)(Hu Ruizhong et al., 2008),温泉的分布与铀矿床(田)、铀成矿带分布一致(图 1)。许多学者已经发现地热、温泉与铀矿空间分布一致性的规律,即温泉出露在铀矿田内或附近,或者与铀矿田(带)受同一构造体系控制(张万良等, 2015)。比如,江西、湖南、广东等省是我国东南沿海隆起型地下热水的主要分布区,是地下热水分布较集中的一个带,水温较高,这三省同时也是热液型铀矿床的主要产区(李学礼, 1992)。在江西,著名的相山铀矿田发育有汤溪温泉、临川温泉、德兴温泉和马鞍坪温泉等多处温泉(张卫民, 1992; 张万良等, 2015);寻乌县横迳地区 121 号铀矿化点与 8 号温泉出露位置较近(黄明光等, 2010);丰州铀矿床与温泉共伴生(周立坚, 2016);沿河草坑铀矿田的控矿断裂会昌断裂分布有谢坊温泉和罗塘温泉等多处温泉(张万良和李富梅, 2014)。在湖南,“中国核工业第一功勋铀矿田”金银寨铀矿田内温泉、热异常点非常发育(祝青云和覃正良, 2008),铀矿田内 1 号主井井内至今仍不断涌出热水;热水镇地热勘查区出露的多处温泉与鹿井—城口特大—大型铀矿床成矿带空间分布一致(周立坚, 2016)。在广东,著名的下庄铀矿田地热资源非常丰富,发育有象司前温泉、茅山温泉和坝仔温泉等多处温泉,同时,还实施了一系列的地热钻

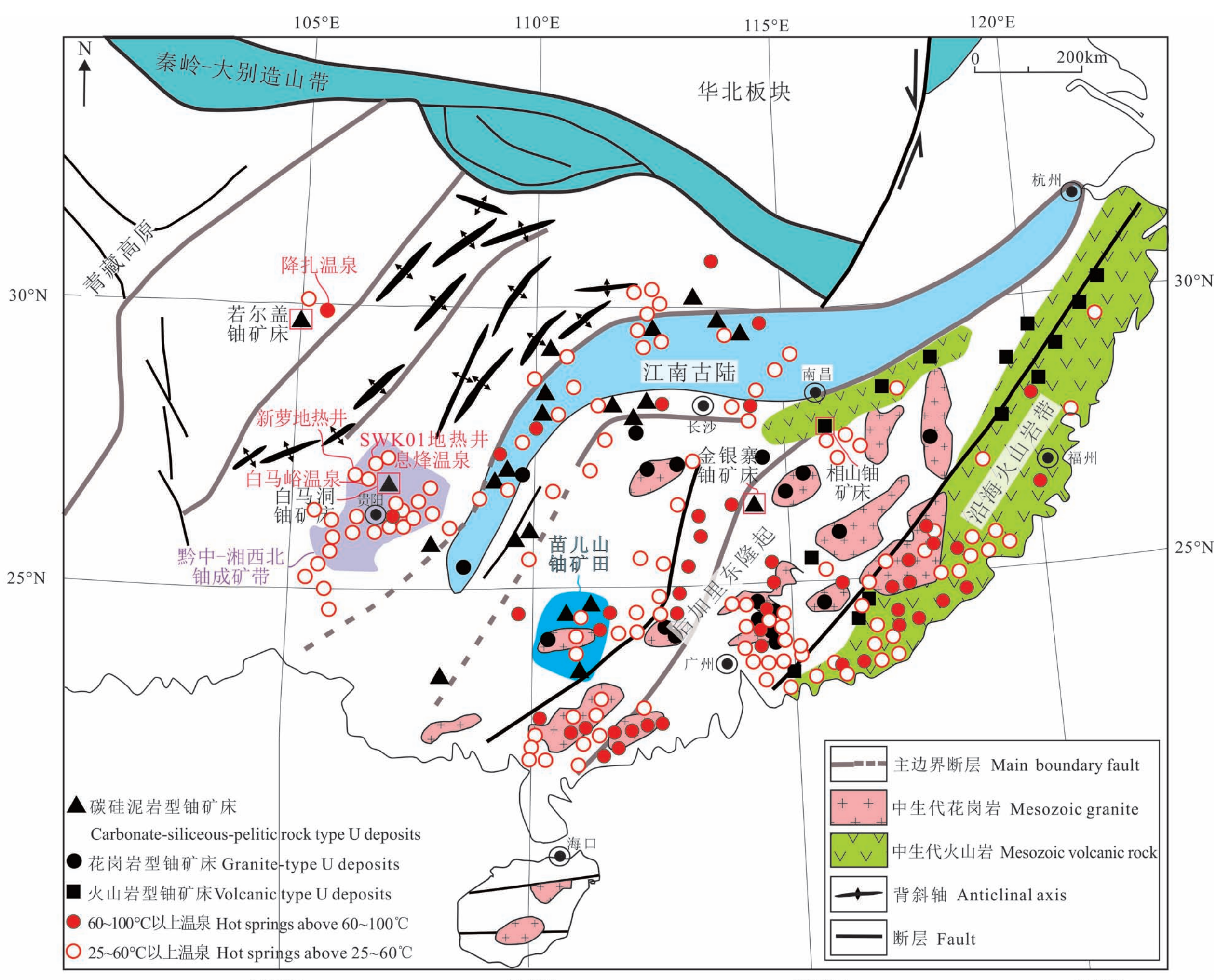

图 1 华南大陆地区温泉与铀矿床(田)分布图(据刘明光, 1998; Hu Ruizhong et al., 2008; 王贵玲, 2018)

Fig. 1 The distribution of hot springs and uranium deposits in south China continent

(After Liu Mingguang, 1998#; Hu Ruizhong et al., 2008; Wang Guiling, 2018#)

孔，并且有自流现象（彭辉才和李俊，2015）；仁化县城口铀矿田与城口镇大小 6 处温泉相伴生（周立坚，2016），棉花坑铀矿床深部含矿带内存在大量地下热水（祁家明等，2019a）。此外，在四川，若尔盖铀矿田内分布有降扎温泉等多处温泉（陈友良，2008；祝宏勋等，2008）。还有学者研究表明铀矿田都有优选定位于热隆内部及边缘的趋势，如诸广山的三大铀矿田（城口矿田、长江矿田、百顺矿田）和会昌矿田（杜乐天，2001a）。然而，热隆内部及边缘同时也是温泉、热水分布的重要位置，如江西安远热隆，热隆边部铀成矿潜力巨大，产有白面石铀矿床等多金属矿产，同时有众多的温泉、地热异常点出露（张万良等，2005）。国际上，澳大利亚 Mt. Painter Inlier 地区的 Paralana 热泉东部约 15 m 处发现中等规模的铀矿床，它们同受 Paralana 构造控制，该铀矿床的成矿元素铀来源于 Mount Painter Domain 地区，而该区地热资源非常丰富（Hillis et al.，2004）；同时，澳大利亚南部 Cooper 盆地和 Flinders 山脉高放射性花岗岩分布与干热岩地热资源分布一致，花岗岩放射性产热是该区地热资源热的主要来源（Hillis et al.，2004；Goldstein et al.，2009）。

1.2　地热与铀矿成因关系

有学者研究发现，除温泉与铀矿空间上密切相关外，与铀矿化密切相关的热液蚀变特征与地热流体围岩蚀变特征也相似。比如绿泥石化等还原性蚀变，是地热流体与围岩发生水—岩反应的常见蚀变类型（Vidal et al.，2018），同时也是形成铀矿非常有利的还原性蚀变（李学礼，1992；周立坚，2016）。Brugger 等（2005）研究发现 Mt. Painter Domain 当代地下热水的地球化学特征与区域成矿流体的地球化学特征关系密切，阐明了二者形成流体的相关性（Walker，1999；周立坚，2016）。也有学者注意到华南的一些铀矿床中，U 与 Hg、Sb、As、Tl 密切共生，而在现代地热田中也如此（涂光帜，1990）。比如在云南腾冲地热田，沥青铀矿、铀石与黄铁矿、赤铁矿密切共生，并具异常含量的 Hg、Sb、As（佟伟，1989）。同时，华南铀成矿年龄（70 ~ 140 Ma 和 22 ~ 65 Ma，Hu Ruizhong et al.，2008）与华南地区温泉水的年龄同为新生代（孙占学等，1992）。还有学者注意到成热与成铀对岩石的物理特性要求较为一致，如水云母化、钠长石化、黄铁绢英岩化等岩石因有效孔隙度增大、渗透能力增高、抗压强度降低，从而更易破碎，更利于地热流体和铀成矿流体的运移和储存，对成热和成矿均有利（李学礼，1992）。除上述联系外，二者形成的构造条件、出露标高亦有很大的相似性和一致性（徐增亮，1982；杜乐天，2001b；周立坚，2016）。

根据这些密切相关性，学者们提出隆起带古地下热水排泄区铀成矿模式、热水成矿模式、古脉状承压泄水区（减压区）铀成矿模式和“铀—水—热”三源结合研究铀矿成因的思路，认为热液型铀矿不仅在形成时与地热异常有关，在形成后还会对其附近的大地热流产生一定影响，形成一定的热异常（李学礼等，1984，1999；李学礼，1992）。还有学者提出岩石圈伸展体系下大陆热水系统铀矿床成因模式，认为岩石圈伸展导致地温梯度升高，大地热流平均值加大，在形成地热的同时为铀成矿提供热驱动力，同时，因岩石圈伸展作用引发热水流体大规模循环，最终演化为富铀热液流体，为铀成矿提供保障（商朋强，2007）。此外，学者们还将地热标志作为找矿突破标志之一应用到热液型铀矿床找矿勘查中，尤其在利用铀矿与地热场分布的密切关系指导深部铀矿勘查上发挥了重大作用（郝士胤，1981；祝青云和覃正良，2008；李庆阳等，2010；黄明光等，2010），认为地下热水的循环深度可能为铀矿床的最大成矿深度（祁家明等，2019a）。

2　存在问题及解决方法

2.1　存在问题

目前，对于地热与热液型铀矿关系的研究大部分局限于一些相似现象的描述，而关于产生这些相似性的根本原因并未开展详细研究，更未从地热和热液型铀矿床形成的重要媒介——热液流体入手解决这一根本问题。地热和热液型铀矿床的形成离不开热液流体，它们是热液流体在特定地质背景下地质作用的结果，流体的来源、特征及演化等关乎到地热田和矿床的成因机制，是矿床学和地热学研究的热点。因此，揭示并对比深部古地热流体和成矿流体来源、特征及演化是解决二者成因联系问题的关键。具体解决方法如下，并见图 2。

2.2　解决方法

2.2.1　热液矿物流体包裹体地球化学

流体包裹体是古地热流体、成矿流体遗留下来的唯一直接样品，是了解古地热流体和成矿流体物理化学特征的最直接、最有效方法，是解开成矿流体和古地热流体成矿成藏作用机理的密码，可提供地热成藏、热液矿床成因方面诸多有价值信息。由于其研究方法简单易行，适用矿物较为常见，已被广泛

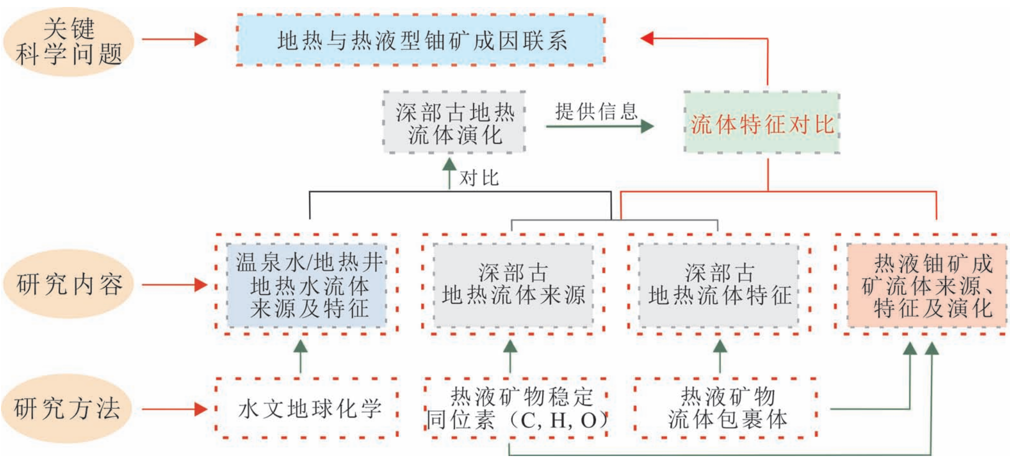

图 2 地热与热液型铀矿关系研究路线图

Fig. 2 Technological roadmap for studying the relations between geothermal energy and hydrothermal uranium deposits

应用到石油地质学、矿床地质学、构造地质学及地球内部流体迁移等研究领域(Bourdet et al., 2008; 孙贺和肖益林, 2009; Chi Guoxiang et al., 2017)。

研究表明井下取样获得地热流体在技术上很难实现(Truesdell and White, 1973),且深部地热流体在上升过程中由于压力骤降会发生闪蒸气损(脱气)作用,同时其在上升到地表的过程中还可能与浅层地下水混合,因此,温泉水/地热井井口获取的地热水地球化学特征仅代表现今的地热流体特征,不能反映深部古地热流体和真实热储特征(Janssen et al., 1997; Kirschner et al., 1999; Budai et al., 2002;Bird and Spieler, 2004)。幸运的是,热液矿物很好地记录了地热系统古地热流体特征、储层演化及水—岩反应等诸多重要信息,所以,想要获得完整的深部古地热流体特征,包括真实温度、压力和气—液组成等,必须对地热系统热液矿物中的流体包裹体开展研究(Belkin et al., 1985)。流体包裹体作为地热学研究的一种非常有效手段(Browne et al, 1976; Elders et al, 1978; Hedenquist, 1980),已被广泛运用到日本 Holi 和 Kirishima 地热田(Sasada, 1986; Sawaki et al., 1997)、中国台湾 Chingshui 地热田(Lu Yichia et al., 2018)、新西兰 Waiotapu 地热田(Hedenquist, 1980)、墨西哥 Los Humeros 地热田(Prol-Ledesma et al., 1989)、菲律宾 Tongonan、Okoy 和 Daklan 地热田等(Leach, 1982; Scott, 1990)。通过流体包裹体显微岩相学、流体包裹体显微测温学(明确深部古地热流体的温度、盐度和压力等)、流体包裹体激光拉曼光谱学(明确深部古地热流体的气—液组成)和流体包裹体 LA-ICP-MS(明确深部古地热流体的气—液相元素地球化学特征)等可揭示古地热流体特征及演化、真实反映热储条件等,还可圈定地下热水聚集带,为地热勘探开发提供非常重要的指示(Grant et al., 1982; Leach, 1982; Roedder, 1984; Scott, 1990; Boles et al., 2004; Luetkemeyer et al., 2016)。

同时,流体包裹体作为矿床学的基本研究方法,已在厘定花岗岩型铀矿床、火山岩型铀矿床、不整合面型铀矿床、碳硅泥岩型铀矿床等热液铀矿床铀成矿流体特征和演化等中得到广泛应用(Cuney, 1978; Aniel and Leroy, 1985; Pecher et al., 1985; Chu Haixia et al., 2015; 胡旭刚, 2015; Chi Guoxiang et al., 2017; Wang Kewen et al., 2018; 祁家明等, 2019b)。

2.2.2 热液矿物稳定同位素地球化学

同位素地球化学是示踪流体来源的有效手段,比如,$\delta^{13}C$ 相较与 $\delta^{18}O$ 相对稳定,主要受水—岩反应和来源控制,因此其成为示踪热液流体来源的重要手段之一(郑永飞等, 2000)。

如前文所述,温泉水/地热井井口获取的地热水地球化学特征仅代表当下地热流体特征,而众多学者研究表明脉石矿物为研究地热系统中地热流体的演化提供了非常重要的记录,尤其是碳酸盐岩类矿物(如方解石等)的同位素特征对指示古地热流体来源、地球化学特征具有重要作用(Wallin and Peterman, 1999; Iwatsuki et al., 2002; Wang Peiling et al., 2010;Li Rongxi et al., 2013; Luetkemeyer et al., 2016; Lu Yichia et al., 2018)。目前,方解石稳定同位素(C、H、O)作为示踪古地热流体来源的有效手段已被广泛应用到中国台湾 Chingshui 地热田(Lu Yichia et al., 2018)、日本 Tono 地区地热系统(Iwatsuki et al., 2002)和美国加利福尼亚州

parkfield 地区地热系统等(Luetkemeyer et al., 2016)。此外,通过方解石稳定同位素的变化特征还可指示古地热流体作用过程等,有助于揭示古地热流体演化历史(Wang Peiling et al., 2010)。

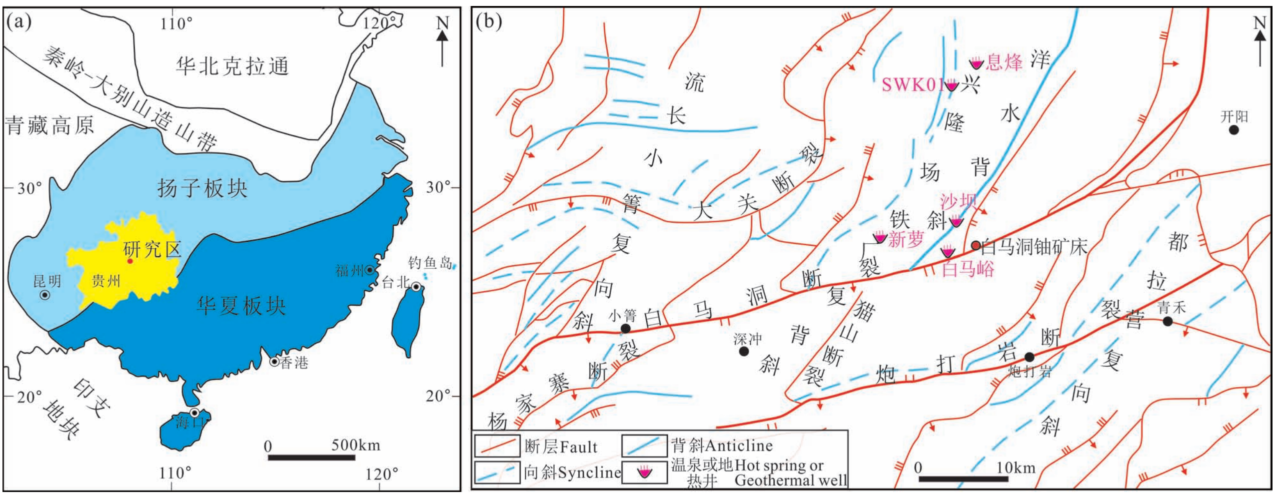

图 3 贵州息烽大地构造位置图(a,据 Zhou Jiaxi et al., 2014)和构造纲要图(b,据李燕燕,2019)

Fig. 3 Reginal map showing the tectonic setting and location (a, modified from Zhou Jiaxi et al., 2014) and structural outline map (b, modified from Li Yanyan et al., 2019) of the Xifeng area, Guizhou

同时,方解石等热液矿物稳定同位素(C、H、O)作为厘定铀成矿流体来源的基本研究方法已在花岗岩型铀矿床、火山岩型铀矿床、不整合面型铀矿床、碳硅泥岩型铀矿床等热液型铀矿床中得到广泛应用(Min Maozhong, 1995; Hu Ruizhong et al., 2008; Liang Rong et al., 2017)。

2.2.3 水文地球化学

研究表明地热流体中某些元素含量的异常可为地热流体的成因等提供重要指示意义。如高 Li、B 含量及 Sr 的出现,暗示地热流体与深部岩浆热源有直接关系(多吉, 2003);高 Rn 和 He 含量指示浅层局部存在放射性热源;高 U 含量指示这一流体可以通过与有机质或硫化物的还原反应发生铀矿化,从而说明地热流体与成矿流体性质类似,可能为同一流体系统(Brugger et al., 2005)。因此通过对地热流体开展水文地球化学研究,有助于揭示其与热液铀矿床成因联系。

3 典型地热与热液型铀矿成因联系研究:贵州息烽地热田和白马洞铀矿

3.1 区域概况

贵州位于扬子板块西缘(图 3a),处于东亚中生代造山带与阿尔卑斯—特提斯新生代造山带之间的上升地壳区,受一系列构造运动的影响(如燕山运动及喜马拉雅运动;余开富等, 1995; 梅冥相等, 2005; 何斌等, 2005; Ling Kunyue et al., 2015; Long Yongzhen et al., 2017),研究区所在的扬子准地台的黔中隆起发生了不同程度的变化,为铀矿化和地热的形成提供了有利的地球动力学背景和足够的构造空间。全省铀矿和地热资源非常丰富(毛健全, 2001; 王国坤等; 2018),铀矿床、铀异常点普遍发育,沿区域性断裂带展布,同时,沿断裂构造带伴有众多温泉出露,据统计贵州省温泉及地热井共计 212 处,地热资源共覆盖 72 个区县(张世丛和陈履安, 1998; 毛健全, 2006; 王贵玲, 2018)。

息烽地热田位于贵阳市北部,地热田内主要分布有白马峪温泉、新萝地热井、息烽温泉等多处温泉(图 3b),构造位置位于北东向德江—纳雍断裂和东西向白马洞断裂(F1)之间,其中白马洞深大断裂沟通深部热源,主要褶皱有兴隆场—铁厂复式背斜、洋水短轴背斜(图 3b; 韩至钧和金占省, 1996; 李志成和申娴达, 2014)。根据贵州省铀成矿带、铀矿资源远景区以及温泉、地热异常点的出露情况(张金带等, 2012; 王贵玲, 2018),发现息烽地热田及贵州其它温泉、地热异常点与热液铀成矿带及铀资源远景区在空间上具一致性(图 1)。研究区热储盖层为寒武系金顶山组(Є$_1j$)、明心寺组(Є$_1m$)和牛蹄塘组(Є$_1n$)的页岩、砂岩和黏土岩,热储层为震旦系灯影组(Z_2dn)和陡山沱组(Z_1d)白云岩(蔡兴林等, 2018)(图 4)。研究区远离板块边缘,无年轻岩浆体

分布,属板内地热系统,为低地温梯度背景区(Zhang Ligang, 1988)。基于氢、氧同位素组成研究表明,息烽地热田内温泉和地热流体来源为大气降水,认为大气降水以古溶蚀带和层间破碎带等为通道下渗,在下渗过程中深循环加热,热储温度达 100 ℃以上(宋小庆等, 2014; 吉勤克补子, 2015)。受构造控制一部分热流体在热储层中聚集储存,另一部分则沿次生断裂构造带上升出露地表形成温泉,浅部冷水的渗入是温泉温度偏低的重要原因(毛健全和陈阳, 1987)。

黔中—湘西北铀成矿带上的白马洞铀矿床位于息烽地热田内,同时息烽地热田内的白马峪温泉、新萝地热井等又出露在白马洞铀矿田内(图 3b),因此是研究地热与热液型铀矿成因联系的理想窗口。白马洞铀矿床地理位置位于贵阳市开阳县白马洞乡,大地构造位置位于黔中深断裂、木黄—贵阳—普安断裂和垭都—紫云断裂相交并向其收敛的有利三角构造地带。研究区主要出露寒武系地层,包括牛蹄塘组(Є$_1n$)、明心寺组(Є$_1m$)、金顶山组(Є$_1j$)、清虚洞组(Є$_1q$)、高台组(Є$_2g$)、石冷水组(Є$_1s$)和娄山关群(Є$_{2-3}ls$)(图 4)(Pi Daohui et al., 2013; Long Yongzhen et al., 2017)。研究区断裂构造发育,其中东西向白马洞断裂是黔中地区的控热控矿断裂,区域自西向东发育有北东向流长—小箐复向斜、兴隆场—铁厂复背斜、都拉营复向斜(莫帮洪等, 2016)。

3.2 研究进展

3.2.1 时空及成因联系

空间上,息烽地热田内白马峪温泉、新萝地热井、两岔河地热井等与白马洞铀矿床相毗邻,整个地热田与黔中铀成矿带分布一致(图 1);时间上,白马洞铀矿床铀成矿年龄(41.7 ~ 51.5 Ma、44.7 ~ 51.5 Ma、27.8 ~ 28.9 Ma、37.3 ~ 37.5 Ma 和 20 ~ 28.9 Ma, 唐俊儒和朱杰辰, 1986; 陈露明, 1990; 黄凯平等, 2011)与息烽地热田温泉水形成年龄(9466 ± 473 a, 吉勤克补子, 2015)均为新生代,尽管息烽地热田热储层(蔡兴林等, 2018)和白马洞铀矿含矿层不同(李燕燕, 2014; Li Yanyan et al., 2019)(图 4)。但基于二者的时空关系,暗示它们成因上的关联性。

何文君等(2014)的研究认为息烽地热田内新萝地热井地热水中的氡来源于深部岩石裂隙中的氡气,而该氡气的来源与白马洞铀矿床铀矿层有一定联系。研究发现,息烽地热田内温泉和地热的形成与白马洞铀矿形成的地质背景和机理较为一致,均受白马洞深大断裂控制,且大气降水是二者形成的重要流体来源(宋小庆等, 2014; 李燕燕, 2019)。同时,息烽地热田热储温度(大于 100 ℃,宋小庆等, 2014)和白马洞铀矿床成矿流体温度(120 ~ 180 ℃, 李燕燕, 2019)相似,均为中—低温,说明二者形成流体可能具一致性。此外,更值得注意的是研究区围岩蚀变强烈,其中白马洞铀矿床热液蚀变

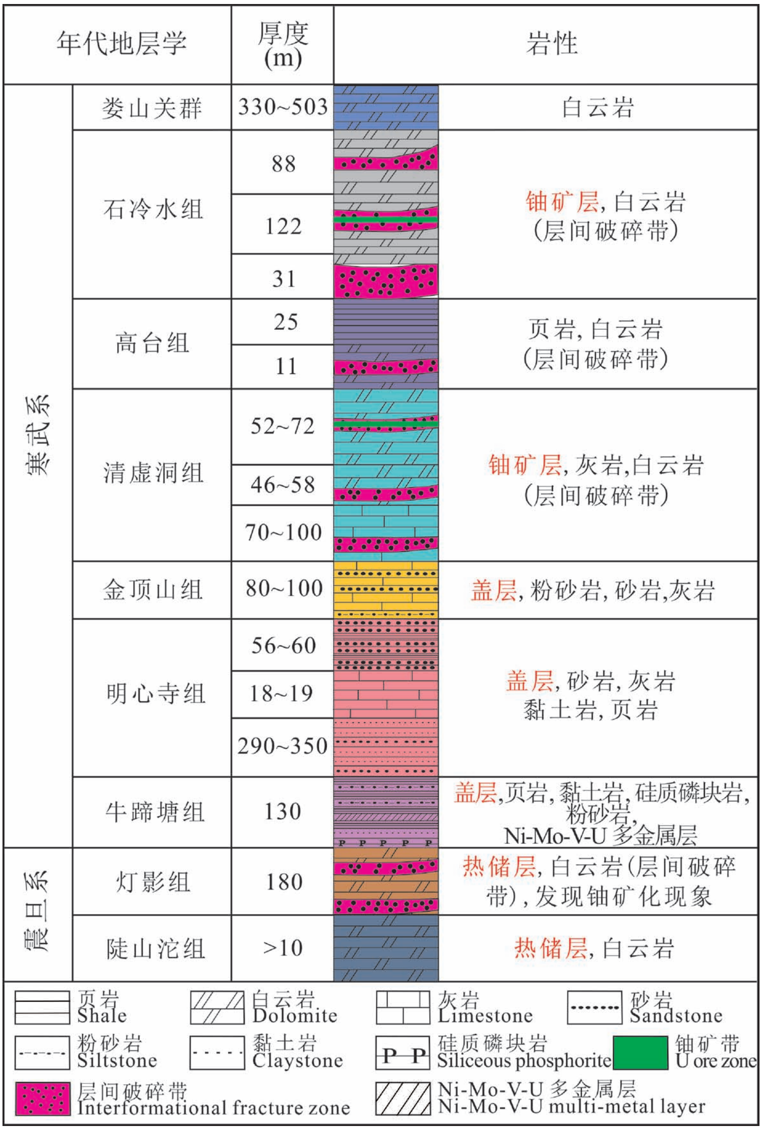

图 4 贵州息烽地区地层柱状图(据张小强等, 2017 修改)

Fig. 4 The stratigraphic column of the Xifeng area, Guizhou (Modified from Zhang Xiaoqiang et al., 2017)

种类多，包括一系列的还原蚀变和氧化蚀变，而其中对铀矿化非常有利的还原蚀变也是地热流体与围岩发生水—岩反应常见的蚀变类型（李学礼，1992；Li Yanyan et al.，2019），进一步说明二者成因上可能具有联系。

3.2.2　成因联系探讨

白马洞铀矿床铀来源于牛蹄塘组（Li Yanyan et al.，2019），牛蹄塘组是研究区出露的最为富铀的地层（Coveney et al.，1991；李朝阳等，2003；陈兰，2005；Yang Enlin et al.，2013），该地层铀含量（43.23 μg/g）是地壳沉积岩平均铀含量的 10 倍，是地壳丰度值的 20 倍（倪师军等，2009），同时，研究区其它地层铀元素含量也非常丰富，如热储层灯影组（U = 12.4μg/g，杨瑞东等，2014）。牛蹄塘组黑色岩系长期处于还原环境（陈兰，2005），铀在还原环境下是以 U^{4+} 形式稳定存在的，只有在氧化环境下才以 U^{6+} 形式活化迁移，因此这些铀可以长期保存，为大规模的铀成矿作用和放射性产热提供物质准备。

研究区经历了多期热液活动。首先，早期的热液活动使得富 U 牛蹄塘组中的海相有机质在深部热液流体的驱动下沿断裂至清虚洞组和石冷水组层间破碎带圈闭沉淀（形成还原环境），同时，富硅热液流体携带 U、Hg、Mo 沿断裂向上运移，使得 U 初步富集（李燕燕，2019；Li Yanyan et al.，2019）（图 5a）；随后，因研究区长期处在拉张构造背景下（Hu Ruizhong et al.，2008），加之 F1 断裂构造不断扩充及加强，角砾岩带的发育以及黔中地区多次隆升，研究区地层已经很破碎，渗透性已很高，极大地促进了大气降水的深部循环，古大气降水下渗深度较周缘地区为最大（魏肖等，2018），循环深度约 3 km（宋小庆等，2014；吉勤克补子，2015），大气降水只需深循环 2 ~ 3 km 即可演化为成矿热液（严冰，2012），认为白马洞铀成矿流体与息烽地热田地热流体可能为同一热液流体系统—古大气降水热液系统。氧化性的大气降水（$H_2O + O_2$）沿断裂、裂隙及层间破碎带下渗，活化迁移流经的富 U 岩石（例如灯影组白云岩），使得 $U^{4+} \longrightarrow U^{6+}$ 活化迁移（$U^{4+} \longrightarrow UO_2^{2+}$），$U^{6+}$ 主要以 $[UO_2(CO_3)_3]^{4-}$、$[UO_2(CO_3)_2]^{2-}$ 形式迁移。这种携带 U^{6+} 的氧化性流体遇到早期热液活动在清虚洞组和石冷水组圈闭创造的还原环境时，U^{6+} 被还原为 U^{4+}，发生 U 的沉淀，同时 Fe^{2+} 被氧化为 Fe^{3+}，赤铁矿和针铁矿沉淀，铀矿化发生即 $U^{6+} + Fe^{2+} \longrightarrow U^{4+} + Fe^{3+}$（图 5b）。其中，$Fe^{2+}$ 主要来源于早期热液活动形成的黄铁矿（Fe_2S）（李燕燕，2019；Li Yanyan et al.，2019）。

3.2.3　铀矿体放射性产热机理

一般情况下，温度函数 $T(x, y, z)$ 的热传递定解为：

$$\nabla^2 T(x,y,z) = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -\frac{A(x,y,z)}{K} \tag{1}$$

$$T(x, y, z) \mid \Gamma_1 = T_0 \tag{2}$$

$$\left.\frac{\partial T(x,y,z)}{\partial n}\right| \Gamma_2 = \frac{q}{K} \tag{3}$$

其中，$A(x,y,z)$ 是生热率分布函数，K 为热导率，q 为大地热流，Γ_1 为第一类温度边界，Γ_2 为第二类边界条件的热流量分布函数。据此，李庆阳等（2010）设计了如图 6a 所示的铀矿体放射性产热模型，采用边界单元数值模拟，通过计算获得如图 6b 所示的结果。根据计算结果发现因热源的存在对地热空间分布产生了明显影响，在热源处引起热场畸变，即在热源所在空间附近地温梯度产生陡变，这是铀矿体产热的本质，铀矿体可等同于一个热源（李庆阳，1992；李庆阳等，2010）。

此外，根据 Rybach（1976）修正的岩石放射性产热与岩石中的放射性元素含量的关系方程：

$$\frac{A}{\mu W/m^3} = 0.01\frac{\rho}{g/cm^3} \times \left(3.48\frac{w_K}{\%} + 9.52\frac{w_U}{\mu g/g} + 2.56\frac{w_{Th}}{\mu g/g}\right) \tag{4}$$

式中 A 为岩石放射性产热率，ρ 为岩石密度，w_K、w_U、w_{Th} 分别为岩石中 K、U 和 Th 含量。显然，岩石生热率与岩石密度 ρ 以及 U、Th、K 含量四个独立变量有关，而各类岩石的密度相差不大，除角闪岩为 3.031 g/cm^3 外，其它各类岩石均在 2.402 ~ 2.796 g/cm^3 之间，因此，岩石中 U、Th、K 越富集，岩石的产热率越大，而根据公式（4），三种元素中 U 元素对生热贡献最大，因此 U 元素越富集，生热率越高，且各类岩石只要含有放射性元素，就会不断的释放热量（赵平等，1995）。

白马洞铀矿床规模中等、品位较高，铀矿体赋存在清虚洞组和石冷水组的灰岩和白云岩中（李燕燕，2014）。综上，铀矿化发生后，清虚洞组和石冷水组可作为浅部放射性热源为地表出露的温泉和热异常提供源源不断的热，牛蹄塘组作为深部放射性热源为深部的灯影组和陡山沱组热储提供热源（图

(a)
F1'
F1
U初步富集带
U初步富集带
U初步富集带
热储层
(b)
F1'
F1
U6+
U矿化带
U矿化带
U矿化带
U矿化带
热储层
白云岩
Dolomite
灰岩
Limestone
页岩
Shale
断层
Fault
铀初步富集带
Primary enrichment of U
粉砂岩
Siltstone
砂岩
Sandstone
黏土岩
Claystone
海相有机质
Marine organic matter
铀矿化带
Mineralized zone of U
娄山关群
Loushanguan Group
石冷水组
Shilengshui Formation
高台组
Gaotai Formation
热液流体
Hydrothermal fluids
铀放射性产热
Radioactive heat produced by U
清虚洞组
Qingxudong Formation
金顶山组
Jindingshan Formation
明心寺组
Mingxinsi Formation
海相有机质运移
Marine organic matter migration
牛蹄塘组
Niutitang Formation
灯影组
Dengying Formation
角砾岩带
Breccia pipe
大气降水
Meteoric water

图 5 贵州息烽地热田白马洞地区地热与铀矿成因关系模式图
Fig. 5 Genetic model of relationship between geothermal energy and uranium deposit in the Baimadong area, Xifeng geothermal field, Guizhou

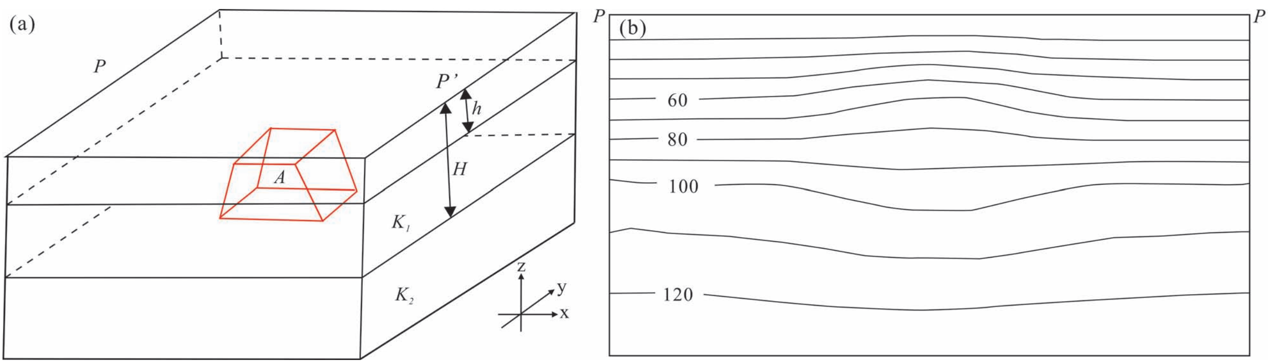

图 6 (a) 铀矿体产热计算模型;(b) 模型对应的计算结果 (据李庆阳等, 2010)
Fig. 6 (a) Computational model for heat production of uranium ore body; (b) computational result of the model in Fig. 6(a) (from Li Qingyang et al., 2020&)

5b)。含铀丰富的铀矿体和岩石不停的释放热量,生热率较大,通过放射性产热对其附近的大地热流产生一定的影响,形成一定的热异常,进而形成丰富的地热资源。息烽地热田地热和白马洞铀矿床不仅在形成过程中密切联系,在形成后也彼此成就。在地热和铀矿形成时,古大气降水下渗深循环加热成为地热流体,为铀的活化迁移提供热动力条件,是启动铀矿化的关键因素之一,同时,因活化迁移搬运了U^{6+},使得 U 富集成矿,其还扮演着成矿流体的角色。在铀矿床形成后,铀矿体起到放射性热源的作用,为深部热储和地表温泉、热异常提供源源不断的热。

4　结论

本文通过总结前期研究工作和野外调查观测,同时收集和整理前人研究资料,详细阐述了地热与铀矿的时空密切相关性,并阐明了解决其成因联系的研究方法。结合前人及已有研究成果,认为地热流体与铀成矿流体可能具有相似性,或属于同一热液流体系统。地热流体为铀活化迁移成矿提供充足的热动力条件,是铀迁移富集最终成矿的运输媒介,同时通过铀矿化铀元素的富集而提供源源不断的放射性热,二者不仅在形成时密切相关,在形成后也相互成就。但目前的研究主要集中在地热田内温泉、地热井地热水的水文地球化学研究,而对热—铀有时空关系的地热田、热异常区内的热液矿物开展的研究较少,因此是接下来研究地热与热液型铀矿成因联系研究的重点。通过地热与热液型铀矿成因联系研究可实现"热—铀兼探"和"热—铀兼采",为深部地热、干热岩和固体矿产综合找矿,即"热矿共采"提供一定的理论依据。

致谢:感谢审稿专家对本文的审阅及提出的宝贵修改建议。

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)

蔡兴林, 张朝举, 郭江波, 吴丹, 樊鑫, 杨明俊. 2018. 贵阳开阳磷矿西翼矿区地热水成因分析. 中国煤炭地质, 30(6): 101 ~ 104.

陈兰. 2005. 湘黔地区早寒武世黑色岩系沉积学及地球化学研究. 导师: 胡瑞忠, 钟宏. 贵阳:中国科学院地球化学研究所博士学位论文: 1 ~ 90.

陈露明. 1990. 504 铀矿床成因探讨. 铀矿地质, 6(8): 135 ~ 144.

陈友良. 2008. 若尔盖地区碳硅泥岩型铀矿床成矿流体成因和成矿模式研究. 导师: 刘家铎, 张成江. 成都: 成都理工大学博士学位论文: 1 ~ 120.

杜乐天. 2001a. 花岗岩型铀矿找矿回顾与展望, 世纪之交的铀矿地质科技态势. 中国核工业地质局: 1~65.

杜乐天. 2001b. 中国热液铀矿基本成矿规律和一般热液成矿学. 北京: 原子能出版社.

多吉. 2003. 典型高温地热系统——羊八井热田基本特征. 中国工程科学, 5(1): 42 ~ 47.

多吉, 王贵玲, 郑克棪. 2017. 中国地热资源开发利用战略研究. 北京: 科学出版社.

甘浩男, 王贵玲, 蔺文静, 王潇, 马峰, 朱喜. 2015. 中国干热岩资

源主要赋存类型与成因模式. 科技导报, 33(19): 22 ~ 27.
韩至钧, 金占省. 1996. 贵州省水文地质志. 北京: 地震出版社.
郝士胤. 1981. 桐山庙地区的放射性水异常晕与铀矿化关系的探讨. 地质科技情报, (增刊): 145 ~ 145.
何斌, 徐义刚, 王雅玫, 肖龙. 2005. 东吴运动性质的厘定及其时空演变规律. 地球科学——中国地质大学学报, 30(1): 89 ~ 96.
何文君, 向贤礼, 李勇刚, 伍锡举. 2014. 贵州新萝热矿水化学特征及成因分析. 地下水, 36(5): 39 ~ 40.
黄凯平, 张维乾, 陈广庆. 2011. 贵州 504 铀汞钼矿床新认识及找矿方向. 中国核科学技术进展报告(第二卷).
黄明光, 温圣奇, 张学珍, 刘禾根. 2010. 寻乌县横迳地区温泉铀水异常成因初探. 应用科学, 16: 132 ~ 134.
胡旭刚. 2015. 若尔盖地区 510-1 铀矿床流体包裹体特征研究. 导师: 陈友良. 成都:成都理工大学硕士学位论文: 1 ~ 56.
吉勤克补子. 2015. 贵州息烽温泉水文地球化学特征及地质成因研究. 导师: 裴向军, 张林. 成都: 成都理工大学硕士学位论文: 1 ~ 51.
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.
李朝阳, 刘玉平, 叶霖, 皮道会. 2003. 有关贵州成矿研究中的几个问题讨论. 矿物岩石地球化学通报, 22(4): 350 ~ 355.
李庆阳. 1992. 四川盆地深部地热特征研究. 导师: 蔡惠蓉. 成都: 成都理工大学硕士学位论文:1 ~ 69.
李庆阳, 蔡惠蓉, 陈彦. 2010. 地热场与深部铀矿的关系研究及应用. 中国地质, 37(1): 198 ~ 203.
李学礼, 杨忠耀. 1984. 隆起带古地下水脉状承压热水排泄区(减压区)铀成矿模式. 华东地质学院学报, 7(2): 1 ~ 12.
李学礼. 1992. 江西温泉成因与铀矿化关系研究. 华东地质学院学报, 3: 201 ~ 220.
李学礼, 周文斌, 张卫民. 1999. 江西省大地热流与铀矿关系的初步研究. 铀矿地质, 9(4): 23 ~ 25.
李燕燕. 2014. 白马洞铀多金属矿床黑色蚀变碳同位素组成及成因意义. 导师: 张成江. 成都: 成都理工大学硕士学位论文: 1 ~ 68.
李燕燕. 2019. 贵州白马洞铀矿床黑色—红色蚀变形成机理及其与铀成矿关系. 导师: 多吉, 张成江, 池国祥. 成都:成都理工大学博士学位论文: 1 ~ 119.
李志成, 申娴达. 2014. 息烽新萝地热井成因浅析. 地质与勘探, 50(6): 1155 ~ 1159.
刘明光. 1998. 中国自然地理图集. 北京: 中国地图出版社: 98 ~ 112.
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.
毛健全, 陈阳. 1987. 利用二氧化硅地球化学温标计算贵州省温泉深部热储层温度. 贵州工学院学报, 15(3): 55 ~ 60.
毛健全. 2001. 贵州省地热资源特征、分布规律、开发现状及发展远景. 中国西部地热资源开发战略研究论文集, 29 ~ 36.
毛健全. 2006. 大力开发清洁、可持续利用的贵州地热资源. "建设资源节约型, 环境友好型社会"研讨会论文集论文, 12 ~ 17.
梅冥相, 马永生, 邓军, 李浩, 郑宽兵. 2005. 加里东运动构造古地理及滇黔桂盆地的形成—兼论滇黔桂盆地深层尤其勘探潜力. 地学前缘(中国地质大学(北京); 北京大学), 12(3): 227 ~ 236.
莫帮洪, 朱西养, 姚毅锋, 孙泽轩, 张辑. 2016. 贵州 504 矿床铀矿化特征及控矿因素分析. 世界核地质科学, 33(1): 19 ~ 25.
倪师军, 张成江, 徐争启, 余中美, 施泽明, 王永利. 2009. 西南晚震旦世—早寒武世黑色岩系中的铀成矿特征. 中国核科学技术进展报告(第一卷)铀矿地质分卷: 13 ~ 18.
彭辉才, 李俊. 2015. 下庄地区地热特征及地热资源分析. 西部资源, DOI:10. 16631/j. cnki. cn15-1331/p. 2015. 04. 039.
祁家明, 叶松鑫, 方晓骐, 曹豪杰, 唐仕尧. 2019a. 粤北仁化棉花坑铀矿床地下热水地球化学特征及补给来源研究. 地质论评, 65(1): 199 ~ 210.
祁家明, 朱捌, 吴建勇, 曹豪杰, 刘文泉, 徐争启. 2019b. 粤北仁化棉花坑铀矿床成矿热液演化及其对成矿过程的约束. 岩石学报, 35(9): 2711 ~ 2726.
商朋强. 2007. 岩石圈伸展对粤北下庄矿田铀成矿的制约机制研究. 导师: 胡瑞忠. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所博士学位论文: 1 ~ 111.
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.
孙贺, 肖益林. 2009. 流体包裹体研究: 进展、地质应用及展望. 地球科学进展, 24(10): 1105 ~ 1121.
宋小庆, 段启杉, 孟凡涛, 曹振东. 2014. 贵州息烽温泉地质成因分析. 地质科技情报, 33(5): 216 ~ 220.
孙占学, 李学礼, 史维浚. 1992. 江西中低温地热水的同位素水文地球化学. 华东地质学院学报, 15(3): 243 ~ 248.
唐俊儒, 朱杰辰. 1986. 贵州某些层控铀矿成矿时代. 铀矿地质, 2(6): 349 ~ 352.
唐显春, 王贵玲, 马岩, 张代磊, 刘忠, 赵旭, 程天君. 2020. 青海共和盆地地热资源热源机制与聚热模式. 地质学报, 94(7): 2052~2065.
佟伟. 1989. 腾冲地热田. 北京: 科学出版社.
涂光炽. 1990. 西南秦岭与西南贵州铀金成矿带及其与美国西部卡林型金矿床的类似性. 铀矿地质, 6(6): 321 ~ 325.
王安东, 孙占学, 刘金辉, 胡宝群, 万建军, 杨立中. 2015. 漳州地区岩石放射性地球化学特征及岩石圈热结构. 科技导报, 33(24): 41 ~ 45.
王贵玲, 张薇, 蔺文静, 刘峰, 朱喜, 刘彦广, 李郡. 2017. 京津冀地区地热资源成藏模式与潜力研究. 中国地质, 44(6): 1074 ~ 1085.
王贵玲, 张薇, 蔺文静, 刘峰, 甘浩男, 付雷. 2018. 全国地热资源调查评价与勘查示范工程进展. 中国地质调查, 5(2): 1 ~ 7.
王贵玲. 2018. 中国地热志西南卷二. 北京: 科学出版社.
王国坤, 金中国, 刘开坤, 王琼, 李艳桃. 2018. 贵州碳酸盐岩型铀矿找矿前景分析. 铀矿地质, 34(01): 9 ~ 14.
王俊虎, 张杰林, 王丽娟. 2011. ASTER 热红外影像温度反演及其应用. 金属矿山, 6: 319 ~ 322.
王微, 王世称, 刘光胜, 马生忠. 2011. 运用综合信息开展地震区划. 吉林大学学报(地球科学版), 41(3): 892 ~ 899.
汪集旸, 孙占学. 2001. 神奇的地热. 北京: 清华大学出版社.
魏肖, 金爱民, 朱蓉, 楼章华, 陈安清, 李梦瑶, 毛佩筱. 2018. 黔南黄平凹陷及周缘古流体特征及其对油气保存的指示. 地质科技情报, 37: 67 ~ 74.
徐增亮. 1982. 断裂构造频率与温泉及铀矿分布. 铀矿地质, 385 ~ 389.
严冰. 2012. 江西相山铀矿田地球化学特征研究. 导师: 胡瑞忠. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所博士学位论文: 1 ~ 135.
杨立中. 2016. 漳州地区典型花岗岩体放射性生热特征及干热岩资源潜力研究. 导师: 刘金辉, 王安东. 南昌:东华理工大学硕士学位论文: 1 ~ 72.
杨立中, 刘金辉, 孙占学, 王安东, 万建军, 周毅. 2016. 漳州岩体放射性生热率特征及干热岩资源潜力. 现代矿业, 563: 123 ~ 127,133.
杨瑞东, 任海利, 刘坤, 高军波. 2014. 贵州开阳白马洞铀矿化岩层

地球化学特征. 现代地质, 28(5):905 ~ 914.
余开富, 王守德. 1995. 贵州南部的都匀运动及其古构造特征和石油地质意义. 贵州地质, 12(3): 225 ~ 232.
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):933~940.
张保建,李燕燕,高俊,王贵玲,李郡,邢一飞,赵甜. 2020. 河北省马头营干热岩的成因机制及其示范意义. 地质学报,94(7):2036~2051. DOI:10. 19762/j. cnki. dizhixuebao. 2020226
张金带, 李子颖, 李友良, 郭庆银, 蔡煜琦. 2012. 铀矿资源潜力评价技术要求. 北京:地质出版社: 1 ~ 135.
张世丛, 陈履安. 1998. 贵州热矿水. 贵阳: 贵州科技出版社. 张小强, 黄凯平, 袁来, 申娴达, 郑懋荣. 2017. 贵州白马洞铀矿床深断裂、层间滑脱构造体系对铀成矿控制及找矿潜力分析. 贵州地质, 34 (4): 237 ~ 243.
张万良, 刘德长, 李子颖, 张景波. 2005. 江西安远热隆基本地质特征及其铀矿远景. 矿产与地质, 2(19): 122 ~ 126.
张万良, 李富梅. 2014. 邵武—河源断裂带会昌断裂新构造活动特征及意义. 矿产与地质, 28(6): 725 ~ 729.
张万良, 李子颖, 刘德长, 赵英俊. 2015. 赣中抚州—永丰断裂新构造活动踪迹及其找矿意义. 地质找矿论丛, 30(1): 23 ~ 29.
张卫民. 1992. 临川温泉地区金成矿特征及远景初探. 华东地质学院学报, 15(3): 276 ~ 283.
张小强, 黄凯平, 袁来, 申娴达. 2017. 贵州白马洞铀矿床深断裂、层间滑脱构造体系对铀成矿控制及找矿潜力分析. 贵州地质, 34 (4): 237 ~ 243.
张云辉. 2019. 鲜水河断裂康定—磨西段地热系统成因及开发利用研究. 导师: 许模, 李晓. 成都: 成都理工大学博士论文: 1 ~ 171.
赵平, 汪集旸, 汪缉安, 罗定贵. 1995. 中国东南地区岩石生热率分布特征. 岩石学报, 11(3): 292 ~ 305.
郑永飞, 徐宝龙, 周根陶. 2000. 矿物稳定同位素地球化学研究. 地学前缘, 7(2): 299 ~ 320.
周立坚. 2016. 汝城地热田地热井非线性增温成因浅析. 华南地质与矿产, 32(3): 218 ~ 223.
祝宏勋, 潘红平, 简兴祥. 2008. 多重关联分析法在降扎地区铀成矿预测评价中的应用. 铀矿地质, 24(4): 233 ~ 241.
祝青云, 覃正良. 2008. 金银寨矿区外围硅质角砾岩特征及分布规律. 湘潭师范学院学报(自然科学版), 30(2): 99 ~ 102.
Aniel B, Leroy J. 1985. The reduced uraniferous mineralizations associated with the volcanic rocks of the Sierra Pena Blanca (Chihuahua, Mexico). Americal Mineralogist, 70: 1290 ~ 1297.
Arevalo Jr, McDonough W F, Luong M. 2009. The K/U ratio of the silicate Earth: Insights into mantle composition, structure and thermal evolution. Earth and Planetary Science Letters, 278: 361 ~ 369.
Belkin H, Vivo B D, Gianelli G, Lattanzi P. 1985. Fluid inclusions in minerals from the geothermal fields of Tuscany, Italy. Geothermics, 14(1): 59 ~ 72.
Bertani. 2015. Geothermal power generation in the world 2010 ~ 2014 update report, Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19 ~ 25 April.
Bird D K, Spieler A R. 2004. Epidote in geothermal systems. Reviews Mineralogy Geochemistry, 56(1): 235 ~ 300.
Boles J R, Eichhubl P, Graven G, Chen J. 2004. Evolution of a hydrocarbon pathway along basin-bounding faults: Evidence from fault cement. AAPG Bull, 88: 947 ~ 970.
Bourdet J, Pironon J, Levresse G, Tritlla J. 2008. Petroleum type determination through homogenization temperature and vapor volume fraction measurements in fluid inclusions. Geofluids, 8: 46 ~ 59.
Browne P R L, Roedder E, Wodzicki A. 1976. Comparison of past and present geothermal waters from a study of fluid inclusions, Broadlands Field, N. Z.: Proceedings International System on Water—rock Interaction: 140 ~ 149.
Brugger J, Long N, McPhail D C, Plimer I. 2005. An active amagmatic hydrothermal system: The Paralana hot springs, Northern Flinders Ranges, South Australia. Chemical Geology, 222: 35 ~ 64.
Budai J M, Martini A M, Walter L M, Ku T C W. 2002. Fracture-fill calcite as a record of microbial methanogenesis and fluid migration: A case study from the Devonian Antrim Shale, Michigan Basin. Geofluids, 2:163 ~ 183.
Cai Xinglin, Zhang Chaoju, Guo Jiangbo, Wu Dan, Fan Xin, Yang Mingjun. 2018&. Geothermal water genetic analysis in Kaiyang phosphate mine west lime, Guizhou. Coal Geology of China, 30 (6): 101 ~ 104.
Chen Lan. 2005&. Sedimentology and geochemistry of the early Cambrian black rock series in the Hunan—Guizhou area, China. Tutor: Hu Ruizhong, Zhonghong. Guiyang: PhD thesis of Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences: 1 ~ 90.
Chen Luming, 1990&. Discussion on the origin of uranium deposit No. 504. Uranium Geology, 6(8): 135 ~ 144.
Chen Youliang. 2008&. The study on ore-forming fluid genesis and ore-forming model of Carbonaceous—siliceous—argillitic rock type uranium deposit in Zoige region. Tutor: Liu Jiaduo, Zhang Chengjiang. Chengdu: PhD thesis of Chengdu University of Technology: 1 ~ 120.
Chi Guoxiang, Haid T, Quirt D, Fayek M, Blamey N, Chu Haixia. 2017. Petrography, fluid inclusion analysis, and geochronology of the End uranium deposit, Kiggavik, Nunavut, Canada. Mineralium Deposita, 52: 211 ~ 232.
Chu Haixia, Chi Guoxiang, Bosman S, Card C. 2015. Diagenetic and geochemical studies of sandstones from drill core DV10-001 in the Athabasca Basin, Canada, and implications for uranium mineralization. Journal of Geochemical Exploration, 148: 206 ~ 230.
Coveney Jr R M, Nansheng C. 1991. Ni—Mo—Au-rich ores in Chinese black shales and speculations on possible analogues in the United States. Mineralium Deposita, 26: 83 ~ 88.
Cuney M. 1978. Geologic environment, mineralogy, and fluid inclusions of the Bois Noirs—Limouzat uranium vein, Forez, France. Economic Geology, 73: 1567 ~ 1610.
Du Letian. 2001a #. Review and Prospect of Granite Type Uranium Ore Prospecting, State of Uranium Geology and Technology at the Turn of the Century. China Geological Bureau of Nuclear Industry; 1 ~ 65.
Du Letian. 2001b #. Basic Metallogenic Regularities and General Hydrothermal Metallogeny of Chinese Hydrothermal Uranium Deposits. Beijing: Atomic Energy Press.
Duo Ji, Wang Guiling, Zheng Keyan. 2017 #. Research on the development and utilization strategy of geothermal resources in China. Beijing: Science Press.
Duo Ji. 2003&. The basic characteristics of the Yangbajing geothermal field——A typical high temperature geothermal system. Engineering Science, 5(1): 42 ~ 47.
Elders W A, Hoagland J R, Olson E R. 1978. Hydrothermal mineralogy and isotope geochemistry in the Cerro Prieto Geothermal Field, Mexico Practical Applications: UCR/IGPP contribution no. 78/10.
El-Feky M. 2011. Mineralogical, REE-geochemical and fluid inclusion studies on some uranium occurrences, Gabal Gattar, Northeastern

Desert, Egypt. Chinese Journal of Geochemistry, 30: 430 ~ 443.

Gan Haonan, Wang Guiling, Lin Wenjing, Wang Xiao, Ma Feng, Zhu Xi. 2015&. Research on the occurrence types and genetic models of hot dry rock respurces in China. Science & Technology Review, 33 (19): 22 ~ 27.

Goldstein B A, Hill A J, Long A, Budd A R, Holgate F, Malavazos M. 2009. Hot rock geothermal energy plays in Australia. Proceedings, Thirty-Fourth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, February 9 ~ 11, SGP-TR-187.

Grant M A, Donaldson I G, Bixley P F. 1982. Geothermal Reservoir Engineering. New York: Academic Press.

Han Zhijun, Jin Zhansheng. 1996#. Hydrogeology of Guizhou Province. Beijing: Seismological Press.

Hao Shiyin. 1981#. Study on the relationship between radioactive water anomaly and uranium mineralization in Tongshanmiao area. Geological Science and Technology Information, (S1): 145 ~ 145.

He Bin, Xu Yigang, Wang Yamei, Xiao Long. 2005&. Nature of the Dongwu movement and its temporal and spatial evolution. Earth Science—— Journal of China University of Geosciences, 30(1): 89 ~ 96.

He Wenjun, Xiang Xianli, Li Yonggang, Wu Xiju. 2014 #. Hydrochemical characteristics and analysis of Xinluo ore in Guizhou province. Ground Water, 36(5): 39 ~ 40.

Hedenquist G. 1980. Proceedings of the New Zealand Geothermal Workshop.

Helmy H M, Kaindl R, Shibata T. 2014. Genetically related Mo—Bi—Ag and U—F mineralization in A-type granite, Gabal Gattar, Eastern Desert, Egypt. Ore Geology Reviews, 62: 181 ~ 190.

Hillis R, Hand M, Mildren S, Morton J, Reid P, Reynolds S. 2004. Hot dry rock geothermal exploration in Australia. In: Boult P J, Johns D R, Lang S C. Eds. Eastern Australian Basins Symposium: II. Petroleum Exploration Society of Australia, Special Publication: 413 ~ 421.

Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Zhou Meifu. 2008. Uranium Metallogenesis in South China and its relationship to crustal extension during the Cretaceous to Tertiary. Economic Geology, 103: 583 ~ 598.

Hu Xugang. 2015&. A study on the characteristics of fluid inclusion in Zoige 510-1 uranium deposit, Sichuan province, China. Tutor: Chen Youliang. Chengdu: Master's degree of Chengdu University of Technology: 1 ~ 56.

Huang Kaiping, Zhang Weiqian, Chen Guangqing. 2011&. New knowledge and direction of ore searching about Guizhou 504 uranium, hydrargyrum and molybdenum orebody. Progress Report on China Nuclear Science & Technology (Vol. 2).

Huang Mingguang, Wen Shengqi, Zhang Xuezhen, Liu Hegen. 2010#. A preliminary study on the origin of uranium water anomalies in hot spring in Hengjing area, Xunwu country. Applied Science, 16: 132 ~ 134.

Iwatsuki T, Satake H, Metcalfe R, Yoshida H, Hama K. 2002. Isotopic and morphological features of fracture calcite from granitic rocks of the Tono area, Japan: a promising palaeohydrogeological tool. Applying Geochemistry, 17: 1241 ~ 1257.

Janssen C, Michel G W, Bau M, Luders V, Muhle K. 1997. The North Anatolian fault zone and the role of fluids in seismogenic deformation. Journal of Geology, 105: 387 ~ 403.

Jiqinkebuzi. 2015&. The hydrogeochemical characteristics and genesis research of Xifeng hot springs in Guizhou. Tutor: Pei Xiangjun, Zhang Lin. Chengdu: Master's thesis of Chengdu University of Technology: 1 ~ 51.

Kirschner D L, Masson H, Sharp Z D. 1999. Fluid migration through thrust faults in the Helvetic nappes (Western Swiss Alps). Contribution Mineralogy Petrology, 136: 69 ~ 83.

Leach T M. 1982. An evaluation of fluid inclusions as a geothermal exploration tool. Proc. 4th N. Z. Geothermal Workshop: 475 ~ 478.

Li Chaoyang, Liu Yuping, Ye Lin, Pi Daohui. 2003&. Discussion on some problems in the study of mineralization in Guizhou. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 22(4): 350 ~ 355.

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.

Li Qingyang. 1992&. The Study of Deep Geothermal Features in Sichuan Basin. Tutor: Cai Huirong. Chengdu: Master's thesis of Chengdu University of Tchnology: 1 ~ 69.

Li Qingyang, Cai Huirong, Chen Yan. 2010&. The study and application of the relationship between the geothermal field and the deep uranium ore deposit. Geology in China, 37(1): 198 ~ 203.

Li Rongxi, Dong Shuwen, Lehrmann D, Duan Lizhi. 2013. Tectonically driven organic fluid migration in the Dabashan Foreland Belt: evidenced by geochemistry and geothermometry of vein-filling fibrous calcite with organic inclusions. Journal of Asian Earth Science, 75: 202 ~ 212.

Li Xueli, Yang Zhongyao. 1984#. Uranium mineralization model of the pipe-like discharge area (decompression area) of the ancient groundwater in the uplift. Journal of East China Geological Institute, 7(2): 1 ~ 12.

Li Xueli. 1992&. Sutdy on the relationship between Jiangxi hot-spring genesis and uranium mineralization. Journal of East China Geological Institute, 3: 201 ~ 220.

Li Xueli, Zhou Wenbin, Zhang Weimin. 1999&. A preliminary study on the relationship between terrestrial heat flow and uranium deposits in Jiangxi province. Uranium Geology, 9(4): 23 ~ 25.

Li Yanyan. 2014&. The characteristic of carbon isotope and mineralization significance of black alteration of Baimadong U—polymetallic. Tutor: Zhang Chengjiang. Chengdu: Master's thesis of Chengdu University of Technology: 1 ~ 68.

Li Yanyan, Zhang Chengjiang, Chi Guoxiang, Duo Ji, Li Zenghua, Song Hao. 2019. Black and red alterations associated with the Baimadong uranium deposit (Guizhou, China): Geological and geochemical characteristics and genetics relationship with uranium mineralization. Ore Geology Review, 102981: 1 ~ 17.

Li Yanyan. 2019&. Black and red alterations associated with the Baimadong uranium deposit (Guizhou, China): Genetic relationship with uranium mineralization. Tutor: Duo Ji, Zhang Chengjiang, Chi Guoxiang. Chengdu: PhD thesis of Chengdu University Technology, 1 ~ 119.

Li Zhicheng, Shen Xianda. 2014&. Genesis of the Xinluo geothermal well in Xifeng, Guizhou province. Geology and Exploration, 50 (6): 1155 ~ 1159.

Liang Rong, Chi Guoxiang, Ashton K, Blamey N, Fayek M. 2017. Fluid compositions and P—T conditions of vein-type uranium mineralization in the Beaverlodge uranium district, northern Saskatchewan, Canada. Ore Geology Review, 80: 460 ~ 483.

Ling Kunyue, Zhu Xiaoqing, Tang Haoshu, Wang Zhonggang, Yan Huiwen, Han Tao, Chen Wenyi. 2015. Mineralogical characteristics of the karstic bauxite deposits in the Xiuwen ore belt, Central Guizhou Province, Southwest China. Ore Geology Reviews, 65: 86 ~ 96.

Liu Mingguang. 1998#. Atlas of Physical Geography of China. Beijing: Map of China Press: 98 ~ 112.

Long Yongzhen, Chi Guoxiang, Liu Jianping, Jin Zhongguo, Dai Tangen. 2017. Trace and rare earth elements constraints on the sources of the Yunfeng paleo-karstic bauxite deposit in the Xiuwen—Qingzhen area, Guizhou, China. Ore Geology Reviews, 91: 404 ~ 418.

Lu Yichia, Song Shengrong, Taguchi S, Wang Peiling, Yeh E C, Lin Yujie, MacDonald J, John C. 2018. Evolution of hot fluids in the Chingshui geothermal field inferred from crystal morphology and geochemical vein data. Geothermics, 74: 305 ~ 318.

Luetkemeyer P B, Kirschner D, Huntington K W, Chester J S, Chester F M, Evans J P. 2016. Constraints on paleofluid sources using the clumped-isotope thermometry of carbonate veins from the SAFOD (San Andreas Fault Observatory at Depth) borehole. Tectonophysics, 690A: 174 ~ 189.

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.

Mao Jianquan, Chen Yang. 1987&. SiO_2 geothermal thermometer and the temperature of deep thermal-reservoir in Guizhou. Journal of Guizhou Institute of Technology, 15(3): 55 ~ 60.

Mao Jianquan. 2001#. The characteristics, distribution, development status and prospect of geothermal resources in Guizhou province. Research papers on geothermal resources development study in western China, 29 ~ 36.

Mao Jianquan. 2006#. Vigorous develop clean and sustainable geothermal resources in Guizhou. Proceedings of the symposium on "Building a resource—conserving and environment friendly society", 12 ~ 17.

Mei Mingxiang, Ma Yongsheng, Deng Jun, Li Hao, Zheng Kuanbin. 2005&. Tectonic palaeogeographic changes resulting from the Caledonian movement and the formation of the Dianqiangui basin: Discussion on the deep exploration potential of oil and gas in the Dianqiangui basin. Earth Science Frontiers, 12(3): 227 ~ 236.

Min Maozhong. 1995. Carbonaceous—siliceous—pelitic rock type uranium deposits in Southern China: geological setting and metallogeny. Ore Geology Reviews, 10: 51 ~ 64.

Mo Banghong, Zhu Xiyang, Yao Yifeng, Sun Zexuan, Zhang Ji. 2016&. Analysis in uranium mineralization characteristics and ore-controlling factors of deposit 504, Guizhou. World Nuclear Geoscience, 33(1): 19 ~ 25.

Ni Shijun, Zhang Chengjiang, Xu Zhengqi, Yu Zhongmei, Shi Zeming, Wang Yongli. 2009&. Characteristics of uranium metallogenesis of the Late Sinian—Early Cambrian black shales in the southwest of China. Progress Report on China Nuclear Science & Technology, 1: 13 ~ 18.

Pecher A, Lespinasse M, Leroy J. 1985. Relations between fluid inclsion trails and regional stress field: a tool for fluid chronology. An example of an intragranitic uranium ore deposit (Northewest Massif Central, France). Lithos, 18: 229 ~ 237.

Peng Huicai, Li Jun. 2015#. Geothermal characteristics and geothermal resources analysis in Xiazhuang area. Western Resources, DOI: 10.16631/j.cnki.cn15-1331/p.2015.04.039.

Pi Daohui, Liu Congqiang, Shields-Zhou G A, Jiang Shaoyong. 2013. Trace and rare earth element geochemistry of black shale and kerogen in the early Cambrian Niutitang Formation in Guizhou province, South China: constraints for redox environments and origin of metal enrichments. Precambrian Reviews, 225: 218 ~ 229.

Prol-Ledesma R M, Browne P R L. 1989. Hydrothermal alteration and fluid inclusion geothermometry of los humeros geothermal field, Mexico. Geothermics, 18(5~6): 677 ~ 690.

Qi Jiaming, Ye Songxin, Fang Xiaoqi, Cao Haojie, Tang Shiyao. 2019a&. Study on hydrogeochemical and recharge sources characteristics of geothermal water in the Mianhuakeng uranium deposit, Renhua, Northern Guangdong. Geological Review, 65 (1): 199 ~ 210.

Qi Jiaming, Zhu Ba, Wu Jianyong, Cao Haojie, Liu Wenquan, Xu Zhengqi. 2019b&. The evolution of ore-forming fluid and its constraint on mineralization process in Mianhuakeng uranium deposit, northern Guangdong, China. Acta Petrologica Sinica, 35 (9): 2711 ~ 2726.

Roedder E. 1984. Fluid inclusions. Geology Socity America Bulletin. 12: 644.

Rybach L. 1976. Radioactive heat production in rocks and its relation to other petrophysical parameters. Pure Appl. Geophys., 114: 309 ~ 318.

Sasada M. 1986. Anhydrite precipitation by low pressure boiling at DW-5 drill hole, Hohi geothermal area. Japan: fluid inclusion evidence and geological significance. Geothermal Research Council Transaction, 10: 149 ~ 154.

Sawaki T, Sasada M, Sasaki M, Goko K. 1997. Fluid inclusion study of the Kirishima geothermal system, Japan. Geothermics, 26(3): 305 ~ 327.

Scott G L. 1990. A fluid-inclusion investigation of the Tongonan geothermal field, Philippines. Geothermics, 19(3): 259 ~ 271.

Shang Pengqiang. 2007&. Restraining mechanism of lithospheric extension on uranium mineralization in the Xiazhuang orefield, Northern Guangdong Province, China. Tutor: Hu Ruizhong. Guiyang: PhD thesis of Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences: 1 ~ 111.

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.

Song Xiaoqing, Duan Qishan, Meng Fantao, Cao Zhendong. 2014&. Geological genesis analysis of the Xifeng hot spring in Guizhou. Geological Science and Technology Information, 33(5): 216 ~ 220.

Sun He, Xiao Yilin. 2009&. Fluid inclusions: Latest development, geological applications and prospect. Advances in Earth Science, 24 (10): 1105 ~ 1121.

Sun Zhanxue, Li Xueli, Shi Weijun. 1992&. Isotopic hydrogeochemistry of mid—low temperature geothermal water in Jiangxi province. Journal of East China Geological Institute, 15(3): 243 ~ 248.

Tang Junru, Zhu Jiechen. 1986#. Metallogenic epoch of some stratabound uranium deposits in Guizhou. Uranium Geology, 2(6): 349 ~ 352.

Tang Xianchun, Wang Guiling, Ma Yan, Zhang Dailei, Liu Zhong, Zhao Xu, Cheng Tianjun. 2020&. Geological model of heat source and accumulation for geothermal anomalies in the Gonghe basin, northeastern Tibetan Plateau. Acta Geologica Sinica, 94(7): 2052 ~ 2065.

Tong Wei. 1989#. Tengchong geothermal field. Beijing: Science Press.

Truesdell A H, White D E. 1973. Production of superheated steam from vapor-dominated geothermal reservoirs. Geothermics, 2: 154 ~ 173.

Tu Guangchi. 1990&. The SW Qinling and the SW Guizhou uranium and gold metallogenic belts, and their similarities to the carlin-type gold deposits in the western states, USA. Uranium Geology, 6(6): 321 ~ 325.

Vidal J, Patrier P, Genter A, Beaufort D, Dezayes C, Glaas C, Lerouge C, Sanjuan B. 2018. Clay minerals relatedto the circulation of geothermal fluids in boreholes at Rittershoffen (Alsace, France). Journal of Volcanology and Geothermal Research, 349: 192 ~ 204.

Walker S. 1999. Beverley Uranium Project——in situ mining approved. MESA Journal, 13: 8 ~ 10.

Wallin B, Peterman Z. 1999. Calcite fracture fillings as indicators of paleohydrology at Espo Laxemar at the A E Hard Rock Laboratory, southern. Applying Geochemistry, 14.

Wang Andong, Sun Zhanxue, Liu Jinhui, Hu Baoqun, Wan Jianjun, Yang Lizhong. 2015**&**. Radiogenic heat production of rocks from Zhangzhou, Southeast China and its implications for thermal regime of lithosphere. Science & Technology Review, 33(24): 41 ~ 45.

Wang Guiling, Zhang Wei, Lin Wenjing, Liu Feng, Zhu Xi, Liu Yanguang, Li Jun. 2017**&**. Research on formation mode and development potential of geothermal resources in Beijing—Tianjin—Hebei region. Geology in China, 44(6): 1074 ~ 1085.

Wang Guiling, Zhang Wei, Lin Wenjing, Liu Feng, Gan Haonan, Fu Lei. 2018a**&**. Project progress of survey, evaluation and exploration demonstration of national geothermal resource. Geological Survey of China, 5(2): 1 ~ 7.

Wang Guiling. 2018b **#**. China Geothermal (southwest Vol. II). Beijing: Science Press.

Wang Guokun, Jin Zhongguo, Liu Kaikun, Wang Qiong, Li Yantao. 2018**&**. Analysis on the exploration prospect of carbonate rock type uranium deposits in Guizhou. Uranium Geology, 34(01): 9 ~ 14.

Wang Jiyang, Sun Zhanxue. 2001 **#**. Magic geothermal. Beijing: Tsinghua University Press.

Wang Junhu, Zhang Jielin, Wang Lijuan. 2011 **#**. ASTER thermal infrared image temperature inversion and its application. Metal Mine, 6: 319 ~ 322.

Wang Kai, Yuan Bin, Ji Guomin, Wu Xingru. 2018. A comprehensive review of geothermal energy extraction and utilization in oilfields. Journal of Petroleum Science and Engineering, doi: 10. 1010/j. petrol. 2018. 05. 012.

Wang Kewen, Chi Guoxiang, Kathryn M, Bethune, Li Zenghua, Nigel B, Colin C, Eric G, Potter, Liu Yongxing. 2018. Fluid *P—T—X* characteristics and evidence for boiling in the formation of the Phoenix uranium deposit (Athabasca Basin, Canada): Implications for unconformity-related uranium mineralization mechanisms. Ore Geology Reviews, 101: 122 ~ 142.

Wang Peiling, Wu Jiajing, Yeh E C, Song Shengrong, Chen Yuegau, Lin Lihuang. 2010. Isotopic constraints of vein carbonates on fluid sources and processes associated with the ongoing brittle deformation within the accretionary wedge of Taiwan. Terra Nov. 22: 251 ~ 256.

Wang Wei, Wang Shicheng, Liu Guangsheng, Ma Shengzhong. 2011**&**. Seismic zoning with integrated information. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 41(3): 892 ~ 899.

Wei Xiao, Jin Aimin, Zhu Rong, Lou Zhanghua, Chen Anqing, Li Mengyao, Mao Peixiao. 2018**&**. Paleo-fluid characteristics and its indication on petroleum preservation in Huangping sag and its margin, South Guizhou. Geological Science and Technology Information, 37: 67 ~ 74.

Xu Zengliang. 1982**#**. Fault structural frequency and distribution of hot springs and uranium deposits. Uranium Geology, 385~389.

Yan Bing. 2012**&**. Geochemistry of the Xiangshan uranium ore field, Jiangxi. Tutor: Hu Ruizhong. Guiyang: PhD thesis of Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences: 1 ~ 135.

Yang Enlin, Lu Xinbiao, Bao Miao, Luo Jianjun, Hu Qingcheng. 2013. Enrichment and origin of some trace elements in black shales from the early Cambrian in eastern Guizhou Province. Advance of Earth Science, 28(10): 1160 ~ 1169.

Yang Lizhong. 2016**&**. The radioactive heat-producing characteristics and the hot dry rock resources potential of prototypes granite rocks in Zhangzhou region. Tutor: Liu Jinhui, Wang Andong. Nanchang: Master's thesis of East China University of Technology, 1 ~ 72.

Yang Lizhong, Liu Jinhui, Sun Zhanxue, Wang Andong, Wan Jianjun, Zhou Yi. 2016**&**. Study of the characteristics of radioactive heat production rate and hot dry rock resources potential in Zhangzhou city. Modern Mining, 563: 123 ~ 127+133.

Yang Ruidong, Ren Haili, Liu Kun, Gao Junbo. 2014**&**. Geochemical characteristics of uranium mineralization rock in Baimadong, Kaiyang country, Guizhou Province. Geoscience, 28(5): 905 ~ 914.

Yu Kaifu, Wang Shoude. 1995**&**. Duyun movement in south Guizhou province and its paleostructure, and their significance in petroleum geology. Guizhou Geology, 12(3): 225 ~ 232.

Yuan Lijuan, Kong Xiangjun, Gao Jian, Sheng Pengfei, He Yuncheng, Feng Hao, Li Wen, Hao Weijun. 2020**&**. Genetic model of the Yanqing geothermal field, Beijing. Geological Review, 66(4): 933~940.

Zhang Baojian, Li Yanyan, Gao Jun, Wang Guiling, Li Jun, Xing Yifei, Zhao Tian. 2020. Genesis and indicative significance of hot dry rock in Matouying, Hebei Province. Acta Geologica Sinica, 94(7): 2036~2051. DOI: 10. 19762/j. cnki. dizhixuebao. 2020226

Zhang Jindai, Li Ziying, Li Youliang, Guo Qingyin, Cai Yuqi. 2012**#**. Technical Requirements for Potential Evaluation of Uranium Resources. Beijing: Geological Press: 1 ~ 135.

Zhang Ligang. 1988. Oxygen isotope studies of wolframite in Tungsten ore deposits of South China. Geochemistry, 7(2): 109 ~ 119.

Zhang Shicong, Chen Lvan. 1998**#**. Guizhou Hot Ore Water. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press.

Zhang Wanliang, Liu Dechang, Li Ziying, Zhang Jingbo. 2005**&**. Basic geological features and future of uranium ore in the Anyuan hoe dome in Jiangxi. Minerak Resources and Geology, 2(19): 122 ~ 126.

Zhang Wanliang, Li Fumei. 2014**&**. Characteristics and significance of neotectonics of Huichang fracture od Shaowu—Heyuan fracture zone. Mineral Resources and Geology, 28(6): 725 ~ 729.

Zhang Wanliang, Li Ziying, Liu Dechang, Zhao Yingjun. 2015**&**. The neotectonics activity trail of Fuzhou—Yongfeng fault and its significance to uranium ore exploration in central Jiangxi province. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 30(1): 23 ~ 29.

Zhang Weimin. 1992**&**. Preliminary study on the gold ore-forming signature and prospect in Linchuan wenquan. Journal of East China Geological Institute, 15(3): 276 ~ 283.

Zhang Xiaoqiang, Huang Kaiping, Yuan Lai, Shen Xianda, Zheng Maorong. 2017**&**. Prospecting potential analysis and uranium mineralization control of deep fracture and interlayer detachment structure system of Baimadong uranium deposit in Guizhou. Guizhou Geology, 34 (4): 237 ~ 243.

Zhang Xiaoqiang, Huang Kaiping, Yuan Lai, Shen Xianda, Zheng Maorong. 2017**&**. Prospecting potential analysis and uranium mineralization control of deep fracture and interlayer detachment structure system of Baimadong uranium deposit in Guizhou. Guizhou Geology, 4: 237 ~ 243.

Zhang Yunhui. 2019&. Research on genesis and development of the geothermal system in the Kangding-Moxi segment of the Xianshuihe fault. Tutor: Xu Mo, Li Xiao. Chengdu: Ph. D. thesis of Chengdu University Technology: 1 ~ 171.
Zhao Ping, Wang Jiyang, Wangj Ji ' an, Luo Dinggui. 1995&. Characteristics of heat production distribution in SE China. Acta Petrologica Sinica, 11(3): 292 ~ 305.
Zheng Keyan, Dong J, Chen Z, Tian Tingshan, Wang Guiling. 2015. Speeding up industrialized development of geothermal resources in China——Country Update Report 2010 ~ 2014. In: Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, April, 19 ~ 24, 2015.
Zheng Yongfei, Xu Baolong, Zhou Gentao. 2000&. Geochemical studies of stable isotopes in minerals. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 7(2): 299 ~ 320.
Zhou Jiaxi, Huang Zhilong, Lü Zhicheng, Zhu Xiangkun, Gao Jianguo, Mirnejad H. 2014. Geology, isotope geochemistry and ore genesis of the Shanshulin carbonate-hosted Pb—Zn deposit, southwest China. Ore Geology Reviews, 63: 209 ~ 225.
Zhou Lijian. 2016&. The case of nonlinear temperature increase of geothermal well in Rucheng geothermal field. Geology and Mineral Resources of South China, 32(3): 218 ~ 223.
Zhu Hongxun, Pan Hongping, Jian Xingxiang. 2008&. Application of multiple correlation analysis method to the prognosis and evaluation of uranium metallogenisys in Jiangzha region. Uranium Geology, 24(4): 233 ~ 241.
Zhu Qingyun, Tan Zhengliang. 2008#. Characteristics and distribution of siliceous breccia in the periphery of Jinyinzhai mining area. Journal of Xiangtan Normal University (Natural Science Edition), 30(2): 99 ~ 102.

Genetic relationship between geothermal energy and hydrothermal uranium deposits: research progress and method

LI Yanyan[1,2], DUO Ji[3], ZHANG Chengjiang[4], CHI Guoxiang[5], WANG Guiling[1,2], ZHANG Fangfang[6], XING Yifei[1,2], ZHANG Baojian[1,2]

1) *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing*, 100037, *China*;
2) *SinoProbe Center*, *Chinese Academy of Geological Sciences and China Geological Survey*, *Beijing*, 100037, *China*;
3) *Tibet Bureau of Geological Exploration*, *Lhasa*, 850032, *China*;
4) *Chengdu University of Technology*, *Chengdu*, 610059, *China*;
5) *University of Regina*, *Regina*, *Saskatchewan*, *S4S 0A2*, *Canada*;
6) *China University of Geosciences* (*Beijing*), *Beijing*, 100083, *China*

Abstract: As a type of clean and renewable resource, geothermal energy has been widely utilized in power generation and heating. Radiogenic heat is a primary source for geothermal energy in earth. The research on radiogenic geothermal energy has been focused on its application in detecting and evaluating potential for dry hot rock. However, as vital radioactive source, the research about the genetic relationship between hydrothermal uranium deposits and geothermal energy is poor. This paper collected and sorted out a large number of domestic and foreign literature as well as related materials to enhance the research about the genetic relationship between geothermal energy and hydrothermal uranium deposits. Based on the research progress and existing problems, method to solve this issue is put forward. Through this study, a new thought and method can be provided for studying the genetic relationship of geothermal energy and hydrothermal uranium deposits and certain theoretical basis could be supplied for “geothermal energy—ore jointly exploring”.

Keywords: geothermal energy; hydrothermal uranium deposits; genetic relationship; research progress; method

Acknowledgements: This study is supported by National Key Research and Development Projects (No. 2019YFB1504102), Project of Chinese Academy of Geological Sciences (Nos. JKY202018, YWF201903-01) and Project of China Geological Survey (No. DD20189114)

First author: LI Yanyan, female, born in 1988, Ph. D, research assistant, mainly engages in geothermal geology; Email: liyanyan@cags. ac. cn

Manuscript received on: 2020-05-06; Accepted on: 2020-08-08; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2020. 05. 020