



移动阅读

伍皓, 李小刚, 夏彧, 等, 2023. 腾冲温泉中 Li-U-Au 异常富集特征及其成因浅析[J]. 沉积与特提斯地质, 43(2): 416-427. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.11004

WU H, LI X G, XIA Y, et al., 2023. Characteristics and causes of Li-U-Au abnormal enrichment in Tengchong hot spring[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(2): 416-427. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.11004

## 腾冲温泉中 Li-U-Au 异常富集特征及其成因浅析

伍皓<sup>1</sup>, 李小刚<sup>2,3\*</sup>, 夏彧<sup>1</sup>, 周恩恩<sup>1</sup>, 梁薇<sup>1</sup>, 李炼鹏<sup>4</sup>, 孔然<sup>4</sup>, 雷星<sup>5</sup>, 谢忠评<sup>2</sup>

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心(西南地质科技创新中心), 四川 成都 610218; 2. 重庆科技学院复杂油气田勘探开发重庆市重点实验室, 重庆, 401331; 3. 自然资源部沉积盆地与油气资源重点实验室, 四川 成都 610218; 4. 云南省核工业 209 地质大队, 云南 昆明 650032; 5. 云南省核工业地质调查队, 云南 昆明 650106)

**摘要:** 综合滇西腾冲 1974 年以来的调查研究文献资料发现, 该区正在发育国内外罕见的现代热泉型铷、金、铯、锶、锂、汞、钨、钼等元素的异常富集系统。为总结温泉中铷、铀、金战略性金属元素异常富集特征, 探索其共生富集机制, 本文统计了腾冲 57 个温泉近 50 年报道的 320 个地球化学数据, 初次系统梳理出温泉中铷、铀、金元素具以下典型特征: (1) 3 种金属元素集中在部分泉水中异常富集。铷、金主要富集于大滚锅, 铀主要富集于珍珠泉和叠水河碳酸泉, 温泉中铷和铀含量高于全省绝大多数温泉。(2) 铷元素含量稳定、富集效率高、资源潜力大。热海地区温泉铷含量变异系数均低于 30%, 指示半个世纪来铷含量波动幅度小, 铷“流而不衰”; 有学者初步测算出全区温泉年溢出铷金属量达 532.9 吨, 20 年流失量即可超过一个小型铷矿。此外, 381 砂岩型铀矿床还存在铀“采而不尽”的现象, 可能与泉水中新生铀的持续补给有关。在前人研究成果基础之上, 新提出温泉中铷、铀、金的共生富集可能主要是在地核或其局部富集的此类元素沿“腾冲现代地幔柱”自下往上迁移, 在地表温泉及其沉积物中不断聚集的结果, 即“核源—地幔柱”成因。

**关键词:** 腾冲; 温泉; 铷、铀、金富集特征; 地核; 地幔柱

中图分类号: P611; P612; P641.3

文献标识码: A

## Characteristics and causes of Li-U-Au abnormal enrichment in Tengchong hot spring

WU Hao<sup>1</sup>, LI Xiaogang<sup>2,3\*</sup>, XIA Yu<sup>1</sup>, ZHOU Kenken<sup>1</sup>, LIANG Wei<sup>1</sup>, LI Lianpeng<sup>4</sup>, KONG Ran<sup>4</sup>, LEI Xing<sup>5</sup>, XIE Zhongping<sup>2</sup>

(1. Chengdu Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Southwest China), Chengdu 610218, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Complex Oil & Gas Exploration and Development, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, China; 3. Key laboratory of sedimentary basin and oil and gas resources, Ministry of natural resources, Chengdu 610218, China; 4. 209 Geological Brigade of Nuclear Industry of Yunnan Province, Kunming 650032, China; 5. Nuclear Industry Geological Survey Team of Yunnan Province, Kunming 650106, China)

收稿日期: 2022-07-27; 改回日期: 2022-09-29; 责任编辑: 曹华文; 科学编辑: 曹华文

作者简介: 伍皓(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事铀矿调查研究。E-mail: wuhaocgs@sohu.com

通讯作者: 李小刚(1983—), 男, 博士, 教授, 主要从事构造地质学与能源矿产勘查研究。E-mail: xg\_lee@cqust.edu.cn

资助项目: 中国地质调查局二级项目(DD20190122、DD20221661)、自然资源部沉积盆地与油气资源重点实验室开放基金(cdcgs2022006)联合资助

**Abstract:** Based on the investigation and research results since 1974 in Tengchong, Western Yunnan Province, it is found that there is a rare modern hydrothermal enrichment system of uranium, gold, arsenic, antimony, rare earth, lithium, mercury, tungsten, hydrogen and other elements. To summarize the anomalous enrichment characteristics of strategic metal elements of lithium, uranium and gold in hot springs and explore their symbiotic enrichment mechanism, we collected 320 geochemical data from 57 hot springs reported over the last 50 years through regional data collection and integration. Then we firstly systematically combed out the following typical characteristics of lithium, uranium and gold elements in hot springs: (1) Three kinds of metal elements are anomalously enriched in some springs. Lithium and gold are mainly enriched in the Dagunguo spring, uranium is mainly enriched in Zhenzhu spring and Dieshuihe carbonated spring. The hot springs in this area contain higher levels of lithium and uranium than most in the province. (2) Lithium element has the characteristics of stable content, high enrichment efficiency and great resource potential. The variation coefficients of lithium content in hot springs in Rehai area are all lower than 30%, indicating that the fluctuation range of lithium content is small in the past half century. It is estimated that the annual overflow of lithium from hot springs in the region amounts to 532.9 tons, and the loss in 20 years can exceed that of a small lithium mine. In addition, the 381 sandstone-type uranium deposit also has the phenomenon of “inexhaustible exploitation” of uranium, which may be related to the continuous replenishment of new uranium from the spring. On the basis of previous research results, it is proposed that the co-accumulation of lithium, uranium and gold in hot springs may be mainly caused by the migration of such elements in the core or its local areas along the “Tengchang modern mantle plume” from bottom to top, and the continuous accumulation in the surface hot springs and their sediments, that is, the origin of “Earth’s core source-Mantle plume”.

**Key words:** Tengchong; Hot spring; Characteristics of Li-U-Au abnormal enrichment; Earth’s core; Mantle plumes

## 0 引言

2016年,原国土资源部、国家发展改革委等联合发布《全国矿产资源规划(2016~2020年)》,将锂矿、铀矿、金矿等24种矿产列入战略性矿产目录。2020年以来,“新冠”疫情的暴发和“俄乌战争”的爆发给战略性矿产的稳定供应带来诸多不确定因素,加强以热泉型矿床为代表的“非常规”矿产资源调查研究已迫在眉睫。热泉型矿床通常是指伴随地表和近地表的热泉活动而产生的具有工业意义的矿石堆积体(芮宗瑶和沈建忠,1992)。早在1955年,就有美国学者开展过热泉型金矿的研究工作(White et al., 1955),20世纪70~80年代,由于环太平洋带陆相火山岩地区与天水活动有关的金、银、铅锌、铜、汞和铋矿床的勘查获得巨大成功(Nelson and Giles, 1985),使得热泉型矿床一直受到国内地质学家的持续关注(潘传楚,1988;戴杰敏,2000;王登红等,2007;赵元艺等,2010;郭唯明等,2019;王晨光等,2020)。1974年,云南省核工业209地质大队在腾冲地区进行铀矿普查的过程中,首次在眼镜泉、松木箐的热泉沉积物中发现铀矿化现象(佟伟和章铭陶,1989)。1987年,前人在眼镜泉的硅华中鉴定出沥青铀矿和铀石(Zhu and Tong, 1987),后在小寨温泉等其他热泉沉积物

中也有相同的发现(侯宗林和郭光裕,1991;郭光裕等,1993;核工业二八〇研究所,2006<sup>①</sup>)。不仅如此,1989年,209队在前期铀、金综合调查的基础上,与中科院贵阳地化所、北京大学合作在腾冲两河地区探获我国首个典型的热泉型金矿床,储量至少5吨(胡涛和张振儒,1991)。此外,腾冲部分温泉中的砷、锑、稀土、锂、汞、钨等元素也异常富集(腾冲地热资源联合调查组,1974;佟伟和章铭陶,1989;胡云中等,2002;Zhang et al., 2008;肖昌浩等,2010;庄亚芹等,2016;郭清海等,2017, 2020;Guo et al., 2017;郭唯明等,2019;罗黎,2021;严克涛等,2022),泉口甚至检测到含量高达5.15%、15.14%的氢气(上官志冠和霍卫国,2001;赵慈平,2008)。目前来看,与国内业已发现的川西热泉型金矿化(王登红等,2003, 2007),西藏搭格架、谷露热泉型铀矿(赵元艺等,2007, 2010),以及搭格架温泉中还存在钨元素、氦气异常富集不同(赵平等,2002;Guo et al., 2019;郭清海和杨晨,2021),腾冲正在发育世所罕见的现代热泉型铀、金、砷、锑、稀土、锂、汞、钨、氢等元素异常富集系统,其共生富集特征、成因机制尚缺系统总结分析,蕴藏的科研和经济价值亟待探索挖掘。

为此,本文以2014年开展至今的滇西砂岩型铀矿调查工作为依托(伍皓等,2016;周昱昱等,

2021), 拟通过区域资料搜集整合和系统梳理, 重点对温泉中锂、铀、金 3 种战略性金属元素异常富集特征及其共生富集机制进行初步探讨, 为后期此类“非常规”多金属资源勘探开发提供依据。

## 1 区域地质概况

腾冲地块位于青藏高原东南缘, 其东以怒江缝合带与保山地块相隔, 西以密支那缝合带与印度板块(缅甸地块)相接, 是中国大陆集火山、地热(温泉)、地震于一体的典型火山—地热—构造地区(林木森, 2015)。经历了中特提斯班公湖—怒江洋俯冲、腾冲—保山地块碰撞拼合(170~100 Ma)和新特提斯雅鲁藏布—密支那洋俯冲、印度板块向北俯冲碰撞(150~65 Ma, Yin and Harrison, 2000; 莫宣学和潘桂棠, 2006; 戚学祥等, 2019)。该地块在新生代早期(65~55 Ma)以挤压逆冲推覆为主导, 中期(24~11 Ma)以走滑剪切运动为主, 晚期以张剪性构造为特征。腾冲地区现今构造—岩浆—地热活动主要受晚期枢纽近垂直纵弯滑褶皱构造作用的影响, 弧形断裂转折端部位形成的张剪性断裂为上新世到全新世持续的火山喷发提供了岩浆上涌的通道, 造就了腾冲地区从上新世到全新世持续的火山喷发。火山喷发间歇期留存的地壳岩浆囊则成为区内良好的热源, 岩浆囊有 3 个: 第 1 个位于腾冲县城—热海一带, 第 2 个位于马站—曲石一带, 第 3 个位于五合一—龙江—团田—蒲川—新华一带(图 1-b, 赵慈平等, 2012)。而弧形断裂与北西—南东向断裂的交会构造断陷沉降部位又提供了良好的热水补给和热水上涌通道, 控制了腾冲地区的热泉及地热异常的分布(林木森, 2015)。区内共有 58 个温泉群, 平均 100 km<sup>2</sup> 有一个, 其中沸泉群 3 个, 包括硫磺塘—黄瓜箐、朗普寨热水塘和攀枝花硝塘, 泉温高于 45℃ 的热泉 25 个; 泉温在 45~37℃ 的温泉 11 个, 低于 37℃ 的微温泉 19 个(廖志杰, 1999)(图 1)。

## 2 温泉中铀、金、锂元素富集特征

笔者查阅搜集了国内学者自 1974 年以来发表的与腾冲温泉中铀、金、锂元素含量相关的报告文献, 掌握了区内除龙光台酸水温泉外的 57 个温泉的共 320 个地球化学数据, 其中, 以锂含量数据最

为丰富, 有 236 个, 铀含量数据 49 个, 金含量数据 35 个(附表 1-2<sup>\*</sup>)。经数据统计分析, 总结出温泉中锂、铀、金元素具以下典型富集特征:

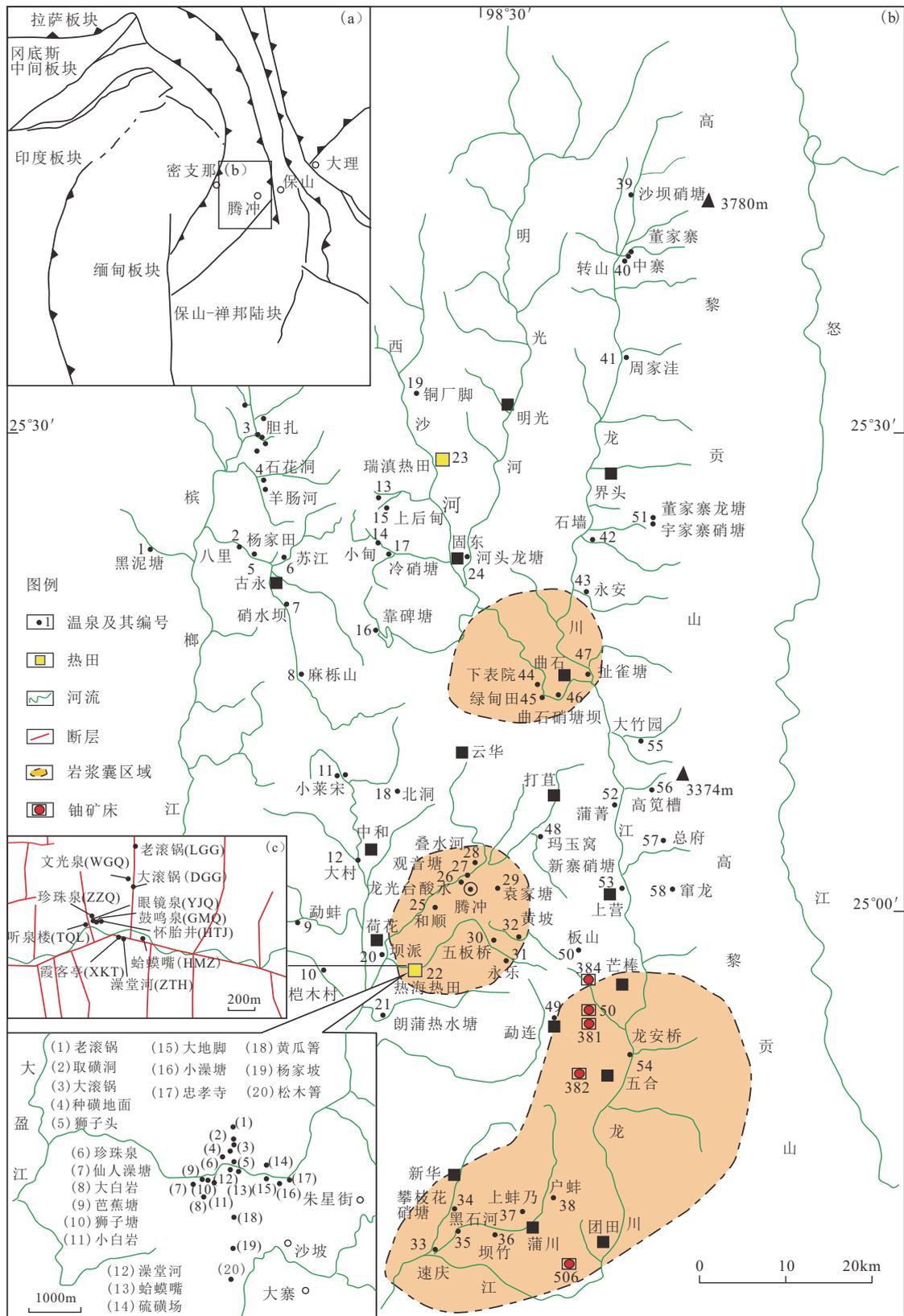
### 2.1 锂、铀、金元素集中在部分泉水中异常富集

一般泉水中锂含量为 2~39 μg/L(郭唯明等, 2019), 全区 57 个温泉中, 除小甸澡塘、靠碑塘等 14 个温泉和热海中的杨家坡、黄瓜箐锂含量低于 40 μg/L 外, 其余均高于此值。以热海温泉区中的大滚锅、听泉楼、眼镜泉、鼓鸣泉和怀胎井锂含量最高, 2012 年以来的检测值均在 4.29 mg/L 以上, 其中, 又以大滚锅中锂含量(6.13~11.18 mg/L)居全区之首, 怀胎井(左)检测出 11.78 mg/L 的单个最高值(附表 1<sup>\*</sup>, 图 2)。与滇西北(0.007~30.67 mg/L, 王蒙蒙, 2017; 徐洪飞, 2020; Liu et al., 2020)、临沧(0.126~1.2 mg/L, 余鸣潇, 2019)、滇东南(0.001~19.120 mg/L, 王云, 2021)温泉中锂含量相比, 腾冲热海温泉区锂含量处于全省中上水平。并高于川西温泉群(0.03~6.1 mg/L, Qi et al., 2017; Li et al., 2019; 于沅等, 2022), 但明显低于青藏高原南部温泉中锂含量(12.7~239 mg/L, 王晨光等, 2020)。

区域上水温大于 70℃ 的温泉, 铀含量为 0.3~0.5 μg/L; 水温小于 40℃ 的温泉, 铀含量一般为 1 μg/L(郭婷婷, 2012), 大于 1 μg/L 即可认为是异常(程汝南, 1982)。20 个开展过铀含量测试的温泉中, 仅热海大滚锅、珍珠泉、眼镜泉、霞客亭西、和顺酸水沟、永乐澡堂和叠水河碳酸泉共 7 个温泉铀含量发现异常, 其中, 以珍珠泉、叠水河碳酸泉检测值最高, 分别为 62.87 μg/L 和 59.71~61.157 μg/L(附表 2<sup>\*</sup>), 高于滇东南 46 个温泉中铀含量(0~33.19 μg/L, 王云, 2021)。

泉水金含量一般为 0.003 μg/L(侯宗林, 1992), 2017 年最新开展过金含量测试的 12 个温泉中, 除黄瓜箐、叠水河碳酸泉温泉外的 10 个温泉金含量均高于 0.003 μg/L, 其中, 以大滚锅金含量最高(0.037~0.043 μg/L, Xiao et al., 2017), 12 倍于一般泉水金含量。但令人费解的是, 1998 年大滚锅中金含量可达 0.53 μg/L(刘宝耽等, 1998)(附表 2<sup>\*</sup>), 2002 年硫磺塘地段内的热沸泉水金含量变化也在 0.39~0.73 μg/L(胡云中等, 2002), 为何温泉中金含量会在 20 年间呈现数量级衰减? 尚待查证。

\*数据资料联系编辑部或者登录本刊网站获取。

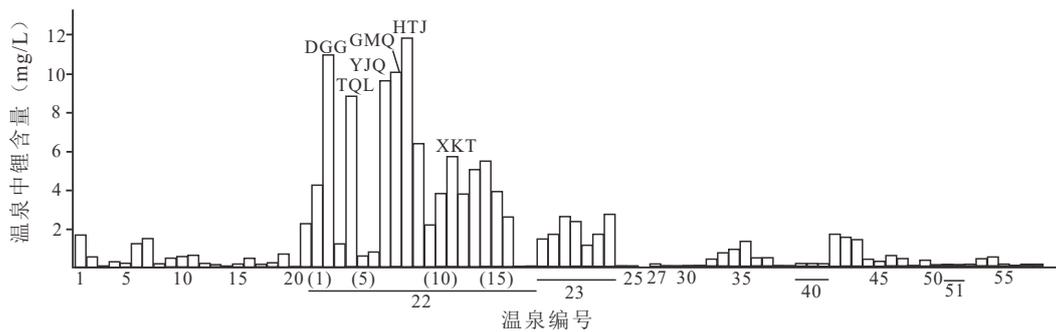


( (a) 据赵勇伟和樊祺诚, 2010 修改 (b) 据廖志杰, 1999; 赵慈平等, 2012 修改 (c) 据郭清海和吴启帆, 2020 修改 ) )

(a) after Zhao and Fan, 2010; (b) after Liao, 1999; Zhao et al., 2012; (c) after Guo and Wu, 2020)

图 1 腾冲县境温泉和岩浆囊分布图

Fig. 1 Distribution of thermal spring and magma chamber in Tengchong country



(注：图中锂含量为温泉测定的最高值，温泉编号、含量见附表 1<sup>\*</sup>)

(Note: The Li content in the figure is the highest value measured in hot spring; The number and content of hot springs are shown in attached table 1)

图 2 腾冲温泉中锂含量对比图

Fig. 2 Comparison of lithium content in Tengchong hot spring

总的来说，锂、铀、金元素集中在腾冲部分泉水中异常富集，锂、金主要富集于大滚锅，铀主要富集于珍珠泉和叠水河碳酸泉，目前资料显示温泉中锂和铀含量高于全省绝大多数温泉。需要说明的是，由附表 1<sup>\*</sup>、附表 2<sup>\*</sup>可以看出，区域上同一温泉中锂含量数十年来变化幅度较小，如：石墙澡堂锂含量变化范围在 1.22~1.7 mg/L，高低相差不到 1 倍，大滚锅锂含量变化范围在 6.13~11.18 mg/L，高低相差不到 2 倍，珍珠泉锂含量变化范围 0.27~0.75 mg/L，高低相差不到 3 倍，指示锂元素产出相对稳定且锂含量不易受取样时代、测量方法等影响。而同一温泉中铀、金元素测量数据则变化幅度较大，如珍珠泉铀含量变化范围 1.378~64 μg/L，高低相差达 46 倍；大滚锅金含量变化范围 0.037~0.53 μg/L，高低相差 14 倍，反映出铀、金元素可能长期处于动态变化中，且两者受采样时代、季节和分析方法等因素影响较大。为获得更为可靠的铀、金含量数据，有待进一步确立精确的测试方法并加强动态监测。

## 2.2 锂元素含量稳定，富集效率高，资源潜力大

如上文所述，自 1974 年以来，由不同学者在不同时期采用不同方法测定的地球化学数据显示(附表 1<sup>\*</sup>)，近半个世纪温泉中锂含量相对稳定，以热海热田为例，大滚锅锂含量变化范围在 6.13~11.18 mg/L，锂含量的变异系数(标准差/平均差)为 20.1%；听泉楼锂含量变化范围在 6.56~8.7 mg/L，变异系数为 12.4%；眼镜泉(左)锂含量变化范围在 7.5~9.52 mg/L，变异系数为 20.3%；鼓鸣泉锂含量变化范围在 4.38~10.8 mg/L，变异系数为 26.2%；

怀胎井(左)锂含量变化范围在 5.4~11.78 mg/L，变异系数为 26.7%；怀胎井(右)锂含量变化范围在 4.16~6.47 mg/L，变异系数为 15.9%；蛤蟆嘴锂含量变化范围 3.1~5.66 mg/L，变异系数为 25.4%。因变异系数数值是一种相对波动的衡量指标，值越小，代表波动幅度越小，反之亦然。热海热田温泉中锂含量变异系数均低于 30%，指示温泉中锂含量长年稳定，锂“流而不衰”。另据郭唯明等(2019)初步测算，腾冲一带水热活动区的泉流量总计达 7 587.6 L/S，以 2 227.64 μg/L 为锂的平均含量，可计算出每秒随水流走的锂的总量为 16.9 g，即相当于每天 1.46 t，每年可达 532.9 t，20 年流失的锂金属量就达 1 万 t，超过一个小型锂矿；温泉带出的锂假如能有效地积聚起来，在 100 年内积聚的金属量等同于一个大型锂辉石矿床的规模，其成矿效果非常显著。在漫长的地质时期内，这种成矿作用速度之快令人惊异(郭唯明等, 2019)。

## 3 381 砂岩型铀矿床存在铀“采而不尽”的现象

位于腾冲五合一龙江—团田—蒲川—新华岩浆囊之上的龙川江盆地中的 381 中型砂岩型铀矿床是国内首个实现可地浸开采的矿床(图 1, 张金带, 2016)，从 1969 年起开始探索地浸采铀技术，到 1985 年实验成功后经历数十年的地浸开采和矿山治理，铀资源应逐渐衰竭，但至今矿区多处仍见工业矿体，铀存在“采而不尽”的现象。这是由于地浸开采的遗漏？还是有其他来源的新生铀的快速补给？类似现象可见于均与泉水活动相关的新

疆伊犁盆地蒙古古尔砂岩型铀矿和四川西部金厂沟砂金矿床中。前者在~0 Ma处于第三个铀矿化阶段,矿床仍在发育,规模正在扩大。研究表明铀不仅来自含铀沉积物,而且来自天山地下水的循环作用,地下水中的铀主要来自区内冷泉(泉水温度:7.9~8.5℃;铀含量11.82~33.48 μg/L),其对铀的迁移富集起着至关重要的作用(Zhang and Liu, 2019)。金厂沟砂金矿床自宋徽宗时代(1082~1135年)即开采,虽历经近千年,但依然采而不衰。因矿床与热水塘热泉处于同一构造带上,被认为很可能有热泉中的成矿物质补给给了砂金矿床,使砂金矿床不断再生(王登红等, 2007)。本文381矿床所处的城子山地区地质勘探过程中发现5个自流钻孔,孔口温度26.5~32℃,流量0.095~1.688 L/S;381矿床地下水铀含量范围0~50 μg/L,最高达750 μg/L,为腾冲区内最高值。紧邻的50矿床地下水铀含量范围0~50 μg/L,最高也可达403 μg/L,两者远高于北部384(最高铀含量120 μg/L),南部382(最高铀含量1.82 μg/L)和最南部的506(最高铀含量36.5 μg/L)的水中铀含量(图1,程汝南, 1982;张琳等, 1999<sup>②</sup>),加之区域上有铀异常富集的珍珠泉、叠水河碳酸泉等数个温泉出露,在眼镜泉、小寨温泉等多个现代泉华中还有铀矿物产出,共同指示铀成矿作用正在以惊人的速度进行。结合前人认识和本区水文地球化学数据,我们更加倾向于381砂岩型铀矿床出现铀“采而不尽”的现象,极可能也与泉水中新生铀的持续补给有关,正是城子山地区富集效率极高的泉水中的铀补给给了砂岩型铀矿床,才使铀在砂岩中不断再生,采而不尽。

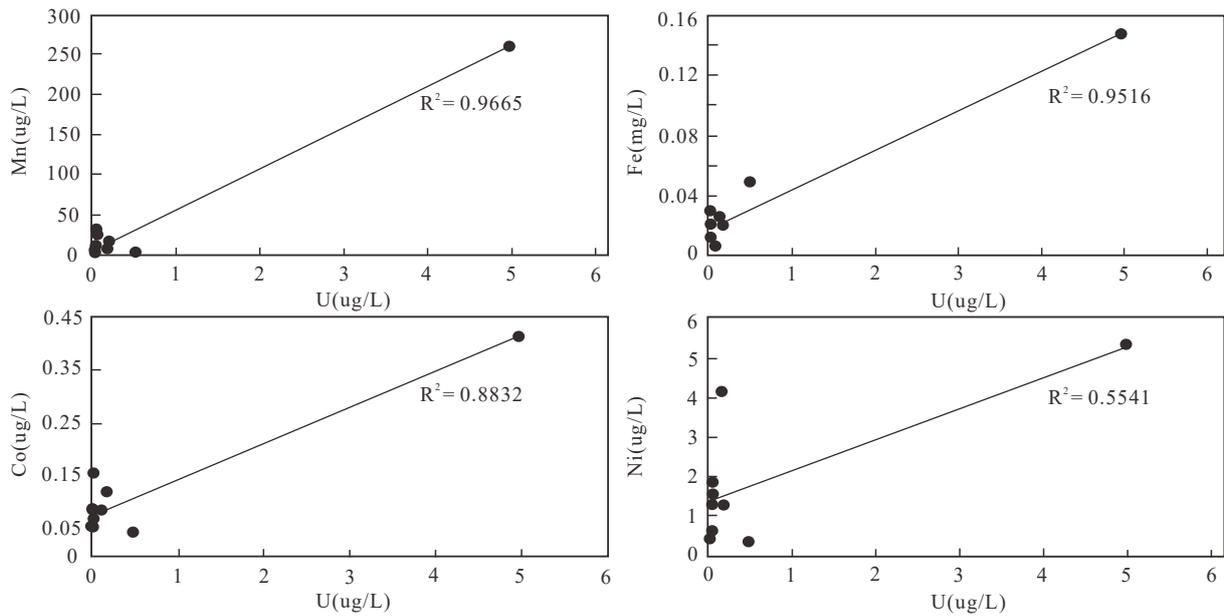
#### 4 温泉中锂、金、铀共生富集机理初步探讨

成矿物质来源是矿床成因研究的核心问题,腾冲热泉型金矿的成矿物质最早被认为主要来自围岩(郭光裕等, 1993),但最新研究认为地幔气体贡献越大、水温越高的温泉,金含量越高,说明温泉中的金属极有可能是岩浆气体贡献的产物(Xiao et al., 2017)。温泉中的锂也被国内学者通过氯元素和氩同位素示踪等方法证明主要来自于深部岩浆(沈立成, 2007;卢志艳, 2012;巴俊杰, 2017;郭唯明等, 2019;王蒙蒙, 2020),且幔源气体占比越大的热

泉,锂及其他稀有金属的含量也越高(郭唯明等, 2019)。温泉中铀可能亦来源于此,因珍珠泉中除铀异常富集外,还可见铁、锰、铝、锌、稀土等元素的共同异常富集(附表3<sup>†</sup>),首先,围岩中同时富集此类元素的可能性较低;其次,即使元素来自围岩,但依然难以理解紧邻的其他温泉中此类元素含量会相差数十上百甚至上千倍;再次,腾冲温泉中铀和锰、铁、钴、镍相关系数分别为0.97、0.95、0.88、0.55(图3),其良好的线性关系表明它们具有相同的来源,锰、铁、钴、镍属于典型的幔源型元素,在地壳中较为分散(黎彤, 1976;宋谢炎, 2019),不易在现代热泉系统中通过快速的水岩反应而富集,进一步暗示铀和共富集的多金属可能来自于深部。因此,温泉中同时富集的锂、金、铀都可能主要来自深部岩浆。有意思的是,多年来的研究证实腾冲正在发育多个熔融态的壳内岩浆囊(图1),都在不断受到幔源玄武质岩浆的持续补充(孙洁等, 1989; Xu et al., 1994;戴金星等, 1994;上官志冠等, 1999; 2000;赵慈平, 2012;胥颐等, 2012; Hua et al., 2019),为何亲石性的锂、铀均可来源于此?锂、铀一般被认为只能在花岗质岩浆分异晚期富集,是不可能富集于幔源玄武质岩浆的(薛颖瑜等, 2021;王大钊等, 2022),两种认识相矛盾,如何解释?

王登红(1998)在开展地幔柱及其成矿作用研究过程中,曾提出地幔柱在将地核内富集的成矿元素搬运到近地表的过程中起了极其重要的作用,他认为像钨、锡这样被认为在地壳富集的元素,实际上其最大的储区在地核而不是地壳本身,即:亲石性元素可能富集于地核,可由地幔柱自下而上搬运在近地表成矿。这一前瞻性认识可为金、锂、铀同在幔源岩浆富集提供较为合理的解释,可能正是由于在地核或其局部富集的金、锂、铀元素沿地幔柱持续往上运移供给,才使得具不同地球化学特征的三种元素能在地幔柱产生的幔源岩浆囊和岩浆囊作用下生成的温泉中共同富集,这样也能理解为何温泉中锂、铀具如此之高的富集效率并“流而不衰”,砂岩型铀矿缘何“采而不尽”。而且,铀富集于地核,并可自地核沿地幔柱向上运移成矿的可能性已被笔者初步证实(伍皓等, 2021, 2023);金元素在地核、地幔和地壳的丰度分别为2.6 g/t、0.005 g/t和0.004 g/t,显著富集于地核(黎彤, 1976),美国

\*数据资料联系编辑部或者登录本刊网站获取。



(图中数据来自 Wang et al., 2020; 本文暂将 RH8<sup>b</sup> 的 U 含量, RH9<sup>a</sup> 的 Fe 含量视为异常数据)

(The data in the figure comes from Wang et al., 2020; The U content of RH8<sup>b</sup> and Fe content of RH9<sup>a</sup> are temporarily regarded as abnormal data in this paper.)

图3 腾冲温泉中锰铁钴镍与铀的关系图

Fig. 3 Relationship between Mn-Fe-Co-Ni and U in Tengchong hot spring

内华达大盆地中第三纪卡林型矿化被认为与黄石公园古热点活动有关(Opliger et al., 1997), 胶东和滇黔桂的金矿可能都受到地幔柱构造的影响(王登红等, 1999), 峨眉地幔柱活动可能为黔西南大规模的卡林型金矿化提供了成矿物质基础(聂爱国, 2007; 陈军等, 2020); 热泉型和沉积型锂矿也产于美国黄石地区(Benson et al., 2017), 应与腾冲地区具相似的锂富集成矿构造背景, 黄石地区已被地震观测数据成像证实存在来自核幔边界的“现代地幔柱”(Nelson and Grand, 2018)。金、锂也存在的自地核沿地幔柱向上运移富集成矿的可能。另外, 腾冲全新世火山活动主要受控于盆地内部的断裂作用, 与印度板块和欧亚板块碰撞可能没有直接的关系, 或为局部地幔上隆的原因(赵慈平, 2008; 李欣, 2012); 腾冲地区在地下 10~15 km 处存在的岩浆房可能为新生代以前形成的小型地幔柱(云南省地质调查院, 2003<sup>③</sup>); 腾冲高温地热田也被认为是地幔热柱活动的产物(宋涛等, 2018), 因此, 腾冲不排除有发育“现代地幔柱”的可能。

综上, 本文初步认为腾冲温泉中锂、铀、金的共生富集可能主要是在地核或其局部富集的此类元素沿“腾冲现代地幔柱”自下往上迁移, 在地表

温泉及其沉积物中不断聚集的结果, 即“核源—地幔柱”成因。由于目前数据指示锂、铀、金在腾冲 3 个岩浆囊区温泉水中含量差异显著(图 1, 图 2, 附表 1\*, 附表 2\*), 三者仅集中产出在腾冲县城—热海一带, 且每个岩浆囊受幔源岩浆补给程度不一致(赵慈平等, 2012), 据此推测 3 个岩浆囊可能分别对应着 3 个发育程度不同的小型地幔柱(图 4)。

## 5 结论

(1) 滇西腾冲大滚锅温泉中锂、金异常富集, 珍珠泉和叠水河碳酸泉中铀异常富集。腾冲温泉中锂元素不仅含量稳定, 而且富集效率高、资源潜力大。区域上受现代温泉活动影响的砂岩型铀矿区的铀成矿速度、资源禀赋可能被低估。锂“流而不衰”, 铀“采而不尽”指示温泉中部分金属可能具“可再生”属性。随着提取技术的不断进步, 温泉中富集的多金属有望成为一种可有效开发利用的新资源, 进一步开展温泉中多金属“非常规”矿产资源潜力评价、回收示范及其共生富集机制研究意义重大。

(2) 温泉中锂、铀、金等元素的富集可能是在地核或其局部富集的此类元素沿“腾冲现代地幔

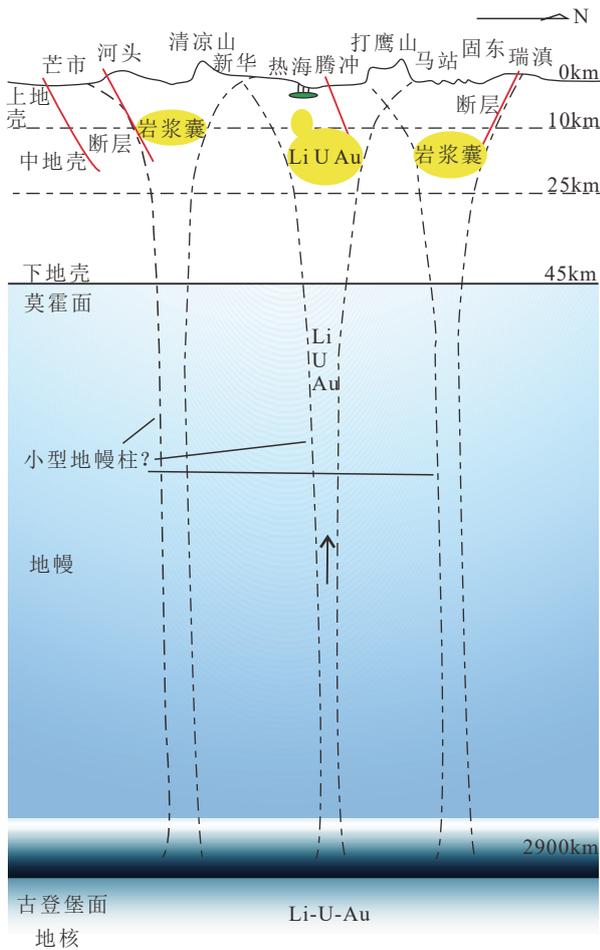


图4 腾冲温泉中锂铀金富集过程示意图(据赵慈平等, 2012修改)

Fig. 4 Schematic diagram of enrichment process of Li-U-Au in Tengchong thermal spring (after Zhao et al., 2012)

柱”自下往上迁移,在地表温泉及其沉积物中不断聚集的结果,即“核源—地幔柱”成因。“将今论古”,“核源—地幔柱”成矿认识可为矿床成因研究提供全新的角度和思考。

**致谢:** 资料收集过程中得到了核工业二八〇研究所的支持帮助,四位审稿专家和本刊编辑提出的宝贵意见提升了文章质量,在此表示衷心感谢!

### 注释 (Notes):

- ① 核工业二八〇研究所, 2006. 云南省梁河盆地铀资源潜力评价项目成果报告[R]. 广汉: 核工业二八〇研究所.
- ② 张琳, 王俊, 闵光裕, 等, 1999. 滇西龙川江盆地地浸砂岩型铀矿成矿规律研究及找矿方向[R]. 昆明: 云南省核工业二〇九地质大队.
- ③ 云南省地质调查院, 2003. 1:5万曲石街幅、打直街幅、大董街幅区域

地质调查报告[R]. 昆明: 云南省地质调查院.

### References

- Ba J J, 2017. Genetic model of magma chamber heat reservoir in Ruidian Geothermal field, Tengchong County, Yunnan province[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology.
- Benson T R, Coble M A, Rytuba J J, et al., 2017. Lithium enrichment in intracrustal rhyolite magmas leads to Li deposits in caldera basins[J]. *Nature communications*, 8 (1): 270.
- Chen J, Huang Z L, Yang R D, et al., 2020. Discovery of SEDEX gold in the Youjiang basin, SW China: Implications for a new type Au mineralization[J]. *Chinese Science Bulletin*, 65 (15): 1486 – 1495 (in Chinese with English abstract).
- Cheng R N, 1982. Study on radioactive geothermal water in Tengchong[J]. *Radioactive geology*, 3: 199 – 205.
- Dai J M, 2000. Gold deposits in hydrothermal environment[J]. *Overseas Uranium and Gold Geology*, 17 (3): 242 – 251 (in Chinese with English abstract).
- Dai J X, Dai C S, Song Y, et al., 1994. Geochemistry and helium and carbon isotopic compositions of natural gas from hot spring in some parts of China[J]. *Science in China (Series B)*, 24 (4): 426 – 433 (in Chinese with English abstract).
- Guo G Y, Hou Z L, Lin Z H, et al., 1993. Metallogenic model and metallogenic prospect evaluation of thermospring type gold deposit[M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press.
- Guo Q H, Liu M L, Li J X, 2017. Thioarsenic species in the high-temperature hot springs from the Rehai geothermal field (Tengchong) and their geochemical geneses[J]. *Earth Science*, 42 (2): 286 – 297 (in Chinese with English abstract).
- Guo Q H, Wu Q F, 2020. Hydrogeochemical anomaly of mercury in the high-temperature geothermal waters in the Rehai hydrothermal area in Tengchong, Yunnan and its indication[J]. *Earth Science Frontiers*, 27 (1): 103 – 111 (in Chinese with English abstract).
- Guo Q H, Liu M L, Li J X, et al., 2017. Geochemical genesis of arsenic in the geothermal waters from the Rehai hydrothermal system, southwestern China[J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 17: 49 – 52.
- Guo Q H, Li Y M, Luo L, 2019. Tungsten from typical magmatic hydrothermal systems in China and its environmental transport[J]. *Science of the Total Environment*, 657 (2-3): 1523 – 1534.
- Guo Q H, Yang C, 2021. Tungsten anomaly of the high-temperature hot springs in the Daggyai hydrothermal area[J]. *Earth Science*, 46 (7): 2544 – 2554 (in Chinese with English abstract).
- Guo T T, 2012. Characteristics and genesis of the Tengchong Hot Sea geothermal field in Yunnan province[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology.
- Guo W M, Ma S C, Sun Y, et al., 2019. Characteristics and significance of rare metal mineralization in hot-spring of Tengchong area, Yunnan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93 (6): 1321 – 1330 (in Chinese with English abstract).
- Hong Z L, Guo G Y. 1991. The Tengchong-Lianghe geothermal system

- and hot spring-type gold mineralization in Yunnan province[J]. *Geological Review*, 37 (3) : 243 – 249.
- Hong Z L, 1992. Geological setting and exploration prospect of hot spring type gold deposits in China[J]. *Geology and Prospecting*, 28 (3) : 1 – 6, 38.
- Hu T, Zhang Z R, 1991. Characteristics and prospecting criteria of cryogenic hydrothermal gold deposit[J]. *Gold Science and Technology trends*, 10: 12 – 15, 21.
- Hu Y Z, Deng J, Guo W M, 2002. Geological Metallogenesis of Active Hydrothermal Fluid in Tengchong, Yunnan Province, China[J]. *Mineral Deposits*, 21 (SI) : 967 – 969 (in Chinese with English abstract).
- Hua Y J, Zhang S X, Li M K, et. al, 2019. Magma system beneath Tengchong volcanic zone inferred from local earthquake seismic tomography[J], *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 377: 1 – 16.
- Li T, 1976. Chemical element abundances in the earth and its major shells[J]. *Geochimica* (3) : 167 – 174.
- Li X, 2012. A study on characteristics of Holocene volcanic activities and origin of Holocene volcanoes in Tengchong volcanic eruption field Yunnan province[D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences.
- Li J X, Sagoe G, Yang G, et al., 2019. The application of geochemistry to bicarbonate thermal springs with high reservoir temperature: A case study of the Batang geothermal field, western Sichuan Province, China[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 371: 20 – 31.
- Liao Z J, 1999. Volcanism and geothermal in Tengchong city, Yunnan province, China[J]. *Geological Review*, 45 (suppl) : 934 – 939 (in Chinese with English abstract).
- Lin M S, 2015. Genetic relationship among the Cenozoic tectonic evolution, volcanic magmatism and high geothermal anomaly activities in Tengchong, western Yunnan province and its tectonic implications[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan).
- Liu B J, Lu Y F, Yue T R, et al., 1998. Study on the gold metallogenetic geochemistry in hot spring-hydrothermal systems[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 19 (3) : 251 – 260.
- Liu H S, Zhou X, Zhang Y Q, et al., 2020. Hydrochemical characteristics of travertine-depositing hot springs in western of Yunnan, China[J]. *Quaternary International*, 547: 63 – 74.
- Lu Z Y, 2012. The Geochemical Comparison of Geothermal Fluid between Two Typical High-temperature Hydrothermal System in Tengchong (China) and Yellowstone National Park (USA) [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan).
- Luo L, 2021. Sources, migration, morphological transformation and removal of Tungsten from typical geothermal water environment in Tengchong [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan).
- Mo X X, Pan G T, 2006. From the Tethys to the formation of the Qinghai-Tibet plateau: constrained by tectono-magmatic events[J]. *Earth Science frontiers*, 13 (6) : 43 – 51 (in Chinese with English abstract).
- Nelson C E, Giles D L, 1985. Hydrothermal eruption mechanisms and hot spring gold deposits[J]. *Economic Geology*, 80: 1633 – 1639.
- Nelson P L, Grand S P, 2018. Lower-mantle plume beneath the Yellowstone hotspot revealed by core waves[J]. *Nature geoscience*, 11 (4) : 280 – 284.
- Nie A G, 2007. A mineralization mechanism as well as minerogenetic prospect of Carlin-type gold deposit in southwestern of Guizhou[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology.
- Oppliger G L, Murphy J B, Brimhall G H, 1997. Is the ancestral Yellowstone hotspot responsible for the Tertiary “Carlin” mineralization in the great basin of Nevada?[J]. *Geology*, 25 (7) : 627 – 630.
- Pan C C, 1988. A new type of gold deposit – hydrothermal gold deposit[J]. *Gold*, 9 (3) : 31 – 32, 19.
- Qi X X, Wei C, Cai Z H, et al., 2019. Sedimentary age of metamorphic rocks of Gaoligong group in Tengchong block, western Yunnan and its relationship with subduction/accretion of prototethys: evidences from detrital zircon U-Pb dating and geochemistry[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93 (1) : 94 – 116 (in Chinese with English abstract).
- Rui Z Y, Shen J Z, 1992. Research progress of hydrothermal deposits[J]. *Mineralogy, petrology and geochemistry communications*, (3) : 147 – 152 (in Chinese with English abstract).
- Shangguan Z G, Sun M L, Li H Z, 1999. Active types of modern geothermal fluids at the Tengchong region, Yunnan province[J]. *Seismology and Geology*, 21 (4) : 436 – 442 (in Chinese with English abstract).
- Shangguan Z G, Bai C H, Sun M L, 2000. Characteristics of modern mantle-derived magma gas release in Rehai area of Tengchong[J]. *Science in China series D*, 30 (4) : 407 – 414 (in Chinese with English abstract).
- Shangguan Z G, Huo W G, 2001.  $\delta D$  value of  $H_2$  escaping from Tengchong Geothermal area and its origin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 46 (15) : 1316 – 1320 (in Chinese with English abstract).
- Shen L C, 2007. The study of deep source  $CO_2$  degasification and carbon cycle in the southwest of China[D]. Chongqing: Southwest University.
- Song T, Diao Q, Zhen Y Q, 2018. Relationship between geothermal resources and mantle plume structure in the Qinghai-Xizang plateau-Multi-stage evolution of mantle heat plumes resulting in magma intrusion into shallow heat source[J]. *Journal of Hebei GEO University*, 41 (6) : 1 – 24 (in Chinese with English abstract).
- Song X Y, 2019. Current research status and important issues of magmatic sulfide deposits[J]. *Mineral Deposits*, 38 (4) : 699 – 710 (in Chinese with English abstract).
- Sun J, Xu C F, Jiang Z, et al., 1989. The electrical structure of the crust and upper mantle in the west part of Yunnan province and its relation to crustal tectonics[J]. *Seismology and Geology*, 11 (1) : 35 – 45 (in Chinese with English abstract).
- Tengchong Geothermal Resources Joint Investigation Group, 1974. Investigation report of geothermal resources in Tengchong, Yunnan

- Province[M]. Beijing: Tengchong Geothermal Resources Joint Investigation Group.
- Tong W, Zhang M T, 1989. Tengchong Geothermal[M]. Beijing: Science Press.
- Qi J H, Xu M, An C J, et al., 2017. Characterizations of geothermal springs along the Moxi deep fault in the western Sichuan plateau, China[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 263: 12 – 22 .
- Wang C G, Zhen M P, Zhang X F, et al., 2020. Geothermal-type lithium resources in Southern Tibetan Plateau[J]. *Science & Technology Review*, 38 (15) : 24 – 36 (in Chinese with English abstract).
- Wang D Z, Leng C B, Qin C J, et al., 2022. Geochemical characteristics and mineralization of uranium[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 46 (2) : 282 – 302 (in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Lin W W, Yang J M, et al., 1999. Controlling effects of the mantle plume on the Jiaodong and Dian- Qian-Gui gold concentration areas[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 20 (2) : 157 – 162 (in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Fu X F, Ying H L. 2003. The discovery and study of gold mineralization related to modern hot spring in western Sichuan province[J], *Geological Review*, 49 (3) : 311 – 315.
- Wang D H, Fu X F, Ying H L, 2007. Geochemistry and Significance of Modern Hot-Spring Sinters in Western Sichuan[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* , 37 (5) : 878 – 883 (in Chinese with English abstract).
- Wang D H, 1998. Mantle plume and mineralization[M]. Beijing: Seismological press.
- Wang M M, 2017. Characteristics of some hot springs and salt springs and formation of travertines in northwestern Yunnan[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) .
- Wang M M, 2020. Hydrochemical and isotopic characteristics of geothermal water in the Rehai region in Tengchong of Yunnan[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) .
- Wang M M, Zhou X, Liu Y et al., 2020. Major, trace and rare earth elements geochemistry of geothermal waters from the Rehai high-temperature geothermal field in Tengchong of China[J]. *Applied Geochemistry*, 119: 1 – 12 .
- Wang Y, 2021. A Research on Geochemical Characteristics of Geothermal Fluids in Southeast Yunnan Province, China[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration.
- White D E, 1955. Violent mud volcano eruption of Lake City Hot Spring, Northeastern California[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 66: 1109 – 1130 .
- Wu H, Jiang X S, Yu Q, et al., 2016. Coal-uranium exploration in the Husa Basin, western Yunnan: A new approach[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 36 (4) : 106 – 110.
- Wu H, Li X G, Wu C, et al., 2021a. Uranium and thorium elements are loss in the deep inside the Earth? Discussion from the uranium and thorium contents of zircon minerals from the Caledonian igneous plutons in the Qinling Orogen[J]. *Geological Review*, 67 (5) : 1207 – 1230.
- Wu H, Xiong S Y, Xia Y, et al., 2021b. Discuss on the unity of uranium metallogenic mechanism[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 43 (1) : 59 – 76 (in Chinese with English abstract).
- Xiao C H, Wang Q F, Zhou X Z, et al., 2010. Rare-earth elements in hot spring waters in the Tengchong geothermal area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (6) : 1938 – 1944 (in Chinese with English abstract).
- Xiao C H, Wang Q F, Li G J, et al., 2017. Subduction-related hot spring-type gold mineralization in the central Tengchong block, southwestern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 90: 987 – 997 .
- Xu Y, Zhong D L, Liu J H, 2012. Constraints of deep structures on the crust-mantle decoupling in the western Yunnan and the magma activity in the Tengchong volcanic area[J]. *Progress in Geophys*, 27 (3) : 846 – 855 (in Chinese with English abstract).
- Xu H F, 2020. An analysis of hydrochemical and isotopic characteristics and geneses of some of the hot springs in the Lushui area of Yunnan[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) .
- Xu S, Nakai S, Wakita H, et al., 1994. Helium isotopic compositions in Quaternary volcanic geothermal area near Indo-Eurasian collisional margin at Tengchong, China[J]. In: Matsuda J. *Noble Gas Geochemistry and Cosmochemistry*. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB) , 305 – 313.
- Xue Y Y, Liu H Y, Sun W D, 2021. The geochemical properties and enrichment mechanism of lithium[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 45 (6) : 1202 – 1215 (in Chinese with English abstract).
- Yan K T, Guo Q H, Luo L, 2022. Methylation and thiolation of arsenic in Tengchong hot Springs[J]. *Earth Science*, 47 (2) : 622 – 632 (in Chinese with English abstract).
- Yin A, Harrison T M, 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28 (1) : 211 – 280 .
- Yu M X, 2019. A study of hydro chemical and isotopic characteristics and formation of some of the hot springs in the Lincang area of Yunnan[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) .
- Yu F, Yu Y, Wang D H, et al., 2022. Application of Li isotope in geothermal fluid-rock interaction: A case study of modern Li-rich geothermal water in western Sichuan[J]. *Acta petrologica sinica*, 38 (2) : 472 – 482.
- Zhang J D, 2016. Innovation and development of metallogenic theory for sandstone type uranium deposit in China[J]. *Uranium Geology*, 32 (6) : 321 – 322 (in Chinese with English abstract).
- Zhang C, Liu H X, 2019. A growing sandstone type uranium district in South Yili Basin, NW China as a result of extension of Tien Shan Orogen: Evidences from geochronology and hydrology[J]. *Gondwana Research*, 76: 146 – 172 .
- Zhang G P, Liu C Q, Liu H, et al., 2008. Geochemistry of the Rehai and Ruidian geothermal waters, Yunnan Province, China[J]. *Geothermics*, 37 (1) : 73 – 83 .
- Zhao C P, 2008. Mantle-derived helium release characteristics and deep magma chamber activities of present day in the Tengchong volcanic area[D]. Beijing: Institute of geology, China Earthquake

- Administration.
- Zhao C P, Ran H, Wang Y, 2012. Present-day mantle-derived helium release in the Tengchong volcanic field, Southwest China: Implication for tectonics and magmatism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (4): 1189–1204 (in Chinese with English abstract).
- Zhao P, Xie E J, Duo J, et al., 2002. Geochemical characteristics of geothermal gases and their geological implications in Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18 (4): 539–550 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Y W, Fan Q C, 2010. Magma origin and evolution of Maanshan volcano, Dayingshan volcano and Heikongshan volcano in Tengchong area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (4): 1133–1140 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Y Y, Nie F J, Hou Z Q, et al., 2007. Geochemistry of Targejia hot spring type cesium deposit in Tibet[J], *Mineral Deposit*, 25 (2): 163–174.
- Zhao Y Y, Zhao X T, Ma Z B, et al., 2010. Chronology of the Gulu hot spring cesium deposit in Nagqu, Tibet and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84 (2): 211–220 (in Chinese with English abstract).
- Zhou K K, Xia Y, Wu H, et al., 2021. Sedimentary facies and their controls over mineralization of sandstone type uranium deposits in Nanlin formation in Lianghe basin, Western Yunnan, China[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 41 (4): 554–562 (in Chinese with English abstract).
- Zhu M X, Tong W, 1987. Surface hydrothermal minerals and their distribution in the Tengchong geothermal area, China[J]. *Geothermics*, 16 (2): 181–195.
- Zhuang Y Q, Guo Q H, Liu M L, et al., 2016. Geochemical simulation of thioarsenic speciation in high-temperature, sulfide-rich hot springs: a case study in the Rehai hydrothermal area, Tengchong, Yunnan[J]. *Earth Science*, 41 (9): 1499–1510 (in Chinese with English abstract).
- 巴俊杰, 2017. 云南腾冲县瑞滇地热田岩浆囊热源主导型热储成因模式研究(博士学位论文)[D]. 昆明: 昆明理工大学.
- 陈军, 黄智龙, 杨瑞东, 等, 2020. 右江盆地 SEDEX 金矿化类型的发现及意义[J]. *科学通报*, 65 (15): 1486–1495.
- 程汝南, 1982. 腾冲放射性地热水研究[J]. *放射性地质*, 3: 199–205.
- 戴杰敏, 2000. 热泉环境中的金矿床[J]. *国外铀金地质*, 17 (3): 242–251.
- 戴金星, 戴春森, 宋岩, 等, 1994. 中国一些地区温泉中天然气的地球化学特征及碳、氮同位素组成[J]. *中国科学 (B 辑)*, 24 (4): 426–433.
- 郭光裕, 侯宗林, 林卓虹, 等, 1993. 热泉型金矿床成矿模式及成矿远景评价[M]. 天津: 天津科学技术出版社.
- 郭清海, 刘明亮, 李洁祥, 2017. 腾冲热海地热田高温热泉中的硫化物及其地球化学成因[J]. *地球科学*, 42 (2): 286–297.
- 郭清海, 吴启帆, 2020. 云南腾冲热海高温地热水中汞的地球化学异常及其指示意义[J]. *地学前缘*, 27 (1): 103–111.
- 郭清海, 杨晨, 2021. 西藏搭格架高温热泉中钨的水文地球化学异常[J]. *地球科学*, 46 (7): 2544–2554.
- 郭婷婷, 2012. 云南腾冲热海地热田特征及成因研究(博士学位论文)[M]. 昆明: 昆明理工大学.
- 郭唯明, 马圣钊, 孙艳, 等, 2019. 云南腾冲热泉中稀有金属矿化特征及其意义[J]. *地质学报*, 93 (6): 1321–1330.
- 侯宗林, 郭光裕, 1991. 云南腾冲-梁河地热系统与现代热泉型金矿化作用[J]. *地质论评*, 37 (3): 243–249.
- 侯宗林, 1992. 我国热泉型金矿成矿地质背景与找矿前景[J]. *地质与勘探*, 28 (3): 1–6, 38.
- 胡涛, 张振儒, 1991. 低温热泉型金矿床特征及找矿标志[J]. *黄金科技动态*, 10: 12–15, 21.
- 胡云中, 邓坚, 郭唯明, 2002. 腾冲现代活动水热流体的地质成矿作用[J]. *矿床地质*, 21 (SI): 967–969.
- 黎彤, 1976. 化学元素的地球丰度[J]. *地球化学 (3)*: 167–174.
- 李欣, 2012. 云南腾冲全新世火山活动特点及其成因探讨(博士学位论文)[D]. 北京: 中国科学院.
- 廖志杰, 1999. 腾冲火山和地热[J]. *地质论评*, 45 (suppl): 934–939.
- 林木森, 2015. 滇西腾冲地区新生代构造-岩浆-火山地热活动成因及大地构造意义(博士学位论文)[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉).
- 刘宝耽, 陆元法, 薛堂荣, 等, 1998. 热泉热液系统金的成矿地球化学研究[J]. *地球学报*, 19 (3): 251–260.
- 卢志艳, 2012. 腾冲与黄石公园(美国)典型高温水热系统的地热流体地球化学对比(硕士学位论文)[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉).
- 罗黎, 2021. 腾冲典型地热水环境中钨的来源、迁移、形态转化及其去除(博士学位论文)[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉).
- 莫宣学, 潘桂堂, 2006. 从特提斯到青藏高原形成: 构造-岩浆事件的约束[J]. *地学前缘*, 13 (6): 43–51.
- 聂爱国, 2007. 黔西南卡林型金矿的成矿机制及成矿预测(博士学位论文)[D]. 昆明: 昆明理工大学.
- 潘传楚, 1988. 新的金矿类型—热泉型金矿床. *黄金*, 9 (3): 31–32, 19.
- 戚学祥, 韦诚, 蔡志慧, 等, 2019. 滇西腾冲地块高黎贡群变质沉积岩时代与原特提斯洋俯冲/增生: 来自碎屑锆石 U-Pb 定年和岩石地球化学证据[J]. *地质学报*, 93 (1): 94–116.
- 芮宗瑶, 沈建忠, 1992. 热泉型矿床研究进展[J]. *矿物岩石地球化学通讯*, (3): 147–152.
- 上官志冠, 孙明良, 李恒忠, 1999. 云南腾冲地区现代地热流体活动类型[J]. *地震地质*, 21 (4): 436–442.
- 上官志冠, 白春华, 孙明良, 2000. 腾冲热海地区现代幔源岩浆气体释放特征[J]. *中国科学 (D 辑)*, 30 (4): 407–414.
- 上官志冠, 霍卫国, 2001. 腾冲热海地区逸出 H<sub>2</sub> 的  $\delta D$  值及其成因[J]. *科学通报*, 46 (15): 1316–1320.
- 沈立成, 2007. 中国西南地区深部脱气(地质)作用与碳循环研究(博士学位论文)[D]. 重庆: 西南大学.
- 宋涛, 刁谦, 真允庆, 2018. 青藏高原地热资源与地幔柱构造的关系—地幔热柱多级演化导致岩浆上侵成为浅部热源[J]. *河北地质大学学报*, 41 (6): 1–24.

## 附中文参考文献

- 宋谢炎, 2019. 岩浆硫化物矿床研究现状及重要科学问题[J]. 矿床地质, 38(4): 699-710.
- 孙洁, 徐常芳, 江钊, 等, 1989. 滇西地区地壳上地幔电性结构与地壳构造活动的关系[J]. 地震地质, 11(1): 35-45.
- 腾冲地热资源联合调查组, 1974. 云南省腾冲地热资源考察报告[M]. 北京: 腾冲地热资源联合调查组.
- 佟伟, 章铭陶, 1989. 腾冲地热[M]. 北京: 科学出版社.
- 王晨光, 郑绵平, 张雪飞, 等, 2020. 青藏高原南部地热型锂资源[J]. 科技导报, 38(15): 24-36.
- 王大钊, 冷成彪, 秦朝建, 等, 2022. 铀的地球化学性质与成矿作用[J]. 大地构造与成矿学, 46(2): 282-302.
- 王登红, 林文蔚, 杨建民, 等, 1999. 试论地幔柱对于我国两大金矿集中区的控制意义[J]. 地球学报, 20(2): 157-162.
- 王登红, 付小方, 应汉龙, 2003. 四川西部现代热泉型金矿化的发现和初步研究[J]. 地质论评, 49(3): 311-315.
- 王登红, 付小方, 应汉龙, 2007. 四川西部现代热泉沉积物地球化学特征及意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 37(5): 878-883.
- 王登红, 1998. 地幔柱及其成矿作用[M]. 北京: 地震出版社.
- 王蒙蒙, 2017. 云南西北地区部分温泉和盐泉特征及钙华成因(硕士学位论文)[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 王蒙蒙, 2020. 云南腾冲市热海地区地下水热水的水化学和同位素特征研究(博士学位论文)[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 王云, 2021. 滇东南地热流体地球化学特征研究(博士学位论文)[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- 伍皓, 江新胜, 余谦, 等, 2016. “煤铀兼探”找矿新思路在云南的初次应用—以滇西户撒盆地铀矿勘探为例[J]. 沉积与特提斯地质, 36(4): 106-110.
- 伍皓, 李小刚, 吴晨, 等, 2021. 地球深部真的贫铀钍吗?—来自秦岭造山带加里东期岩浆岩体铀钍含量的讨论[J]. 地质论评, 67(5): 1207-1230.
- 伍皓, 熊树银, 夏彧, 等, 2021b. 铀成矿机理的统一性探讨[J]. 沉积与特提斯地质, 43(1): 59-76.
- 肖昌浩, 王庆飞, 周兴志, 等, 2010. 腾冲地热带高温热水中稀土元素特征[J]. 岩石学报, 26(6): 1938-1944.
- 胥颐, 钟大赉, 刘建华, 2012. 滇西地区壳幔解耦与腾冲火山区岩浆活动的深部构造研究[J]. 地球物理学进展, 27(3): 846-855.
- 徐洪飞, 2020. 云南泸水地区部分温泉水化学和同位素特征及成因分析(硕士学位论文)[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 薛颖瑜, 刘海洋, 孙卫东, 2021. 锂的地球化学性质与富集机理[J]. 大地构造与成矿学, 45(6): 1202-1215.
- 严克涛, 郭清海, 罗黎, 2022. 腾冲热泉中砷的甲基化和巯基化过程[J]. 地球科学, 47(2): 622-632.
- 余鸣潇, 2019. 云南省临沧地区部分温泉水化学同位素特征及成因研究(硕士学位论文)[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 于泓, 于扬, 王登红, 等, 2022. 锂同位素地球化学在地热流体水岩反应中的应用—以川西现代富锂热泉研究为例[J]. 岩石学报, 38(2): 472-482.
- 张金带, 2016. 我国砂岩型铀矿成矿理论的创新和发展[J]. 铀矿地质, 32(6): 321-322.
- 赵慈平, 2008. 腾冲火山区现代幔源氦释放特征及深部岩浆活动研究(博士学位论文)[D]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- 赵慈平, 冉华, 王云, 2012. 腾冲火山区的现代幔源氦释放: 构造和岩浆活动意义[J]. 岩石学报, 28(4): 1189-1204.
- 赵平, 谢鄂军, 多吉, 等, 2002. 西藏地热气体的地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 18(4): 539-550.
- 赵勇伟, 樊祺诚, 2010. 腾冲马鞍山、打鹰山、黑空山火山岩浆来源与演化[J]. 岩石学报, 26(4): 1133-1140.
- 赵元艺, 聂凤军, 侯增谦, 等, 2007. 西藏搭格架热泉型铀矿床地球化学[J]. 矿床地质, 25(2): 163-174.
- 赵元艺, 赵希涛, 马志邦, 等, 2010. 西藏谷露热泉型铀矿床年代学及意义[J]. 地质学报, 84(2): 211-220.
- 周息息, 夏彧, 伍皓, 等, 2021. 滇西梁河盆地南林组沉积学特征及其对砂岩型铀矿的控制[J]. 沉积与特提斯地质, 41(4): 554-562.
- 庄亚芹, 郭清海, 刘明亮, 等, 2016. 高温富硫化物热泉中硫代砷化物存在形态的地球化学模拟: 以云南腾冲热海水热区为例[J]. 地球科学, 41(9): 1499-1510.