

黔西南水银洞卡林型金矿构造地球化学 及对隐伏矿找矿的指示

谭亲平¹⁾, 夏勇^{1)*}, 谢卓君¹⁾, 王泽鹏³⁾, 李松涛^{1, 2, 3)},
韦东田⁴⁾, 闫俊^{1, 2, 5)}, 赵亦猛^{1, 2)}

1)中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵州贵阳 550081;
2)中国科学院大学, 北京 100039; 3)贵州省地矿局 105 地质大队, 贵州贵阳 550018;
4)桂林理工大学, 广西桂林 541006; 5)贵州理工学院, 贵州贵阳 550003

摘要: 水银洞金矿是黔西南地区目前发现最大的隐伏超大型卡林型矿床。该矿床的发现显示了黔西南地区巨大的深部隐伏矿找矿潜力, 同时也对隐伏矿地球化学找矿方法提出了严峻的挑战。为探索黔西南隐伏卡林型金矿的找矿方法, 沿水银洞金矿床代表性剖面采集了岩石和方解石脉, 并沿主要断裂带采集地表土壤。岩石分析了 Au、As、Sb、Hg、Tl 和 U 含量, 土壤分析了 As、Sb、Tl 和 U 含量, 方解石分析了 C-O 同位素和稀土元素组成。剖面岩石中 Au 等成矿元素主要沿着背斜轴、中—上二叠统之间的构造蚀变体和逆断层富集。岩石中 U 元素同样沿构造蚀变体和逆断层富集, 但却没有沿着背斜轴富集, 可能代表了另一期富 U 的热液活动。低 $\delta^{13}\text{C}$ ($< -2.3\%$)、高 $\delta^{18}\text{O}$ ($> 22.1\%$) 和中稀土富集 ($\Delta\text{MREE} > 1.89$) 的方解石主要沿背斜轴和逆断层分布。地表裂隙土壤成矿元素构造地球化学异常与深部隐伏矿体具有高度一致的对应关系。背斜轴及相关的逆断层可能是深部成矿信息到达地表的通道。地表裂隙充填物和裂隙附近的细粒级土壤, 能够有效提取深部成矿作用信息, 达到直接探寻深部盲矿体的目的。

关键词: 卡林型金矿; 水银洞; 黔西南; 构造地球化学; 隐伏矿

中图分类号: P595; P597.2 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2020.070801

Tectono-geochemistry and Concealed Ores Prospecting in the Shuiyindong Gold Deposit of Southwestern Guizhou

TAN Qin-ping¹⁾, XIA Yong^{1)*}, XIE Zhuo-jun¹⁾, WANG Ze-peng³⁾, LI Song-tao^{1, 2, 3)},
WEI Dong-tian⁴⁾, YAN Jun^{1, 2, 5)}, ZHAO Yi-meng^{1, 2)}

1) State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550081;
2) University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039;
3) No.105 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Guiyang, Guizhou 550018;
4) Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541006;
5) Guizhou Institute of Technology, Guiyang, Guizhou 550003

Abstract: The Shuiyindong deposit is the largest concealed Carlin-type gold deposit ever discovered in southwestern Guizhou. The discovery of the Shuiyindong deposit indicates a huge potential of deep concealed Carlin-type orebody, and also presents a severe challenge to exploration methods for concealed orebodies in southwestern Guizhou. To investigate the exploration methods for concealed ores, the authors collected rocks and calcite veins in drill holes from a representative section, and soil along surficial fractures/faults in the Shuiyindong mining area. The values of Au, As, Sb, Hg, Tl and U for the rocks, the values of As, Sb, Tl and U for the soil, and the compositions of C-O isotopes and rare earth elements for the calcites were analyzed. Rocks along

本文由国家重点研发计划项目(编号: 2016YFC0600607)、国家自然科学基金项目(编号: 41803046)、贵州省教育厅青年科技人才成长项目(编号: 黔教合 KY 字(2016)229)和贵州省科技计划项目(编号: 黔科合基础[2019]1138 号)联合资助。

收稿日期: 2019-11-11; 改回日期: 2020-06-20; 网络首发日期: 2020-07-09。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 谭亲平, 男, 1986 年生。助理研究员。主要从事卡林型金矿研究。E-mail: 565310821@qq.com。

*通讯作者: 夏勇, 男, 1960 年生。研究员。主要从事卡林型金矿研究。E-mail: xiayong@vip.gyig.ac.cn。

anticline axis, unconformity between middle-upper Permian and reverse faults display elevated values of Au and other ore-forming elements. Rocks with high U concentration also occur along the unconformity and reverse faults, but not occur along the anticline axis, which may record another U-bearing hydrothermal event. Calcites with low $\delta^{13}\text{C}$ ($<-2.3\%$), high $\delta^{18}\text{O}$ ($>22.1\%$), and high concentrations of middle rare earth elements ($\Delta\text{MREE}>1.89$) mainly appear along the anticline axis and reverse faults. There are high corresponding relations of ore-forming elements geochemical anomalies between deep concealed orebodies and soil. The anticline axis and reverse faults possibly acted as the upwelling channel for deep ore-forming information. Fillings in surficial fractures/faults and soil around surficial fractures/faults may contain significant mineralization information and have the potential to be a vital tool for identifying drilling targets.

Key words: Carlin-type gold deposit; Shuiyindong; southwestern Guizhou; tectono-geochemistry; concealed ore deposit

构造地球化学(tectono-geochemistry)是一门介于构造地质学和地球化学之间的交叉学科, 众多学者对其有不同的定义(陈国达和黄瑞华, 1984; 涂光焯, 1984; 杨开庆, 1984; 孙岩和戴春森, 1993; 吕古贤等, 2011)。它强调把应力场、物理场和地球化学场三者统一起来, 研究构造作用过程中地壳化学元素的分配和迁移、分散和富集、共生组合规律及其动力学机制。构造作用所形成的构造形迹往往有规律地排列组合形成构造体系(韩润生, 2005), 通常呈线性分布、面型发育、成群成带、等距格子、同心环带和放射旋转等几何形态。构造地球化学作用, 一方面在构造活动过程中引起化学元素活化迁移、分散和富集, 另一方面所形成构造体系为后期岩浆活动或成矿热液提供运移通道和就位场所, 使得构造体系及其周围形成特殊的元素地球化学异常带, 即构造地球化学晕或行迹(刘泉清, 1981; 温汉捷等, 1999)。基于构造地球化学理论和现象, 众多学者以断裂破碎带、蚀变带或裂隙的充填物为采样对象(王学求和谢学锦, 2000), 通过圈定构造地球化学晕(行迹)来进行隐伏矿定位预测的探矿方法(赵祚永等, 1998; 温汉捷等, 1999; 韩润生等, 2000; 刘继顺等, 2001)。利用构造地球化学方法进行隐伏矿探矿有三个显著作用: (1)成矿期构造或成矿期发生过强烈活动的成矿前构造, 往往伴随岩浆或成矿热液活动的踪迹, 构造地球化学晕可以有效地判断与成矿有关的构造(刘继顺等, 2001; 赵清泉等, 2005); (2)当成矿过程中发生多期次构造活动时, 不同阶段的构造体系中应有不同的元素富集和组合特征, 从而查明成矿演化的期次, 并且采用多个矿化元素组合可以发现单个矿化元素难以确定的异常(韩润生等, 2000); (3)构造空间是成矿流体活动的良好运移通道和沉淀场所, 与地层(围岩)相比, 构造体系中蕴藏着成矿物质聚集和分散的丰富信息, 而且深部矿体与地表(浅部)的矿化原生晕通过断裂、裂隙相联系, 可以有效追索或寻找深部的隐伏矿体(韩润生, 2005)。近年来, 大量的研究实例证实, 构造地球化学对构造控矿型金属矿床深部隐伏矿定位预测和评

价具有重要指导意义, 具有广阔的发展前景(黄德阳等, 2012; 孙社良等, 2013; 李波等, 2014; 王明志等, 2016; 杜丽娟等, 2017; 龚婷等, 2017; 钱建平等, 2017)。

黔西南卡林型金矿和与之密切伴生或共生的汞、铋、砷矿在空间分布、产出状态, 组合关系上具有一定的规律性, 受构造作用控制明显(郭振春, 1993)。地壳深大断裂为黔西南 Au 等金属元素迁移提供了便利的通道, 对包括金矿在内的其它金属矿床的形成区域进行了限制, 控制了矿床的空间分布(郭振春, 1993)。茅口组和龙潭组之间的沉积间断不整合面为一构造薄弱面, 常被后期构造作用所利用, 是区域含矿热液横向运移的通道和金铋矿的就位场所(刘建中等, 2014)。黔西南广泛发育的短轴背斜或穹隆构造往往处于浅部地壳的高点部位, 为进入沉积间断不整合面的成矿流体提供了良好的汇聚空间, 控制了金矿床(点)沿背斜轴的集中产出(王茂春, 1992; 郭振春, 1993), 而背斜(穹隆)轴部和近轴部的褶皱相关逆冲断裂构造, 则直接控制了金矿体的分布和产状。

近年来, 随着水银洞超大型、隐伏卡林型金矿的发现, 表明黔西南地区巨大的隐伏卡林型金矿的找矿潜力和资源远景。但同时, 随着矿体埋藏深度越来越大, 对今后该地区特别是背斜控制的隐伏矿的找矿方法提出了严峻的挑战。本文基于构造地球化学理论和方法, 对水银洞金矿簸箕田矿段进行了构造地球化学解剖, 研究成果对于黔西南地区深部隐伏矿找矿具有重要的理论和实践意义。

1 矿床地质

水银洞金矿位于灰家堡金矿田的东部, 是黔西南卡林型金矿的典型代表, 由水银洞、雄黄岩、簸箕田和纳秧四个矿段组成(图 1), 为全隐伏(埋深 150~1400 m)的超大型矿床, 探明资源量达 290 多吨。矿区出露及钻遇地层从下至上依次有二叠系中统茅口组, 二叠系上统龙潭组、长兴组和大隆组, 三叠系下统夜郎组和永宁镇组。另外, 在茅口组和

龙潭组之间的沉积间断不整合界面附近, 由区域性构造作用形成并经热液蚀变作用改造的角砾岩带, 称之为“构造蚀变体”(刘建中等, 2014)。

灰家堡背斜是水银洞矿区内的主干构造, 总体为宽缓短轴背斜, 西段轴向为 NW 向, 两翼基本对称, 东段水银洞矿区内转为近 EW 向, 呈北翼陡、南翼缓的不对称形态(图 1)。背斜东段的南北翼分别发育了一条近 EW 向的逆断层, 分别为 F105 和 F101。F105 断层为一条倾向南的逆断层, 在簸箕田和纳秧矿段内发育不明显(图 2 中以虚线表示)。F101 断层为一条倾向北的逆断层, 贯穿整个水银洞金矿区。垂直于 EW 向的背斜和逆断层, 发育一组近 SN 或 NE 向的断层(如 F107、F201 和 F109 断层), 断层斜切或横切背斜轴, 多为正断层兼具右行或左行剪切特征, 东部纳秧一带, 局部表现为逆断层性质, 部分控制了汞铊矿(点)的产出。谭亲平等(2017)总结

了灰家堡背斜的构造模式, 认为龙潭组及其之上的地层沿着龙潭组和茅口组之间的不整合面顺层滑动, 产生横向缩短和纵向加厚, 形成灰家堡背斜构造; 背斜不同地段, 顺层缩短的位移大小不同, 为调整不同地段之间的位移差而形成垂直于背斜轴向的走滑(撕裂)断层; 不整合面附近的顺层滑脱断层在背斜近核部受阻或应力集中, 转化为切层逆冲后发育平行于背斜轴的逆冲断层。

水银洞金矿体受构造蚀变体、灰家堡背斜和相关逆断层的联合控制, 主要包括“断控型”和“层控型”矿体(郭振春, 2002; 刘建中等, 2009; 夏勇等, 2009)。“断控型”矿体分布在受背斜近轴部的低角度逆冲断层(如 F101 断层)控制的浅部, 矿体呈板状、透镜状沿破碎带产出, 其产状与断层产状基本一致。“层控型”矿体是水银洞金矿体的主要产出类型, 主要产于灰家堡背斜近核部生物碎屑灰岩和

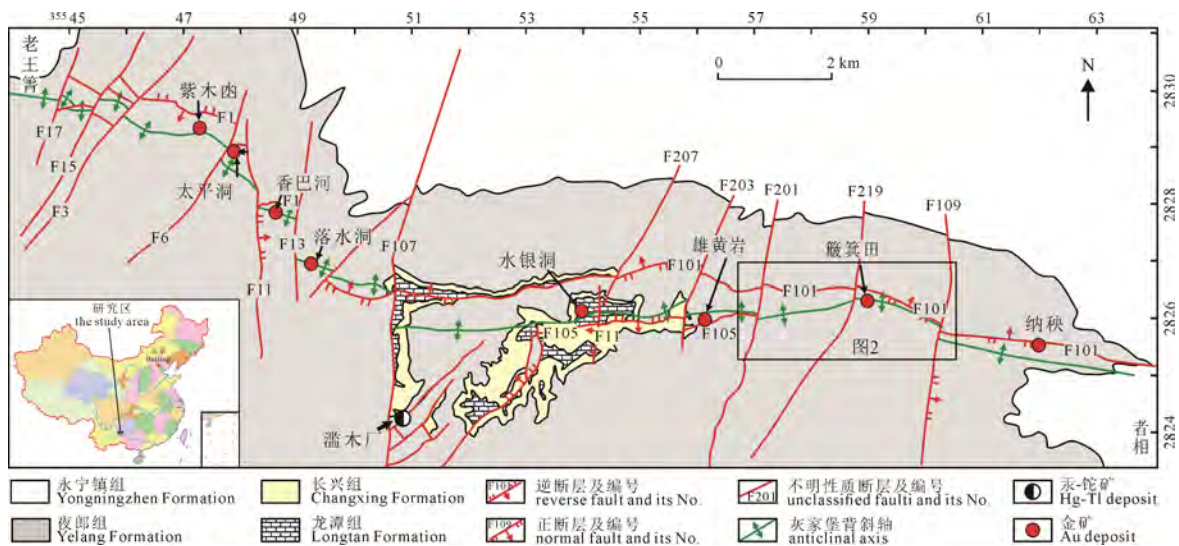


图 1 灰家堡金矿田地质图
Fig. 1 Geological map of the Huijiabao gold orefield

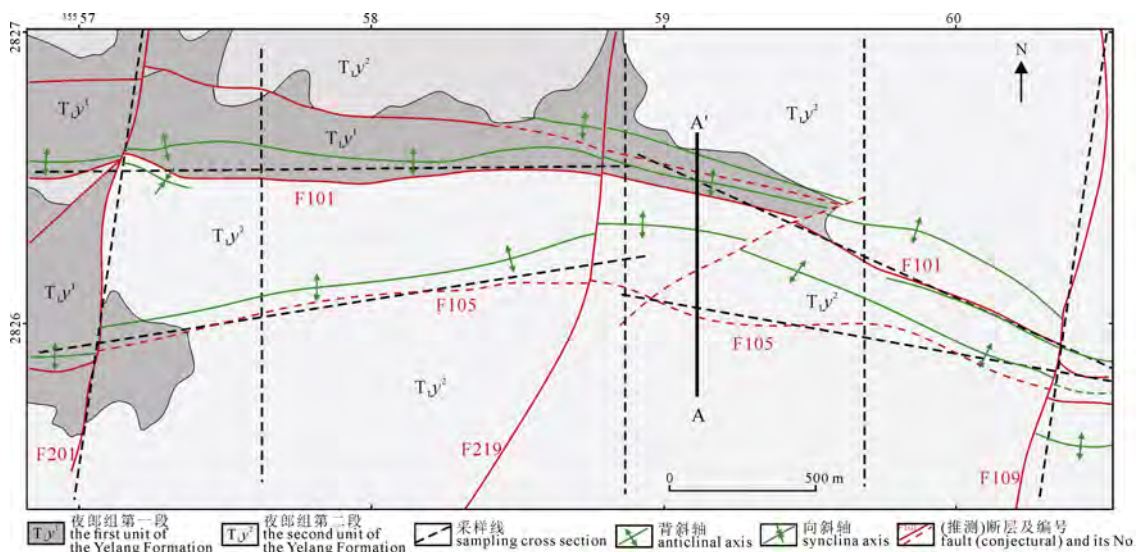


图 2 水银洞金矿簸箕田矿段地质图
Fig. 2 Geological map of the Bojitian block at the Shuiyindong gold deposit

构造蚀变体中。背斜核部向两翼 800~1500 m 范围内控制了“层控型”金矿体的产出，远离背斜核部矿体逐渐消失，产状与岩层产状一致，呈层状、似层状，走向上波状起伏、空间上多个矿体上下重叠(刘建中等, 2017)。

2 采样和分析

本次研究共采集三套构造地球化学样品。第一套采用追索法，沿地表断裂带布置构造地球化学土壤样品，选择了 7 条土壤剖面(图 2)，EW 向 2 条剖面(沿 F105 和 F101 断层)，SN 向 5 条剖面(沿 F201、F219 和 F109 断层以及 167、267 勘探线)，点距平均为 15 m，并根据斜坡的倾斜程度等因素，点距浮动约 5 m，采样的深度约为 15~25 cm，共采集样品 100 件。第二套和第三套为已发表的数据(Tan et al., 2015a, b, 2017)。其中，第二套为代表性剖面钻孔岩石样品(图 3)，以背斜和断裂构造为基准，采样间距 5~50 m，在矿体、背斜核部和裂隙发育处采样较密，

间距大约 5~20 m，在裂隙构造不发育，成矿作用弱的部位采样稀疏，间距大约 20~50 m，取样同时考虑岩性的变化，样品不跨岩性采集，共采集样品 350 件。第三套为剖面钻孔岩石裂隙中充填的方解石脉(图 3)，凡钻孔岩芯中产出方解石脉即采集，共采集样品 70 件。

地表土壤和钻孔岩石的 As、Sb、Tl 和 U 含量采用电感耦合等离子质谱仪在中国科学院地球化学研究所测定，分析方法详见 Qi et al.(2000)。岩石补充测试了 Au 和 Hg 含量，由澳实分析检测(广州)有限公司分别采用原子吸收光谱和电感耦合等离子发射光谱法测定，测试方法详见 Tan et al.(2015a)。方解石的稀土元素含量及 C-O 同位素比值分别采用电感耦合等离子质谱仪和 MAT 253 稳定同位素质谱仪，在中科院地球化学研究所测试完成，测试方法详见 Tan et al.(2015b, 2017)。分析的精密性与准确度利用野外重复样、实验室重复样和标准样品综合控制，分析结果可靠。

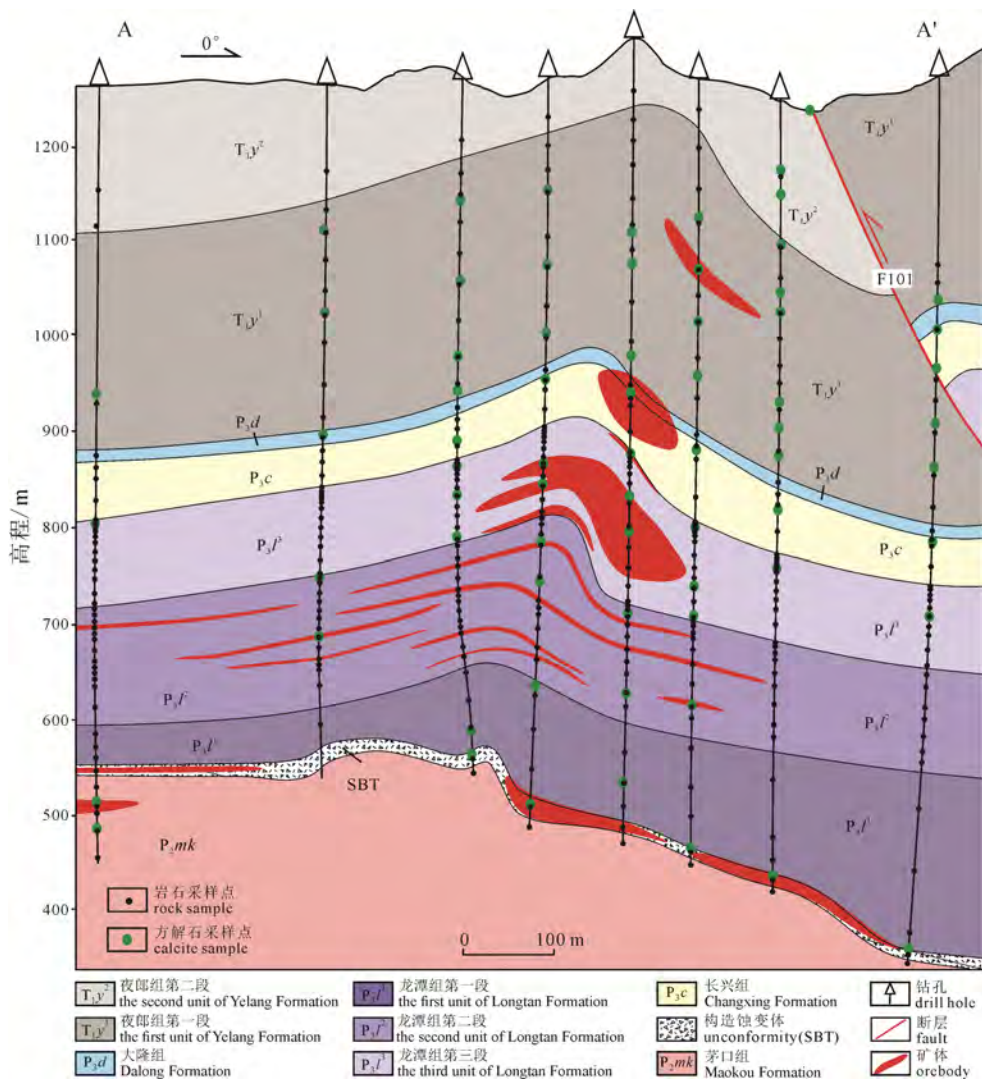


图 3 水银洞金矿 A-A'剖面地质图及采样点位

Fig. 3 Geological section along A-A' cross-section at the Shuiyindong gold deposit, showing the locations of the rock and calcite samples

表1 水银洞金矿土壤、岩石和方解石元素及 C-O 同位素地球化学数据统计表

Table 1 Statistical table of elements and C-O isotope geochemical data in soil, rocks and calcites at the Shuiyindong gold deposit

类型	元素	单位	最小值	百分位数							最大值	平均值	标准差	变化系数
				5%	15%	25%	50%	75%	85%	95%				
地表 土壤	As	μg/g	12.3	13.6	16.4	24.0	53.9	210	306	451	689	129	154	1.19
	Sb	μg/g	0.82	1.29	1.93	2.27	3.71	7.82	16.8	29.1	39.7	7.77	9.13	1.18
	Tl	μg/g	0.21	0.26	0.33	0.38	0.52	0.89	1.35	2.03	2.95	0.75	0.56	0.75
	U	μg/g	2.79	3.22	3.77	4.25	5.70	8.16	8.8	12.5	15.0	6.49	2.87	0.44
A-A' 剖面 岩石	As	μg/g	0.10	1.85	9.1	18.9	90.3	781	1533	2999	11950	656	1228	1.87
	Sb	μg/g	0.07	0.18	0.34	0.54	2.22	10.9	23.4	47.5	746	16.8	70.7	4.21
	Tl	μg/g	0.01	0.04	0.10	0.16	0.66	1.74	2.71	5.78	213	2.23	11.8	5.30
	U	μg/g	0.32	0.72	1.05	1.44	2.22	2.95	3.43	4.69	41.7	2.49	2.56	1.03
	Au	μg/g	0.005	0.005	0.005	0.005	0.008	0.107	0.381	4.35	42.1	0.748	3.09	4.13
	Hg	μg/g	0.02	0.09	0.21	0.37	1.32	8.51	19.8	67.0	294	133	33.4	2.51
A-A' 剖面	$\delta^{13}\text{C}$	‰	-9.3	-7.9	-5.4	-4.7	-2.3	-0.5	0.0	1.1	2.1	-2.7	2.75	1.02
	$\delta^{18}\text{O}$	‰	9.4	10.8	13.3	14.3	19.8	22.1	22.8	23.8	24.1	18.3	4.33	0.24
方解 石	ΔMREE	1	0.49	0.58	0.77	1.04	1.89	3.43	3.93	5.99	21.1	2.79	3.45	1.24
	MCL	1	6.4	19.0	36.6	41.5	64.1	89.8	110	145	255	73.1	46.0	0.63

注: $\Delta\text{MREE}=(\text{Sm}_N+\text{Eu}_N+\text{Gd}_N+\text{Tb}_N)\times 2/(\text{La}_N+\text{Ce}_N+\text{Pr}_N+\text{Nd}_N+\text{Er}_N+\text{Tm}_N+\text{Yb}_N+\text{Lu}_N)$; $\text{MCL}=\delta^{18}\text{O}+10\times\Delta\text{MREE}-10\times\delta^{13}\text{C}$ 。

3 结果

3.1 统计特征

所有样品测试结果的统计参数见表 1。地表土壤和钻孔岩石对比可知,以百分位数 50%为界,岩石中 As、Sb 和 Tl 在百分位数 50%以下的含量越来越低于土壤的,相反在 50%以上的越来越高于土壤。但 U 元素不管是高值区还是低值区,土壤 U 含量均远远大于岩石。岩石中 As(1.87)、Sb(4.21)、Tl(5.3)、Au(4.13)和 Hg(2.51)的变化系数均较大,但土壤中的 As(1.19)、Sb(1.18)和 Tl(0.75)的变化系数均较小。U 不管是在岩石还是在土壤中变化系数均较低,分别为 1.03 和 0.44。土壤和岩石 As、Sb、Tl 和 U 元素含量取对数之后,相互之间的相关性既有相似性又有差异性(表 2、表 3)。相似性表现为 As、Sb 和 Tl 在土壤和岩石中均显示密切的相关性,差异性表现为 U 在岩石中与 As、Sb 和 Tl 不具有明显相关性,但在土壤中与 As、Sb 和 Tl 显示明显相关性。

方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 值的范围为 $-9.3\text{‰}\sim 2.1\text{‰}$,但 85% 的方解石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值小于 0.0‰ (百分位数 85% 的值为 0.0‰),平均值为 -2.7‰ 。方解石 $\delta^{18}\text{O}$ 值的范围为 $9.4\text{‰}\sim 24.1\text{‰}$,平均值为 18.3‰ 。稀土元素球粒陨石(Sun and McDonough, 1989)标准化后,利用中稀土元素与轻-重稀土元素均值的比值计算方解石中稀土富集系数(ΔMREE), ΔMREE 的范围为 $0.49\sim 21.1$, ΔMREE 值大于 1 即为中稀土富集,有 75% 的方解石具有中稀土富集特征(百分位数 25% 值为 1.04),且平均值达 2.79。Tan et al.(2017)研究显示与 Au 成矿作用密切相关的方解石具有低 $\delta^{13}\text{C}$ 、高 $\delta^{18}\text{O}$ 和中稀土富集的独特特征,并将方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和

ΔMREE 这三个地球化学参数组合为一个统一的参数,即矿化相关度(MCL), $\text{MCL}=\delta^{18}\text{O}+10\times\Delta\text{MREE}-10\times\delta^{13}\text{C}$,为了使这三个参数具有相同的数量级,将 ΔMREE 和 $\delta^{13}\text{C}$ 前分别乘以 10 和 -10 。方解石 MCL 值最小值为 6.4,最大值为 255,平均值为 73.1,变化系数仅为 0.63。

三套地球化学数据分别绘制频率直方图,见图 4 至图 6。岩石 Au、As、Sb、Hg、Tl 和 U 元素地球化学直方图均显示了对数多峰式分布特征,并且大致可以划分 3~4 个峰(图 4)。土壤 As、Tl、Sb 和 U 元素地球化学直方图同样显示了对数多峰式分布

表2 水银洞金矿岩石 Au、As、Hg、Sb、Tl、U 元素相关系数矩阵

Table 2 Correlation coefficient matrix of Au, As, Hg, Sb, Tl, and U in rocks at the Shuiyindong gold deposit

元素	Au	As	Hg	Sb	Tl	U
Au	1					
As	0.70	1				
Hg	0.67	0.84	1			
Sb	0.70	0.84	0.87	1		
Tl	0.57	0.78	0.82	0.81	1	
U	0.06	0.27	0.31	0.28	0.43	1

表3 水银洞金矿土壤 As、Sb、Tl、U 元素相关系数矩阵

Table 3 Correlation coefficient matrix of As, Sb, Tl, and U in soil at the Shuiyindong gold deposit

元素	As	Sb	Tl	U
As	1			
Sb	0.83	1		
Tl	0.70	0.77	1	
U	0.70	0.60	0.73	1

特征(图 5)。方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 、 ΔMREE 和 MCL 的地球化学直方图, 虽没有像岩石和土壤成矿元素那样显示多峰式特征, 但方解石 $\delta^{18}\text{O}$ 的频率直方图明显具有双峰式分布特征(图 6)。

3.2 构造地球化学

3.2.1 土壤构造地球化学

地表土壤 As、Tl、Sb 和 U 构造地球化学特征见图 7。As 异常的核心部位主要分布在 F101 和 F105 断层的东段, 特别是 F105 与 F109 断层交汇处附近, 总体显示出受断裂和背斜控制, 呈近 EW 向展布。

Sb 的主要异常分布区与 As 近似, 异常总体近 EW 向分布。另外, 在 F105 断层的西段, 靠近 F201 断层处, 出现一小范围 As 异常。Tl 与 As、Sb 的异常分布范围虽然也相似, 但主体有南移趋势, 主要分布于 F105 断层的东段, 且集中分布于 F105 与 F109 断层交汇处附近, 另外在图 7 的 NE 角 F109 断层处, 新出现一处 Tl 异常。U 的异常沿 F105 断层更加集中分布, 且异常范围向西部有所延伸, 在图幅 NE 角 F109 断层处有一比 Tl 更强的异常分布, 显示受 F109 断层控制。

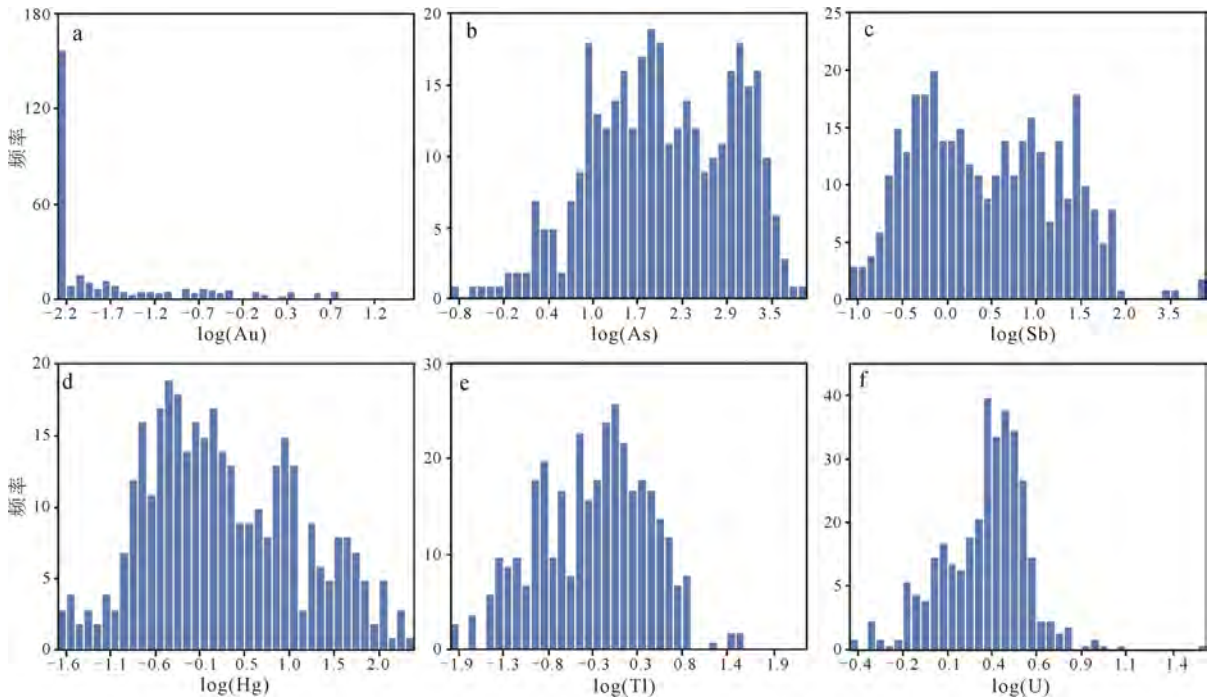


图 4 水银洞金矿岩石 Au (a)、As (b)、Sb (c)、Hg (d)、Tl (e)、U (f)元素地球化学直方图
Fig. 4 Histogram of Au (a), As (b), Sb (c), Hg (d), Tl (e), and U (f) in rocks at the Shuiyindong gold deposit

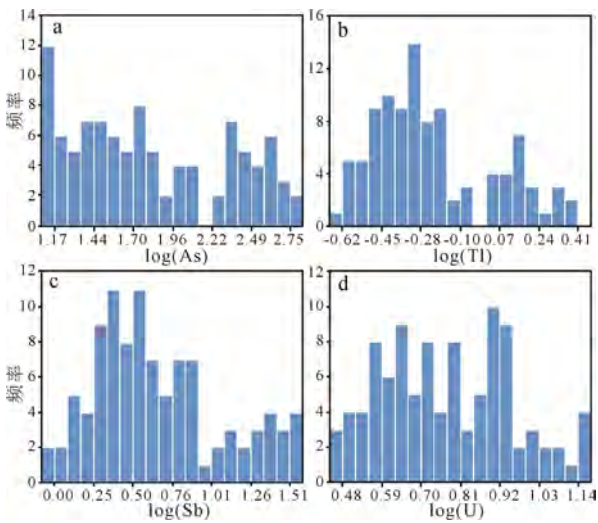


图 5 水银洞金矿地表土壤 As (a)、Tl (b)、Sb (c)、U (d)元素地球化学直方图
Fig. 5 Histogram of As (a), Tl (b), Sb (c), and U (d) in soil at the Shuiyindong gold deposit

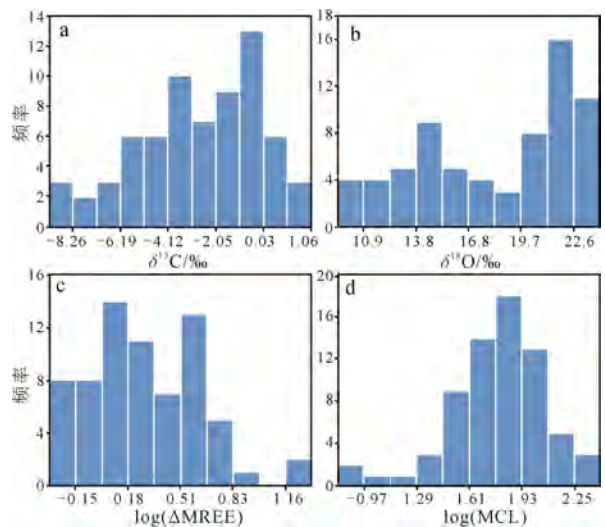


图 6 水银洞金矿方解石 $\delta^{13}\text{C}$ (a)、 $\delta^{18}\text{O}$ (b)、 ΔMREE (c)、MCL (d)地球化学直方图
Fig. 6 Histogram of $\delta^{13}\text{C}$ (a), $\delta^{18}\text{O}$ (b), ΔMREE (c), and MCL (d) in calcites at the Shuiyindong gold deposit

3.2.2 岩石构造地球化学

水银洞金矿岩石 Au、As、Sb、Hg、Tl 和 U 的空间分布规律见图 8。图 8a-e 中 Au、As、Sb、Hg 和 Tl 的空间分布特征大体类似,均沿着构造蚀变体和背斜轴富集。另外,沿着背斜北翼 F101 断层附近以及背斜核部靠近地表处,这些元素同样具有微弱的富集(元素含量位于百分位数 50%~75% 范围内;浅蓝色)。Au 等成矿元素不仅在背斜核部高度富集,同时像树枝一样在龙潭组地层中从背斜核部向两翼延伸,形成了层状富集带。图 8a-e 中 Au、As、Sb、Hg 和 Tl 的分布既有相似性,又有差异性,Sb 和 Tl 趋向于在构造蚀变体及其附近富集,As 和 Hg 趋向于在龙潭组第一段和第二段的粉砂质黏土岩中富集,而 Au 趋向于在龙潭组第二段和第三段的生物碎屑灰岩中富集。

最值得重视的是 U 元素独特的构造地球化学特征(图 8f)。图 8f 中 U 的富集一方面在龙潭组地层中沿着特定的地层呈层状分布,但没有呈现出沿背斜轴富集的特征;另一方面在构造蚀变体、F101 断层附近以及背斜核部靠近地表处,均显示与 Au 等成矿元素一致的富集特征。

3.2.3 方解石构造地球化学

方解石脉 C-O 同位素和 Δ MREE 的空间分布特征见图 9。图 9 中 $\delta^{13}\text{C}$ 值小于 -2.3‰ (百分位数 50%) 的方解石与金矿体的分布高度一致,均沿着背斜轴和逆断层分布,且 $\delta^{13}\text{C}$ 值小于 -4.7‰ (百分位数 75%) 的方解石仅出现在富矿体和逆断层附近。另外在背斜南翼,夜郎组无矿地层中同样也产出有低 $\delta^{13}\text{C}$ 值(小于 -2.3‰) 的方解石脉。 $\delta^{18}\text{O}$ 值大于 19.8‰ (百分位数 50%) 的方解石大致可以划分为三个带,最上面的带沿着 F101 断层分布,其余两个带与断层 F101 大致平行(图 9b)。虽然 $\delta^{18}\text{O}$ 值大于 19.8‰ 的

方解石没有与 Au 元素显示一致的空间分布特征,但是 $\delta^{18}\text{O}$ 值大于 22.1‰ (百分位数 75%) 的方解石大部分仍然紧邻金矿体分布,同样在背斜南翼夜郎组无矿地层中也有高 $\delta^{18}\text{O}$ 值的方解石分布。 Δ MREE 值大于 1.89(百分位数 50%) 的方解石与金矿体的空间分布规律一致,均沿着整个背斜轴分布(图 9c),且矿体周围往往分布有极高 Δ MREE 值(大于 3.4;百分位数 75%) 的方解石。在背斜南翼夜郎组无矿地层中也分布着 Δ MREE 值大于 1.89 的方解石脉。另外,高 MCL 值方解石(64.1;百分位数 50%) 的分布规律与金矿体的空间分布高度相似(图 9d)。

4 讨论

4.1 热液活动的期次

岩石中 U 和 Au 的空间分布既有区别又有相似性(图 8)。元素 U 在构造蚀变体、断层 F101 附近以及背斜核部靠近地表处均显示与 Au 一致的富集特征,但却没有像 Au 一样沿着背斜轴富集。前人的研究指出 U 也是黔西南卡林型金矿的异常元素之一(Hu et al., 2002; Zhang et al., 2003),但是近期对卡林型金矿与成矿相关矿物(黄铁矿)的原位微量元素分析显示 U 并非 Au 成矿相关元素(Xie et al., 2018)。这种特殊的 U-Au 空间分布特征,有两种可能的解释,一方面富 Au 的成矿流体可能也含有一定量的 U,但由于 Au 和 U 的沉淀机制不同而显示即共生又分异的特征,另一方面可能代表了另一期富 U 的热液活动,共用了 Au 成矿作用的部分运移通道。岩石成矿元素 Au、As、Sb、Hg 和 Tl 的频率直方图(图 4)中均显示对数多峰式分布特征,大致可以划分为 3~4 个峰,这可能和成岩期不同地层和不同岩性岩石的背景值有关,也可能与多期次或脉冲式的热液活动作用有一定的关系。

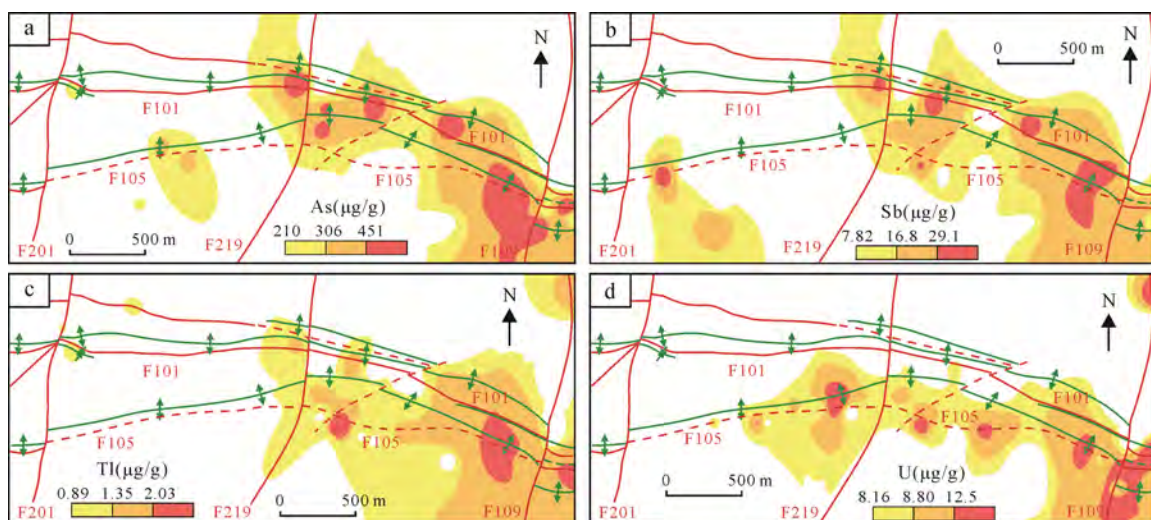


图 7 水银洞金矿簸箕田矿段地表土壤 As (a)、Sb (b)、Tl (c) 和 U (d) 元素构造地球化学图
Fig. 7 Tectono-geochemical maps of As (a), Sb (b), Tl (c), and U (d) in soil at the Shuiyindong gold deposit

前人用了很多方法以试图确定黔西南卡林型金矿的成矿时代, 但得到了变化范围很大的结果。烂泥沟金矿充填于热液石英方解石脉中的绢云母 ^{39}Ar - ^{40}Ar 阶段升温所获得的坪年龄为 $(194.6\pm 2)\text{Ma}$ (陈懋弘等, 2009)。泥堡金矿中含 Au 石英脉的流体包裹体 Rb-Sr 等时线年龄为 $(142\pm 2)\text{Ma}$ (刘平等, 2006)。水银洞金矿热液方解石(部分与雄黄共生)

Sm-Nd 等时线年龄为 $(134\pm 3)\text{Ma}$ 和 $(136\pm 3)\text{Ma}$ (Su et al., 2009)。此外, 石英裂变径迹法测得烂泥沟和百地金矿的年龄分别为 $(82.9\pm 6.3)\text{Ma}$ 和 $(87.6\pm 6.1)\text{Ma}$ (张峰和杨科佑, 1992)。最近 Tan et al.(2019)对水银洞金矿床矿体中的方解石和构造蚀变体中的萤石同时用 Sm-Nd 等时线法测年, 得到年龄分别为 $(150.2\pm 2.2)\text{Ma}$ 和 $(200.1\pm 8.6)\text{Ma}$, 显示为两期热液活动的产物。

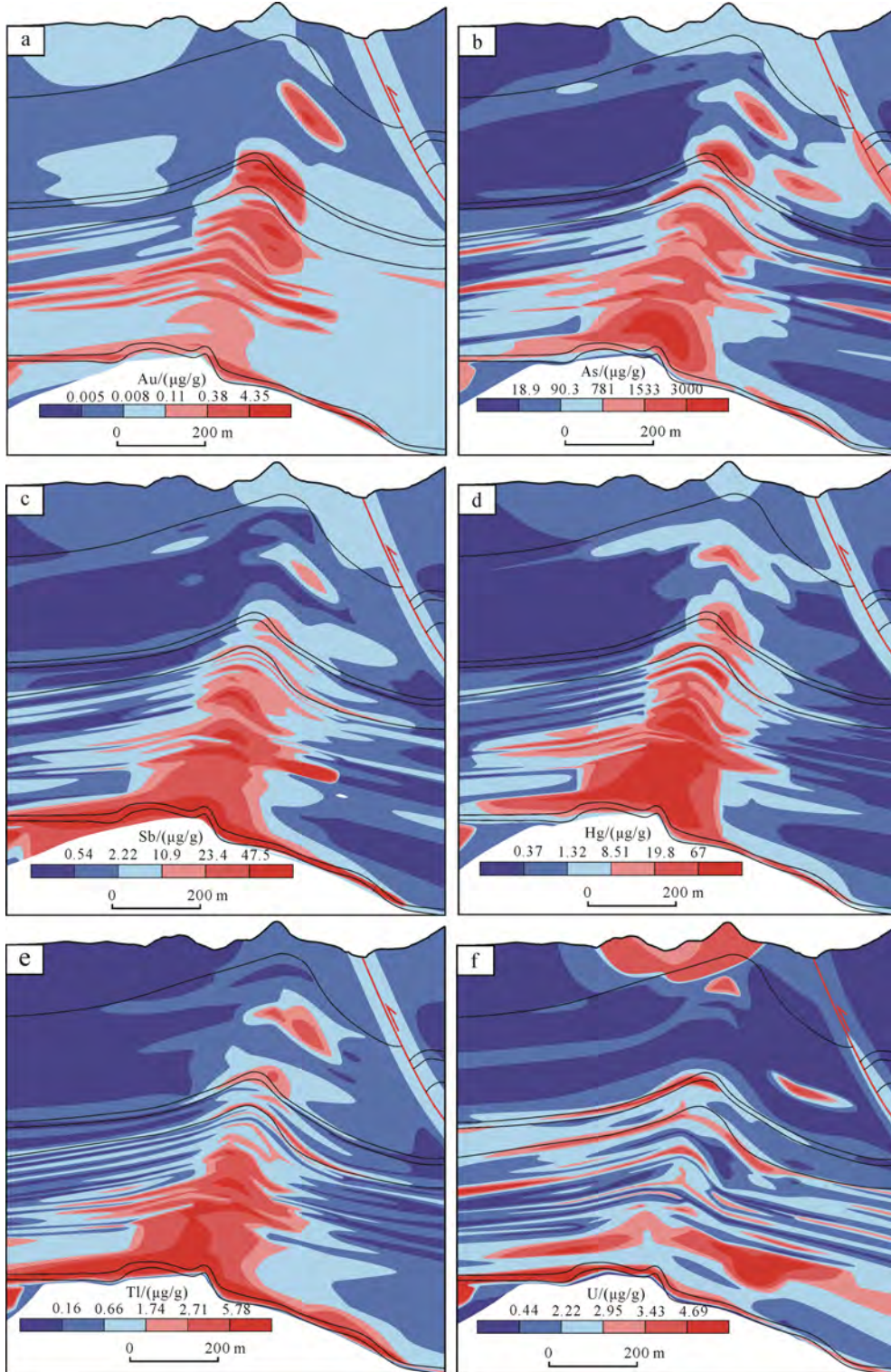


图 8 水银洞金矿 A-A' 剖面 Au (a)、As (b)、Sb (c)、Hg (d)、Tl (e)和 U (f)元素构造地球化学图
 Fig. 8 Spatial distribution maps of Au (a), As (b), Sb (c), Hg (d), Tl (e), and U (f) along the A-A' cross section at the Shuiyindong gold deposit

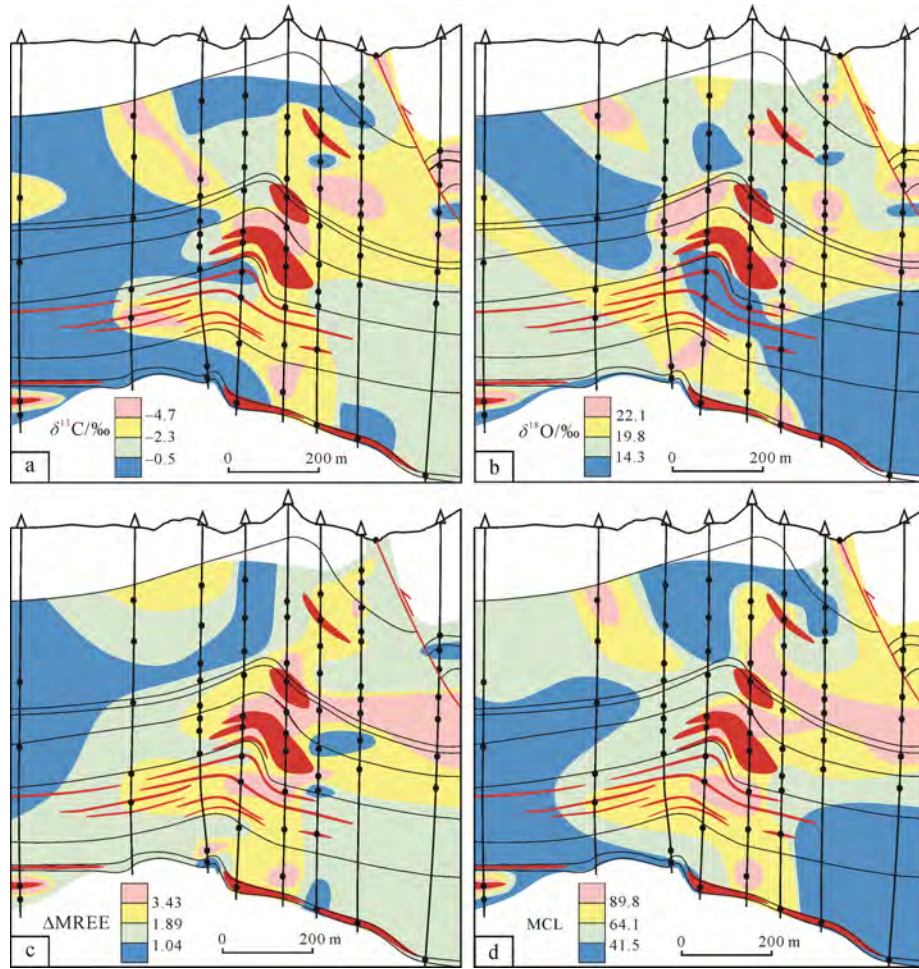


图9 水银洞金矿 A-A'剖面方解石 $\delta^{13}\text{C}$ (a)、 $\delta^{18}\text{O}$ (b)、 ΔMREE (c)和 MCL (d)构造地球化学图(Tan et al., 2017)
 Fig. 9 Spatial distribution maps of $\delta^{13}\text{C}$ (a), $\delta^{18}\text{O}$ (b), ΔMREE (c), and MCL (d) along the A-A' cross section at the Shuiyindong gold deposit (Tan et al., 2017)

以上的 U-Au 空间分布特征和年代学数据暗示水银洞金矿床具有多期次热液活动的可能性。

4.2 深部隐伏矿找矿勘查

水银洞 Au 等成矿元素主要沿着背斜轴富集的特征显示成矿流体从构造蚀变体向上覆地层转移的通道,即成矿流体进入构造蚀变体后,沿着构造蚀变体横向迁移,在背斜的高点位置汇集,之后沿着背斜轴向上覆地层迁移,到达上覆地层后,沿着层间滑动带及高渗透性的岩石向背斜两翼迁移(Tan et al., 2015a)。水银洞金矿龙潭组及其之上的地层,顺层滑脱褶皱过程形成低压虚脱空间以及背斜核部附近大量的切层微裂隙构造,使得背斜轴扮演了流体上升的通道。成矿热液活动在深部发生水-岩反应形成富矿体后的热液流体仍然包含了微弱的成矿信息,沿着背斜轴附近密集发育的微裂隙构造或者背斜两翼的断层(如 F101 和 F105 断层)运移至地表,使得图 8 中背斜核部靠近地表的夜郎组岩石中仍然有一定的成矿元素富集(浅蓝色;百分位数 50%~75%范围内),与远离背斜核部的夜郎组岩石(蓝色或深蓝色;百分位数 0~50%范围内)形成明显差异。

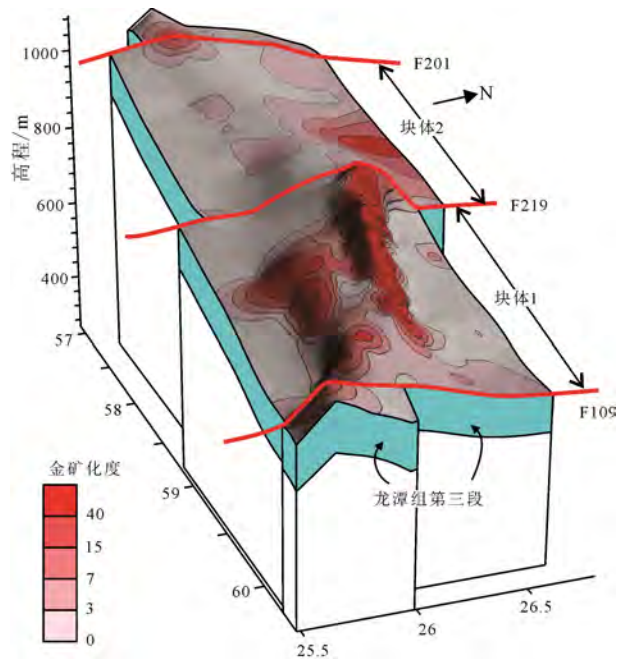


图10 水银洞金矿龙潭组第三段空间展布及其 Au 矿化空间分布(谭亲平等, 2017)
 Fig. 10 Tectonic geometry of the third unit of the Longtan Formation and spatial distributions of gold mineralization at the Shuiyindong gold deposit(TAN et al., 2017)

谭亲平等(2017)展示了灰家堡背斜龙潭组第三段构造形态与 Au 矿化作用的空间关系(图 10)。龙潭组第三段在 F219 和 F201 这两条断层所夹部位,背斜核部平缓, Au 矿化弱,并且 Au 矿化不沿着背斜高点分布;相反,在 F109 和 F219 这两条断层所夹部位,背斜核部紧闭, Au 矿化强,并且 Au 矿化集中分布在背斜高点特别是在背斜核部岩层陡倾处。地表土壤 As、Tl、Sb 和 U 构造地球化学异常同样也主要分布在 F109 和 F219 这两条断层所夹部位,且沿着 F105 和 F101 大致呈东西向展布(图 7)。利用构造地球化学测量方法,地表沿断裂带所采集土壤的 As、Sb 和 Tl 元素构造地球化学异常(图 7)与深部隐伏矿体(图 10)具有高度一致的对应关系。虽然土壤没有给出 Au 和 Hg 的含量数据,但鉴于贵州卡林型金矿中 As、Sb、Tl、Au 和 Hg 之间“不在其中,不离其踪”的地球化学特征, Au 和 Hg 应与 As、Sb 和 Tl 具有一致的相关规律。由于断裂是矿液活动和矿质聚散的有利通道,成矿作用过程中形成的原生晕的分布范围,在断裂带中比未受破坏的岩石中明显得多,而且深部矿床与地表原生晕通过断裂连通,并具有一致性及对应性(韩润生, 2005)。因此,断裂破碎带及接触带包含着丰富的成矿信息,能为深部隐伏矿的定位预测提供地表的相关信息(王学求等, 2020)。

另外,热液方解石是黔西南地区以不纯碳酸盐岩为赋矿围岩的卡林型金矿,在 Au 沉淀过程中重要的“排泄物”(Su et al., 2009)。成矿流体中的 S 与富 Fe 碳酸盐矿物发生去碳酸盐化释放的 Fe 结合,生成含 Au 黄铁矿认为是卡林型金矿重要的 Au 沉淀机制(Su et al., 2012)。黔西南地区地层层间滑动明显,逆冲断层发育, Au 成矿过程中水-岩反应所形成的方解石“排泄物”往往沿着各种断裂和微裂隙运移较远,方解石的空间分布可能远远大于金矿体的分布范围,这为利用地表裂隙中充填的方解石脉作为深部隐伏矿的找矿指标提供了现实依据。

图 4 中地表土壤成矿元素频率直方图的多峰式分布特征没有钻孔岩石的那么明显,与岩石在表生风化过程中伴随物质的流失和残留,后期搬运过程中局部范围内物质组成的高度均一化有密切关系。这种均一化还造成了岩石中 As、Sb 和 Tl 含量在百分位数 50% 以下的含量越来越低于土壤的,相反在百分位数 50% 以上的越来越高于土壤,同时造成岩石中元素的变化系数普遍高于土壤的(表 1)。传统的水系沉积物测量与土壤地球化学测量,所采集的往往是高度均一化的样品,成矿有关信息高度贫化和弱化,难以有效的提取深部成矿和找矿信息。但是地表裂隙附近的细粒级土壤因其富含铁锰氧化物、

黏土矿物和无定型硅铝氧化物等,有利于捕获在多营力作用下迁移至地表的深部成矿物质,在地表形成地球化学异常,对于隐伏矿探测具有指导意义(韩志轩等, 2020)。

5 结论

(1)岩石中 U 元素在构造蚀变体、F101 断层附近以及背斜核部靠近地表处均显示与 Au 一致的富集特征,但却没有像 Au 一样沿着背斜轴富集,结合该区年代学数据的多组性暗示水银洞金矿床具有多期次热液活动的可能性。

(2)地表裂隙附近土壤 As、Sb 和 Tl 成矿相关元素构造地球化学异常与深部隐伏矿体具有高度一致的对应关系。地表裂隙构造可能直接连通深部构造,是深部成矿信息到达地表的重要通道。利用构造地球化学方法,对地表裂隙充填物以及裂隙附近的细粒级土壤进行采集和分析,能有效提取深部的成矿信息,达到直接探寻深部盲矿体的目的。

致谢: 在野外采样工作中得到贵州紫金矿业股份有限公司杜王庆工程师、吕祖华工程师,贵州省地矿局陈明高工、祁杰高工、陈发恩高工、杨成富高工和李俊海高工的大力支持,在此一并致谢。

Acknowledgements:

This study was supported by National Key Research & Development Program of China (No. 2016YFC0600607), National Natural Science Foundation of China (No. 41803046), Guizhou Provincial Education Department (No. QJHKY(2016)229), and Science and Technology Plan of Guizhou Province (No. QKH[2019]1138).

参考文献:

- 陈国达, 黄瑞华. 1984. 关于构造地球化学的几个问题[J]. 大地构造与成矿学, 8(1): 7-18.
- 陈懋弘, 黄庆文, 胡瑛, 陈振宇, 章伟. 2009. 贵州烂泥沟金矿层状硅酸盐矿物及其⁻³⁹Ar-⁻⁴⁰Ar 年代学研究[J]. 矿物学报, 29(3): 353-362.
- 杜丽娟, 黄智龙, 李波, 周家喜, 邹国富, 严再飞, 孙海瑞. 2017. 滇西北羊拉铜矿床里农—路农接合段构造地球化学与找矿预测[J]. 矿物学报, 37(4): 434-442.
- 龚婷, 杨斌, 向胤合, 李清玉. 2017. 胶东腊子沟金矿区构造地球化学特征与找矿预测[J]. 黄金, 38(7): 6-9.
- 郭振春. 1993. 黔西南金矿的构造控制作用探讨[J]. 贵州地质, 10(1): 54-61.
- 郭振春. 2002. 黔西南灰家堡金矿田“两层楼”模式及找矿意义[J]. 黄金地质, 8(4): 18-23.
- 韩润生. 2005. 隐伏矿定位预测的矿田(床)构造地球化学方法[J]. 地质通报, 24(10): 978-984.
- 韩润生, 刘丛强, 马德云, 马更生, 刘伟, 李元. 2000. 铜厂矿田

- 陈家坝地区断裂构造地球化学特征及定位预测[J]. 地质与勘探, 36(5): 66-69.
- 韩志轩, 张必敏, 乔宇, 柳青青, 胡朗朗, 郭祥义, 王永康, 付海平. 2020. 隐伏铜矿区土壤微细粒测量有效性实验——以江西通江岭铜矿为例[J]. 地球学报, 41(6): 977-986.
- 黄德阳, 钱建平, 谢彪武, 张渊. 2012. 西藏谢通门县斯弄多铅锌矿区构造地球化学找矿研究[J]. 矿产与地质, 26(1): 73-79.
- 李波, 韩润生, 文书明, 盛蕊, 邱文龙, 唐果. 2014. 滇东北巧家松梁铅锌矿床构造特征及构造地球化学[J]. 大地构造与成矿学, 38(4): 855-865.
- 刘继顺, 高珍权, 舒广龙. 2001. 李坝金矿田构造地球化学特征及其找矿意义[J]. 大地构造与成矿学, 25(1): 87-94.
- 刘建中, 陈景河, 邓一明, 付芝康, 陈发恩, 陈明, 游彬. 2009. 贵州水银洞超大型金矿勘查实践及灰家堡矿集区勘查新进展[J]. 地质调查与研究, 32(2): 138-143.
- 刘建中, 夏勇, 陶琰, 杨成富, 王泽鹏, 谭亲平, 付绍洪, 陈睿, 吴文明. 2014. 贵州西南部 SBT 与金锑矿成矿找矿[J]. 贵州地质, 31(4): 267-272.
- 刘建中, 杨成富, 王泽鹏, 王大福, 祁连素, 李俊海, 胡承伟, 徐良易. 2017. 贵州省贞丰县水银洞金矿床地质研究[J]. 中国地质调查, 4(2): 32-41.
- 刘平, 李沛刚, 马荣, 韩忠华, 杨光龙, 叶德书. 2006. 一个与火山碎屑岩和热液喷发有关的金矿床——贵州泥堡金矿[J]. 矿床地质, 25(1): 101-110.
- 刘泉清. 1981. 构造地球化学的研究及其应用[J]. 地质与勘探, (4): 53-61.
- 吕古贤, 孙岩, 刘德良, 吴学益, 刘瑞珣. 2011. 构造地球化学的回顾与展望[J]. 大地构造与成矿学, 35(4): 479-494.
- 钱建平, 张海莹, 杜继旭, 覃顺桥, 徐磊, 常德才, 莫慧. 2017. 构造地球化学找矿方法在山东沂南金矿的应用及效果[J]. 矿物岩石地球化学通报, 36(4): 593-601.
- 孙社良, 张寿庭, 顾文帅, 李冬, 宋要武, 谢朝勇. 2013. 河南栾川 Mo 多金属矿集区构造地球化学特征及找矿预测[J]. 地质与勘探, 49(3): 405-416.
- 孙岩, 戴春森. 1993. 论构造地球化学研究[J]. 地球科学进展, 8(3): 1-6.
- 谭亲平, 夏勇, 王学求, 谢卓君, 韦东田. 2017. 黔西南灰家堡金矿田成矿构造模式及构造地球化学研究[J]. 大地构造与成矿学, 41(2): 291-304.
- 涂光炽. 1984. 构造与地球化学[J]. 矿物岩石地球化学通报, 3(1): 1-2.
- 王茂春. 1992. 黔西南表层脱底褶皱及对金矿床的控制作用[J]. 矿产与地质, 6(5): 347-351.
- 王明志, 韩润生, 王雷, 刘飞, 郭钰心玥, 谭威. 2016. 滇西北北衙金矿床万洞山—笔架山矿段构造地球化学特征[J]. 中国地质, 43(1): 238-248.
- 王学求, 谢学锦. 2000. 金的勘查地球化学理论与方法·战略与战术[M]. 济南: 山东科学技术出版社出版.
- 王学求, 张必敏, 于学峰, 杨德平, 夏勇, 谭亲平, 刘耀文, 张苏坤, 田密, 刘汉粮, 李瑞红, 韩志轩, 熊玉新, 吴慧, 张宝云. 2020. 金矿立体地球化学探测模型与深部钻探验证[J]. 地球学报, 41(6): 869-885.
- 温汉捷, 肖化云, 俞广钧. 1999. 构造地球化学探矿方法的应用——以山东招远魏家沟金矿床为例[J]. 地质与勘探, 35(3): 32-35, 45.
- 夏勇, 张瑜, 苏文超, 陶琰, 张兴春, 刘建中, 邓一明. 2009. 黔西南水银洞层控超大型卡林型金矿床成矿模式及成矿预测研究[J]. 地质学报, 83(10): 1473-1482.
- 杨开庆. 1984. 构造动力作用中地球化学作用[J]. 大地构造与成矿学, 8(4): 27-36.
- 张峰, 杨科佑. 1992. 黔西南微细浸染型金矿裂变径迹成矿时代研究[J]. 科学通报, (17): 1593-1595.
- 赵清泉, 孙传斌, 荆龙华, 王大平. 2005. 构造地球化学-判别分析在找矿中的应用——以呼盟甲乌拉银多金属矿床为例[J]. 矿产与地质, 19(4): 414-417.
- 赵祚永, 李念凤, 华曙光. 1998. 构造地球化学测量在找金中的应用[J]. 黄金地质, 4(4): 25-29.

References:

- CHEN Guo-da, HUANG Rui-hua. 1984. Some problems on tectono-geochemistry[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 8(1): 7-18 (in Chinese with English abstract).
- CHEN Mao-hong, HUANG Qing-wen, HU Yin, CHEN Zhen-yu, ZHANG Wei. 2009. Genetic types of phyllosilicate (micas) and its ^{39}Ar - ^{40}Ar dating in Lannigou gold deposit, Guizhou Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(3): 353-362 (in Chinese with English abstract).
- DU Li-juan, HUAN Zhi-long, LI Bo, ZHOU Jiayi, ZOU Guo-fu, YAN Zai-fei, SUN Hai-rui. 2017. Tectono-geochemical features and orientation prognosis of concealed ores of Yangla Cu deposit, Yunnan Province, SW China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 37(4): 434-442(in Chinese with English abstract).
- GONG Ting, YANG Bin, XIANG Yin HE Li, QING Yu. 2017. Tectonic-geochemical characteristics and prospecting prediction of Lazigou gold district in jiaodong region[J]. *Gold*, 38(7): 6-9(in Chinese with English abstract).
- GUO Zhen-chun. 1993. Tectonic controls on gold deposits in Southwestern Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 10(1): 54-61(in Chinese with English abstract).
- GUO Zhen-chun. 2002. The two-stairs model of the Huijiapu gold field in South-Western Guizhou and its prospecting significance[J]. *Gold Geology*, 8(4): 18-23(in Chinese with English abstract).
- HAN Run-sheng. 2005. Orefield/deposit tectono-geochemical

- method for the localization and prognosis of concealed ore-bodies[J]. *Geological Bulletin of China*, 24(10): 978-984(in Chinese with English abstract).
- HAN Run-sheng, LIU Cong-qiang, MA De-yun, MA Geng-sheng, LIU Wei, LI Yuan. 2000. Fault tectonogeochemical features and metallogenic prognosis of orientation in Chenjiaba area, Tongchang Orefield, Shanxi[J]. *Geology and Exploration*, 36(5): 66-69(in Chinese with English abstract).
- HAN Zhi-xuan, ZHANG Bi-min, QIAO Yu, LIU Qing-qing, HU Lang-ming, GUO Xiang-yi, WANG Yong-kang, FU Hai-ping. 2020. Validity Experiments of Fine-grained Soil Geochemical Survey for Exploring Concealed Copper Deposits: A Case Study in the Tongjiangling Copper Deposit, Jiangxi Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 41(6): 977-986(in Chinese with English abstract).
- HU Rui-zhong, SU Wen-chao, BI Xian-wu, TU Guang-zhi, Hofstra Albert H. 2002. Geology and geochemistry of Carlin-type gold deposits in China[J]. *Mineralium Deposita*, 37: 378-392.
- HUANG De-yang, QIAN Jian-ping, XIE Biao-wu, ZHANG Yuan. 2012. Study on tectonic geochemistry prospecting of Sinongduo lead-zinc mining area in Xietongmen Country, Tibet[J]. *Mineral Resources and Geology*, 26(1): 73-79(in Chinese with English abstract).
- LI Bo, HAN Run-sheng, WEN Shu-ming, SHENG Rui, QIU Wen-long, TANG Guo. 2014. Structural characteristics and fault tectono-geochemistry of the Songliang lead-zinc deposit in Northeast Yunnan, China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(4): 855-865(in Chinese with English abstract).
- LIU Ji-shun, GAO Zhen-quan, SHU Guang-long. 2001. Tectonic geochemistry of the Liba gold orefield and applications for prospecting[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 25(1): 87-94(in Chinese with English abstract).
- LIU Jian-zhong, CHEN Jing-he, DENG Yi-ming, FU Zhi-kang, CHEN Fa-en, CHEN Ming, YOU Bin. 2009. Exploration of the Shuiyindong super-scale gold deposit and the evolution of exploration for metallogenic belt of the Huijiabao anticline in Guozhou Province[J]. *Geological Survey and Research*, 32(2): 138-143(in Chinese with English abstract).
- LIU Jian-zhong, XIA Yong, TAO Yan, YANG Cheng-fu, WANG Ze-peng, TAN Qin-ping, FU Shao-hong, CHEN Rui, WU Wen-ming. 2014. The relation between SBT and gold-antimony deposit metallogenesis and prospecting in Southwest Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 31(4): 267-272(in Chinese with English abstract).
- LIU Jian-zhong, YANG Chen-fu, WANG Ze-peng, WANG Da-fu, QI Lian-su, LI Jun-hai, HU Cheng-wei, XU Liang-yi. 2017. Geological research of Shuiyindong gold deposit in Zhenfeng County, Guizhou Province[J]. *Geological Survey of China*, 4(2): 32-41(in Chinese with English abstract).
- LIU Quan-qing. 1981. Studies and applications of tectono-geochemistry[J]. *Geology and Exploration*, (4): 53-61(in Chinese).
- LÜ Gu-xian, SUN Yan, LIU De-liang, WU Xue-yi, LIU Rui-xun. 2011. Tectono-geochemistry: a review[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 35(4): 479-494(in Chinese with English abstract).
- PING Liu, LI Pei-gang, MA Rong, HAN Zhong-hua, LONG Yang-guang, YE De-shu. 2006. A gold deposit associated with pyroclastic rock and hydrothermal exhalation: nibao gold deposit in Guizhou Province, China[J]. *Mineral Deposits*, 25(1): 101-110 (in Chinese with English abstract).
- QI Liang, HU Jing, CONRAD G D. 2000. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Talanta*, 51(3): 507-513.
- SU Wen-chao, HU Rui-zhong, XIA Bin, XIA Yong, LIU Yu-ping. 2009. Calcite Sm-Nd isochron age of the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China[J]. *Chemical Geology*, 258(3): 269-274.
- SU Wen-chao, ZHANG Hong-tao, HU Rui-zhong, GE Xi, XIA Bin, CHEN Yan-yan, ZHU Chen. 2012. Mineralogy and geochemistry of gold-bearing arsenian pyrite from the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China: implications for gold depositional processes[J]. *Mineralium Deposita*, 47(6): 653-662.
- SUN S S, MCDONOUGH W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society London Special Publications*, 42(1): 313-345
- SUN She-liang, ZHANG Shou-ting, GU Wen-shuai, LI Dong, SONG Yao-wu, XIE Chao-yong. 2013. Tectono-geochemical characteristics and prospecting prediction of the molybdenum polymetallic ore concentration area in Luanchuan, Henan Province[J]. *Geology and Exploration*, 49(3): 405-416(in Chinese with English abstract).
- SUN Yan, DAI Chun-sen. 1993. Study on the tectono geochemistry[J]. *Advance in Earth Sciences*, 8(3): 1-6(in Chinese with English abstract).
- TAN Qin-ping, XIA Yong, WANG Xue-qiu, XIE Zhuo-jun, WEI Dong-tian. 2017. Tectonic model and tectono-geochemistry characteristics of the Huijiabao gold orefield, SW Guizhou Province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 41(2): 291-304(in Chinese with English abstract).
- TAN Qin-ping, XIA Yong, WANG Xue-qiu, XIE Zhuo-jun, WEI Dong-tian. 2017. Carbon-oxygen isotopes and rare earth elements as an exploration vector for Carlin-type gold deposits: a case study of the Shuiyindong gold deposit, Guizhou Province,

- SW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 148: 1-12.
- TAN Qin-ping, XIA Yong, XIE Zhuo-jun, WANG Ze-peng, WEI Dongtian, ZHAO Yi-meng, YAN Jun and LI Song-tao. 2019. Two Hydrothermal Events at the Shuiyindong Carlin-Type Gold Deposit in Southwestern China: Insight from Sm-Nd Dating of Fluorite and Calcite[J]. *Minerals*, 9(230): 1-12.
- TAN Qin-ping, XIA Yong, XIE Zhuo-jun, YAN Jun. 2015a. Migration paths and precipitation mechanisms of ore-forming fluids at the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 69: 140-156.
- TAN Qin-ping, XIA Yong, XIE Zhuo-jun, YAN Jun, WEI Dong-tian. 2015b. S, C, O, H, and Pb isotopic studies for the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Southwest Guizhou, China: constraints for ore genesis[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 34(4): 525-539.
- TU Guang-zhi. 1984. Tectonics and geochemistry[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 8(1): 1-5(in Chinese with English abstract).
- WANG Mao-chun. 1992. The overlying decollement fold and its controlling function on gold deposit in Southwestern Guizhou[J]. *Mineral Resources and Geology*, 6(5): 347-351(in Chinese with English abstract).
- WANG Ming-zhi, HAN Run-sheng, WANG Lei, LIU Fei, GUO Yu-xinyue, TAN Wei. 2016. Tectono-geochemical characteristics of Wandongshan-Bijiashan ore block in the Beiya Au-polymetallic deposit, Northwestern Yunnan[J]. *Geology in China*, 43(1): 238-248(in Chinese with English abstract).
- WEN Han-jie, XIAO Hua-yuan, YU Guang-jun. 1999. Weijiagou gold deposit in Shandong: application of tectonic geochemistry to prospecting[J]. *Geology and Exploration*, 35(3): 32-35 (in Chinese with English abstract).
- WANG Xue-qiu, XIE Xue-jing. 2000. Theory and methodology of Au exploration geochemistry Strategy and Tactics[M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press(in Chinese).
- WANG Xue-qiu, ZHANG Bi-min, YU Xue-feng, YANG De-ping, XIA Yong, TAN Qin-ping, LIU Yao-wen, ZHANG Su-kun, TIAN Mi, LIU Han-liang, LI Rui-hong, HAN Zhi-xuan, XIONG Yu-xin, WU Hui, ZHANG Bao-yun. 2020. Three-dimension Geochemical Patterns of Gold Deposits: Implications for the Discovery of Deep-seated Orebodies[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 41(6): 869-885(in Chinese with English abstract).
- XIA Yong, ZHANG Yu, SU Wen-chao, TAO Yan, ZHANG Xing-chun, LIU Jian-zhong, DENG Yi-ming. 2009. Metallogenic model and prognosis of the Shuiyindong super-large stratabound Carlin-type gold deposit, Southwestern Guizhou Province, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(10): 1473-1482(in Chinese with English abstract).
- XIE Zhuo-jun, XIA Yong, CLINE J S, KOENING A, WEI Dong-tian, TAN Qin-ping, WANG Ze-peng. 2018. Are There Carlin-Type Gold Deposits in China? A Comparison of the Guizhou, China, Deposits with Nevada, USA, Deposits[M]//MUNTEAN J L. Diversity of Carlin-Style Gold Deposits, *Reviews in Economic Geology*: 187-233.
- YANG Kai-qing. 1984. Geochemical actions in tectono-dynamics[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 8(1): 327-336(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Feng, YANG Ke-you. 1992. Mineralization time of fission track in disseminated gold deposits in Southwest Guizhou[J]. *Chinese Science Bulletin*, (17): 1593-1595(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Xing-chun, SPIRO B, HALLS C, STANLEY C J, YANG Ke-you. 2003. Sediment-hosted disseminated gold deposits in Southwest Guizhou, PRC: their geological setting and origin in relation to mineralogical, fluid inclusion, and stable-isotope characteristics[J]. *International Geology Review*, 45(5): 407-470.
- ZHAO Qing-quan, SUN Chuan-bin, JING Long-hua, WANG Da-ping. 2005. Application of structure geochemistry-discrimination analysis for prospecting: taking the Jiamala silver polymetallic deposit in Hulunbeier League as an example[J]. *Mineral Resources and Geology*, 19(4): 414-417(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Zuo-yong, LI Nian-feng, HUA Shu-guang. 1998. The application of the tectono geochemistry in gold exploration[J]. *Gold Geology*, 4(4): 25-29(in Chinese with English abstract).