

文章编号: 0258-7106 (2011) 01-0125-14

赣西小龙金矿热液活动与成矿作用特征^{*}

杨 斌¹, 董国臣^{1,2,*}, 曾书明³, 孔会磊¹, 刘金元³, 宋云涛¹, 王伟清²

(1 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 3 江西省地质勘查局赣西地质调查大队, 江西 南昌 330201)

摘 要 赣西小龙金矿区位于萍乐凹陷带中部竹亭-洞溪深大断裂带附近, 矿区内的 Au 矿化明显受近 EW 向断裂的控制, 与构造活动导致的热液渗透相关。文章在岩相学和地球化学研究的基础上, 认为围岩蚀变的特点是以强硅化为主导, 伴有轻微的去碳酸盐化和泥化; 围岩蚀变是同阶段多期次热液作用的结果, 并无明显的分带现象。通过常量元素地球化学特征解析以及蚀变岩质量平衡计算, 得出了支持野外和岩相学观察结果的证据, 含金矿物电子探针分析结果揭示了该矿区热液活动的成矿作用特征。

关键词 地质学; 热液活动; 围岩蚀变; 成矿; 小龙金矿; 赣西

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

Hydrothermal activity and mineralization of Xiaolong gold deposit, western Jiangxi Province

YANG Bin¹, DONG GuoChen^{1,2}, ZENG ShuMing³, KONG HuiLei¹, LIU JinYuan³, SONG YunTao¹
and WANG WeiQing²

(1 China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3 Ganxi Geological Survey, Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Nanchang 330201, Jiangxi, China)

Abstract

The Xiaolong gold deposit in western Jiangxi Province is located adjacent to the Zhuting-Jianxi fault belt in Pingle depression, and the gold mineralization is controlled by the west-eastern fault obviously and has a consanguineous connection with the hydrothermal fluid penetration. Based on lithology and in site geochemical experiments, the authors hold that the wall rock alteration was dominated by silicification, followed by weak decarbonatization and argillization. According to the theory of mass balance about altered rock and geochemical characteristics of the main elements, the authors obtained enough evidence to afford lithologic conclusions. On such a basis, the authors used the electron microprobe analysis of gold minerals to detect the characteristics of hydrothermal fluid migration.

Key words: geology, hydrothermal activity, wall rock alteration; mineralization, Xiaolong gold deposit, western Jiangxi Province

^{*} 本文得到高等学校创新引智计划(“111 计划”)、“成矿动力学基地”(B07011)、科学基金(编号: GPMR200652)和国家自然科学基金项目(编号: 40672044, 40473020, 40503005)的联合资助

第一作者简介 杨 斌, 男, 1987 年生, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: yangbin-cugb@126.com

^{**} 通讯作者 董国臣, 男, 1962 年生, 教授级高工, 现从事岩石学、矿床学、矿物学研究与教学工作。Email: donggc@cugb.edu.cn

收稿日期: 2010-05-14; 改回日期: 2010-12-08。许德焕编辑。

赣西萍乐凹陷地处扬子板块与华南板块的交接部位, 位于九岭隆起与武功山玉华隆起之间。该凹陷带内分布有许多 Cu、Pb、Zn、Co、W、Sn、Au、Ag、Fe 等矿床(点)。尤其是在该凹陷带中部竹亭-涧溪深大断裂带的附近, 20 世纪 90 年代以来, 发现了多处卡林型金矿化点, 显现出良好的找矿前景。近年来, 众多学者在赣西地区进行了大量的研究工作并取得了一系列成果: 陈大经等(2000; 2001) 认为, 赣西卡林型金矿受地层层位及构造的共同控制; 吕新彪(2001) 认为, 赣西的区域构造异常是导致该地区成矿的关键; 何维基等(2003; 2004) 认为, 赣西的卡林型金矿主要赋存在碎屑岩及不纯碳酸盐中, 与硅化、黄铁矿化等蚀变有着密切关系。笔者在详细野外工作的基础上, 根据赣西小龙矿区的特点, 采用岩相学与岩石地球化学相结合的分析方法, 论述了小龙矿区的热液活动及围岩蚀变特征, 阐明了不同阶段的热液活动和不同类型的围岩蚀变与 Au 矿化的关系,

以期为赣西地区其他类似的卡林型金矿的研究提供某些启示。

1 区域地质概况及矿区地质

在赣西地区, 沿九岭地体南缘及武功地体北侧发育有 2 个大型推(滑)覆构造, 北部为九岭南缘推覆体系, 南部为武功山北缘滑覆体系, 两者在萍乐凹陷带内对接而形成构造脆弱带(对冲带), 大致分布于长平-万载-南港-石岗一带。萍乐凹陷带的北侧大致以宜丰-景德镇断裂带为界, 南侧以萍乡-广丰断裂带为界, 中部近 EW 向的竹亭-涧溪深大断裂带作为 2 大构造体系的对冲带, 是整个凹陷带内构造发育最为复杂的地区。在推覆体系和滑覆体系的共同作用下, 成矿热液沿竹亭-涧溪断裂带侵入, 形成了一系列的卡林型金矿点(图 1)。

小龙矿区位于赣西萍乐凹陷带的中部, 竹亭-涧

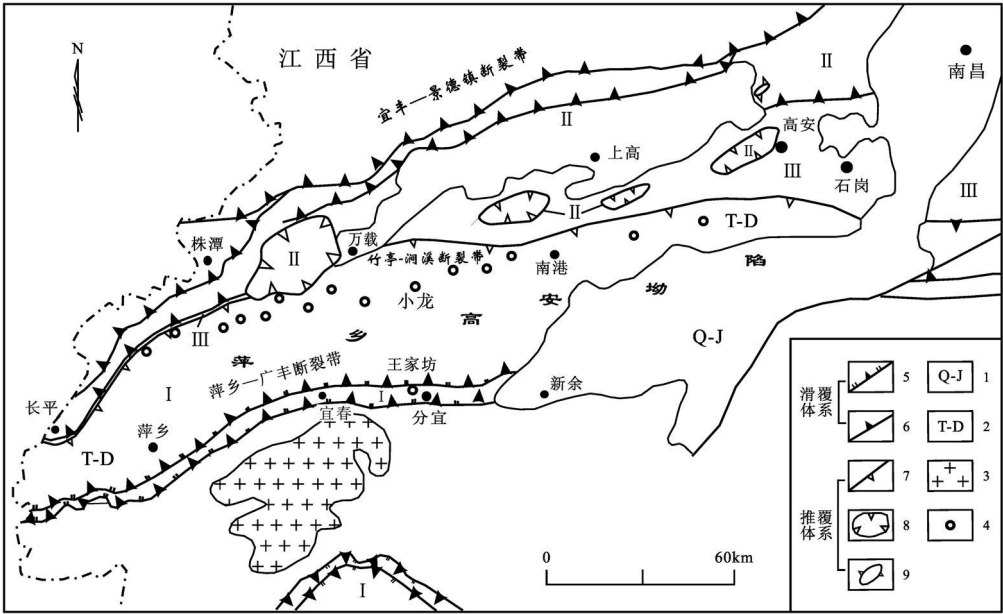


图 1 赣西萍乐凹陷带区域构造及部分卡林型金矿分布图^①

I—武功山隆起; II—九岭南缘逆冲推覆体系; III—推滑覆体系接触带; 1—第四系-侏罗系; 2—三叠系-泥盆系; 3—武功山岩体; 4—矿点; 5—根带正断层; 6—前缘挤压断层; 7—推覆构造; 8—飞来峰; 9—构造窗

Fig. 1 Simplified regional tectonic map and distribution of some Carlin gold deposits in western Jiangxi

I—Wugongshan uplift; II—Jiuling southern margin thrust nappe system; III—Contact zone of nappeslip system; 1—Quaternary-Jurassic sediments; 2—Triassic-Devonian; 3—Wugongshan rock body; 4—Ore spot; 5—Root zone normal fault; 6—Frontal compression fault; 7—Nappe structure; 8—Klippe; 9—Structural window

溪深大断裂带附近(图 1),其地理坐标为北纬 $28^{\circ}1'00''\sim 28^{\circ}1'30''$,东经 $114^{\circ}35'30''\sim 114^{\circ}36'00''$,面积约 1.8 km^2 ,是一处小型金矿,2009 年由赣西地质大队进行区域化探工作时发现。该矿区内 Au 丰度变化较大,高者 $w(\text{Au})$ 可达 400×10^{-6} ,低者则只有 1×10^{-6} (表 1)。

区内出露地层及岩性主要为下二叠统栖霞组(P_1q)深灰色泥晶、微晶灰岩,中二叠统小江边组(P_2x)灰色生屑泥晶灰岩,上二叠统乐平组(P_3l)灰白色石英砂岩、粉砂岩,以及七宝山组(P_3q)薄层状硅质岩。地层走向为 NE 向。下二叠统栖霞组是蚀变及金异常的主要发育区域。

该矿区内未见岩浆岩出露。

区内主要发育 2 条断裂构造(F1、F2)(图 2)。F1

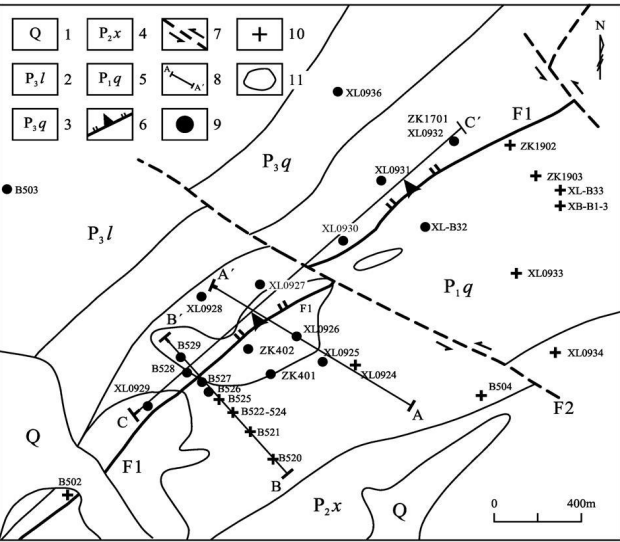


图 2 小金龙矿区地质简图^①
1—第四系; 2—上二叠统乐平组石英砂岩; 3—上二叠统七宝山组硅质岩; 4—中二叠统小江边组生屑泥晶灰岩; 5—下二叠统栖霞组泥晶灰岩; 6—实测正断层; 7—推测平移断层; 8—成矿元素剖面及编号; 9— $w(\text{Au}) > (1\times 10^{-6})$ 的样品; 10— $w(\text{Au}) \leq (1\times 10^{-6})$ 的样品; 11—矿化异常区

Fig. 2 Simplified geological map of the Xiaolong gold deposit
1—Quaternary; 2—Quartz sandstone of Upper Permian Leping Formation; 3—Siliceous rock of Upper Permian Qibaoshan Formation; 4—Biotritus micrite of Middle Permian Xiaojiangbian Formation; 5—Micrite of Lower Permian Qixia Formation; 6—Measured normal fault; 7—Inferred parallel displacement fault; 8—Profile of ore forming elements and its serial number; 9—Sample of $w(\text{Au}) > (1\times 10^{-6})$; 10—Sample of $w(\text{Au}) \leq (1\times 10^{-6})$; 11—Mineralized anomaly area

发育在栖霞组(P_1q)内,走向 NE,倾向 SE,为正断层,其主体表现为强烈的硅化沿山脊呈带状展布,在矿区西端和东端的断层面上,发育有镜面、擦痕及构造角砾岩。F2 呈 NW-SE 向延伸,地表覆盖严重,表现为 NW 向呈带状排列的负地形,及其东西两侧标准层(硅化带)的错断,具左行走滑性质。这 2 条断裂均为竹亭-洞溪深大断裂带的次生断裂构造。

矿化沿 F1 断裂呈带状展布。矿体西厚东薄、西宽东窄,厚度变化呈波状起伏,西部厚约 300 m,东部厚约 100 m(图 2 和图 3),矿体与 F1 断裂以及强硅化的依存关系明显。

矿石风化后主要为褐色、黄褐色的硅质碎石、砂土、亚粘土,呈松散碎裂状结构。金属矿物主要有褐铁矿、黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿,非金属矿物主要有方解石、白云石、石英,粘土矿物主要为伊利石,属典型的卡林型金矿床。

2 围岩蚀变的元素地球化学

2.1 围岩蚀变的类型及主要特征

该矿区内围岩蚀变的类型主要为硅化、碳酸盐化、泥化及去碳酸盐化。

硅化

主要表现为碳酸盐围岩中平行且密集发育的石

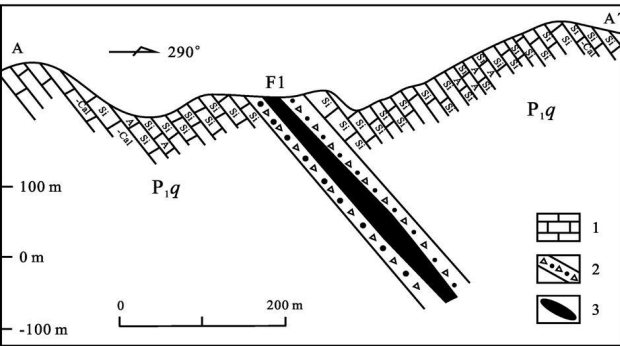


图 3 小龙矿区主要矿体形态示意图
1—栖霞组泥晶灰岩; 2—构造角砾岩带; 3—矿体;
Si—硅化; A—泥化; - Cal—去碳酸盐化
Fig. 3 Characteristics of the main ore body in the Xiaolong deposit
1—Micrite of Qixia Formation; 2—Tectonic breccia zone; 3—Ore body; Si—Silicification; A—Argillization; - Cal—Decarbonatization

英细脉以及围岩的碧玉岩化,这也是卡林型金矿的近矿围岩蚀变标志(陈大经等, 2001)。矿区内硅化的强度以 F1 断裂为中心向南北两侧递减, 在 F1 断

裂面处, 硅化最强, 围岩均已蚀变成为碧玉岩(图 4A)。硅化的主要特征为: ① 石英的交代作用主要发生在脉体中心部位, 围岩中仅有少量石英交代的

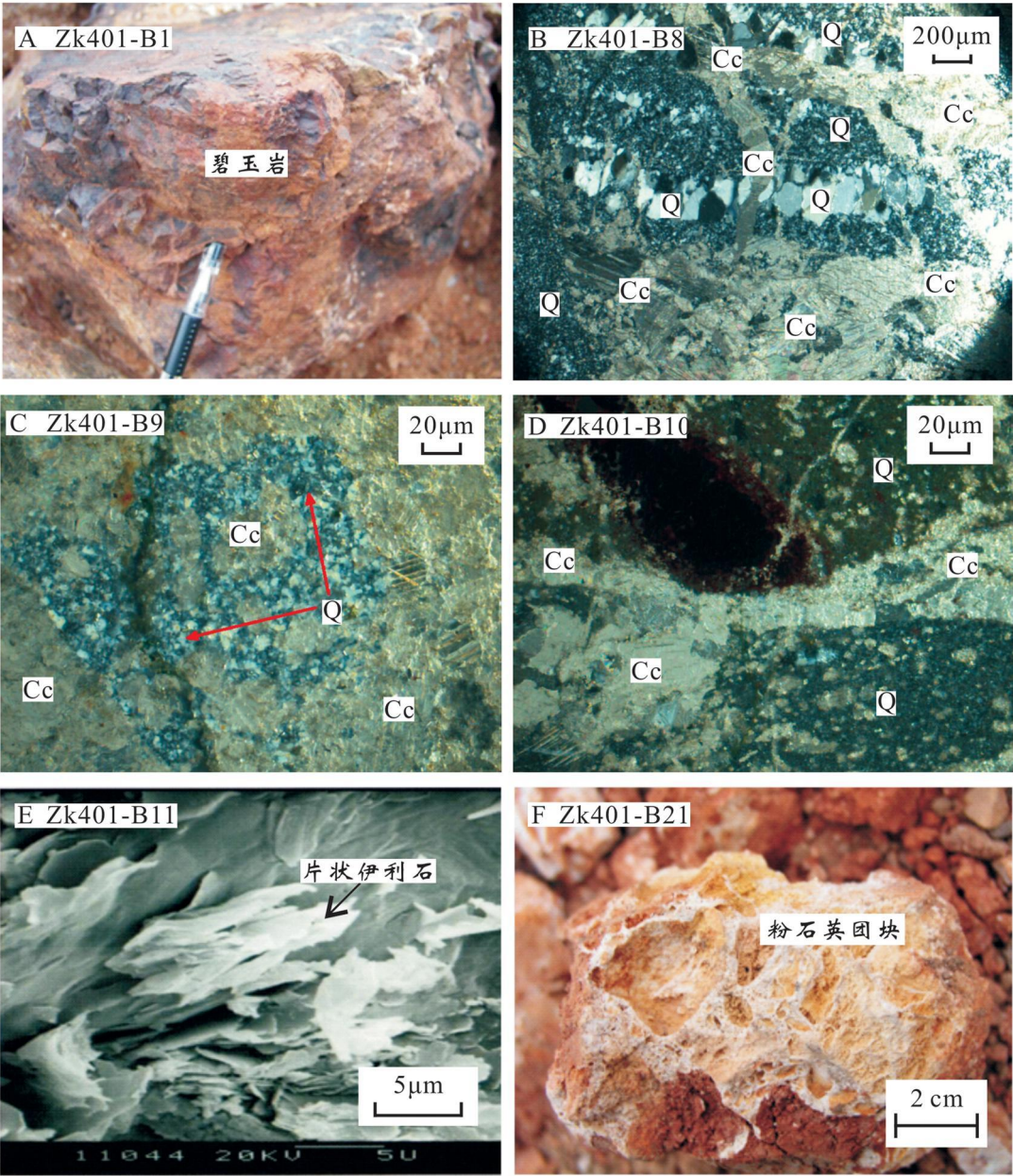


图 4 小龙矿区热液活动及围岩蚀变的岩相学证据

A. 围岩中的硅化灰岩; B. I 期硅化形成的梳状石英脉以及 II 期形成的方解石脉; C. III 期硅化的细粒状石英沿裂隙交代 II 期形成的方解石颗粒; D. II 期方解石脉充填在 I 期硅化形成的石英中, 指示 II 期的方解石化; E. 叶片状伊利石(SEM), 指示泥化蚀变; F. 孔洞状粉石英, 代表去碳酸盐化蚀变; Cc—方解石; Q—石英

Fig. 4 Lithologic evidence of country rock alteration in the Xiaolong ore deposit

A. Silicified limestone in wall rock; B. Comb quartz veins formed during the first stage of silicification and calcite veins formed during the second stage of intrusion; C. Calcite grains formed during the replacement of the second stage mineral by the third stage fine-grained quartz along the fissures; D. Calcite vein of the second stage filling the quartz formed by the first stage silicification, indicating calcitization of the second stage; E. SEM of flaky illite, indicating argillization; F. Pole-like powder quartz, representing decarbonatization; Cc—Calcite; Q—Quartz

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

表 1 小龙矿区部分常量元素分析结果及对应 Au 品位数据
Table 1 Microelements and Au grade data of the Xiaolong deposit

样品号	w (B) / %													w (Au) / 10 ⁻⁶
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	TFe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺	烧失量	总和	
XB-B1	82.80	0.73	0.06	14.503	0.12	0.05	0.02	0.00	0.013	0.05	1.61	2.01	100.36	10
XL-B32	98.34	0.15	0.02	0.066	0.12	0.05	0.01	0.00	0.001	0.01	0.18	0.40	99.17	1
XL-B33	97.86	0.57	0.05	0.066	0.08	0.08	0.08	0.00	0.001	0.02	0.48	0.73	99.54	1
ZK402-B4	1.98	0.09	0.03	0.087	54.34	0.33	0.02	0.05	0.005	0.02	0.22	42.51	99.46	38
ZK1902	97.98	0.61	0.03	0	0.20	0.09	0.03	0.00	0.001	0.01	0.29	0.61	99.56	2
ZK1903	97.94	0.63	0.03	0.043	0.28	0.07	0.10	0.00	0.001	0.02	0.30	0.48	99.59	2
ZK1701	96.84	1.32	0.06	0.542	0.16	0.10	0.05	0.00	0.001	0.02	0.59	0.97	100.06	8
ZK1701-C	97.26	1.30	0.07	0.053	0.24	0.10	0.22	0.00	0.001	0.04	0.38	0.67	99.95	1
B503	90.60	4.67	0.46	0.822	0.28	0.19	0.72	0.08	0.001	0.05	1.44	1.88	99.75	12
B504	94.42	1.97	0.11	1.469	0.16	0.15	0.10	0.00	0.001	0.03	0.90	1.20	99.61	12
B505	2.26	0.30	0.03	0.13	53.57	0.68	0.08	0.04	0.008	0.02	0.25	42.40	99.52	1
B525	98.24	0.52	0.04	0.031	0.20	0.09	0.03	0.00	0.000	0.02	0.25	0.52	99.69	2
XL0923	2.51	0.36	0.022	1.031	53.64	0.81	0.096	0.032	0.0071	0.034	1.12	41.69	100.23	9.40
XL0924	94.44	0.56	0.025	1.138	1.56	0.58	0.080	0.030	0.0061	0.034	0.54	1.83	100.28	2.06
XL0925	97.65	0.39	0.015	0.798	0.50	0.18	0.064	0.022	0.0052	0.034	0.040	0.32	99.98	405
XL0926	89.14	4.98	0.26	0.676	0.37	0.36	0.81	0.041	0.0019	0.057	1.48	1.60	98.30	234
XL0927	97.19	0.81	0.040	0.478	0.31	0.18	0.14	0.042	0.0061	0.034	0.28	0.43	99.66	13.7
XL0928	95.28	1.69	0.15	0.3701	0.21	0.091	0.12	0.024	0.0045	0.023	0.84	0.86	98.82	17.9
XL0929	97.51	0.76	0.012	1.1751	0.28	0.041	0.069	0.018	0.012	0.023	0.020	0.010	99.91	21.6
XL0930	96.00	1.32	0.045	0.54	0.32	0.10	0.19	0.025	0.0056	0.023	0.38	0.59	99.16	10.7
XL0931	87.51	5.65	0.34	0.424	0.25	0.14	0.57	0.044	0.0061	0.023	2.22	2.22	97.18	6.12
XL0932	96.14	1.46	0.054	0.5338	0.29	0.058	0.21	0.020	0.0055	0.023	0.36	0.60	99.39	3.05
XL0933	97.10	0.58	0.022	0.285	0.21	0.050	0.079	0.036	0.0052	0.023	0.32	0.74	99.13	1.07

测试方法: Si 和烧失量采用 Agilent 7500a 型质谱仪测定, Al、Fe 采用滴定法, Ti、P 采用比色法, K、Na、Ca、Mg、Mn 采用原子吸收光谱法;
测试单位: 河北省廊坊地球物理地球化学研究所中心实验室。

痕迹; ② 围岩中的硅化作用形成了许多石英小晶洞, 其分布具定向性, 可在一定程度上指示热液运移的方向; ③ 受硅化强度变化的影响, 石英细脉的密度在 断层附近最高, 向两侧递减直至消失。

方解石化

以方解石细脉交切早阶段硅化时形成的石英脉为标志(图 4B、4D), 显微镜下可见方解石细脉切穿早期的梳状石英脉, 也可见方解石被晚期硅化所形成的细粒状石英交代(图 4C)。

泥化

标志矿物是伊利石, 泥化带内发育的伊利石呈叶片状, 以集合体形式沿裂隙充填于方解石和石英颗粒之间(图 4E)。

去碳酸盐化

去碳酸盐化发生的实质是 SiO₂ 取代了碳酸盐, 赋矿岩石脱 CO₂ 及 Ca 和 Mg, Fe 因形成硫化物或砷化物而残留下来(陈衍景等, 2007), 原岩则由于淋滤

作用, 已完全被交代成表面疏松多孔的乳白色粉石英团块(图 4F)。

另外, 围岩蚀变的岩相学研究还表明, 小龙矿区内有 3 期热液活动: 第 I 期为硅化, 以粗中粒石英组成的梳状石英脉为特征, 说明早阶段的硅化较强; 第 II 期为方解石化, 以方解石细脉切穿早期硅化形成的梳状石英脉为特征, 构成方解石脉的方解石颗粒较小(< 5 μm); 第 III 期为硅化, 其特征为细晶-微晶状石英沿裂隙贯入方解石脉中, 在方解石脉的内部发生交代, 该期硅化所形成的石英颗粒明显变小, 蚀变的强度明显减弱。在小龙矿区的这 3 期热液活动中, 硅化无论是从蚀变的次数还是蚀变的规模方面都远远超过方解石化, 因此, 在小龙矿区显示出以硅化为主、伴生方解石化及泥化和去碳酸盐化的蚀变特征。

2.2 常量元素变化特征

已有研究表明, 常量元素在蚀变过程中的迁

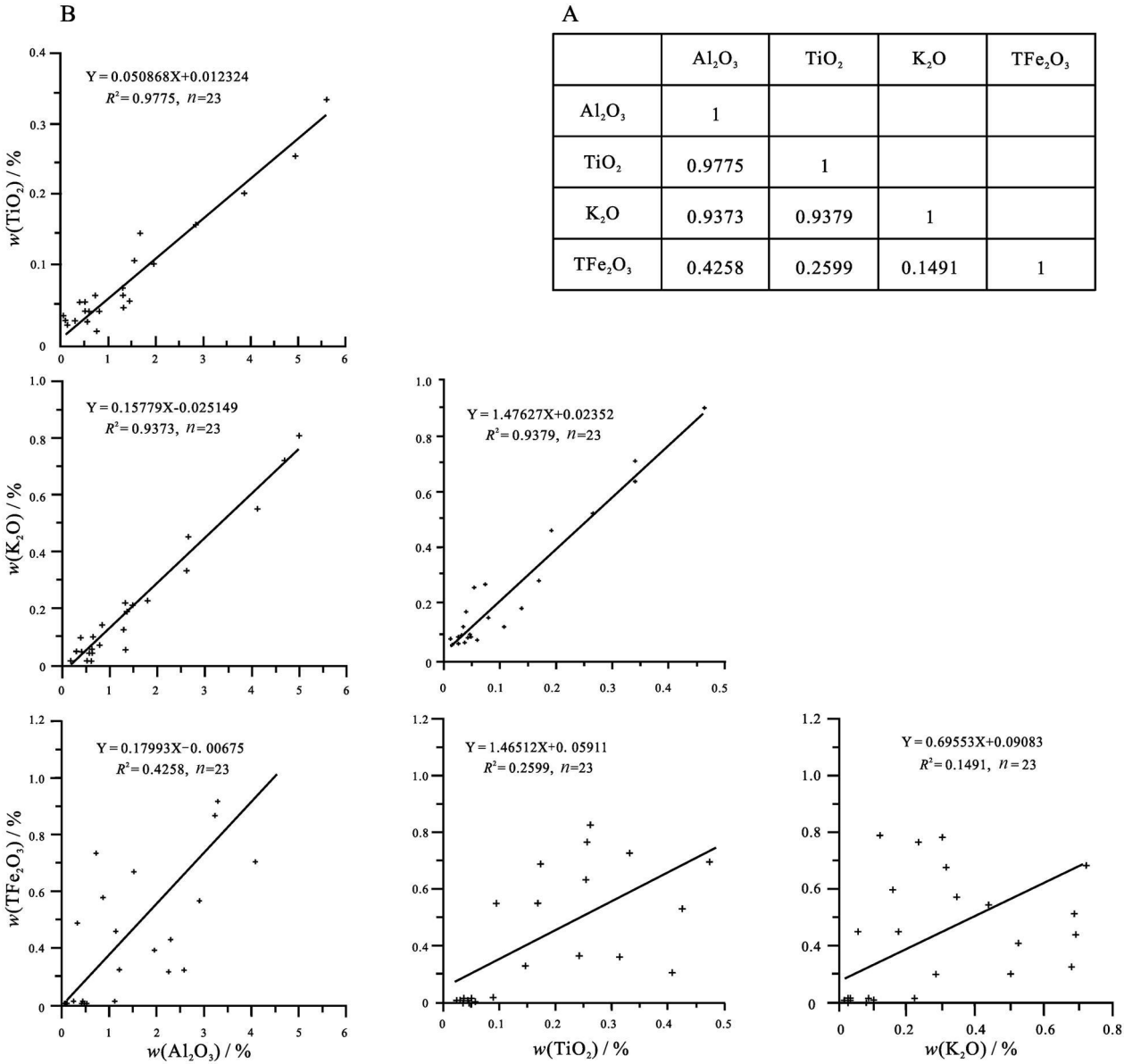


图 5 小龙矿区常量元素散点图

A. 小龙矿区的 Al₂O₃、TiO₂、K₂O、Fe₂O₃ 的线性相关系数; B. Al₂O₃、TiO₂、K₂O 和 Fe₂O₃ 的哈克图解, 直线的斜率代表 2 种不活动物质在原岩中的初始比率, 这表明它们在蚀变过程中以及蚀变后都保持相对稳定的比率;
 R^2 为 2 种组分的线性相关系数, 系数越接近 1, 相关性越高; n 为参与投点的样品数

Fig. 5 Major elements scatter plots of Al₂O₃, TiO₂, K₂O and Fe₂O₃ in the Xiaolong deposit

A. Linear correlation coefficients of Al₂O₃, TiO₂, K₂O, Fe₂O₃ in the Xiaolong ore district; B. Harker diagram of Al₂O₃, TiO₂, K₂O and Fe₂O₃. The slope of the line represents the initial ratio of the two kinds of inactive materials in the protolith, indicating that their ratio remained relatively stable during and after the alteration; R^2 represents linear coefficients of the two components: the closer the coefficient to 1, the higher the correlation; n means the number of samples taking part in the point projection

移行为具有明显的规律性, 部分元素的含量在蚀变和矿化过程中总是维持着一个恒定的比率, 若用这样的 2 个元素的质量分数分别作横坐标和纵坐标, 则样品点应落在经过原点的同一直线上(Hofstra et

al., 2000; Yigit et al., 2003)。在这 2 个元素的二元变化图解中, 线性相关系数越高, 就代表这 2 个元素的组合在蚀变过程中越稳定, 因此, 可以用来估计在蚀变和矿化过程中其他元素的带入、带出趋势, 以及

反映岩石中其他组分的变化趋势。

由于小龙金矿床的矿体受区内 F1 断裂的控制, 热液活动使得断裂附近的围岩发生了不同程度的蚀变, 因此, 蚀变集中发育在下二叠统栖霞组泥晶灰岩中, 故而, 本研究的主要采样对象是矿区内的栖霞组泥晶灰岩。采样本着“同地层, 等间距”的原则, 以求减小或避免岩性差异对分析的影响, 采样时以矿化异常区为背景, 在矿化强的地段适当加密。

小龙矿区内矿石及不同蚀变程度围岩样品的分析数据(表 1)也显示出类似的规律: Al_2O_3 、 TiO_2 以及 K_2O 三者之间的线性相关系数较大, 在蚀变和矿化过程中, 这三种主元素氧化物的比率保持不变(图 5A), Al_2O_3 - TiO_2 组合的线性相关系数最高(0.977), 表明在小龙矿区的蚀变和矿化过程中, Al_2O_3 与 TiO_2 的质量分数比率变化最小(图 5B)。

在卡林型金矿的成矿系统中, 常量元素氧化物可以用来度量原岩组分, 以及识别原岩在硅化、去碳酸盐化、泥化等蚀变作用过程中所发生的变化, 蚀变与 Au 之间的关系也可以用蚀变图解来讨论和解释, 其前提是, 在蚀变过程中, 该常量元素氧化物的含量保持相对稳定(Yigit et al., 2003)。根据常量元素相关系数可以看出, Al_2O_3 、 TiO_2 及 K_2O 三者在蚀变与矿化过程中最为稳定(图 5A), 它们在蚀变过程中的迁移可忽略不计, 将之作为标准, 结合各个样品的金品位, 能有效地比较出 Au 在蚀变过程中的变化特征, 从而明确蚀变与 Au 矿化的关系。相关系数最高的 Al_2O_3 - TiO_2 结合 Au 品位, 可说明蚀变过程中 Au 的迁入或迁出特点: 不同 Au 品位的 Al+Ti 的散点在图中保持在一条直线上, 说明 Au 品位的不同并不影响该直线的斜率(图 6), 同时, 也说明 Au 与蚀变过程中 Al 及 Ti 的带入或迁出无关。

CO_2 -CaO 协变图可反映出未蚀变的及蚀变的围岩中方解石、白云石与其他硅质矿物的组成比例和变化特点, 以及 Au 在去碳酸盐化过程中的富集趋势(图 7)。该图右上方椭圆形阴影范围内的样品代表了碳酸盐原岩, 该原岩的位置点表示小龙矿区内碳酸盐原岩样品的矿物及含量组合为 81% 方解石+ 12.75% 白云石+ 6.25% 石英。实验数据的变化趋势(灰色箭头)表明, 该矿区的泥晶、微晶灰岩在蚀变过程中去碳酸盐化及白云石化均不明显, 其蚀变绝大多数为硅化。排除了取样所导致的影响, 从原岩到蚀变岩之间缺乏过渡点, 说明硅化蚀变发生的时间短, 强度大。向该图中加入 Au 品位数据后, 显示

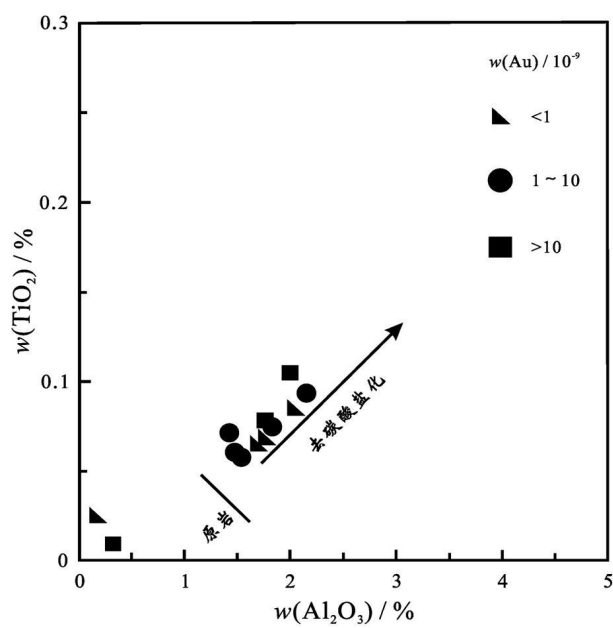


图 6 小龙矿区不同 Au 品位的 TiO_2 - Al_2O_3 图解
(据 Yigit et al., 2003)
Fig. 6 Plot of TiO_2 versus Al_2O_3 with different Au grade in the Xiaolong deposit (after Yigit et al., 2003)

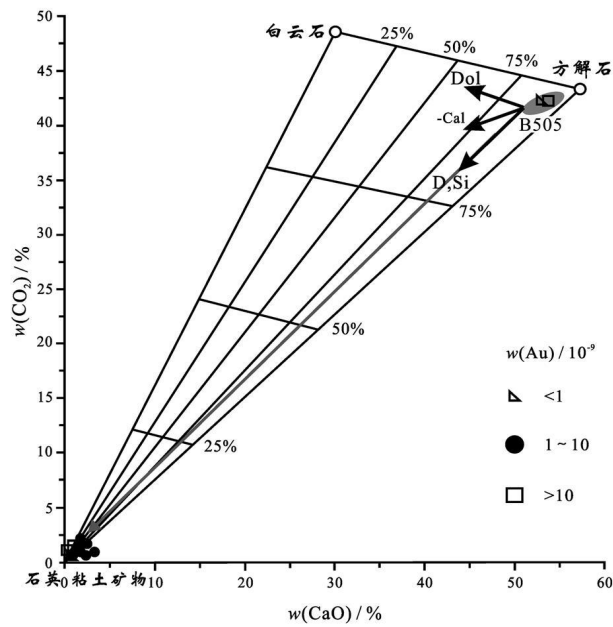


图 7 小龙矿区不同金品位的 CO_2 -CaO 协变图解
(据 Yigit et al., 2003)
Dol—白云石化; D—碳酸盐溶解; -Cal—去碳酸盐化; Si—硅化
Fig. 7 Plot of CO_2 versus CaO with different Au grade in the Xiaolong deposit (after Yigit et al., 2003)

Dol—Dolomitization; D—Dissolution of carbonate;
-Cal—Decarbonatization; Si—Silicification

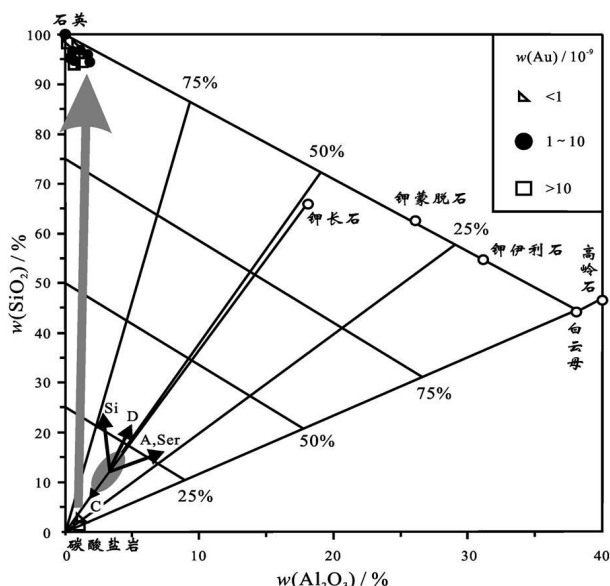


图8 小龙矿区不同 Au 品位的 SiO_2 - Al_2O_3 协变图

(据 Yigit et al., 2003)

Si—硅化; D—碳酸盐溶解; Ser—绢云母化; A—泥化;
C—方解石化

Fig. 8 Plot of SiO_2 versus Al_2O_3 with different Au grade in the Xiaolong deposit (after Yigit et al., 2003)

Si—Silicification; D—Dissolution of carbonate;

Ser—Sericitization; A—Argillization; C—Calcification

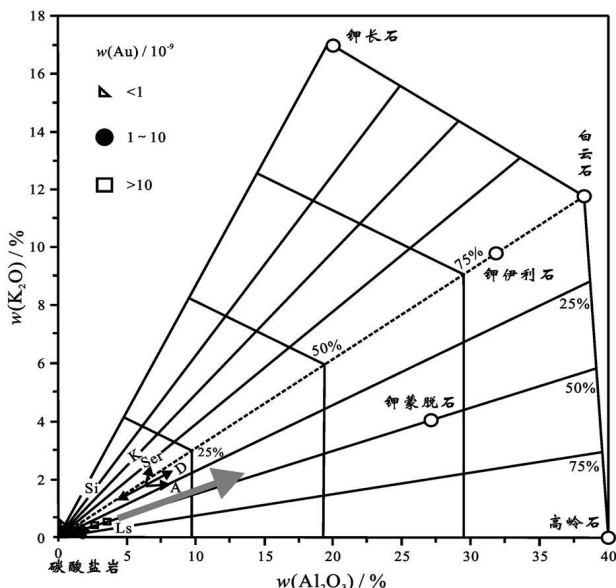


图9 小龙矿区不同 Au 品位的 K_2O - Al_2O_3 协变图

(据 Yigit et al, 2003)

Ser—绢云母化; K—钾质; Si—硅化; D—碳酸盐溶解;
A—泥化; Ls—灰岩

Fig. 9 Plot of K_2O versus Al_2O_3 with different Au grade in the Xiaolong deposit (after Yigit et al., 2003)

Ser—Sericitization; K—Potash; Si—Silicification; D—Dissolution of carbonate; A—Argillization; Ls—Limestone

出高品位 Au 大部分位于坐标原点附近, 反映出硅化对 Au 富集的作用。此外, 由于小龙金矿床为卡林型, 故而, 仍有少部分高品位样品位于碳酸盐原岩区内。

SiO_2 - Al_2O_3 协变图可显示出石英、白云母、高岭石及其他矿物在蚀变岩中所占的比例, 也可为蚀变作用的强弱与 Au 富集的关系提供证据(图8)。该图左下方椭圆阴影中的样品代表未蚀变的碳酸盐原岩, 图解表明, 矿区在发生去碳酸盐化蚀变的过程中, 总是伴随着以碧玉岩化为特征的硅化, 一直到碳酸盐组分完全被 SiO_2 取代为止。蚀变的途径显示出样品在蚀变过程中并未产生钾长石、绢云母、高岭石等蚀变矿物, 而是直接形成了石英。这再一次证明, 矿区内的硅化蚀变发生的时间短且强度大, 属于突变式硅化, 同时也反映出, 小龙矿区的位置靠近区域热液活动的中心。另外, 在图8中, 高品位 Au 数据点大多落在硅化的路径上, 据此可知, 硅化对 Au 富集的作用比去碳酸盐化更为明显。

K_2O - Al_2O_3 协变图显示出石英、碳酸盐和云母、伊利石及高岭石等蚀变矿物之间的比例(Yigit et al.,

2003), 进而可研究在硅化、去碳酸盐化与泥化三类蚀变过程中 Au 的变化特点; 而蚀变矿物之间的比例, 则可显示出所生成的蚀变矿物的主要类型, 为硅化或去碳酸盐化提供证据(图9)。小龙矿区的蚀变矿物组合为白云石+高岭石($\leq 14\%$), 在图9中落入A点, 而原岩中白云石的比例为12.75%, 将两者相比即可知在蚀变过程中产生了少量高岭石, 存在有轻微的钾富集, 这亦可部分说明钾与铝呈正相关的原因。图9内灰色箭头的变化方向远离原点, 代表去碳酸盐化蚀变的方向, 说明小龙矿区内 Au 的富集还与去碳酸盐化有关。

2.3 成矿元素变化特征

为了研究小龙矿区内成矿元素的变化趋势, 认清成矿元素在空间上的分布特征, 本文在大量的岩相学观察及地球化学分析的基础上, 选择了由空间上具一定关系的一系列样品构成的2个成矿元素剖面B-B'及C-C'(图2及表2), 并做出成矿元素变化趋势图(图10), 所选的样品均为栖霞组内的矿石, 可排除因原岩岩性差异而导致的成矿元素变化。

B-B'剖面(图10a)显示, 自北至南, 成矿元素

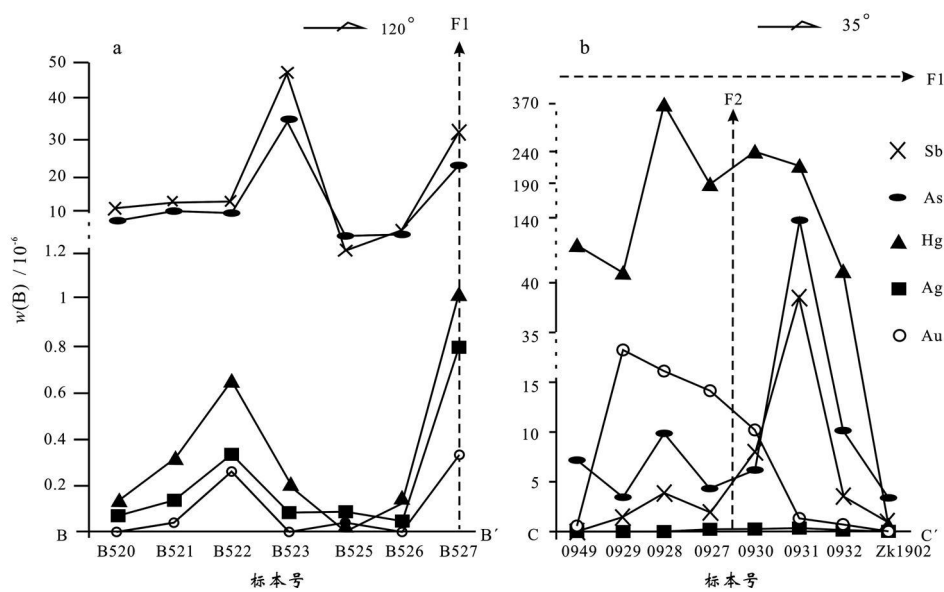


图 10 小龙矿区微量元素变化蛛网图
F1 及 F2 为断裂, 其位置及样品点位置见图 1
Fig. 10 Trace elements spidergrams of the Xiaolong deposit

表 2 小龙矿区 B- B' 及 C- C' 剖面成矿元素化学分析数据

Table 2 Analyses of ore-forming elements along B- B' and C- C' profiles in the Xiaolong deposit					
样品号	$w(B)/10^{-6}$				
	Au	Ag	As	Sb	Hg
B- B' 剖面					
B520	1	0.07	8	3.43	0.061
B521	3.8	0.1	10.8	2.49	0.174
B522	26	0.08	10.4	2.87	0.307
B523	7	0.08	35	12.41	0.118
B525	2	0.1	4.6	1.45	0.052
B526	1	0.08	5	4.03	0.063
B527	33	0.46	22.4	9.61	0.227
C- C' 剖面					
ZK1902	2	0.08	3.8	0.98	0.022
XL0927	13.70	0.11	4.55	1.79	190
XL0928	17.90	0.058	10.7	3.83	370
XL0929	21.60	0.079	3.54	1.43	48
XL0930	10.70	0.10	6.60	7.74	240
XL0931	6.120	0.36	137	37.0	210
XL0932	3.050	0.20	10.6	3.44	50
XL0949	0.680	0.11	7.18	0.57	72

测试方法: 酸溶法, 相对误差 (RSD) 小于 10%; 测试仪器: Agilent 7500a 型质谱仪; 测试单位: 河北省地矿中心实验室。

Sb、As、Hg、Ag 和 Au 呈现出富集→贫化→富集的特征。成矿元素第 1 次富集的点出现在 B522 处, 距 F1 断裂面约 200 m; 第 2 次富集的点位于 B527 处, 即位于 F1 断裂上。变化曲线中 Sb、As、Hg、Ag 和

Au 都呈现出较为一致的元素相关性, 其中, Ag 与 Au 的相关性最高, 两者的变化曲线几乎一致。

C- C' 剖面平行 F1 断裂展布(图 10b), 上述 5 种成矿元素由于都处于断裂面的开放体系环境中, 各元素的沉淀速率不稳定, 不再具有一致的相关性, 而是呈现出以下特点: ①SW 向, Ag 不仅变化极小, 而且含量极低, 几乎为零; ②Sb、As 与 Hg 具有较为一致的相关性, 出现 2 个富集高峰点(标本号 0928 及 0931)和 1 个集中亏损点(标本号 0927)(图 10b), 这 2 个富集点距 F1 约 150~ 200 m, 而集中亏损点则位于 F2 附近; ③SW 向, Au 的含量经历了一个贫化→富集→贫化的过程, 自 0949 开始至 0930, Au 有明显的富集趋势, 结合样品的采样位置分析后发现, Au 富集的区域集中在 F1 的 SW 段以及 F1 与 F2 交汇的区域, 经过 0931 后, Au 含量几乎为 0。在成矿元素减少的过程中, Au 的下降频率较均匀。

综上所述, 这 2 条成矿元素剖面的变化趋势图显示出的特点说明: ①F1 为区内热液运移的主通道, 垂直 F1 走向上的成矿元素的变化趋势曲线说明, 热液的冷却和成矿元素的富集是以一个稳定的速率进行的; ②在小龙矿区内, Au 的成矿富集区有 2 类, 一类位于主成矿通道 F1 处, 这类富集区有着丰富的物质来源, 较容易富集大量成矿元素, 另一类富集区是距主成矿通道 F1 约 150~ 200 m 的区域,

是热液快速降温的区域,因此,也有大量的 Au 在此富集;③成矿元素变化趋势曲线表明,在 F1 与 F2 断裂交汇处 Au 发生富集,这说明断裂交汇的地方有利于 Au 的富集。

3 物质迁移特征及质量平衡

蚀变研究的核心问题是原岩的性质及蚀变过程中组分的得失,元素质量分数的变化既不能用于鉴别真正卷入质量变化的元素,也不能直接用来计算元素的变化量,更不能用来鉴别物质转换过程中组

分的得失(张可清等,2002)。Greens(1967)首先提出了成分-体积的关系方程,定量解释了蚀变岩的组分迁移、体积变化和元素迁移;Grant(1986)简化了这一方法,提出了等比线分析法;O’ hara(1988)又改进了等比线值法,提出了微量元素法。笔者运用微量元素等比线值定量计算方法,对小龙矿区热液活动及围岩蚀变过程中的物质迁移及质量平衡进行了探讨。由于该矿区内存在多阶段的热液活动,而且叠加发育,故本文针对区内主要的蚀变作用——硅化蚀变进行了计算。

研究蚀变,首先要确定蚀变过程中的不活动组

表 3 小龙矿区原岩和蚀变岩的平均化学成分及物质迁移量

Table 3 Mean chemical components of unaltered and altered rocks in the Xiaolong deposit

	<i>w</i> (B) / %											
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	CO ₂	H ₂ O
硅质岩	95.01	1.53	0.10	1.02	0.16	0.31	0.14	0.18	0.02	0.03	0.93	0.64
泥晶灰岩	2.25	0.25	0.03	0.06	0.33	53.85	0.61	0.07	0.04	0.02	42.20	0.23
Δ	+ 117.53	+ 1.68	+ 0.09	+ 1.23	- 0.12	- 53.46	- 0.43	+ 0.16	- 0.01	+ 0.01	- 41.02	+ 0.58

Δ 表示物质的变化量, Δ= (*w*₀ⁱ / *k*) - *w*_Bⁱ; + 表示迁入组分; - 表示迁出组分;设原岩质量为 100 g。

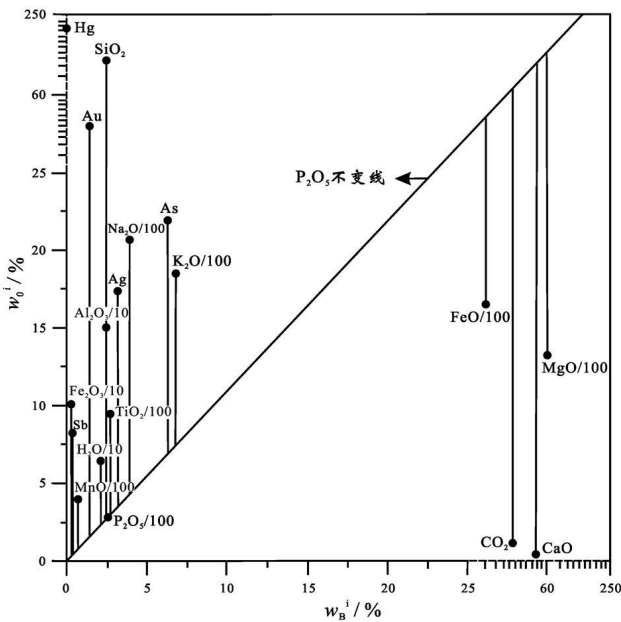


图 11 小龙矿区根据 P₂O₅ 质量分数线确定的蚀变过程中元素迁入迁出等比线
*w*_Bⁱ、*w*₀ⁱ 分别代表小龙矿区 P₁q 地层内蚀变前后岩石组分的质量分数

Fig. 11 Isometric parallel diagram based on the mass fraction of P₂O₅ in the Xiaolong deposit

*w*_Bⁱ、*w*₀ⁱ represent quality fractions of rock components before and after the alteration in P₁q strata of the Xiaolong ore district

分。Th 通常被认为是最佳的惰性元素,然后是 Al₂O₃、P₂O₅、TiO₂、Hf、V (魏俊浩等,2000)。根据小龙矿区的全岩化学分析结果(表 1),以 δ 值(δ= A_{max}/A_{min}, A 代表某组分在全岩中所占的质量分数)最小为标准,笔者选择 P₂O₅ 作为不活动组分(表 3),并计算出围岩蚀变的体积因子 K= 0.7932(K= V_B/V₀;V₀ 为蚀变前的岩石体积,V_B 为蚀变后的岩石体积)。岩石的体积因子 K< 1,即蚀变岩的体积应为减小型,即泥晶灰岩经过蚀变之后,体积减小。同时,做出部分组分的 *w*_Bⁱ-*w*₀ⁱ 变化图(*w*₀ⁱ 为蚀变前岩石中各组分的质量分数;*w*_Bⁱ 为蚀变后岩石中各组分的质量分数)(图 11)。

计算结果表明,蚀变过程中迁入的常量元素组分主要为 SiO₂、Na₂O、K₂O、Al₂O₃、Fe₂O₃、TiO₂ 和 MnO,成矿元素为 Hg、Au、Ag、As 及 Sb,迁出的组分只有 FeO、CaO、CO₂ 和 MgO。根据元素的迁出、迁入量(表 3),计算得出蚀变过程中岩石的质量平衡方程为:

100 g 泥晶灰岩+ 53.46 g CaO+ 0.123 g FeO+ 0.433 g MgO+ 41.02 g CO₂= 117.53 g SiO₂+ 1.23 g Fe₂O₃+ 0.09 g TiO₂+ 1.68 g Al₂O₃+ 0.165 g K₂O + 0.576 g H₂O + 79.32 g 硅质岩

根据围岩蚀变作用中成分带入量和迁出量占原

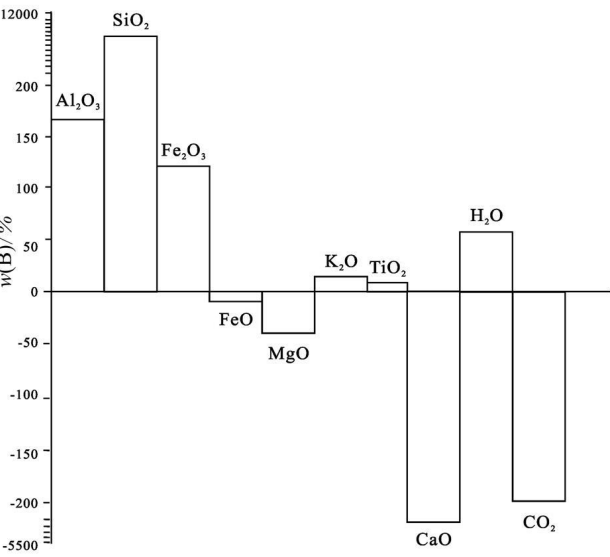


图 12 小龙矿区围岩蚀变过程中相对于原岩含量的组分迁移柱状图

Fig. 12 Quantity of component migration during the posses of alteration in the Xiaolong deposit

岩中该成分的质量分数的大小,可以确定在岩石蚀变过程中该成分变化由强到弱的序列为: $\text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaO} \rightarrow \text{CO}_2 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MgO} \rightarrow \text{K}_2\text{O} \rightarrow \text{TiO}_2$ (图 12)。这种成分的变化序列与元素自身的地球化学性质以及热液作用环境密切相关,也反映了围岩蚀变过程中元素的相对活动性顺序(邓军等, 2000)。

4 热液活动与 Au 的赋存

小龙矿区内发育的金属矿物主要为黄铁矿和褐铁矿,主要分布在硅化的石英脉中,而围岩中的含量则较少,不足 0.5%。矿体顶部硅帽中发育的金属矿物多为褐铁矿,其存在形式有 2 种: ① 存在于碧玉岩中,粒径约为 0.1 mm,晶形较好,呈立方体,为黄铁矿假

晶,是黄铁矿氧化的结果,含量极少,约占 0.2%; ② 赋存在石英脉中,多沿裂隙和粒间分布,反射色为黄白色,边缘呈橘红色,晶形不好,呈三角状或短柱状,粒径约为 0.002 mm,其含量受石英脉密度的制约,石英脉密度越大,褐铁矿含量越高。在矿体深部 40~ 70 m 的位置,金属矿物组合变为褐铁矿、黄铁矿与闪锌矿的共生组合,主要分布在石英脉中,褐铁矿仍然具有黄铁矿的假晶,粒径约为 50 μm ; 黄铁矿的粒度约为 3~ 5 μm ,呈半自形到他形,部分达 10 μm ,呈六边形;闪锌矿粒度与黄铁矿相近,部分出现环带结构。

为搞清小龙金矿区内金的赋存状态,本文在详细光薄片鉴定的基础上,选择了 5 件该矿区样品中的黄铁矿和闪锌矿进行电子探针分析,共打点 25 个,有 5 个点含金(其中 3 个点为黄铁矿,2 个点为闪锌矿)(表 4)。

ZK40I-B4-1 采自距地表 62.04 m 处,闪锌矿呈不规则状,粒度约为(12×8) μm ,其主要成分: $w(\text{Zn})$ 为 56.71%, $w(\text{S})$ 为 31.65%, $w(\text{Au})$ 为 0.21%, 赋存在 I 期石英脉中(图 13A)。

ZK40I-B4-2 采样深度同上,闪锌矿呈椭圆状,粒度约为 5 μm ,其主要成分: $w(\text{Zn})$ 为 60.83%, $w(\text{S})$ 为 32.79%, $w(\text{Au})$ 为 0.51%, 赋存在 I 期石英脉中(图 13B)。

ZK40I-B6-2 采自距地表 63.6 m 处,砷黄铁矿的形状不规则,粒度约为 10 μm ,其主要成分: $w(\text{Fe})$ 为 29.17%, $w(\text{S})$ 为 44.67%, $w(\text{As})$ 为 23.73%, $w(\text{Au})$ 为 0.18%, 赋存在 II 期石英脉中(图 13C)。

ZK40I-B6-3 采样深度为 63.6 m,砷黄铁矿呈椭圆形,粒度约为 3 μm ,其主要成分: $w(\text{Fe})$ 为 42.45%, $w(\text{S})$ 为 53.32%, $w(\text{As})$ 为 5.95%, $w(\text{Au})$ 为 0.27%, 赋存在 II 期石英脉中(图 13D)。

ZK40I-B7-1 采自距地表 64.1 m 处,黄铁矿呈

表 4 小龙矿区部分载金矿物的电子探针数据

Table 4 Electron microprobe analyses of metallic minerals related to gold in the Xiaolong deposit

探针点号	矿物	w(B) / %									
		Fe	S	As	Ag	Pb	Co	Sb	Zn	Au	总和
ZK40I-B4-1	闪锌矿	0.15	31.65	0.00	0.00	0.35	0.01	0.04	56.71	0.21	89.12
ZK40I-B4-2	闪锌矿	0.11	32.79	0.06	0.00	0.30	0.04	0.14	60.83	0.51	94.78
ZK40I-B6-2	砷黄铁矿	29.170	44.669	23.728	0.064	0.630	0.021	2.693	0.069	0.183	101.227
ZK40I-B6-3	砷黄铁矿	42.446	52.322	5.947	0.000	0.000	0.081	0.021	0.116	0.272	101.205
ZK40I-B7-1	砷黄铁矿	42.639	52.988	1.151	0.000	0.263	0.093	0.074	0.075	0.327	97.610

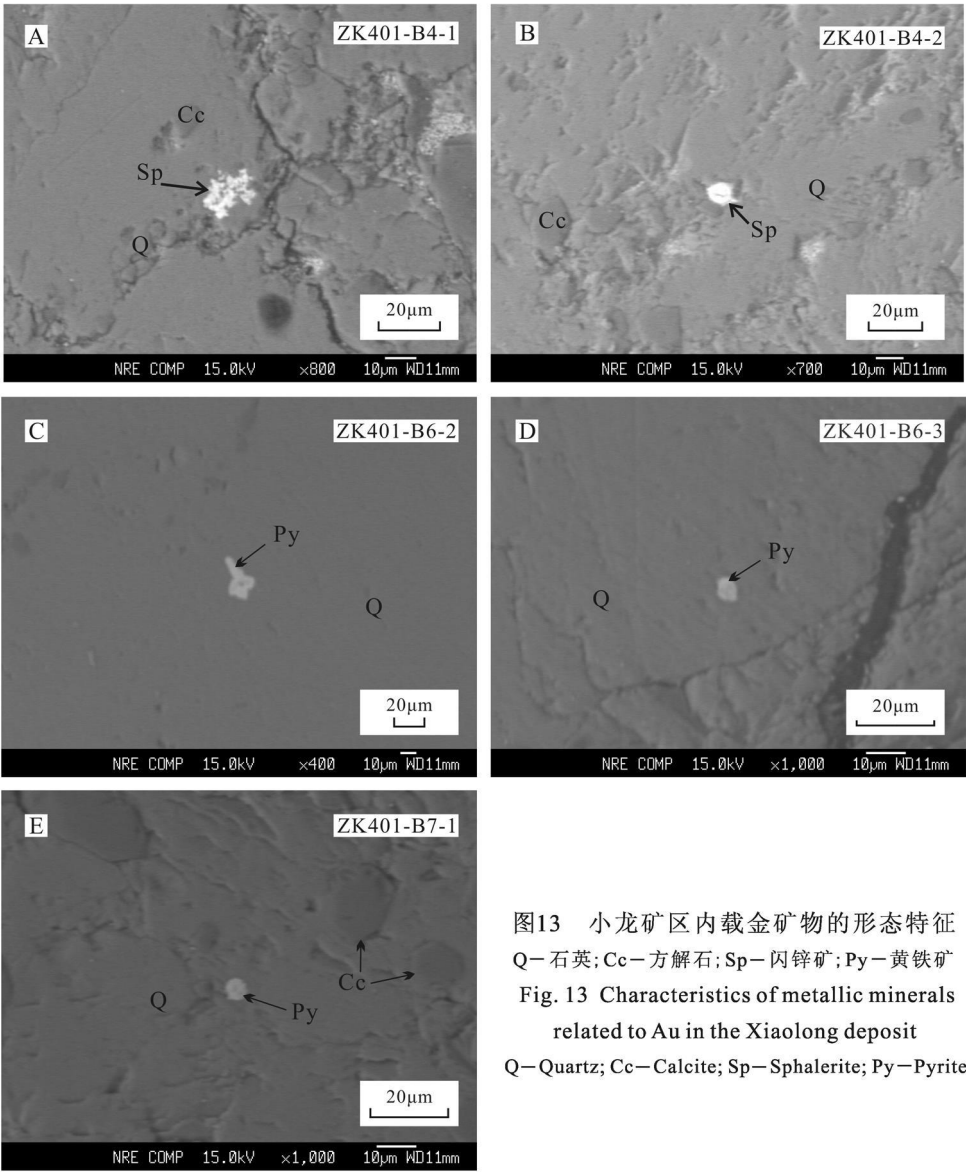


图13 小龙矿区内载金矿物的形态特征
Q—石英; Cc—方解石; Sp—闪锌矿; Py—黄铁矿

Fig. 13 Characteristics of metallic minerals related to Au in the Xiaolong deposit
Q—Quartz; Cc—Calcite; Sp—Sphalerite; Py—Pyrite

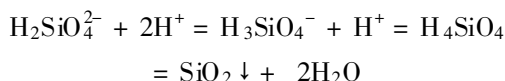
椭圆形, 粒度约 3 μm, 其主要成分: $w(\text{Fe})$ 为 42.64%, $w(\text{S})$ 为 52.99%, $w(\text{As})$ 为 1.15%, $w(\text{Au})$ 为 0.33%, 赋存在 I 期石英脉中(图 13E)。

金属矿物的岩相学观察和电子探针分析结果表明: ①矿区内的载金矿物为砷黄铁矿和闪锌矿, 但含金量不高, 它们均赋存在硅化形成的石英脉中, 未在褐铁矿中发现 Au, 也未发现自然金颗粒; ②载金矿物的晶形较差, 大多数砷黄铁矿和闪锌矿沿裂隙呈浸染状或乳滴状分布, 具典型热液成因形态特征。

5 问题与讨论

本文为了研究蚀变与矿化的关系, 在确定了硅化蚀变的主导地位后, 从岩相学、常量元素地球化学、成矿元素变化规律、蚀变岩质量平衡计算以及载金矿物等 5 个方面, 论证了硅化对金富集的作用及影响方式, 结果证明, 硅化对于小龙矿区内金的富集有着极为重要的影响, 这可从硅化反应的发生机制

上予以解释:



刘斌等(2008)认为,主要是裂隙水降温导致 SiO_2 过饱和和沉淀,从而发生了硅化作用。 Au 原本是赋存在流体中的还原性组分内,在硅发生过饱和和沉淀的过程中,还原性组分运移至地表时,由于氧化而失去了对 Au 的携带能力,从而使 Au 沉淀下来,降温越快,还原性组分氧化得也越快, Au 沉淀的速度就越快,沉淀的 Au 也就越多,随 Au 一起沉淀的还有金属硫化物与砷化物,最后, Au 赋存在这些金属矿物中。

6 结 论

(1) 野外地质观察及室内岩相学研究表明,小龙矿区的围岩蚀变并不具有典型的分带现象,而仅仅是同阶段矿化蚀变的复合,是同阶段多期热液作用后的结果,矿区内大面积发生的蚀变仅是强硅化(表1),其他类型的蚀变只是相伴发生。

(2) 该矿区内存在3期热液活动:第I期为硅化,第II期为方解石化,第III期为硅化。多期热液活动的叠加是小龙矿区内的围岩蚀变以强硅化为主的一个主要原因。

(3) 常量元素间的相关系数表明,在小龙矿区的围岩蚀变过程中, Al_2O_3 、 TiO_2 和 K_2O 相互间的含量比率相对稳定,以此为基础的蚀变图解证明,小龙矿区的围岩蚀变以硅化为主导,伴有轻微的去碳酸盐化和泥化,这不仅为野外及岩相学的观察结果提供了佐证,而且也反映出该矿区内的热液存在一个快速降温的过程。

(4) 根据蚀变岩质量平衡原理,对小龙矿区的围岩蚀变进行了计算,结果表明,在其围岩蚀变过程中,迁入的常量元素组分主要为 SiO_2 、 Na_2O 、 K_2O 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 和 MnO ,微量元素为 Hg 、 Au 、 Ag 、 As 和 Sb ,迁出的组分有 FeO 、 CaO 、 CO_2 和 MgO 。各种组分迁入迁出的量由大到小依次为: $\text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaO} \rightarrow \text{CO}_2 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MgO} \rightarrow \text{K}_2\text{O} \rightarrow \text{TiO}_2$,这也是硅化占主导地位的有力佐证。

(5) 载金矿物的电子探针分析结果表明,该矿区内的载金矿物都赋存于石英脉中,它们具有典型

的成因特征,可反映出小龙矿床的热液成矿属性。

志 谢 本研究的岩石化学和地球化学分析在河北省廊坊地球物理地球化学研究所中心实验室完成。野外工作中得到了江西省地质勘查局赣西地质大队曾书明总工程师、刘金元教授级高级工程师和黄孝文高级工程师等的大力帮助;数据测试过程中,东华理工大学电子探针实验室的郭国林、刘成东老师以及贵州省区域调查院的王敏老师提供了宝贵的帮助和建议;论文修改过程中李龚建硕士与王必任硕士提出了大量意见,在此一并致以诚挚的谢意!

References

- Chen D J and Yang M S. 2000. Geochemical characters of carlin type gold deposits in Yuanshui depression, western of Jiangxi[J]. Mineral Resources and Geology, 14(6): 23-27 (in Chinese with English abstract).
- Chen D J and Yang M S. 2001. Ore-controlling condition and metallogenetic model of carlin type gold deposits in the western of Jiangxi Province[J]. Mineral Resources and Geology, 15(2): 12-17 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y J, Ni P, Fan H R, Pirajno F, Lai Y, Su W C and Zhang H. 2007. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits[J]. Acta Petrological Sinica, 23(9): 2085-2108 (in Chinese with English abstract).
- Deng J, Fang Y, Yang L Q, Ding S J, Xiao R G, Peng R M and Wang J P. 2000. Shear alteration, mass transfer and gold mineralization: An example from Jiaodong gold deposit concentration region, shandong[J]. Earth Science, 25(4): 14-20 (in Chinese with English abstract).
- Grant J A. 1986. The isocon diagram: A simple solution to greases equation for metasomatic alteration[J]. Econ. Geol., 81: 1976-1982.
- Greens R L. 1967. Composition-volume relationships of metasomatism [J]. Chemical Geology, 1(2): 47-65.
- He W J and Qian G H. 2003. Metallogenetic condition and prospecting outlook of kalin type gold deposit in western Jiangxi[J]. Mineral Resources and Geology, 17(2): 13-17 (in Chinese with English abstract).
- He W J. 2004. Metallogenetic characteristics and oresearching direction for carlin type au deposits in the west jiangxi province[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 19(3): 173-176, 195 (in Chinese with English abstract).
- Hofstra A H and Cline J S. 2000. Characteristics and models for Carlin-type gold deposits[J]. In: Hagemann S G, ed. Reviews in Economic Geology, Society of Economic Geology. 13: 163-214.
- Liu B. 2008. Tectonic fluid in the crust[M]. Beijing: Science Press. 456-476 (in Chinese with English abstract).
- L. X B. 2001. Structural anomaly and its significance in controlling the

- ore deposits distribution in south-east Hubei and north-west Jiangxi Provinces[J]. *Geology and Prospecting*, 37(5): 15-18 (in Chinese with English abstract).
- O' hara R T. 1988. Fluid flow and volume loss during mylonitization: An origin for phyllonite in an overthrust setting, North Carolina, USA [J]. *Tectonophysics*, 156(1): 21-36.
- Wei J H, Liu C Q and Ding Z J. 2000. Active laws of element migration in wall-rock alteration processes for hydrothermal gold deposits: As evidenced by Dongping, Hougou and Shuijingtun gold deposits[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 20(2): 34-45 (in Chinese with English abstract).
- Yigit O and Hofstra A H. 2003. Lithogeochemistry of Carlin-type gold mineralization in the Gold Bar district, Battle Mountain-Eureka trend, Nevada[J]. *Ore Geology Reviews*, (22): 201-224.
- Zhang K Q and Yang Y. 2002. Introduction of the method for mass balance calculation in altered rocks[J]. *Geological Science and Technology Information*, 21(3): 21-34 (in Chinese).
- 附中文参考文献
- 陈大经, 杨明寿. 2000. 赣西袁水凹陷卡林型金矿床地质特征[J]. *矿产与地质*, 14(6): 23-27.
- 陈大经, 杨明寿. 2001. 赣西卡林型金矿控矿条件及成矿模式[J]. *矿产与地质*, 15(2): 12-17.
- 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, Pirajno F, 赖勇, 苏文超, 张辉. 2007. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[J]. *岩石学报*, 23(9): 2085-2108.
- 邓军, 方云, 杨立强, 丁式江, 肖荣阁, 彭润民, 王建平. 2000. 剪切蚀变与物质迁移及金的富集——以胶东矿区为例[J]. *地球科学*, 25(4): 14-20.
- 何维基, 钱国华. 2003. 赣西卡林型金矿床成矿地质条件及找矿前景[J]. *矿产与地质*, 7(2): 13-17.
- 何维基. 2004. 赣西卡林型金矿床成矿特征及找矿方向[J]. *地质找矿论丛*, 19(3): 173-176, 195.
- 刘斌. 2008. 地壳构造流体[M]. 北京: 科学出版社. 456-476.
- 吕新彪. 2001. 鄂东南-赣西北地区构造异常及其控矿意义[J]. *地质与勘探*, 37(5): 15-28.
- 魏俊浩, 刘丛强, 丁振举. 2000. 热液金矿床围岩蚀变过程中元素迁移规律——以张家口地区东坪、后沟、水晶屯金矿为例[J]. *矿物学报*, 20(2): 34-45.
- 张可清, 杨勇. 2002. 蚀变岩质量平衡计算方法介绍[J]. *地质科技情报*, 21(3): 21-34.