

DOI: 10.13745/j.esf.yx.2017-2-14

赣南长流坑钨矿年代学与原生晕地球化学

方贵聪¹, 赵正², 陈伟³, 王登红², 陈毓川⁴, 刘善宝², 罗泽¹, 陆炫臣¹,
冯昌瑞¹, 张宇杰¹

1. 桂林理工大学 地球科学学院 广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 广西 桂林 541004
2. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037
3. 江西省地质矿产勘查开发局 赣南地质调查大队, 江西 赣州 341000
4. 中国地质科学院, 北京 100037

FANG Guicong¹, ZHAO Zheng², CHEN Wei³, WANG Denghong², CHEN Yuchuan⁴,
LIU Shanbao², LUO Ze¹, LU Xuanchen¹, FENG Changrui¹, ZHANG Yujie¹

1. *Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration, College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China*
2. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*
3. *Geological Survey Party of Gannan, Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Resources Development, Ganzhou 341000, China*
4. *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*

FANG Guicong, ZHAO Zheng, CHEN Wei et al. Geochronology and primary halo geochemistry of the Changliukeng tungsten deposit in South Jiangxi Province. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(5): 149-158

Abstract: No previous studies have been reported on metallogenic chronology and primary halo geochemistry of the Changliukeng tungsten polymetallic deposit, which is a quartz vein type of deposit located in northern Jiulongnao Orefield, South Jiangxi Province. In this paper, the ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of muscovite and the analysis of primary halo zonation were carried out in the deposit to better understand the time, genesis of mineralization and more effectively define favorable metallogenic area. The result shows that (1) the age of Changliukeng deposit is the Late Jurassic with an age of 151.9±1.5 Ma, which shows intimate genetic association with the Jiulongnao granitic pluton; that (2) the axial zoning of primary halos obviously exists, which is indicated by the ore-body containing W and Bi, the ore-head containing Ca, Sr, Mn, V, Cr, Nb, Cs, Ti and U, and the ore-front containing Cu, Mo, Hg, Co, S, P, As, Y, Th, Pb, Sb and I, and it is about 150 m between the anomaly halo centers of ore-body indicator and ore-head indicator, and about 330 m between the anomaly halo centers of ore-body indicator and ore-front indicator; that (3) the axial zoning pattern of primary halos in Changliukeng tungsten deposit has been established and two targets are predicted.

Key words: tungsten deposit; mineragenetic epoch; primary halo; geochemistry; metallogenic prospecting; Jiulongnao

摘要:长流坑钨矿位于赣南九龙脑矿田北部,研究程度较为薄弱,成矿时代及原生晕分带规律至今未见报道。本文对其开展了白云母 Ar-Ar 年代学及原生晕地球化学研究。结果表明:(1)长流坑钨矿形成于(151.9±1.5) Ma,与九龙脑花岗岩体存在密切成因关系;(2)矿床原生晕轴向分带明显,W、Bi 为矿中元素,Ca、Sr、Mn、V、Cr、Nb、Cs、Ti、U 为矿头元素,Cu、Mo、Hg、Co、S、P、As、Y、Th、Pb、Sb、I 为矿前元素,矿中元素与矿头

收稿日期:2017-01-01;修回日期:2017-02-23

基金项目:国土资源部公益性行业科研专项(201411050-2);国家重点研发计划课题(2016YFC0600208);广西自然科学基金青年基金项目(2015GXNSFBA139205);广西隐伏金属矿产勘查重点实验室系统研究课题(16-140-27-03);国家自然科学基金项目(41162005,41463001,41572191)

作者简介:方贵聪(1985—),男,博士,讲师,主要从事矿床成矿规律研究。E-mail:fanggc@163.com

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘,2017,24(5)

元素原生晕异常中心相距约 150 m,与矿前元素原生晕异常中心相距约 330 m;(3)建立了矿区原生晕轴向分带模式,并据此圈定 2 个预测靶区。

关键词:钨矿床;成矿时代;原生晕;地球化学;成矿预测;九龙脑

中图分类号:P618.67;P597.3;P632.2 文献标志码:A 文章编号:1005-2321(2017)05-0149-10

长流坑钨矿位于赣南九龙脑矿田北部,南距九龙脑花岗岩体约 15 km。前人从成岩成矿年代学^[1-6]、成矿流体^[7-9]、矿田构造^[10]、矿物学^[11]、原生晕^[12]等角度对九龙脑矿田开展过众多研究,但主要聚焦于九龙脑岩体接触带附近的淘锡坑、柯树岭、樟东坑、洪水寨等矿床,而对距离九龙脑岩体较远的长流坑钨矿的研究则很薄弱。由于该矿区内部并未发现与矿体直接接触的花岗岩体,矿床的成因及其与九龙脑岩体的关系尚不清楚,有待补充成矿年代学依据加以约束。长流坑钨矿始建于 1996 年,2004 年以前主要对地表及浅部(290 m 标高以浅)开采,但由于矿石品位低,规模小,生产多处于停顿状态,亟待开展深部隐伏矿体的预测研究,提高找矿效果,延长矿山服务年限。本文在详细调查矿区地质特征基础上,对矿区开展白云母 Ar-Ar 年代学研究,探讨矿床成因,同时对 3 号勘探线开展原生晕分带性分析,试图建立矿区原生晕找矿模式,为矿区及外围深部找矿勘查提供指导。

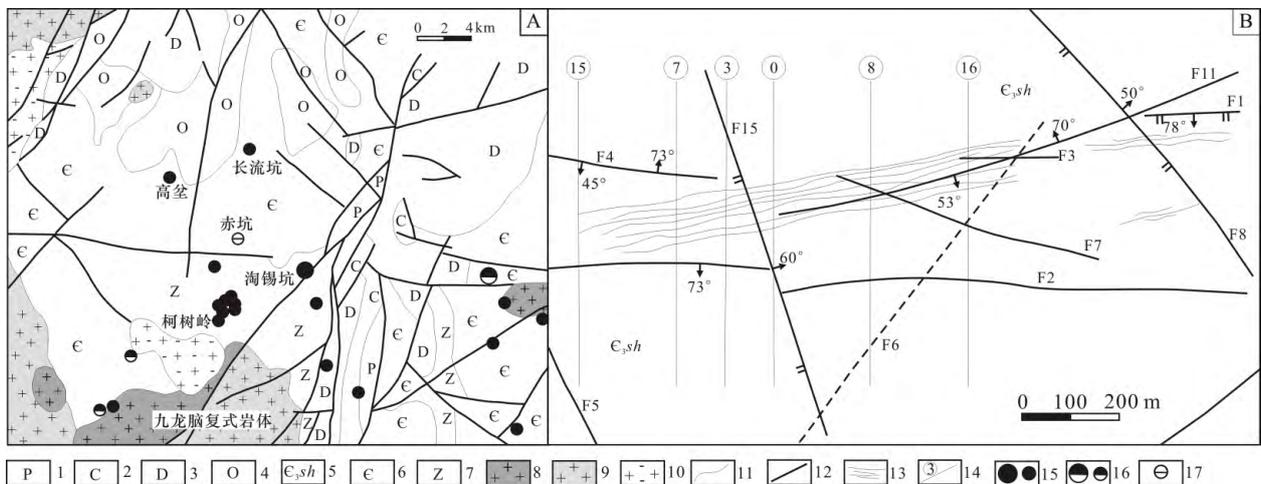
1 矿床地质概况

长流坑钨矿地处赣南崇义县过埠镇,九龙脑复

式花岗岩体北约 14 km 处,为一小型石英脉型 W-Sn-Cu 多金属矿床,是九龙脑钨矿田中重要的找矿远景区(图 1)。

矿区地层较简单,主要为晚寒武世水石组,是一套次深海含碳泥质陆源碎屑的类复理石建造,主要由石英细砂岩、条带状板岩、含碳板岩、石英砂质灰岩透镜体组成。岩石角岩化广泛发育,夕卡岩化较为普遍。夕卡岩化以发育透辉石、透闪石、绿泥石、石榴子石以及一些针柱状矿物等为特征,石榴子石难以见到晶形。夕卡岩化岩石中可见较强的黑钨矿、白钨矿化、闪锌矿等,多处可达工业品位。夕卡岩化现象的普遍发育表明,夕卡岩型钨矿具有一定的成矿潜力,夕卡岩化岩石对找矿具有重要的指示意义。

矿区断裂构造较发育,主要表现为近东西向、北北西向,次为北东向。近东西向断裂对钨矿石英脉的产状有明显控制作用,石英脉两侧常有产状一致的断裂发育。近东西向矿化石英脉往往被南北向断裂所错断,错断石英脉的断裂带中常被方解石所充填,表明近东西向构造形成较早,属于成矿前构造。矿区 3 号和 0 号勘探线附近破碎带最为发育,大小不等,规模最大一处宽度可达 30 m,



1—二叠纪硅质岩和砂岩;2—石炭纪灰岩和砂岩;3—泥盆纪砂岩夹页岩;4—奥陶纪粉砂质板岩;5—晚寒武世水石组变质砂岩、板岩夹灰岩;6—寒武纪变质杂砂岩和板岩;7—震旦纪变质砂岩和板岩;8—晚侏罗世细粒斑状黑云母二长花岗岩;9—中侏罗世中细粒黑云母二长花岗岩;10—早志留世中粒花岗岩闪长岩;11—地层界线;12—断层;13—矿化石英脉;14—勘探线及其编号;15—大型/中小型钨矿床;16—大型/中小型锡矿床;17—中小型铅锌矿。

图 1 长流坑钨矿床区域地质图(A)及矿区地质图(B)

(据文献^[13]修编)

Fig.1 Regional geological map (A) and ore-district geological map (B) of Changliukeng tungsten deposit

带中充填了石英、方解石、萤石,可见大量白云母,并发育有褐铁矿化、黄铜矿化、黄铁矿化、毒砂,产状 $200^{\circ}\angle 83^{\circ}$ 。被断裂错断的矿脉,西段往往向北移,东段向南移,错距0.1~2 m不等,在寻找矿脉和掘进时应引起重视。

矿区内未见岩浆岩出露,根据已施工的两个钻孔获知,ZK001至-290 m、ZK801至-314 m,均未揭露岩体,推测与成矿有关的花岗岩体隐伏于标高-400 m以下。不过现场调查发现,234中段3线掌子面向北水平钻60 m孔深处揭露了闪长岩脉,宽约1 m,灰绿色,细粒结构,块状构造,主要由斜长石和普通角闪石组成。

矿化主要以外带钨矿石英脉(图2a)产出,同时发育夕卡岩型多金属矿化(图2b)。目前,钻孔和平硐已控制7条钨矿石英脉,倾向 $170^{\circ}\sim 190^{\circ}$,倾角 $60^{\circ}\sim 85^{\circ}$,脉幅5~16 cm,矿石品位Cu(0.016%~3.12%)、Sn(0.012%~0.88%)、 WO_3 (0.03%~0.567%)。在234中段调查发现,矿化石英脉脉幅一般为2~5 cm,少数可达10 cm以上;在3线和7线可见脉体密集发育,脉距3~21 m不等;7号勘探线的矿脉产状测量结果显示,矿脉倾角有南陡北缓的特征,变化范围 $85^{\circ}\rightarrow 78^{\circ}\rightarrow 70^{\circ}\rightarrow 65^{\circ}\rightarrow 60^{\circ}$;石英脉形态在走向和纵向上常呈现有膨大缩小现象,但同一条脉通常具有由东向西、由浅至深脉幅增大的特点。矿石中常见矿物近十余种,金属矿物主要为黄铜矿,次为黑钨矿、锡石、黄铁矿、孔雀石等。非金属矿物主要为石英,其次为萤石、正长石、白云母、方解石。矿石结构主要为充填结构、自形粒状结构,它形

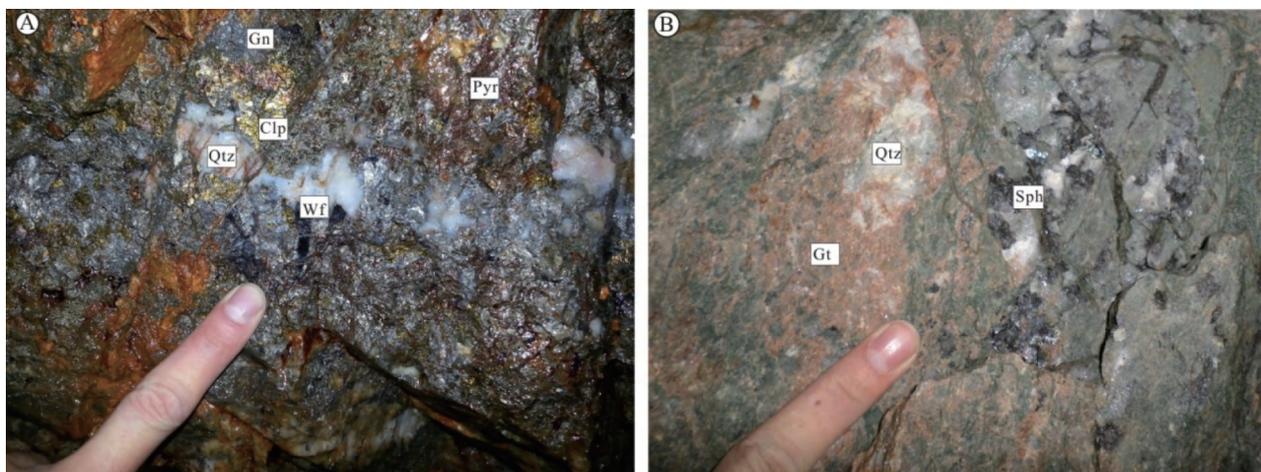
一半自形结构,其次是交代结构、交代残余结构、碎裂结构。矿石构造主要有块状构造、条带状构造、细脉状构造、网脉状构造、角砾状构造。

围岩蚀变以硅化、夕卡岩化、大理岩化、白云母化、绢云母化、绿帘石化等常见,局部可见绿泥石化和碳酸盐化。大理岩化和夕卡岩化呈条带状,可见5条,每条宽0.5~1 m,集中在7号勘探线附近,产状 $208^{\circ}\angle 78^{\circ}$,一般顺层产出。每条蚀变带之间间距0.7~1 m不等,带中局部会出现极富的闪锌矿、白钨矿化。

2 样品采集与分析方法

用于测年的云母样品采于矿区0号勘探线钻孔ZK003孔深365 m处的白云母线脉(图3),样品号为CLK-3。脉体产于寒武系角岩化砂岩中,宽约0.5 cm,轴心夹角 35° ,主要由白云母、绢云母和石英组成,并含少量萤石、黑钨矿、白钨矿和黄铜矿。云母线之上及之下可见较多矿化石英细脉,发育黑钨矿、黄铜矿、白钨矿、磁黄铁矿等明显矿化,据此可判断该云母线为成矿期内形成,其结晶时间可代表成矿时间。

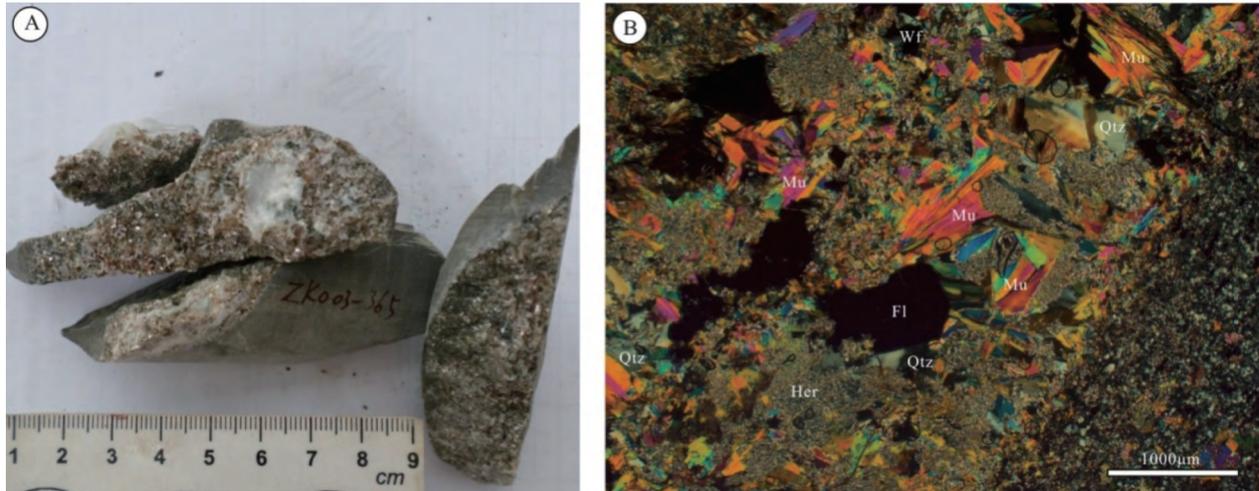
白云母测年在中国地质科学院地质所 Ar-Ar 定年实验室完成,采用的是常规 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 阶段升温测年法。从云母线脉中挑选纯的云母单矿物(纯度 $> 99\%$)用超声波清洗。超声清洗过程中要注意清洗液的选择和严格控制时间。一般先用经过两次亚沸蒸馏净化的纯净水清洗3次,每次3 min,在此过



Gn—方铅矿;Clp—黄铜矿;Pyr—磁黄铁矿;Sph—闪锌矿;Wf—黑钨矿;Qtz—石英;Gt—石榴子石。

图2 长流坑钨矿床石英脉型(A)与夕卡岩型(B)矿化

Fig. 2 Quartz-vein type(A) and skarn type(B) mineralization of Changliukeng deposit



Qtz—石英; Her—绢云母; Mu—白云母; Fl—萤石; Wf—黑钨矿。

图3 长流坑钨矿床的白云母线脉手标本(A)及显微照片(B)

Fig. 3 The hand specimen(A) and microphotograph(B) of muscovite vein in the Changliukeng deposit

程中矿物表面和解理缝中在天然状态下和碎样过程中吸附的粉末和杂质被清除。然后在丙酮中清洗两次,每次 3 min,在此过程中,矿物表面吸附的油污等有机物质被清除。清洗后的样品被封进石英瓶中送核反应接受中子照射。照射工作是在中国原子能科学研究所的“游泳池堆”中进行的。使用 H8 孔道,中子流密度约为 $6.0 \times 10^{12} \text{ m}^{-2}/\text{s}$ 。照射总时间为 3 000 min,积分中子通量为 $1.13 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$;同期接受中子照射的还有用做监控样的标准样:ZBH-25 黑云母国内标样,其标准年龄为 132.7 Ma, K 含量为 7.6%。

样品的阶段升温加热使用电子轰击炉,每一个阶段加热 30 min,净化 30 min。质谱分析是在 MM-1200B 质谱计上进行的,每个峰值均采集 8 组数据。所有的数据在回归到时间零点值后再进行质量歧视校正、大气氩校正、空白校正和干扰元素同位素校正。系统空白水平: $m/e=40, 39, 37, 36$, 分别小于 $6 \times 10^{-15} \text{ mol}$, $4 \times 10^{-16} \text{ mol}$, $8 \times 10^{-17} \text{ mol}$ 和 $2 \times 10^{-17} \text{ mol}$ 。中子照射过程中所产生的干扰同位素校正系数通过分析照射过的 K_2SO_4 和 CaF_2 来获得,其值为: $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar}_0)_{\text{Ca}}=0.000\ 238\ 9$, $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}}=0.004\ 782$, $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar}_0)_{\text{Ca}}=0.000\ 806$ 。 ^{37}Ar 经过放射性衰变校正; ^{40}K 衰变常数 $K=5.543 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$; 用 ISOPLOT 程序计算坪年龄及正、反等时线^[14], 坪年龄误差为 2。详细实验流程参见文献[15-16]。

用于原生晕研究的 69 件样品由赣南地质调查大队采自矿区 3 号勘探线的 ZK301、ZK302、ZK303

三个钻孔中的矿化脉(体),其中 23 件采于 ZK301、17 件采于 ZK302,29 件采于 ZK303,以岩心劈半法进行,样品质量一般在 200~300 g。样长视矿化脉(体)宽度而定,当矿化体较短时,采全劈下的一半;当矿化体较长时,沿岩心分段连续采样,并要穿过矿化体的全部厚度,合并形成一件组合样,必要时对同一个矿化体的各分段分别采集一个组合样。样品破碎工作由江西省地勘局赣南中心实验室完成。

本文对上述副样开展了系统的微量元素测试,测试工作在中国地质科学院国家地质实验测试中心的 SPECTRO XEPOS 台式偏振 X 射线荧光光谱仪上完成,测试元素包括 P、S、Ti、W、Mo、Sn、Sb、Pb、Bi、Cu、Ca、V、Cr、Mn、Co、Ga、Ge、As、Sr、Y、Zr、Nb、Cs、Ba、Hf、Hg、Tl、Th、U、Cl 等 31 个。

测试数据根据矿化体的空间产出特征经由 MapGIS 软件的空间 DTM 分析做出各元素的原生晕剖面图,图中主要由元素原生晕的外带、中带和内带组成,其中外带含量的下限即为该元素的异常下限。求取该异常下限时,首先采用直方图法逐步剔除含量特高值和含量特低值,直至剩下的数据基本服从正态分布,然后求出剩下数据的平均值和标准离差,一般取异常下限=平均值+2×标准离差,原生晕中带的下限=2×异常下限,原生晕内带的下限=4×异常下限。当然,该求法中的 2 倍、4 倍并非一成不变,还需不断进行调试,以突出原生晕剖面元素含量的最佳分带效果的目的。

3 分析结果与讨论

3.1 成矿时代

白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar测年结果见表1。云母中Ar对后期地质作用的影响甚为敏感,因而其年龄图谱形态可反映其形成后是否已受扰动,未受后期地质作用叠加时,就形成平坦的年龄图谱,否则形成明显的扩散丢失谱。本次测试的云母呈现平坦的年龄图谱,表明云母形成以后未受后期热事件的扰动,而且绝大部分加热阶段析出的³⁹Ar都符合成坪条件,相关性很好。获得的坪年龄为(152.0±0.9)Ma,反等

时线年龄为(151.9±1.5)Ma,两者高度吻合(图4),表明测试结果真实可靠,反映所测样品的结晶时间。所测云母与黑钨矿、白钨矿、黄铜矿等金属矿物共生,云母的年龄可代表成矿年龄。可见,长流坑钨铜矿形成于(151.9±1.5)Ma。

九龙脑矿田的主要花岗岩体(九龙脑岩体)形成于154.9Ma^[1],该岩体北侧的淘锡坑钨矿床发育隐伏花岗岩体,形成于158.7Ma^[6],矿床形成于154.4Ma^[17];九龙脑岩体南侧的洪水寨云英岩型钨矿形成于156.3Ma,九龙脑内带石英脉型钨矿形成于151.5Ma,樟东坑外带石英脉型钨矿形成于151.3Ma^[18],表明矿田于晚侏罗世发生了广泛而

表1 云母样品 CLK-3 的⁴⁰Ar/³⁹Ar测年数据
Table 1 ⁴⁰Ar/³⁹Ar analytical data for muscovite samples from the Changliukeng deposit

T/°C	(⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁶ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁷ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁸ Ar/ ³⁹ Ar) _m	ω(⁴⁰ Ar) /%	F	n(³⁹ Ar)/ (10 ⁻¹⁴ mol)	³⁹ Ar 累积 比率/%	Age/Ma	±1 s /Ma
700	612.613 4	2.051 5	1.389 3	0.397 0	1.06	6.488 2	0.02	0.07	46.0	61.0
760	123.649 0	0.364 4	0.011 1	0.078 1	12.92	15.975 9	0.05	0.29	112.0	10.0
800	117.361 3	0.324 9	0.218 0	0.074 0	18.19	21.357 2	0.21	1.17	148.6	2.7
840	58.854 8	0.126 5	0.087 7	0.037 5	36.49	21.478 4	0.64	3.83	149.4	1.5
880	28.109 3	0.021 0	0.014 4	0.016 6	77.92	21.901 9	1.75	11.08	152.2	1.5
920	22.666 0	0.002 7	0.015 6	0.013 2	96.44	21.858 9	3.34	24.93	151.9	1.5
960	22.138 4	0.001 1	0.012 3	0.012 8	98.53	21.813 8	5.50	47.77	151.6	1.5
1 000	22.100 2	0.000 7	0.007 8	0.012 7	99.05	21.890 4	6.35	74.11	152.1	1.5
1 040	22.266 3	0.001 3	0.022 1	0.012 8	98.22	21.870 7	2.82	85.81	152	1.5
1 080	22.580 0	0.001 9	0.039 6	0.013 0	97.45	22.004 7	1.21	90.83	152.9	1.5
1 150	22.684 2	0.002 3	0.006 8	0.012 9	97	22.003 0	1.06	95.24	152.9	1.5
1 250	23.050 0	0.004 0	0.067 9	0.013 6	94.91	21.878 2	0.79	98.51	152	1.5
1 400	25.047 5	0.009 4	0	0.014 9	88.83	22.250 8	0.36	100	154.5	1.8

注:表中下标 m 代表样品中测定的同位素比值,单矿物质量 m=28.75 mg,照射常数 J=0.004 019, F=⁴⁰Ar*/³⁹Ar 比率。

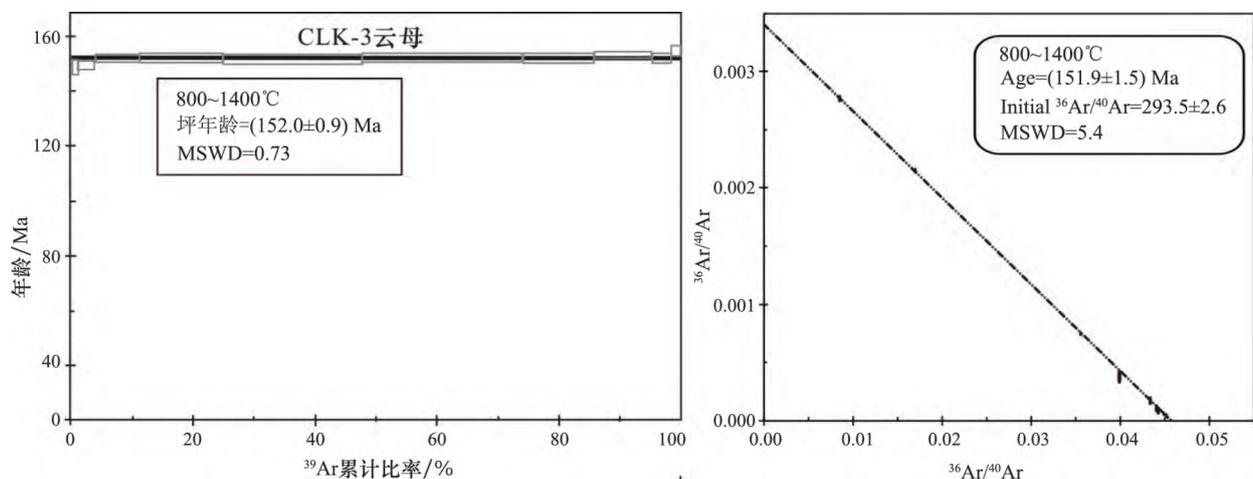


图4 长流坑钨矿云母⁴⁰Ar-³⁹Ar坪年龄和反等时线年龄图

Fig. 4 Plots of ⁴⁰Ar-³⁹Ar age spectrum and inverse isochron for the muscovite samples from the Changliukeng deposit

强烈的花岗岩浆侵入和钨多金属成矿活动。长流坑钨矿成矿年龄为 151.9 Ma,与淘锡坑、洪水寨、九龙脑、樟东坑等钨矿的形成时代基本一致,表明这些矿床均是该阶段构造—岩浆—成矿活动的产物,也是华南燕山早期钨多金属成矿作用大爆发^[19-20]的响应。尽管长流坑钨矿中未发现与矿体直接接触的花岗岩体,但石英脉型、夕卡岩型矿化及地层的角岩化已表明深部隐伏花岗岩体的发育,该岩体与淘锡坑隐伏岩体可能均为九龙脑岩体的向北延伸部分,三者深部呈大岩基相连。可见,尽管长流坑钨矿距离九龙脑岩体较远,但两者仍存在密切的成因关系。

3.2 原生晕分带模式的建立

求出各元素含量异常下限及异常外带、中带和内带元素含量(表 2),并绘制各元素原生晕异常图后,对所有异常图进行对比、分析和归类,根据异常空间分带关系可将矿区元素归为 3 类:矿中元素(图 5)、矿头元素(图 5)、矿前元素(图 6)和非指示元素(图 7)。

本文所指的矿中元素是其高异常产在矿体发育部位的元素,主要有 W、Bi(图 5)。原生晕分带规律的研究首先需要确定矿体,进而对比分析已知矿体本身、矿体前缘、头部、尾部的原生晕特征。3 号勘探线剖面中尽管发育密集的矿化石英脉,但并非所有矿化石英脉都能构成矿体。W 内带异常是钨矿体最直接的显示,在 W 元素原生晕剖面中 W 发育的 2 处内带异常 W1、W2(图 5),可以粗略认为是两处已知钨矿体。其中 W1 比 W2 规模大,连续性好,且 W1 由标高 100 m 延伸至 -350 m,向深部仍有增强趋势,3 个钻孔 ZK301、ZK302、ZK303 对 W1 均有控制,而 W2 仅有 ZK302 进行了控制。因而 W1 是识别原生晕轴向分带的理想矿体。Bi 元素的异常分布特征与 W 元素高度一致,其内带异常主要发育在两处钨矿体中,因此 Bi 也是矿中元素。

矿头元素是指高异常主要发育在矿体头部的元素,主要有 Ca、Sr、Mn、V、Cr、Nb、Cs、Ti、U 等 9 个元素。需强调的是,矿体头部是在矿体轴向上,而非在垂向上。图 5 显示,以已知矿体 W1 作为参照,这 9 个元素仅在 W1 的头部发育有明显的内带异常,范围介于 ZK301 附近,标高 100~ -150 m,其中以 Ca、Sr、Mn 的内带异常最为显著,而它们在 W1 下部或尾部异常很弱或无异常。矿头元素与矿中元素的异常中心轴向上相距约 150 m。

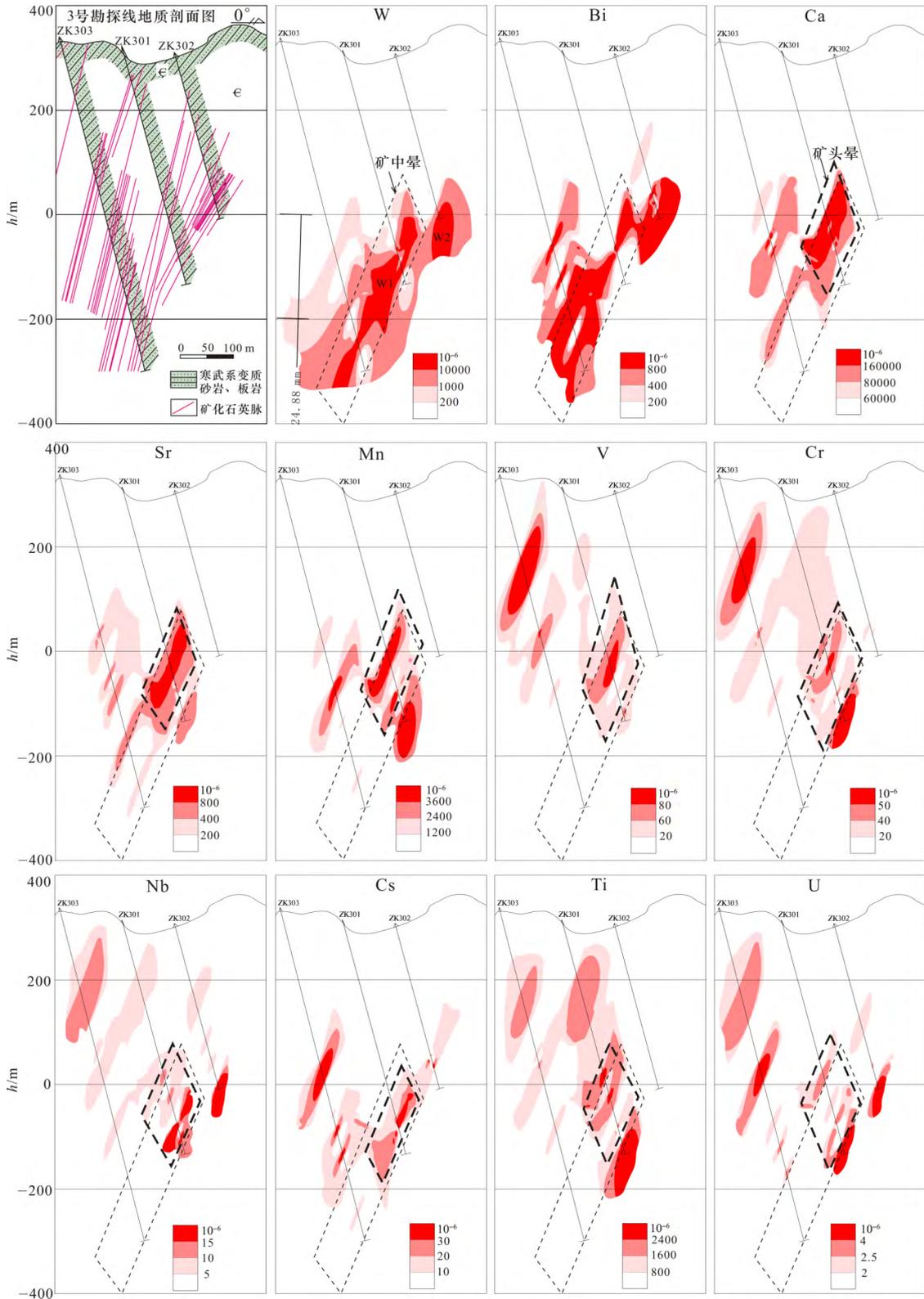
表 2 长流坑钨矿成晕元素浓度分带
Table 2 Zoning concentration of halo-forming elements in Changliukeng deposit

元素	异常下限 /10 ⁻⁶	元素含量/10 ⁻⁶		
		外带	中带	内带
W	200	200~1 000	1 000~10 000	>10 000
Bi	200	200~400	400~800	>800
Sb	5	5~6	6~7	>7
Tl	2.5	2.5~3.5	3.5~5	>5
Ca	60 000	60 000~80 000	80 000~160 000	>160 000
Sr	200	200~400	400~800	>800
Mn	1 200	1 200~2 400	2 400~3 600	>3 600
Cu	800	800~1 600	1 600~4 800	>4 800
Mo	5	5~20	20~50	>50
Hg	1.2	1.2~1.5	1.5~2	>2
Co	200	200~400	400~800	>800
Pb	15	15~30	30~60	>60
Ba	150	150~200	200~300	>300
Cl	60	60~80	80~100	>100
Y	10	10~15	15~30	>30
Th	7	7~11	11~15	>15
Zr	60	60~120	120~180	>180
V	20	20~60	60~80	>80

注:求取该异常下限时,首先采用直方图法逐步剔除含量特高值和含量特低值,直至剩下的数据基本服从正态分布,然后求出剩下数据的平均值和标准离差,异常下限=平均值+a×标准离差,外带元素含量=异常下限~a×异常下限,中带元素含量=a×异常下限~b×异常下限,内带元素含量>b×异常下限。一般取 a=2, b=4,当某一元素的内带、中带和外带效果不显著时,需要调整 a、b 值的大小。

矿前元素是指高异常主要发育在矿体前缘的元素,主要有 Cu、Mo、Hg、Co、S、P、As、Y、Th、Pb、Sb、I 等 12 个元素。这 12 个元素的高异常既非发育在已知矿体 W1 中部,也非在 W1 的头部,而是集中在 W1 的前缘(图 6)。范围大致在 ZK302 附近,标高 250~ -30 m,其中 Cu、Mo、Hg、Co、S、P、As、Y、Th、Pb 的矿前晕都很显著,Sb、I 的矿前晕相对较弱,而他们在矿体范围内的异常很弱或无异常。矿前元素异常中心与矿中元素异常中心轴向上相距约 330 m。

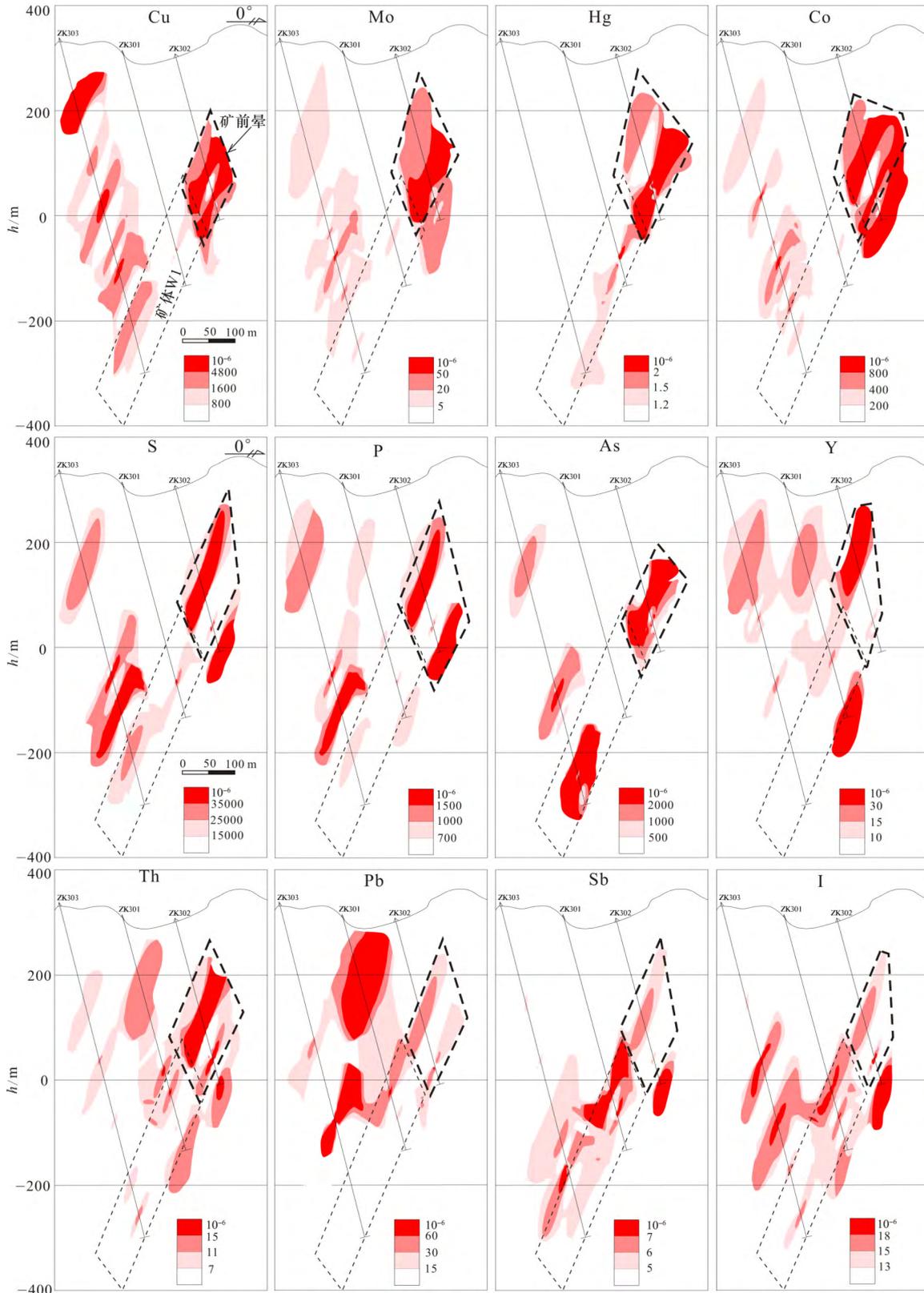
非指示元素是指高异常分布与矿体的空间关系不明显、对矿体位置的指示作用不显著的元素,主要有 Sn、Ba、Hf、Zr。它们在矿体范围内或矿体头部、前缘、尾部都未形成明显的异常(图 7)。



细虚线框表示钨矿体 W1 发育部位,其中产生了明显的 W、Bi 元素内带异常,因此 W、Bi 为矿中元素;粗虚线框表示钨矿体 W1 的头部,其中发育了 Ca、Sr、Mn、V、Cr、Nb、Cs、Ti、U 等 9 个元素的内带异常,因此把它们称为矿头元素;矿头元素与矿中元素的异常中心轴向上相距约 150 m。

图 5 长流坑钨矿 3 号勘探线矿中元素和矿头元素原生晕

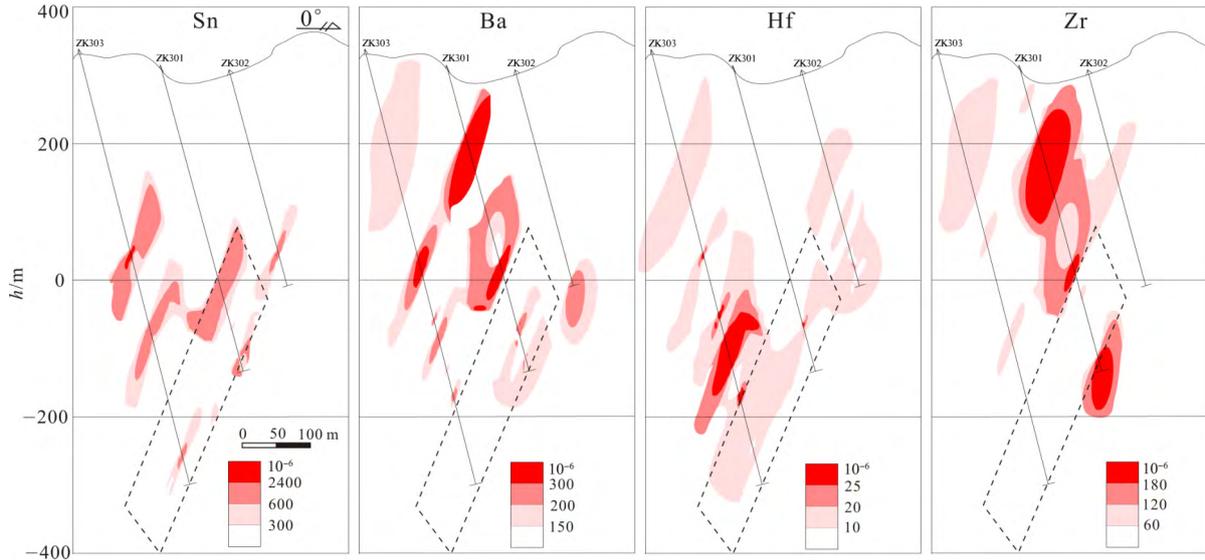
Fig. 5 Zonation of primary halo of ore-body and ore-head indicating element from the geological section of the NO. 3 exploratory line in Changliukeng deposit



细虚线框表示图 5 中的钨矿体 W1 发育部位;粗虚线框表示钨矿体 W1 的前缘,是 Cu、Mo、Hg、Co、S、P、As、Y、Th、Pb、Sb、I 等 12 个元素内带异常发育的部位,因此把它们称为矿前元素。矿前元素与矿中元素的异常中心轴向上相距约 330 m。

图 6 长流坑钨矿 3 号勘探线矿前元素原生晕

Fig. 6 Zonation of primary halo of ore-front indicating element from the geological section of the NO. 3 exploratory line in Changliukeng deposit



细虚线框表示图 5 中的钨矿体 W1 发育部位; Sn、Ba、Hf、Zr 等 4 个元素的异常分布与矿体在轴向上的空间关系不明显,对矿体的指示作用不显著,因此称为非指示元素。

图 7 长流坑钨矿 3 号勘探线非指示元素的原生晕

Fig. 7 Zonation of primary halo of non-indicating element from the geological section of the NO. 3 exploratory line in Changliukeng deposit

综上所述,尽管矿区 3 号勘探线钻孔工程控制有限,尚未能分析矿体尾部、后缘的原生晕分带规律,但矿体本身、矿体头部、前缘的原生晕分带显著, W、Bi 为矿中元素, Ca、Sr、Mn、V、Cr、Nb、Cs、Ti、U 等 9 个元素为矿头元素, Cu、Mo、Hg、Co、S、P、As、Y、Th、Pb、Sb、I 等 12 个元素为矿前元素, 矿头元素与矿中元素的异常中心轴向上相距约 150 m, 矿前元素异常中心与矿中元素异常中心轴向上相距约 330 m, 据此建立了本矿区原生晕轴向分带模式(图 8)。在开展隐伏矿体勘查工作时, 若出现矿前元素异常, 隐伏矿体可能发育在沿异常轴向方向向深部约 330 m 处; 若出现矿头元素异常, 隐伏矿体主体可能发育在沿异常轴向方向向深部约 150 m 处; 若出现矿中元素异常, 则是矿体发育的直接标志。

长流坑原生晕分带模式与淘锡坑钨矿的原生晕分带模式^[12]既有相似性, 也有差异性: As、Sb 在两处矿床均为矿前元素; Mn、Co 在淘锡坑钨矿为矿中元素, 而在长流坑钨矿 Mn 为矿头元素, Co 为矿前元素; Hf 在在淘锡坑钨矿为矿中元素, 而在长流坑钨矿却为非指示元素, 这可能与两处矿床的成矿地质条件差异有关。在热液型金矿床中, I、F、Hg、As、Sb、Se、Li、Be、Ba、Sr、Li、Cs 为矿前元素, Cd、Ag、Cu、Pb、Au、Zn 为矿中元素, W、Bi、Co、Mn、Mo、Ni、V、Tl、Ce、La、Ti、Sn 为矿尾元素^[21-23]。由此看来, 无论在热液金矿还是在热液钨矿中, W、Bi

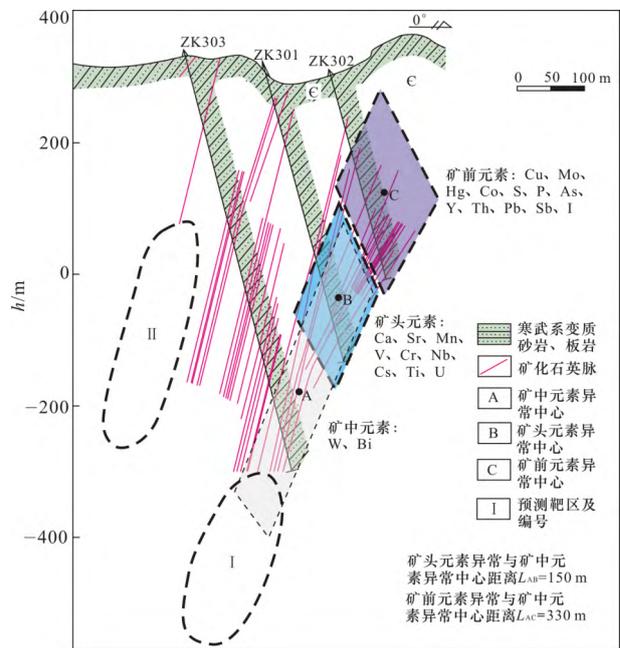


图 8 长流坑钨矿床原生晕轴向分带模式及预测靶区

Fig. 8 The axial zoning pattern of primary halos and predict targets in Changliukeng tungsten deposit

均富集于下部, Cu、Hg、As、Sb、Pb、I、Sr、Cs 均富集于中—上部; 而 Mo、Co、Mn、V、Ti 在热液金矿中多富集于下部, 在热液钨矿中却富集于中—上部。这也启示我们, 不同矿床的原生晕既有共性, 也有特殊性, 采用原生晕模式和标志开展该矿床深部预测, 需结合矿床实际^[23]。

3.3 成矿预测

原生晕分带模式的建立为隐伏矿体的预测提供了有利依据。根据该模式及矿中元素、矿头元素、矿前元素的原生晕异常特征,本研究圈定了2个预测靶区(图8)。

靶区 I:位于 ZK303 南侧,标高-300~-500 m。该靶区上部发育有矿中元素、矿头元素及矿前元素的内带异常。矿头元素、矿前元素的强烈异常指示矿体 W1 较大。而矿中元素内带异常规模大,连续性好,且由标高 0 m 延伸至-350 m,向深部仍有增强趋势,指示矿体 W1 向深部仍有一定的延长。

靶区 II:位于 ZK303 南侧,标高 50~-220 m。该靶区未见明显的矿中元素异常,但其头部不仅发育了矿头元素 V、Cr 及矿前元素 Cu 的内带异常,还发育了矿头元素 Nb、Ti、U 及矿前元素 Mo、Co、P、S、As、Y 的中带异常,指示了靶区 II 处可能发育隐伏矿体,隐伏矿体中心与该异常中心有 300~330 m 距离。

4 结论

(1)长流坑钨矿成矿年龄为(151.9±1.5) Ma,与九龙脑花岗岩体存在密切成因关系。

(2)矿床原生晕轴向分带明显,W、Bi 为矿中元素,Ca、Sr、Mn、V、Cr、Nb、Cs、Ti、U 为矿头元素,Cu、Mo、Hg、Co、S、P、As、Y、Th、Pb、Sb、I 为矿前元素,矿中元素与矿头元素异常中心相距约 150 m,与矿前元素异常中心相距约 330 m,据此建立了本矿区原生晕轴向分带模式。

(3)根据该模式及矿中元素、矿头元素、矿前元素的原生晕异常特征,分析了矿区成矿有利部位,圈定了2个预测靶区。

参考文献

[1] 郭春丽,陈毓川,黎传标,等. 赣南晚侏罗世九龙岗钨锡铅锌矿集区不同成矿类型花岗岩年龄,地球化学特征对比及其地质意义[J]. 地质学报, 2011, 85(7): 1188-1205.

[2] 丰成友,黄凡,屈文俊,等. 赣南九龙岗矿田东南部不同类型钨矿的辉钨矿 Re-Os 年龄及地质意义[J]. 中国钨业, 2011, 26(4): 6-11.

[3] 丰成友,黄凡,曾载淋,等. 赣南九龙岗岩体及洪水寨云英岩型钨矿年代学[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(1): 111-121.

[4] 陈郑辉,王登红,屈文俊,等. 赣南崇义地区淘锡坑钨矿的地质特征与成矿时代[J]. 地质通报, 2006, 25(4): 496-501.

[5] 王登红,陈郑辉,陈毓川,等. 我国重要矿产地成岩成矿年代学研究新数据[J]. 地质学报, 2010, 84(7): 1030-1040.

[6] GUO C L, MAO J W, BIERLEIN F, et al. SHRIMP U-Pb (zircon), Ar-Ar(muscovite) and Re-Os(molybdenite) isotopic dating of the Taoxikeng tungsten deposit, South China Block[J]. Ore Geology Reviews, 2011, 43(1): 26-39.

[7] 宋生琼,胡瑞忠,毕献武,等. 赣南崇义地区淘锡坑钨矿氢、氧、硫同位素地球化学研究[J]. 矿物学报, 2009, (增刊1): 328.

[8] 汪群英,路远发,陈郑辉,等. 赣南淘锡坑钨矿床流体包裹体特征及其地质意义[J]. 华南地质与矿产, 2012, 28(1): 35-44.

[9] 宋生琼,胡瑞忠,毕献武,等. 赣南淘锡坑钨矿床流体包裹体地球化学研究[J]. 地球化学, 2011, 40(3): 237-248.

[10] 刘战庆,刘善宝,梁婷,等. 南岭九龙岗矿田典型矿床构造解析:以淘锡坑钨矿床为例[J]. 地学前缘, 2016, 23(4): 148-165.

[11] 陈郑辉,王登红,刘善宝,等. 赣南淘锡坑钨矿的石英中子活化分析研究[J]. 地质学报, 2008, 82(7): 978-985.

[12] 方贵聪,陈郑辉,陈毓川,等. 石英脉型钨矿原生晕特征及深部成矿定位预测:以赣南淘锡坑钨矿 11 号脉为例[J]. 大地构造与成矿学, 2012, 36(3): 406-412.

[13] 江西省地质矿产勘查开发局赣南地质调查大队. 江西省崇义县长流坑矿区铜矿资源储量核实报告[R]. 赣州:江西省地质矿产勘查开发局赣南地质调查大队, 2013: 1-74.

[14] LUDWIG K R. User's manual for Isoplot 3.00: a geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Special Publication No. 4a. Berkeley, CA, USA: Geochronology Center, 2003.

[15] 陈文,万渝生,李华芹,等. 同位素地质年龄测定技术及应用[J]. 地质学报, 2011, 85(11): 1917-1947.

[16] 陈文,张彦,张岳桥,等. 青藏高原东南缘晚新生代幕式抬升作用的 Ar-Ar 热年代学证据[J]. 岩石学报, 2006, 22(4): 867-872.

[17] 陈郑辉,王登红,屈文俊,等. 赣南崇义地区淘锡坑钨矿的地质特征与成矿时代[J]. 地质通报, 2006, 25(4): 496-501.

[18] 丰成友,黄凡,屈文俊,等. 赣南九龙岗矿田东南部不同类型钨矿的辉钨矿 Re-Os 年龄及地质意义[J]. 中国钨业, 2011, 26(4): 6-11.

[19] MAO J W, PIRAJNO F, COOK N. Mesozoic metallogeny in East China and corresponding geodynamic settings: an introduction to the special issue[J]. Ore Geology Reviews, 2011, 43(1): 1-7.

[20] 毛景文,谢桂青,郭春丽,等. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用:成矿时限及地球动力学背景[J]. 岩石学报, 2007, 23(10): 2329-2338.

[21] 李惠,禹斌,李德亮,等. 构造叠加晕找盲矿法及研究方法[J]. 地质与勘探, 2013, 49(1): 154-161.

[22] 李惠,禹斌,李德亮,等. 构造叠加晕找盲矿法的创新与找矿新突破[J]. 黄金科学技术, 2014, 22(4): 7-13.

[23] 李惠,禹斌,李德亮,等. 构造叠加晕法预测盲矿的关键技术[J]. 物探与化探, 2014, 38(2): 189-193.