

doi: 10.12029/gc20160506

方贵聪, 陈毓川, 陈郑辉, 等. 赣南盘古山钨矿隐伏花岗岩体岩石学与地球化学特征[J]. 中国地质, 2016, 43(5): 1558–1568.

Fang Guicong, Chen Yuchuan, Chen Zhenghui, et al. Petrology and geochemistry of granite in the Pangushan tungsten deposit, south Jiangxi Province[J]. *Geology in China*, 2016, 43(5): 1558–1568(in Chinese with English abstract).

赣南盘古山钨矿隐伏花岗岩体岩石学与地球化学特征

方贵聪¹ 陈毓川² 陈郑辉³ 曾载淋⁴ 刘翠辉⁴ 童啟荃⁵ 孙 杰⁵ 朱国华⁵

(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, 北京 100037; 3. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 4. 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; 5. 江西盘古山钨业有限公司, 江西 于都 342311)

摘要:著名的盘古山大型钨矿与深部隐伏花岗岩体具有密切成因关系,但因该岩体隐伏深,相关研究资料较为欠缺,很大程度上影响了对矿床岩浆-热液-成矿作用的深入认识。南岭科学钻探(SP-NLSD-2)揭露该岩体后,本文对其开展了岩石学和元素地球化学研究。结果表明,该岩体具有超酸性、富碱、贫钠富钾等特征,属于准铝-过铝质高钾钙碱性花岗岩。形成该岩体的花岗岩浆为高度分异演化的残浆,W、Bi等元素含量明显高于南岭燕山期花岗岩,为盘古山钨铋矿床的形成提供了丰富的矿质。岩浆演化至云英岩化阶段时,岩浆中的Mo、Bi、Cu、Pb及REE含量增加,而W、Sn含量则因已转移到岩浆后期热液而降低。岩体形成于板内伸展环境。

关键词:地球化学;花岗岩;钨矿床;南岭科学钻探;盘古山

中图分类号:P588.12; P618.67 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2016)05-1558-11

Petrology and geochemistry of granite in the Pangushan tungsten deposit, south Jiangxi Province

FANG Gui-cong¹, CHEN Yu-chuan², CHEN Zheng-hui³, ZENG Zai-lin⁴, LIU Cui-hui⁴,
TONG Qi-quan⁵, SUN Jie⁵, ZHU Guo-hua⁵

(1. *Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration, College of Earth Science, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;* 2. *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;* 3. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;* 4. *Gannan Geological Survey Party, Jiangxi Bureau of Exploration & Development of Geology & Mineral Resources, Ganzhou 341000, Jiangxi, China;* 5. *Jiangxi Pangushan Tungsten Co., Ltd., Yudu 342311, Jiangxi, China*)

收稿日期:2016-07-07; 改回日期:2016-08-16

基金项目:广西自然科学基金青年基金(2015GXNSFBA139205)、国家深部探测技术与实验研究专项“南岭于都—赣县矿集区立体探测技术与深部成矿预测示范”课题(SinoProbe-03-03)、国家科技支撑计划“赣南崇义—于都矿集区深部资源勘查技术集成与示范”课题(2011BAB04B07)、国土资源部公益性行业科研专项“南岭东段九龙脑矿田地质与地球化学测量”课题(201411050-2)、桂林理工大学科研启动基金联合资助。

作者简介:方贵聪, 1985年生,男,博士,讲师,主要从事成矿规律和成矿预测研究; E-mail: fanggucong@163.com。

Abstract: Pangushan granite is genetically related to the well-known Pangushan large-sized tungsten deposit. However, due to great depth, its petrologic and geochemical data had been lacking until it was discovered by the Nanling Scientific Drilling Project (SP-NLSD-2) recently. In this paper, the petrologic and geochemical study conducted by the authors is reported. The granite is found to be ultra-acidic, alkali-rich, Na-poor, K-rich, meta- to weak-peraluminous and K-high calc-alkaline. Its corresponding granitic magma is highly evolved and W and Bi values are significantly higher than their average values in Yanshanian granite in Nanling region, indicating that they were the major ore-forming material source. When the granitic magma was evolved to the greisenization stage, Mo, Bi, Cu, Pb and REE were enriched, while W and Sn were depleted because of their migration into the hydrothermal solution. The intrusion of the Pangushan granite happened during intraplate extension.

Key words: geochemistry; granite; tungsten deposit; Nanling Scientific Drilling; Pangushan

About the first author: FANG Gui-cong, male, born in 1985, doctor, lecturer, majors in the study of metallogenic regularity; E-mail: fanggcong@163.com.

Fund support: Supported by Grants from the Natural Science Foundation of Guangxi (2015GXNXFBA139205) the Chinese SinoProbe Program (No. SinoProbe-03-03), the National Science and Technology Program (No. 2011BAB04B07) and Technology National Non-Commercial Scientific Program, Ministry of Science (No. 201411050-2) and Research Initiation Funds from Guilin University of Technology.

盘古山钨矿床位于赣南腹地,是赣南四大名山钨矿(西华山、岿美山、盘古山和大吉山钨矿)之一,以规模大、品位高、矿脉厚、纵向延伸长(≥ 1300 m)、矿化稳定、矿物成分复杂等特点著称。自1918年被发现以来,不少学者相继从矿床地质特征^[1]、控矿构造^[2]、流体包裹体^[3-4]、矿物组合分带^[5]、围岩蚀变^[6]、成岩成矿年代学^[7-8]、稳定同位素^[9]、深部成矿预测^[10]等方面开展研究并取得了丰硕成果。但由于与该矿床具有密切成因关系的花岗岩体隐伏很深,有关该岩体的研究资料较为欠缺,这很大程度上影响了对矿床岩浆-热液-成矿作用的深入认识。SP-NLSD-2是中国深部探测技术与实验研究专项^[11-12]在南岭地区部署的第二口科学钻孔,于2012年2月在赣南盘古山钨矿床东南部开钻,2012年12月终孔,进尺2006 m。SP-NLSD-2揭露盘古山隐伏岩体后,本文在详细的钻孔编录和室内矿物鉴定基础上,对其开展了岩石学和元素地球化学研究,以期揭示该矿区岩浆-热液的演变规律和岩浆活动的动力学背景。

1 矿床地质特征

盘古山钨矿床处于南岭EW向构造-成矿带与武夷山NNE向构造-成矿带的交接部位(图1)。矿区地层主要有震旦系(Z)、上泥盆统(D₃)和下石炭统(C₁),在震旦系中发育一系列紧密线状褶皱,轴向近南北,地层倾角55°~70°;泥盆系和石炭系形成平缓开阔的褶皱,轴向北西,地层倾角一般25°~50°。矿

区断裂发育,有NEE向、NNW向、NWW向、近EW向和NW向等,长者达8 km以上,短者不足200 m,多数断层具有左行平移性质。矿床中有花岗岩体、闪长玢岩脉和玄武玢岩脉3类岩浆岩侵入,发育石英脉型钨矿、云英岩型钼矿和破碎带型Pb-Zn-W矿3种类型矿体。其中,石英脉型钨矿规模最大,形成南、中、北3组矿脉带,3组矿脉带均自NNE向SSW方向侧伏,南组最陡,中组次之,北组最缓,自上而下、自北向南、自西向东呈收敛之势,形似帚状;云英岩型钼矿以含粗晶辉钼矿的石英脉形式产于岩体顶部的云英岩化花岗岩带中;破碎带型Pb-Zn-W矿产于震旦系的破碎带中,以发育粗晶白钨矿、方铅矿、闪锌矿、磁黄铁矿、黄铁矿等中低温金属矿物为特征。

盘古山花岗岩体呈穹隆状隐伏于震旦系之下,早期钻探工程和近期SP-NLSD-2科学钻孔分别在矿区中西部和矿区东南部揭露岩体(图2-a-f),揭露标高分别为-115 m和-341 m,表明岩体中西部侵位高于东南部。岩体的新鲜岩石见于孔深1874~1925 m,呈灰白色,中细粒结构,块状构造,矿物组成主要为长石(50%~55%)、石英(40%~45%)和少量云母(1%~3%),长石以钾长石为主,占长石总量70%~80%,斜长石仅20%~30%,钾长石又以微斜长石和正长石居多,少量条纹长石和透长石(图2-e、f),按邱家骧^[13]对酸性侵入岩的种属划分方案,将其定为钾长花岗岩。其中的微斜长石为他形粒状或板状,负低凸起,两组完全节理,格子状双晶明显;正长石

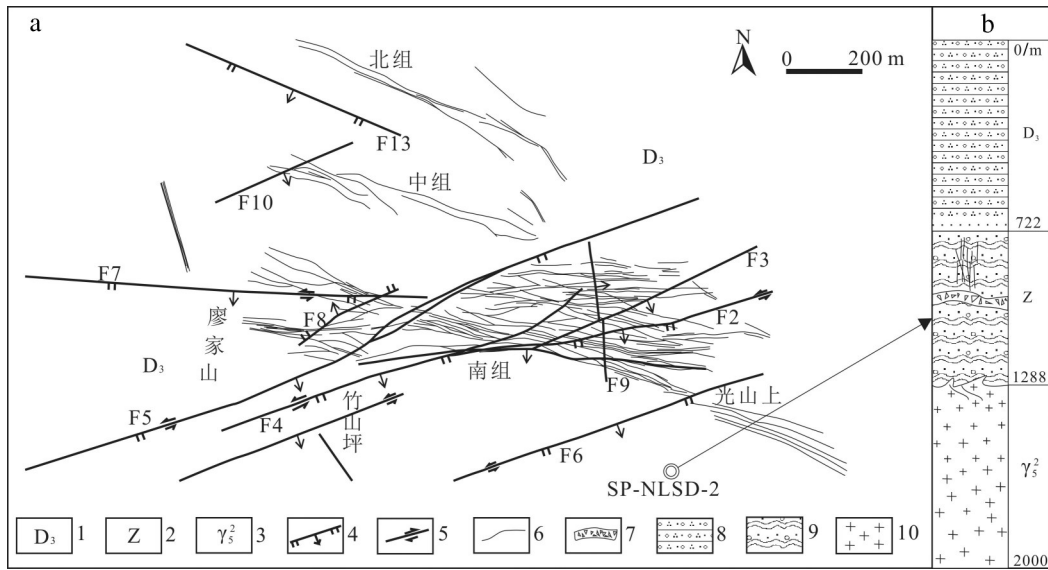


图1 盘古山钨矿床地质图(a)^①及SP-NLSD-2钻孔柱状图(b)

1—上泥盆统砂岩; 2—震旦系浅变质砂岩; 3—燕山早期花岗岩; 4—正断层; 5—平移断层; 6—矿化石英脉; 7—破碎带型Pb-Zn-W矿;
8—长石石英砂岩; 9—浅变质砂岩; 10—钾长花岗岩

Fig. 1 Geological map of the Pangushan tungsten deposit (a) and profile of Drilling SP-NLSD-2(b)

1—Upper Devonian sandstone; 2—Sinian epi-metamorphic sandstone; 3—Early Yanshanian granitoid; 4—Normal fault; 5—Transcurrent fault;
6—Mineralized quartz vein; 7—Fractured zone type Pb-Zn-W orebody; 8—Feldspathic quartz sandstone; 9—Epi-metamorphic sandstone;
10—K-feldspar granite

呈不规则状,常见卡斯巴双晶;条纹长石一般呈条状或板状,发育明显的条纹结构;透长石呈自形板状或柱状,表面较清洁干净;斜长石呈自形板状晶体,聚片双晶发育;石英呈他形粒状与长石镶嵌在一起,有的呈蠕虫状分布于长石中;黑云母呈叶片状,发育一组完全节理。由于岩浆期后热液自变质作用,岩体发生明显的钾长石化和云英岩化,仅局部见到较新鲜岩石。

钾长石化见于孔深1325~1873 m及1926~2006 m,最显著的特征是岩石呈肉红色,钾长石由斜长石边部向内部交代,或沿斜长石的聚片双晶纹进行交代(图2-c、d),导致原生斜长石晶形残缺或聚片双晶模糊不清甚至消失,部分被交代较严重的斜长石只能隐约看到聚片双晶的假象;钾长石交代钾长石的现象也偶能见到,但不易识别,一般被交代部分和原生部分常具有不同消光位;石英化学性质比较稳定,被钾长石交代的现象较少见,当岩石中长石含量较少,石英含量较多时,偶尔见到钾长石沿石英颗粒间的空隙进行充填。

云英岩化主要发育在岩体顶部,孔深1288~1324 m处,岩石呈灰白色(图2-a、b),细粒结构,块状构造,成分主要为石英(50%~60%)、长石(30%~35%)和白云母(5%~7%)。石英有过半为蚀变产物,呈蠕虫状交代长石和早期石英;长石主要有正长石、微斜长石、斜长石等,因云英岩化强烈而面目全非,只保留长石假象(图2-b),斜长石含量较钾长花岗岩明显减少,约占长石总量的10%~15%;白云母呈细粒片状散布在长石中,多是云英岩化的产物。云英岩化花岗岩与钾长花岗岩之间没有明显界限,呈渐变过渡关系,反映了花岗岩浆的渐变演化特征。

2 样品采集及测试方法

用于主微量元素分析的样品共7件,其中NLSD2-1287、NLSD2-1293、NLSD2-1321为云英岩化花岗岩,NLSD2-1348、NLSD2-1522为明显钾长石化花岗岩,NLSD2-1880、NLSD2-1882为新鲜的钾长花岗岩,样品编号的后4位数字为SP-NLSD-2的采样孔深。

①江西盘古山钨业有限公司. 江西省于都县盘古山钨矿资源潜力调查报告[R]. 2005.

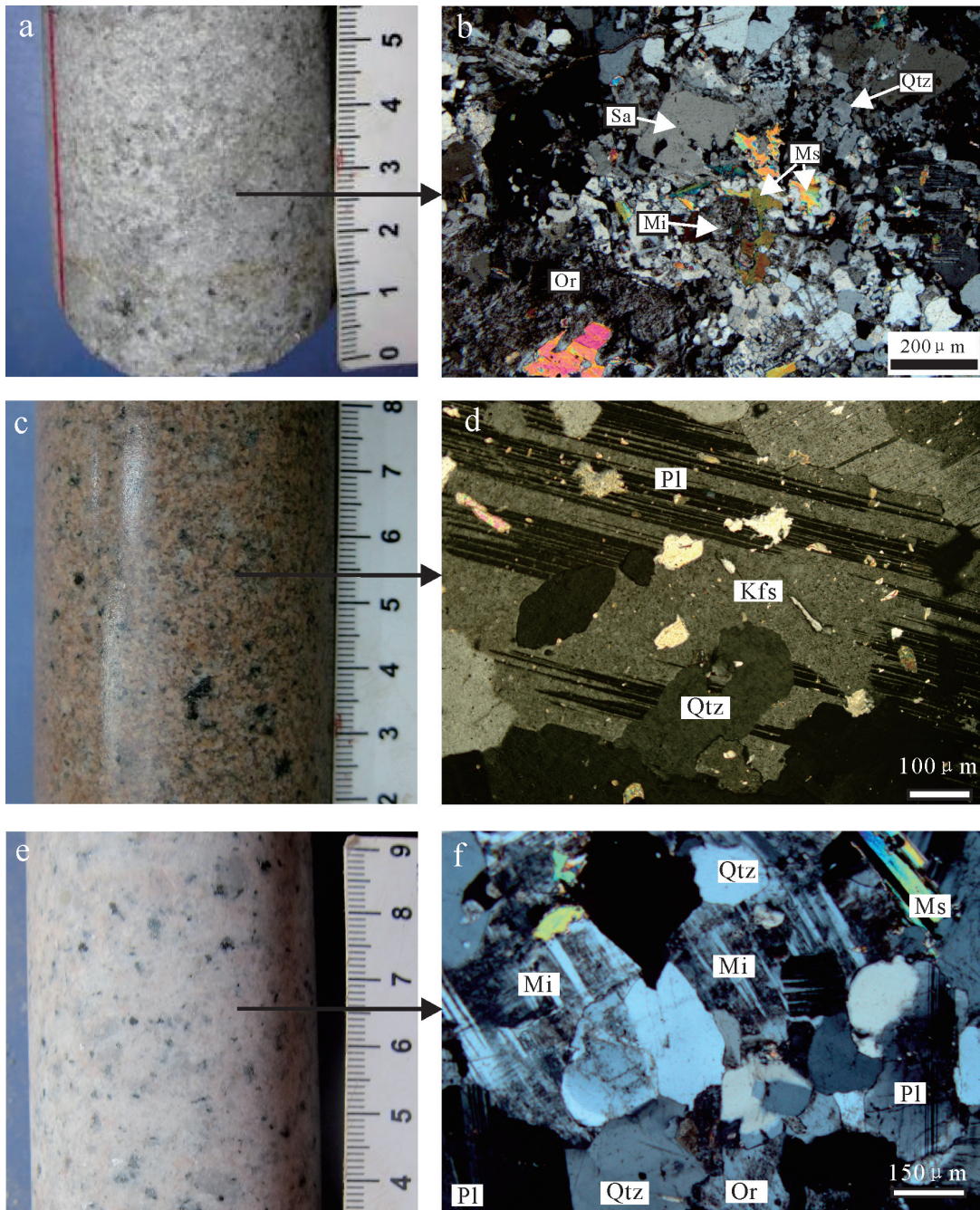


图2 盘古山花岗岩体的云英岩化花岗岩(a,b)、钾长石化花岗岩(c,d)和新鲜钾长花岗岩(e,f)

Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Mi—微斜长石; Ms—白云母; Qtz—石英; Or—正长石

Fig. 2 Greisenized granite (a, b), potash feldspathized granite (c, d) and fresh K-feldspar granite (e, f) of Pangushan granitic pluton

Pl—Plagioclase; Kfs—Potash feldspar; Mi—Microcline; Ms—Muscovite; Qtz—Quartz; Or—Orthoclase; Sa—Sanidine

全岩主量、微量和稀土元素测试分析在中国地质科学院国家地质实验测试中心完成。测试过程中3个标准样品GSR1、GSR2和GSR3一同被测试,用于控制实验分析误差和精度。主量元素利用X荧光光谱仪(PW4400)测试,烧失量(LOI)通过对样品加热至1000℃后1h称量其重量变化获得,FeO采用容量滴定法测定。微量元素和稀土元素采用等离子体质谱仪(ICP-MS)来测定。主量元素检测限<0.01%(TiO₂和MnO<0.001%),分析结果精度<10%。微量、稀土元素检测限为1×10⁻⁶~0.05×10⁻⁶,分析结果精度2%~10%。盘古山花岗岩体的主微量分析结果列于表1和表2。

3 分析与讨论

3.1 主量元素特征

新鲜样品NLS2-1880和NLS2-1882的测试结果(表1)显示,盘古山花岗岩体的新鲜钾长花岗岩SiO₂较高,为75.56%~76.14%,平均75.85%,属于超酸性岩;Al₂O₃为12.8%~12.95%,平均12.88%;全碱含量Na₂O+K₂O为7.98%~8.03%,平均8.01%,

反映岩体的富碱特征;K₂O/Na₂O介于1.3~1.31,平均1.31,反映岩体相对贫钠富钾的特点。在TAS图解中,两件样品均落于花岗岩区域(图3-a);里特曼指数(σ)为1.95~1.96,在岩石系列分类图解中显示为高钾钙碱性岩(图3-b);铝饱和指数A/CNK为1.02,属准铝-过铝质花岗岩(图3-c)。

与钨、锡、铍、铌、钽有关的花岗岩浆成矿作用过程中,交代蚀变在时间上的演变过程为钾质交代阶段→钾-钠质交代阶段→钠质交代阶段→云英岩化阶段,花岗岩体自下而上形成钾化带→钠化带→云英岩化带^[14]。表1和图4显示,盘古山花岗岩体由深至浅,由新鲜钾长花岗岩→钾长石化花岗岩→云英岩化花岗岩,SiO₂呈跳跃式波动,未显示明显的变化趋势(图4-a),说明云英岩化作用虽然导致岩石的石英含量增多,但硅质含量并没有明显增加,可能只是重新分配于不同的矿物相中,也表明岩石SiO₂含量不能光靠石英的多寡判断;Al₂O₃含量总体降低(图4-b),是长石和云母陆续结晶的结果;碱质含量(Na₂O+K₂O)总体升高(图4-c),反映岩浆-热液向富碱方向演化的特征,这可能是由于钙质斜长石

表1 盘古山花岗岩体主量元素分析结果(%)

Table 1 Major chemical composition (%) of Pangushan granite

分析项目	云英岩化花岗岩			钾长石化花岗岩		新鲜钾长花岗岩	
	NLS2-1287	NLS2-1293	NLS2-1321	NLS2-1348	NLS2-1522	NLS2-1880	NLS2-1882
SiO ₂	75.70	76.26	74.15	76.57	73.72	76.14	75.56
Al ₂ O ₃	12.42	12.40	12.59	12.31	12.85	12.80	12.95
CaO	0.85	0.85	1.12	0.83	1.14	1.03	1.17
Fe ₂ O ₃	0.40	0.31	0.33	0.25	0.67	0.34	0.27
FeO	0.59	0.81	1.82	1.06	1.35	0.95	0.92
K ₂ O	5.23	5.50	5.06	5.04	4.77	4.54	4.53
MgO	0.13	0.10	0.10	0.10	0.22	0.17	0.20
MnO	0.07	0.07	0.09	0.08	0.09	0.12	0.10
Na ₂ O	2.82	2.77	3.23	3.21	3.31	3.49	3.45
P ₂ O ₅	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03
TiO ₂	0.09	0.10	0.13	0.11	0.16	0.09	0.10
CO ₂	0.35	0.19	0.21	0.11	0.43	0.26	0.09
H ₂ O ⁺	0.36	0.68	0.83	0.40	0.66	0.30	0.26
LOI	1.07	1.08	1.13	0.65	1.27	0.50	0.51
Total	100.2	101.2	101.0	100.9	100.8	100.9	100.2
Na ₂ O+K ₂ O	8.05	8.27	8.29	8.25	8.08	8.03	7.98
K ₂ O/Na ₂ O	1.85	1.99	1.57	1.57	1.44	1.30	1.31
A/CNK	1.05	1.03	0.98	1.00	1.01	1.02	1.02
σ	1.98	2.06	2.21	2.03	2.13	1.95	1.96
氧化系数	0.40	0.28	0.15	0.19	0.33	0.26	0.23

注:A/CNK=Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O),以摩尔数计算;里特曼指数 $\sigma=(Na_2O+K_2O)/(SiO_2-43)$,以百分含量计算;氧化系数=Fe₂O₃/(Fe₂O₃+FeO),以百分含量计算。

表2 盘古山花岗岩体微量元素和稀土元素分析结果(10^{-6})
Table 2 Trace element and REE content (10^{-6}) of Pangushan granite

分析项目	云英岩化花岗岩			钾长石化花岗岩		新鲜钾长花岗岩	
	NLSD2-1287	NLSD2-1293	NLSD2-1321	NLSD2-1348	NLSD2-1522	NLSD2-1880	NLSD2-1882
Li	37.1	30.5	62.3	40.7	92.1	82.5	109
Be	7	8.22	8.75	5.03	6.59	9.25	9.29
Cr	8.03	6.83	15.5	9.93	8.81	66.1	9.45
Mn	531	515	691	625	774	920	774
Co	1.23	1.61	3.28	1.61	1.81	2.13	1.55
Ni	3.85	3.31	8.47	4.92	3.34	32.6	3.96
Cu	11.1	19.7	126	10.6	4.11	7.12	6.1
Zn	14.1	16.3	39.4	17.1	32.9	29.7	32.1
Ga	16.3	15.6	17.9	15.1	19	18	17.3
Rb	401	384	361	351	328	427	407
Sr	28.4	39.3	43	62.3	38.9	33.5	41.7
Mo	11.3	3.07	0.84	1.04	1.48	1.38	0.53
Cd	0.23	0.23	0.79	0.06	0.05	0.05	0.07
In	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Cs	12.6	12	12.8	20.5	9.04	35	36.9
Ba	55.8	81.3	75	143	37.7	43.5	70.2
Tl	1.7	1.79	1.72	1.59	1.22	1.86	1.8
Pb	30.4	51.6	266	43.5	43.6	56.8	56.3
Bi	0.82	2.16	107	0.38	0.19	5.35	7.7
Th	30.1	33	35.5	31.9	58	25.7	23.2
U	16.2	30.7	18.8	14.9	29.3	22.9	20.2
Nb	28.5	46	34.3	18.1	34.7	36.1	29.1
Ta	4.73	7.79	7.07	1.92	4.16	8.4	7.37
Zr	98.3	80.8	87.4	110	91.4	63.4	55.4
Hf	4.14	4.79	4.82	5.17	4.48	3.46	2.96
Sn	6.08	4.32	5.29	4.64	8.53	12.5	10.9
Sb	0.19	0.18	0.63	0.19	0.23	0.34	0.31
Ti	514	488	694	573	906	524	551
W	8.12	6.24	18.4	1.84	632	82	8.67
As	1.91	2.04	17.8	1.81	2.61	3.95	2.52
V	3.97	5.43	7.4	7	13	6.73	7.66
La	19.4	15.8	24.8	11.1	25.2	10.6	9.95
Ce	42.5	34.9	55.4	22.1	55.6	25.1	21.8
Pr	5.34	4.33	7.29	2.85	7.37	3.33	2.96
Nd	21.5	17.9	28.1	11.1	28.8	14.3	12.3
Sm	5.69	6.06	7.9	2.87	8.34	5.08	4.34
Eu	0.33	0.41	0.44	0.48	0.5	0.32	0.39
Gd	5.78	7.03	7.16	2.9	8.37	6.06	5.15
Tb	1.08	1.62	1.42	0.6	1.54	1.17	1.01
Dy	6.93	9.94	8.94	3.76	9.58	7.71	6.76
Ho	1.48	2.39	1.74	0.78	1.96	1.65	1.4
Er	4.78	7.08	5.51	2.45	6.09	5.24	4.55
Tm	0.71	1.11	0.85	0.37	0.87	0.82	0.68
Yb	4.84	8.22	5.81	2.44	5.72	5.69	4.87
Lu	0.76	1.14	0.87	0.38	0.9	0.89	0.79
Y	43.5	65.1	49.6	20.4	54	47.9	39.6
Rb/Sr	14.12	9.77	8.4	5.63	8.43	12.75	9.76
Sr/Ba	0.51	0.48	0.57	0.44	1.03	0.77	0.59
Σ REE	121.1	118	156	64.2	161	87.96	77
LREE/HREE	3.59	2.06	3.84	3.69	3.59	2.01	2.05
L_{aN}/Y_{bN}	2.88	1.38	3.06	3.26	3.16	1.34	1.47
δ Eu	0.17	0.19	0.18	0.5	0.18	0.18	0.25
δ Ce	1.01	1.02	1	0.94	0.99	1.03	0.97

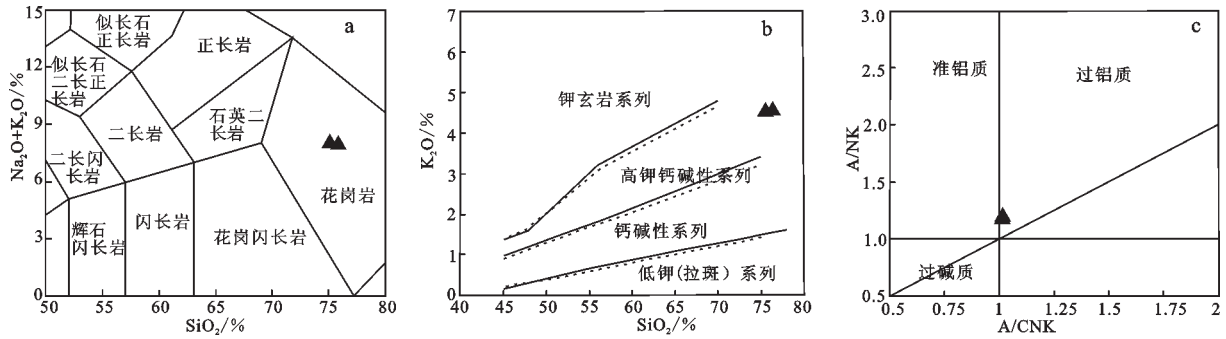


图3 盘古山钾长花岗岩的SiO₂-(Na₂O+K₂O)、SiO₂-K₂O和A/CNK-A/NK图解
Fig.3 SiO₂-(Na₂O+K₂O), SiO₂-K₂O and A/CNK-A/NK diagrams of Pangushan granite

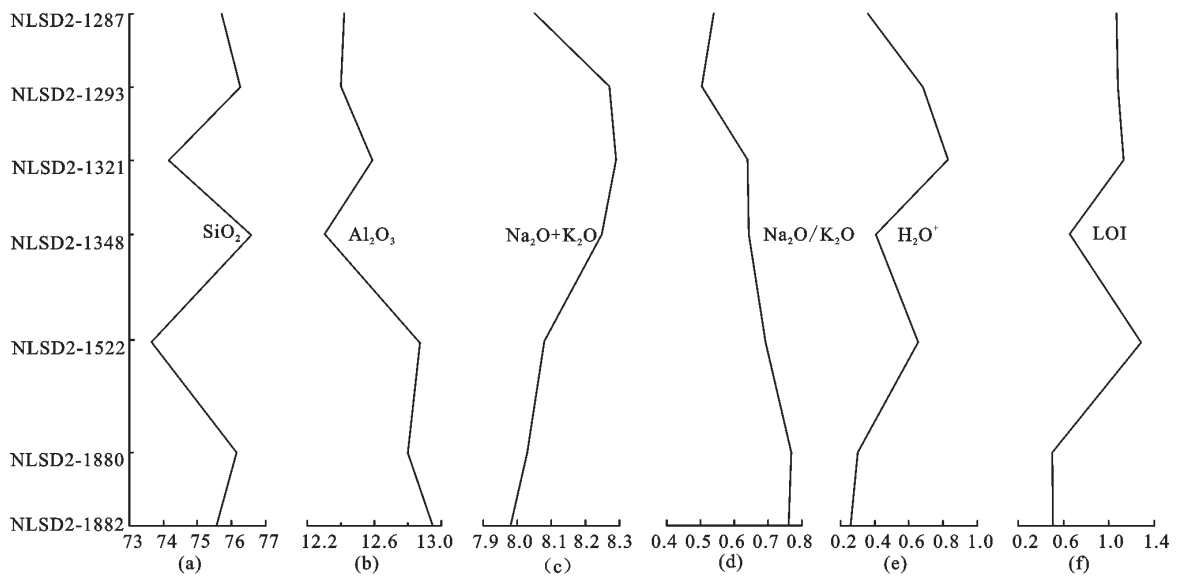


图4 盘古山花岗岩体的化学成分变化趋势
(除图d的数值为比值外,其余为%)

Fig.4 Variation tendency of chemical composition of Pangushan granite
(The value on Fig.4d is ratio, and the unit of the value in the rest figures is percentage)

结晶早于碱质斜长石和钾长石,导致残浆逐渐富碱;K₂O/Na₂O呈鲜明的降低趋势(图4-d),反映了岩浆向相对富钾而贫钠方向演化的特征,主要是由于斜长石结晶早于钾长石,残浆中的钠质较早被带出;H₂O⁺和烧失量LOI总体升高(图4-e、f),反映云英岩化阶段岩浆-热液的富挥发分特征;Fe₂O₃、FeO、CaO、MgO、MnO、P₂O₅和TiO₂的含量总体上均有所降低(表1),与斜长石、磷灰石、钛铁矿等矿物的结晶有关。可见,在花岗岩浆演化过程中,从正岩浆阶段至云英岩化阶段,花岗岩浆-热液是向钾质和挥发分增加,铝、钠、钙、镁、锰和磷减少的方向演化的。

岩体的氧化系数明显较低,为0.15~0.4(表1),反映了花岗岩结晶时化学氧化势不高,是在深度较

大、相对较封闭的条件下形成的。

3.2 微量与稀土元素特征

盘古山花岗岩体的新鲜样品 NLS2-1880 和 NLS2-1882 富集 Rb、Th、U、K、Ta 等高度不相容元素,而亏损高度相容元素 Ti 及中等相容性元素 Sr、P (图 5-a), Rb/Sr 值较高(9.76~12.75), Sr/Ba 值较低(0.59~0.77)(表 2),表明形成该岩体的花岗岩浆为高度分异演化的残浆。其中的钨元素含量为 $8.67 \times 10^{-6} \sim 82 \times 10^{-6}$,明显高于南岭燕山期花岗岩的平均含量 2.42×10^{-6} ^[15],其 Bi 平均含量高达 $5.35 \times 10^{-6} \sim 7.7 \times 10^{-6}$ (表 2),也是很多花岗岩体少见的,为该钨铋多金属矿床提供了丰富的矿质来源。

盘古山花岗岩体稀土元素球粒陨石标准化分

布型式呈平缓的海鸥型(图5-b),Eu负异常较显著($\delta\text{Eu}=0.17\sim 0.50$),Ce异常则不明显($\delta\text{Ce}=0.94\sim 1.03$)。显著的Eu负异常主要是斜长石分离结晶的结果,反映了岩浆较高分异演化。

由深至浅,由新鲜钾长花岗岩→钾长石化花岗岩→云英岩化花岗岩,W和Sn含量趋于降低,Mo、Bi、Cu、Pb含量则总体升高(图6),尤其在云英岩化花岗岩含量较高,这可能与元素在岩浆-热液演化过程中的沉淀先后有关。这些元素在岩浆演化过程中趋于富集在岩浆期后热液中,但Mo、Bi、Cu和Pb较早地沉淀和结晶在云英岩化带及矿脉的底部,W和Sn继续残留在热液中运移至矿脉的中上部成矿,这也一定程度上解释了钨多金属矿床常见的逆

向分带特征。稀土总量(ΣREE)由 $82.5\times 10^{-6}\rightarrow 112.6\times 10^{-6}\rightarrow 131.7\times 10^{-6}$,呈逐渐增加趋势。可见,从正岩浆阶段至云英岩化阶段,岩浆的Mo、Bi、Cu、Pb及REE含量增加,而W、Sn则因转移到热液中而在岩浆中的含量降低。

3.3 成岩构造环境

不同构造环境中的物质组成、物理化学条件及化学动力作用存在差异,因此不同构造环境形成的岩石具有不同的化学成分和微量元素组成特征。本文用新鲜的钾长花岗岩数据投图发现,在 $\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{SiO}_2-\text{TFe}_2\text{O}_3/(\text{TFe}_2\text{O}_3+\text{MgO})$ 图解(图7-a、b)中,盘古山花岗岩体的新鲜样品主要落在POG(后造山花岗岩)区域,在 $\text{SiO}_2-\lg[\text{CaO}/(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})]$ 图

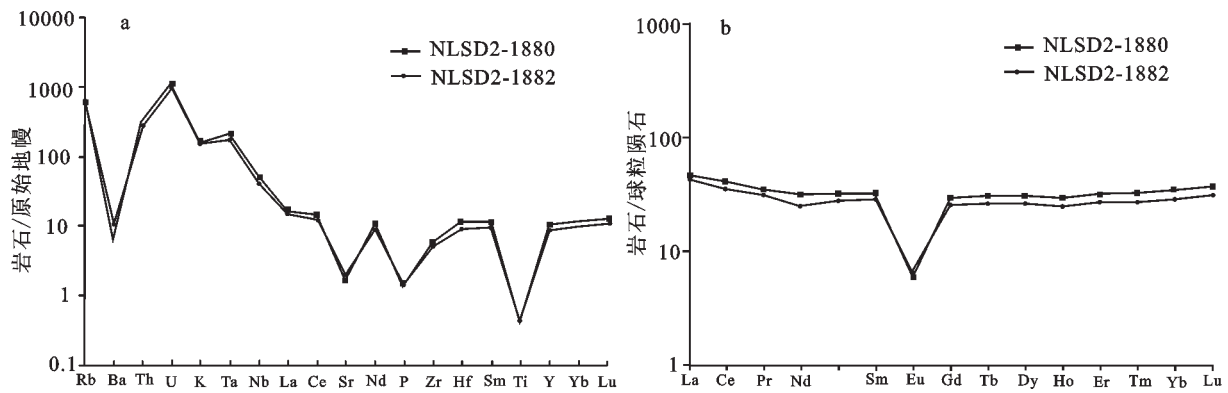


图5 盘古山新鲜钾长花岗岩的微量元素原始地幔标准化分布型式(a)和稀土元素球粒陨石标准化分布型式(b) (标准值据文献[16])

Fig. 5 Primitive mantle-normalized multiple trace element diagram (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of Pangushan granite (after reference [16])

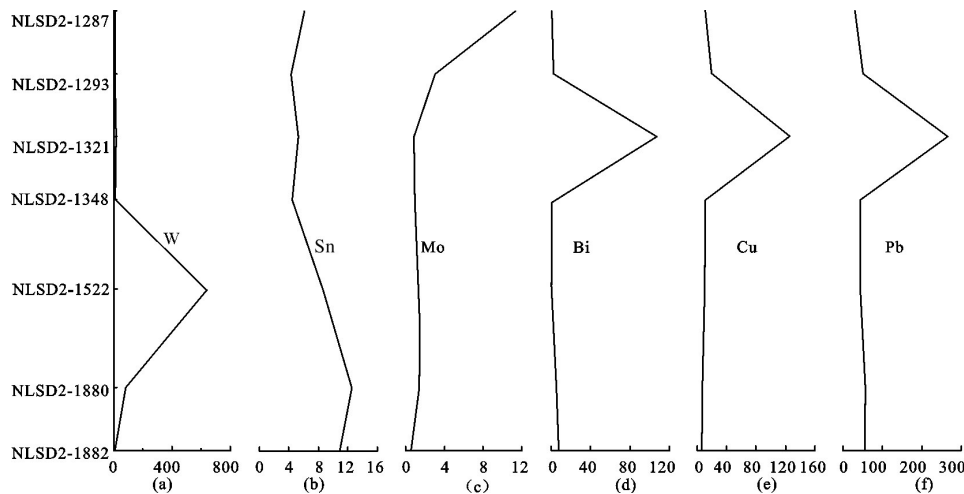


图6 盘古山花岗岩体的矿化元素含量变化趋势(图中数值以 10^{-6} 为单位)

Fig. 6 Variation tendency of metallogenic element content of Pangushan granite (unit of the value is 10^{-6})

解(图7-c)中位于挤压型与伸展型重叠区域,但明显偏向伸展型一方而即将跳出挤压型区域,在(Yb+Ta)-Rb、(Y+Nb)-Rb、Yb-Ta、Y-Nb图解(图8)主要落在WPG(板内花岗岩)区域内或附近。

对于南岭地区燕山早期的大地构造环境,不少学者进行了研究、概括和总结。陈培荣等^[20]指出,该区双峰式火山-侵入杂岩和A型花岗岩类及其有关的碱性杂岩是软流圈上升、岩石圈减薄、大陆地壳开始拉张裂隙的最直接证据,南岭地区燕山早期应是一种后造山的大陆裂解的地球动力学背景,所谓后造山是指发生在造山的威尔逊旋回结束以后的构造-岩浆过程,完全是一种板内的地球动力学行为。Sun et al.^[21]通过南岭东段中生代强过铝花岗岩的研究认为,燕山早期的南岭地区处于由古太平洋构造域制约的弧后伸展环境。华仁民^[22]指出,南岭地区从燕山期进入后造山地球动力学环境,170~140 Ma期间南岭地区岩石圈全面拉张-减薄,地幔上涌-玄武质岩浆底侵引发大规模的地壳熔融,导致大范围陆壳重熔型花岗岩的生成及侵位,并在160 Ma前后形成高潮。柏道远等^[23]认为,湘东南及湘粤赣边区中侏罗世早期一晚侏罗世为后造山阶段,主要形成大量后造山花岗岩以及与花岗岩相关的大量有色金属矿床。毛景文等^[24]基于近些年的高精度成岩成矿测年资料和地球动力学研究进展,提出南岭地区165~150 Ma相应的构造背景是古太平

洋板块向大陆俯冲,在大陆边缘弧后地区出现一系列NE向壳幔相互作用强烈的伸展带,这些伸展带与东西向古断裂的交汇部位是岩装活动和成矿作用中心区,Mao et al.^[25-26]进一步论述了这一观点。Feng et al.^[27]综合赣南地区钨多金属矿床的成岩成矿年代学数据,认为该区大规模的岩浆和成矿作用发生在板内岩石圈伸展的构造环境。陈毓川和王登红^[28]指出,华南地区中生代的岩浆和成矿作用均形成于陆块内的大地构造环境,具有诸多共性。可见,尽管各学者对燕山早期构造-岩浆活动机制尚存在异议,但板内伸展环境基本达成共识。

盘古山花岗岩体形成于161.7 Ma^[8],综合构造环境判别图解及前人的地球动力学研究成果,笔者认为该岩体形成于板内伸展环境。

4 结 论

(1)盘古山隐伏岩体的新鲜钾长花岗岩具有超酸性、富碱、贫钠富钾等特征,属于高钾钙碱性系列,为准铝-过铝质花岗岩。

(2)形成该岩体的花岗岩浆为高度分异演化的残浆,W、Bi等元素含量明显高于南岭燕山期花岗岩,为盘古山钨铋矿床的形成提供了丰富的矿质。岩浆演化至云英岩化阶段时,岩浆中的Mo、Bi、Cu、Pb及REE含量增加,而W、Sn含量则因已转移到热液而降低。

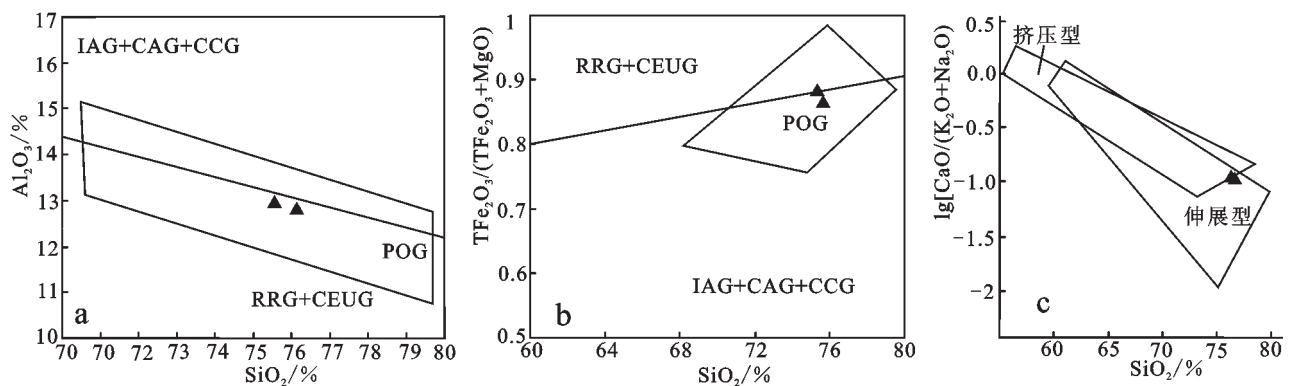


图7 盘古山花岗岩体的主要化学成分构造环境判别图解(a和b底图据[17],c底图据[18])

IAG—岛弧花岗岩; RRG—与裂谷有关的花岗岩; CAG—大陆弧花岗岩类; CEUG—大陆的造陆抬升花岗岩类; CCG—大陆碰撞花岗岩类; POG—后造山花岗岩类

Fig.7 Diagenetic setting diagram of Pangushan granite according to its major chemical composition (Fig.7-a and Fig.7-b after reference [17], and Fig.7-c after reference [18])

IAG—Island arc granitoids; RRG—Rift-type granitoids; CAG—Continental arc granitoids; CEUG—Continental epeirogenic uplift granite; CCG—Continental collision granite; POG—Post-orogenic granitoid

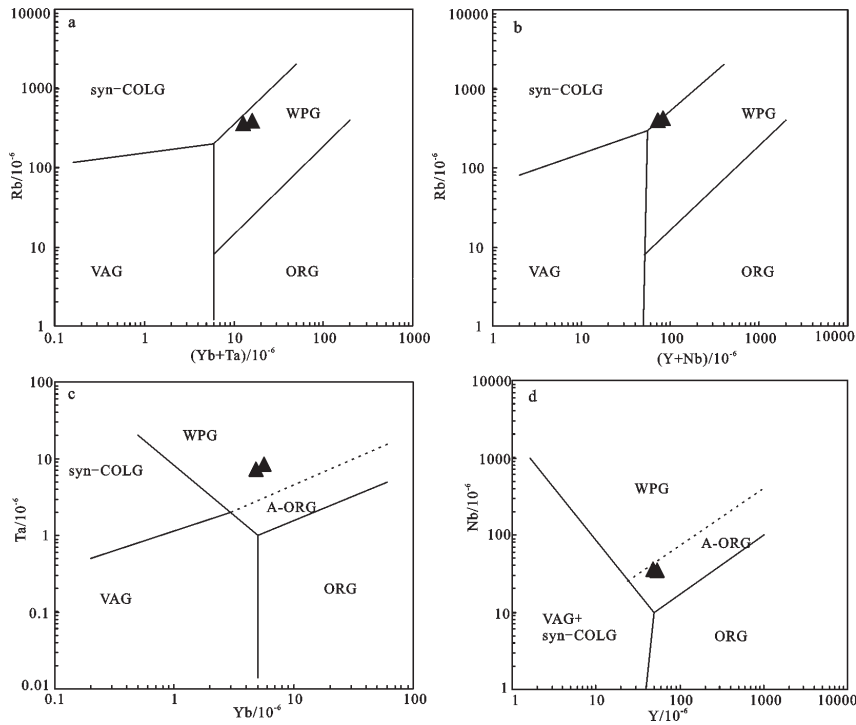


图8 盘古山花岗岩体的微量元素含量构造环境判别图解(底图据[19])

VAG—火山弧花岗岩; WPG—板内花岗岩; syn-COLG—同碰撞花岗岩; ORG—洋中脊花岗岩; A-ORG—异常洋中脊花岗岩

Fig.8 Diagenetic setting diagram of Pangushan granite according to its trace element values (after reference [19])

VAG—Volcanic arc granite; WPG—Intraplate granite; syn-COLG—Syn-collisional granite; ORG—Mid-ocean ridge granite; A-ORG—Abnormal mid-ocean ridge granite

(3)盘古山花岗岩体形成于板内伸展构造环境。

参考文献(references):

[1] 叶际祎, 邓国政, 皮俊明, 等. 盘古山钨矿深部矿床赋存特征分析及找矿前景[J]. 中国钨业, 2000, 15(4): 17-19.
Ye Jiyi, Deng Guozheng, Pi Junming, et al. An analysis on the characteristics of deep deposit of Pangushan tungsten mine and the vistas of prospecting[J]. China Tungsten Industry, 2000, 15(4): 17-19 (in Chinese with English abstract).

[2] 曾广胜. 盘古山钨矿容矿裂隙及盲矿预测[J]. 地质与勘探, 1980, (12): 13-16.
Zeng Guangsheng. Ore-hosting fissure and ore prediction of Pangushan tungsten deposit[J]. Geology and Exploration, 1980, (12): 13-16 (in Chinese).

[3] 蔡建明, 刘若兰, 曾广胜. 江西盘古山钨矿包裹体含盐度和CO₂成分的研究及其在成矿中的意义[J]. 成都地质学院学报, 1981, (2): 99-103.
Cai Jianming, Liu Ruolan, Zeng Guangsheng. The salinity and CO₂ study of fluid inclusion and its metallogenic significance in Pangushan tungsten deposit[J]. Journal of Chengdu College of Geology, 1981, (2): 99-103 (in Chinese).

[4] 王旭东, 倪培, 张伯声, 等. 江西盘古山石英脉型钨矿床流体包裹体研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(5): 539-550.
Wang Xudong, Ni Pei, Zhang Bosheng, et al. Fluid inclusion

studies of the Pangushan quartz-vein type tungsten deposit in southern Jiangxi Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2010, 29(5): 539-550 (in Chinese with English abstract).

[5] 任英忱, 程敏清, 王存昌. 江西盘古山石英脉型钨矿床钨铋矿物特征及矿物的垂直分带[J]. 矿床地质, 1986, 5(2): 63-74.
Ren Yingchen, Cheng Minqing, Wang Cunchang. Characteristics and vertical zoning of tungsten-bismuth minerals in the Pangushan quartz-vein type tungsten deposit of Jiangxi Province[J]. Mineral Deposits, 1986, 5(2): 63-74 (in Chinese with English abstract).

[6] 谭运金, 童启荃, 皮俊明, 等. 盘古山钨矿床近矿热液蚀变岩石的地质地球化学[J]. 中国钨业, 2002, 17(5): 21-26.
Tan Yunjin, Tong Qiquan, Pi Junming, et al. Geological-geochemical features of ore-near hydrothermal alteration rocks in Pangushan tungsten deposit[J]. China Tungsten Industry, 2002, 17(5): 21-26 (in Chinese with English abstract).

[7] 曾载淋, 张永忠, 陈郑辉, 等. 江西省于都县盘古山钨铋(碲)矿床地质特征及成矿年代学研究[J]. 矿床地质, 2011, 30(5): 949-958.
Zeng Zailin, Zhang Yongzhong, Chen Zhenghui, et al. Geological characteristics and metallogenic epoch of Pangushan W-Bi(Te) ore deposit in Yudu County, Jiangxi Province[J]. Mineral Deposits, 2011, 30(5): 949-958 (in Chinese with English abstract).

[8] 方贵聪, 陈毓川, 陈郑辉, 等. 赣南盘古山钨矿床锆石 U-Pb 和辉钨矿 Re-Os 年龄及其意义[J]. 地球学报, 2014, 35(1): 76-84.
Fang Guicong, Chen Yuchuan, Chen Zhenghui, et al. Zircon U-Pb

- and molybdenite Re–Os geochronology of the Pangushan tungsten deposit in South Jiangxi Province and its significance[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2014, 35(1): 76–84(in Chinese with English abstract).
- [9] 方贵聪, 童启荃, 孙杰, 等. 赣南盘古山钨矿床稳定同位素地球化学特征[J]. *矿床地质*, 2014, 33(6): 1391–1399.
Fang Guicong, Tong Qiquan, Sun Jie, et al. Stable isotope geochemical characteristics of Pangushan tungsten deposit in southern Jiangxi Province[J]. *Mineral Deposits*, 2014, 33(6): 1391–1399(in Chinese with English abstract).
- [10] Fang G C, Chen Z H, Chen Y C, et al. Geophysical investigations of the geology and structure of the Pangushan–Tieshanlong tungsten ore field, South Jiangxi, China—Evidence for site-selection of the 2000 m Nanling Scientific Drilling Project (SP–NLS–2)[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, (110): 10–18.
- [11] Dong S W, Li T D, Gao R, et al. A multidisciplinary earth science research program in China[J]. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 2011, 92(38): 313–314.
- [12] 董树文, 李廷栋, SinoProbe 团队. 深部探测技术与实验研究 (SinoProbe)[J]. *地球学报*, 2011, 32(Supp.): 3–23.
Dong Shuwen, Li Tingdong, SinoProbe Group. Deep exploration technology and experimentation (SinoProbe) [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2011, 32(Supp.): 3–23 (in Chinese with English abstract).
- [13] 邱家骧. 岩浆岩岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1985: 1–340.
Qiu Jiaxiang. *Petrology of Igneous Rocks*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985: 1–340(in Chinese).
- [14] 胡受溪, 周顺元, 任启江, 等. 碱交代成矿模式及其成矿机制的理论基础[J]. *地质与勘探*, 1982, (1): 1–4.
Hu Shouxi, Zhou Shunyu, Ren Qijiang, et al. Theoretical basis of alkali metasomatism and ore-forming mechanism[J]. *Geology and Exploration*, 1982, (1): 1–4(in Chinese).
- [15] 陈毓川, 裴荣富, 张宏良, 等. 南岭地区与中生代花岗岩类有关的有色及稀有金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 1–508.
Chen Yuchuan, Pei Rongfu, Zhang Hongliang, et al. *The Ferrous and Rare Metal Deposit Related to Mesozoic Granite in Nanling region*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989: 1–508(in Chinese).
- [16] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42(1): 313–345.
- [17] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological society of America Bulletin*, 1989, 101(5): 635–643.
- [18] Brown G C. Calc–alkaline intrusive rocks: Their diversity, evolution, and relation to volcanic arcs[C]//Thropi, R S (ed.). *Andesites–Orogenic Andesites and related rocks*. New York: John Wiley and Sons, 1982: 437–464.
- [19] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 956–983.
- [20] 陈培荣, 华仁民, 章邦桐, 等. 南岭燕山早期后造山花岗岩类: 岩石学制约和地球动力学背景[J]. *中国科学(D辑)*, 2002, 32(4): 279–289.
Chen Peirong, Hua Renmin, Zhang Bangdong, et al. Early Yanshanian post–orogenic granitoids in the Nanling region—Petrological constraints and geodynamic settings[J]. *Science in China (Series D)*, 2002, 32(4): 279–289(in Chinese with English abstract).
- [21] Sun T, Zhou X M, Chen P R, et al. Strongly peraluminous granites of Mesozoic in Eastern Nanling Range, southern China: Petrogenesis and implications for tectonics[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2005, 48(2): 165–174.
- [22] 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 等. 南岭与中生代花岗岩类有关的成矿作用及其大地构造背景[J]. *高校地质学报*, 2005, 79(5): 291–304.
Hua Renmin, Chen Peirong, Zhang Wenlan, et al. Metallogenesis and their geodynamic setting related to Mesozoic granitoids in the Nanling rang[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2005, 79(5): 291–304(in Chinese with English abstract).
- [23] 柏道远, 黄建中, 李金冬, 等. 华南中生代构造演化过程的多地质要素约束——湘东南及湘粤赣边区中生代地质研究的启示[J]. *大地构造与成矿学*, 2007, 31(1): 1–13.
Bai Daoyuan, Huang Jianzhong, Li Jindong, et al. Multiple geological elements constraint on the mesozoic tectonic evolution of South China: Apocalypse of the Mesozoic geological evolution in southeastern Hunan and the Hunan–Guangdong–Jiangxi border area[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2007, 31(1): 1–13 (in Chinese with English abstract).
- [24] 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.
Mao Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, et al. Large–scale tungsten–tin mineralization in the Nanling region, South China: Metallogenic ages and corresponding geodynamic processes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(10): 2329–2338(in Chinese with English abstract).
- [25] 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.
- [26] Mao J W, Cheng Y B, Chen M H, et al. Major types and time–space distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their geodynamic settings[J]. *Mineralium Deposita*, 2013, 48(3): 267–294.
- [27] Feng C Y, Zhang D Q, Zeng Z L, et al. Chronology of the Tungsten Deposits in Southern Jiangxi Province, and Episodes and Zonation of the Regional W–Sn Mineralization—Evidence from High–precision Zircon U–Pb, Molybdenite Re–Os and Muscovite Ar–Ar Ages[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(3): 555–567.
- [28] 陈毓川, 王登红. 华南地区中生代岩浆成矿作用的四大问题[J]. *大地构造与成矿学*, 2012, 36(3): 315–321.
Chen Yuchuan, Wang Denghong. Four main topics concerning the metallogeny related to Mesozoic magmatism in South China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2012, 36(3): 315–321(in Chinese with English abstract).