



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403118

引用格式:穆玖清,王安东,汪方跃,等.皖南泾县檀树岭钼矿床辉钼矿 Re-Os 和锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J].科学技术与工程,2025,25(9):3555-3572.

Mu Jiuqing, Wang Andong, Wang Fangyue, et al. Molybdenite Re-Os and zircon U-Pb chronology of Tanshuling molybdenum deposits from Jingxian County, southern Anhui Province and its geological significance [J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(9): 3555-3572.

皖南泾县檀树岭钼矿床辉钼矿 Re-Os 和 锆石 U-Pb 年代学及其地质意义

穆玖清^{1,2,3}, 王安东^{1,2*}, 汪方跃⁴, 王运^{1,2}

(1. 东华理工大学核资源与环境省部共建国家重点实验室培育基地, 南昌 330013;
2. 东华理工大学地球科学学院, 南昌 330013; 3. 河北省地矿局第五地质大队, 唐山 063006;
4. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009)

摘要 檀树岭钼矿床处于江南隆起带内,位于江南断裂的南侧,其主体岩性为花岗闪长岩。为限定其成岩成矿时代和矿床成因,对其开展了锆石 U-Pb 年代学、辉钼矿 Re-Os 年代学和全岩主微量元素地球化学研究。结果表明:檀树岭花岗岩 SiO₂ 含量为 64.5%~66.8%, Al₂O₃ 含量为 14.4%~16.0%, K₂O 含量为 3.92%~4.86%, Na₂O 含量为 2.90%~3.91%, CaO 含量为 1.56%~2.8%, MgO 含量为 1.24%~1.53%, A/CNK 为 1.02~1.10, A/NK 为 1.37~1.59, 主量元素特征显示其属于准铝质-弱过铝质高钾钙碱性-钾玄岩系列的 I 型花岗岩。稀土元素球粒陨石标准化曲线明显右倾,轻稀土相对富集, Eu 负异常。檀树岭辉钼矿的 Re-Os 定年结果为 (133.09 ± 0.86) Ma, 茂林岩体花岗闪长岩的 U-Pb 定年结果为 (140.4 ± 0.62) Ma, (139.9 ± 0.66) Ma, (139.6 ± 0.63) Ma, 均属于早白垩世。综合年代学和地球化学结果可见檀树岭钼矿床主要岩浆活动属于太平洋构造体制,挤压与伸展的相互交替使该地区发生了大规模的岩浆与成矿作用。

关键词 江南隆起带; I 型花岗岩; 地球化学; Re-Os 定年; U-Pb 定年

中图分类号 P597; **文献标志码** A

Molybdenite Re-Os and Zircon U-Pb Chronology of Tanshuling Molybdenum Deposits from Jingxian County, Southern Anhui Province and Its Geological Significance

MU Jiu-qing^{1,2,3}, WANG An-dong^{1,2*}, WANG Fang-yue⁴, WANG Yun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 3. The Fifth Geological Brigade of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources, Tangshan 063006, China; 4. School of Resource and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

[Abstract] The Tanshuling molybdenum deposit is located in the Jiangnan Uplift zone along south part of the Jiangnan Fault. Its main lithology type is granodiorite. With the aim to constrain their magma and ore-forming ages and deposit genesis, combined zircon U-Pb and molybdenite Re-Os geochronology together with whole-rock major and trace element geochemistry have been carried out. The result suggest that the content of SiO₂ is 64.5%~66.8%, Al₂O₃ is 14.4%~16.0%, K₂O is 3.92%~4.86%, Na₂O is 2.90%~3.91%, CaO is 1.56%~2.8%, MgO is 1.24%~1.53%, A/CNK value of 1.02~1.10, and A/NK value of 1.37~1.59. The characteristics of major elements show that the granites belong to metaaluminium to weak peraluminous high potassium calc-alkaline potassium series with I-type granite nature. The chondrite-normalized REE patterns are evidently right-declined, with relatively LREE enrichment and slight Eu negative anomalies. The molybdenite Re-Os age of the Tanshuling molybdenite is (133.09 ± 0.86) Ma, and the U-Pb dating of the Maolin granodiorite is (140.4 ± 0.62) Ma, (139.9 ± 0.66) Ma, (139.6 ± 0.63) Ma, all belong to the Early Cretaceous. Integrated chronological and geochemical characteristics show that the main magmatic activity of the Tanshuling molybdenum deposit belong to the Pacific tectonic system, and the alternation of extrusion and extensional has led to large-scale magmatic and

收稿日期: 2024-04-26 修订日期: 2024-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(41763005); 国家重点研发计划(2018YFA0404104); 放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室项目(RGET2209)

第一作者: 穆玖清(1999—), 男, 汉族, 河北唐山人, 硕士研究生。研究方向: 同位素地球化学。E-mail: 1369870609@qq.com。

* 通信作者: 王安东(1985—), 男, 汉族, 安徽安庆人, 博士, 副教授。研究方向: 同位素地球化学、地热学。E-mail: adw008@mail.ustc.edu.cn。

mineralization in this area.

[**Keywords**] Jiangnan Uplift belt; I-type granite; geochemistry; Re-Os dating; U-Pb dating

长江中下游成矿带和钦(赣)杭成矿带是中国东部两条重要的成矿带,是国内 Cu-Fe-W-Mo 等多金属矿产资源重要的产区^[1-6]。夹持于两者东段之间的赣北—皖南地区,近 20 多年来,在该地区先后发现了诸多大型甚至超大型矿床,如大湖塘 W-Cu 矿、朱溪 W-Cu 矿、百丈岩 W-Mo 矿和东源 W-Mo 矿等,使得该地区成为中国又一重要的 W-Mo 多金属成矿带^[7-8]。前人从岩浆岩、成岩成矿时代、成矿元素、矿床类型、全岩地球化学、全岩 Sr-Nd-Pb 和锆石 Lu-Hf 以及岩浆源区和成矿构造背景等方面将赣北—皖南地区成矿作用与长江中下游和钦杭成矿带成矿作用进行了对比^[9-15],分别认为赣北—皖南成矿带类似于长江中下游成矿带或钦(赣)杭成矿带,或者代表了过渡型成矿带甚至是独立于两者之外的成矿带。因此,皖南地区金属成矿作用尤其是中生代钨-钼多金属成矿作用的成岩成矿时代、地球化学特征,以及矿床成因和成矿动力学背景还未形成共识。

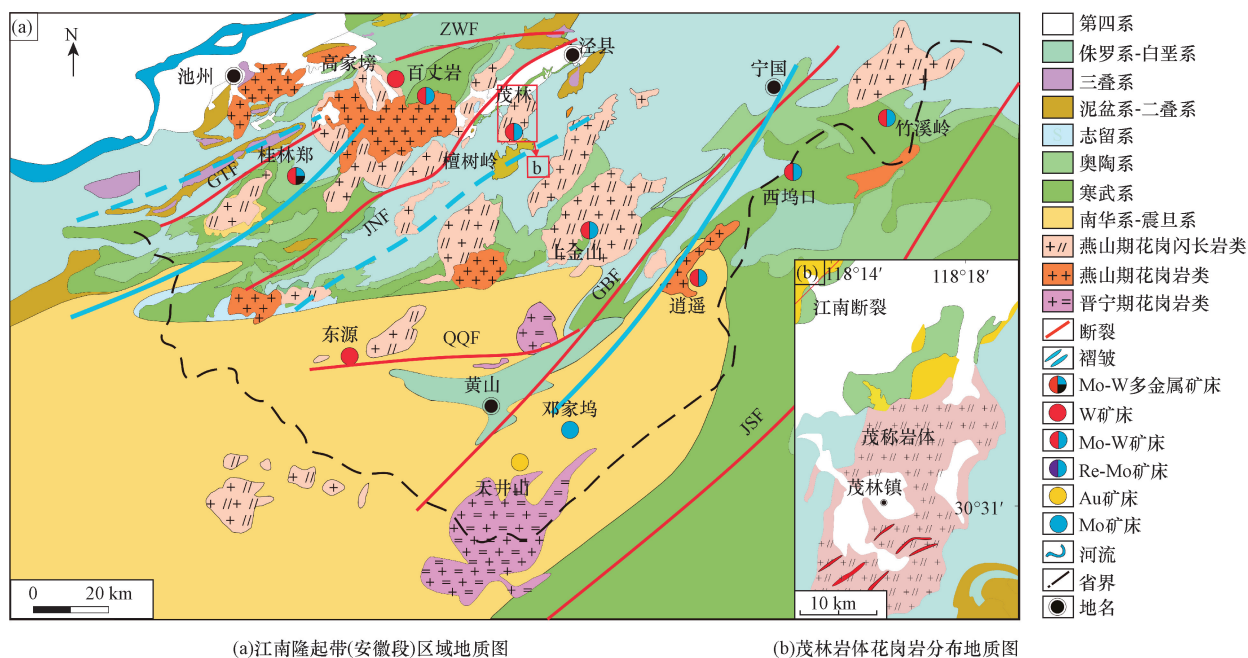
钨作为一种全球稀缺性战略资源,同时也是中国的优势矿产资源,对其开展深入研究具有重要的理论和现实意义^[16]。现对产于江南隆起带东段安徽南部泾县的檀树岭钨矿床开展系统的全岩主、微量元素和辉钨矿 Re-Os 年代学、S 同位素以及含矿岩体的锆石 U-Pb 年代学研究,厘定它们的成

岩成矿时代和成矿物质来源,并将其与研究区内其他矿床做进一步对比,探讨檀树岭钨矿床的成矿背景。

1 地质背景与样品特征

茂林岩体位于安徽泾县茂林镇,江南断裂带的南侧[图 1(a)],属“沿江沉积区”和“皖南沉积区”的过渡地带;区域上褶皱单元为“太平复向斜”,沿次级背斜“茂林—龙门背斜”轴部侵入^[17]。该岩体处于长江中下游南亚部南部,已不属于长江中下游成矿带,具有江南隆起过渡的成矿特色,而属于江南成矿带^[5,7]。岩体总体出露面积约 70 km²,以花岗闪长岩岩性为主,呈不规则椭圆状展布[图 1(b)],并在岩体内部已发现湛岭钨矿和檀树岭钨矿,围岩南部为中志留统康山组及唐家坞组地层,北部为志留系、白垩系及新近系张家渡组地层,南东侧为泥盆系、石炭系、二叠系组成的向斜构造,属于铜山向斜的北东段^[18];发育多条近平行展布的断裂,主要控制断裂有北东向断裂包括高坦断裂、江南断裂、赣东北—白际山断裂、江绍断裂,东西向断裂包括祁门—潜口断裂、周王断裂^[3]。

研究区处于茂林岩体中段相似穹窿位,面积约 5.55 km²,距茂林镇 4 km。矿段内钨矿体产于燕山期的花岗闪长斑岩内,地表矿化规模:长 1 500 m,宽



GTF 为高坦断裂;ZWF 为周王断裂;JNF 为江南断裂;GBF 为赣东北—白际山断裂;JSF 为江绍断裂;QQF 为祁门—潜江断裂

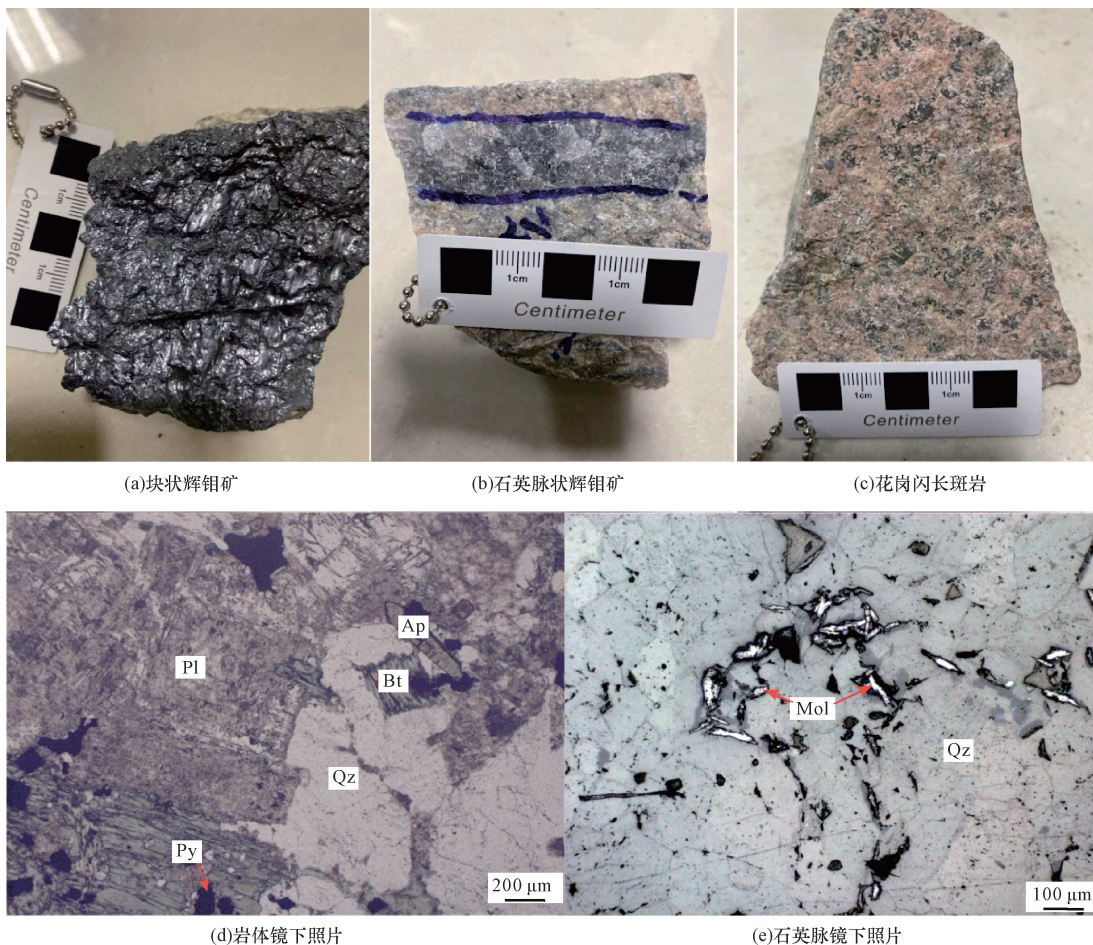
图 1 研究区位置图及分布简图^[20]

Fig. 1 Tectonic location and geological sketch map of the study area^[20]

1 000 m;深部控制规模:长和延深均为 600 m。钨矿化在时间和空间上与中酸性斑岩关系密切,矿化类型为非浸染状为主的细脉状 V 石英细脉和微裂隙控矿,属“渗透漏型”斑岩型钨矿床。

区内岩脉较发育,主要有石英正长斑岩、闪斜煌斑岩和石英闪长玢岩等;矿石类型为花岗斑岩型钨矿,主要金属矿物为辉钨矿、黄铁矿、少量磁铁矿,次生矿物为褐铁矿和白钨矿等,主要脉石矿物为石英、绢云母、钾长石、斜长石、绿泥石等。矿石品位:主要有益组分 Mo 含量一般为 0.041% ~ 0.144%,平均 0.062%,略估算钨金属量为 108 98 t,矿石钨品位变化较大,矿体平均品位变化不大,主要产于钾化蚀变带中,矿体局部伴生铜和硫品位较低^[16]。研究样品均采自矿区露天采场内,样品总体新鲜。辉钨矿呈铅灰色,强金属光泽的细小鳞片状、叶片状,与石英关系密切,一般赋存于石英脉壁、裂隙壁及晶洞中,多以致密块状[图 2(a)]和石英脉状[图 2(b)]产出,岩体[图 2(c)]大部分呈浅肉红色,具斑状结构。岩体镜下[图 2(d)]观察主

要由斜长石、石英、黑云母组成,含少量黄铁矿、磷灰石等,其中长石和黑云母颗粒较大,石英相对较小,组成似斑状结构,块状构造。斜长石约占 60%,自形或半自形短柱状(0.2 mm × 0.6 mm) ~ (0.7 mm × 1.0 mm),多数颗粒表面较“脏”,一些颗粒几乎完全被绢云母等矿物取代,表明岩石遭受了强烈的后期风化蚀变;石英约含 35%,呈它形粒状或不规则状充填于长石之间,有的形成“熔体假象”,粒径 0.1 ~ 0.5 mm,内部常发育流体包裹体,部分颗粒表现出波状消光;黑云母约含 5%,规则或不规则片状,颗粒大小范围较大,小的颗粒约为 0.1 mm × 0.2 mm,大的颗粒可达 5 mm × 10 mm,大颗粒的黑云母中通常含长石和石英包裹体,且自身有绿泥石化现象;黄铁矿呈浸染状分布或在石英细脉中发育,多数为不规则粒状,粒径 0.1 ~ 0.2 mm。含矿石英脉镜下[图 2(e)]观察岩石呈粒状变晶结构,几乎完全由石英组成,粒径在 0.1 ~ 1 mm,石英颗粒直接接触,中间无胶结物,岩石中发育浸染状不透明矿物辉钨矿。



Qz 为石英;Pl 为斜长石;Bt 为黑云母;Py 为黄铁矿;Ap 为磷灰石;Mol 为辉钨矿

图 2 手标本及显微照片

Fig. 2 Hand specimen and photomicrograph

2 分析方法

全岩主、微量元素测试分析在江西省地质局第十检测技术研究院完成,主量元素分析采用 X 荧光光谱仪 Rigaku 100e(XRF)完成,测试的分析误差为 1%~5%,分析程序见文献[21];微量元素采用 Agilent 7900 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)进行测试,其中稀土元素的检测下限为 0.05×10^{-6} ,部分元素检测下限为 0.5×10^{-6} ,含量大于 10×10^{-6} 的元素误差小于 5%,含量小于 10×10^{-6} 的元素误差小于 10%,具体分析程序见文献[22]。

辉钼矿 Re-Os 同位素分析在国家地质实验测试中心铼-钨同位素年代学实验室完成。目前被普遍接受的¹⁸⁷Os 所求得的半衰期 $(4.23 \pm 0.13) \times 10^{10}$ a 是美国劳伦兹实验室(Lawrence Livermore national lab)的 1989 年用 ICP-MS 测定由公斤级铼中产生的。将辉钼矿样品(主要以块状辉钼矿为主,部分为石英脉状辉钼矿)采用 Carius 管逆王水封闭溶液溶解,为避免因失耦现象而导致测年结果的误差,在溶解样品中应采用完整的颗粒并粉碎均匀,同位素测试仪器为电感耦合等离子体质谱仪 TJA X-series ICP-MS, Re 和 Os 分离化学前处理过程及质谱测试程序参见文献[23-26]。所测定的 Re-Os 同位素分析数据采用 Ludwig 程序软件进行处理[27],并计算同位素等时线年龄。Re、Os 质量分数的不确定度为实验中产生的误差,置信水平 95%。模式年龄的不确定度还包括衰变常数的不确定度(1.02%),置信水平为 95%。模式年龄计算所采用的衰变常数为 $\lambda(^{187}\text{Re}) = 1.66 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ 。

锆石单矿物分选在河北地质测绘院进行,将样品粉碎,经常规重选和电磁选后在双目镜下挑选出晶形、透明度较符合的锆石,在重庆宇劲科技有限公司锆石制靶,锆石 CL 图像与锆石激光剥蚀等离子体质谱(LA-ICP-MS)U-Pb 同位素分析均在东华理工大学核资源与环境国家重点实验室完成。根据锆石 CL 结

构特征,选择晶体特征良好、具有岩浆生长环带的锆石开展 LA-ICP-MS U-Pb 定年分析,分析采用 PerkinElmer NexION 1000 四极杆 ICP-MS,激光剥蚀装置为 ESI NWR 193 He 准分子激光器。激光剥蚀能量密度为 5.0 J/cm^2 ,脉冲为 5 Hz,剥蚀直径为 30 μm 。激光剥蚀过程中采用氦气作为剥蚀物质的载气。测试过程中,分别利用 NIST 610 玻璃和 91500 锆石(²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 1 063 Ma)作为元素和年龄外标,每间隔 5 个待测点插入两组 91500 锆石标样,间隔 10 个待测点插入两组 NIST 610 标样,并以²⁹Si 为元素内标。锆石 U-Pb 和微量元素数据利用 Iolite 软件处理[28]。

硫同位素样品分析在东华理工大学核资源与环境国家重点实验室完成,把待测矿物碎块进行玛瑙球技术碎样,在镜下挑出单矿物,研磨至 200 目以下并保存,称取辉钼矿样品 20~100 μg ,在 1 020 $^{\circ}\text{C}$ 下氧化为 SO_2 ,将用 SO_2 进入 Flash-EA 与 MAT-253 质谱仪联机测试所得。数据结果采用以国际硫同位素 CDT 标准标定的国家硫同位素标准(硫化银) GBW-4414 ($\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}} = -0.07\text{‰}$) 和 GBW-4415 ($\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}} = 22.15\text{‰}$) 校正精度: $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}} \leq 0.2\text{‰}$, $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ 的相对标准为 V-CDT。

3 分析结果

3.1 辉钼矿 Re-Os 年代学

檀树岭钼矿 8 个辉钼矿样品的 Re-Os 同位素数据分析列于表 1,样品的模式年龄在 132.2~134.0 Ma。8 个辉钼矿样品所拟合的直线具有良好的线性关系[图 3(a)],所求得的 Re-Os 等时线年龄为 $(133.08 \pm 0.75) \text{ Ma}$,与模式年龄结果在误差范围内高度一致。初始¹⁸⁷Os 含量为 $(0.003 \pm 0.020) \text{ ng/g}$,表明初始¹⁸⁷Os 含量接近于 0,该批数据符合辉钼矿 Re-Os 同位素定年的条件,此外该等时线的平均标准权重偏差(mean squared weighted deviation, MSWD)为 0.45,表明所有样品的 Re、Os 同位素组成

表 1 檀树岭钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素结果

Table 1 Re-Os isotope data of molybdenite from Tanshuling molybdenum deposit

样品	样重/g	Re/ 10^{-6}		普 Os/ 10^{-9}		¹⁸⁷ Re/ 10^{-6}		¹⁸⁷ Os/ 10^{-9}		模式年龄/Ma	
		测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度
M-1-1	0.010 21	46.162	0.447	0.379 6	0.106 2	29.014	0.281	64.09	0.54	132.4	2.1
M-1-2	0.010 18	49.285	0.508	0.421 6	0.026 6	30.977	0.319	69.00	1.28	133.6	3.1
M-1-3	0.020 31	22.406	0.214	0.161 9	0.005 3	14.083	0.135	31.28	0.35	133.2	2.4
M-2	0.010 04	49.358	0.486	0.469 3	0.000 9	31.022	0.306	68.40	1.03	132.2	2.7
M-3	0.010 09	50.294	0.510	2.514 5	0.238 5	31.611	0.321	70.27	0.82	133.3	2.4
M-4	0.350 22	0.601	0.004 6	0.017 3	0.003 8	3.781	0.002 9	0.841 6	0.018 1	133.4	3.3
M-6	0.010 06	91.486	1.333	0.532 8	0.039 6	57.501	0.838	127.2	0.80	132.6	2.5
M-8	0.010 19	27.002	0.255	0.600 0	0.058 7	16.971	0.160	37.92	0.27	134.0	2.1

遵循放射性衰变定律,等时线年龄准确可靠。为更好地避免样品中 Re-Os 失耦现象导致的辉钼矿年龄偏差过大,所以采用辉钼矿 Re-Os 模式年龄的加权平均值来代表矿床的形成时代^[29]。该 8 个样品模式年龄加权平均值 [图 3 (b)] 为 (133.09 ± 0.86) Ma, MSWD = 0.26, 与等时线年龄非常接近,因此可以代表檀树岭钼矿床确切的成矿年龄。

3.2 锆石 U-Pb 年代学

檀树岭钼矿床花岗闪长岩的锆石在透射光下多呈无色透明状,外形多为半自形-自形长柱状,晶形完好,颗粒相粒径长度 150 ~ 200 μm,长宽比 2: 1。

锆石阴极发光图像中(图 4)具有明显的岩浆生长环带,无核-幔结构,无后期变质壳,都表明这些锆石是岩浆形成后一次性结晶形成的,能代表岩浆冷却结晶的时代,说明是典型的岩浆成因锆石^[30-31]。所测试样品的锆石具有稀土总量(ΣREE)较高、变化范围较大(482 × 10⁻⁶ ~ 1 377 × 10⁻⁶),全部锆石表现出重稀土元素(HREE)相对于轻稀土元素(LREE)强烈富集(L/H = LREE/HREE = 0.03 ~ 0.31),并具有不同程度的 δCe 正异常(1.33 ~ 349.23) > 1 和 δEu 负异常(0.22 ~ 0.47) < 1 (表 2 ~ 表 4),表现出典型的岩浆锆石稀土元素分布特征(图 5)。

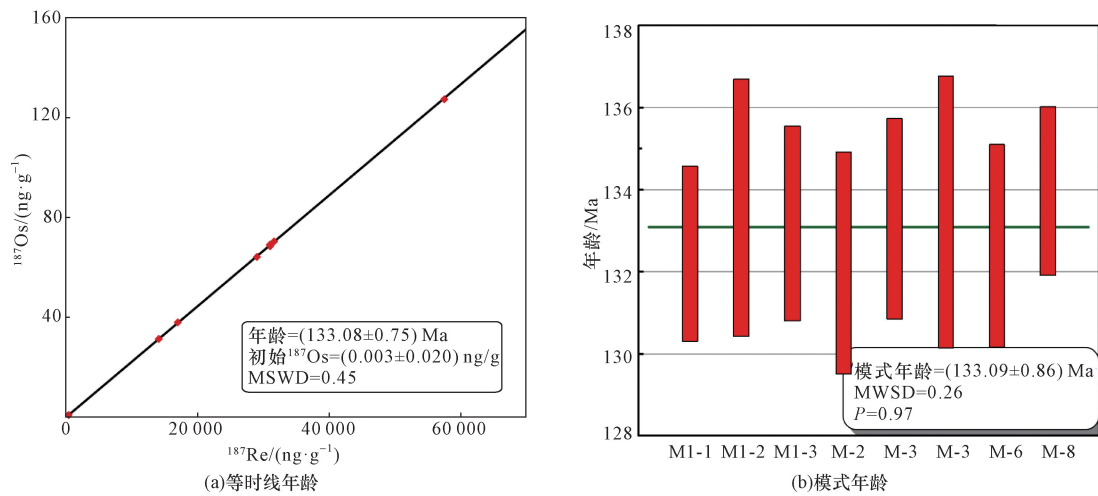


图 3 檀树岭钼矿辉钼矿 Re-Os 等时线年龄及模式年龄

Fig. 3 Re-Os isochron age and model age of molybdenite in Tanshuling molybdenum deposit

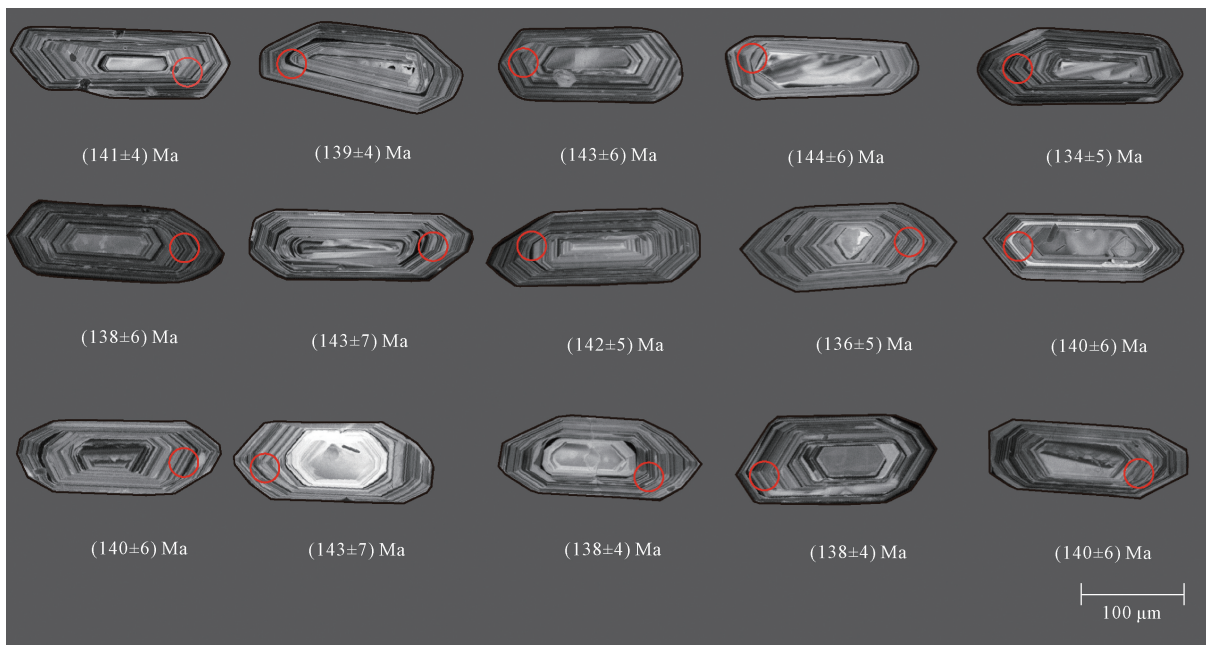


图 4 檀树岭花岗闪长岩锆石 CL 图

Fig. 4 CL images of zircons in the Tanshuling granodiorite

表2 檀树岭钼矿床锆石 LA-ICP-MS 微量元素数据 (S1)
Table 2 Zircon LA-ICP-MS trace element data of Tanshuling molybdenum deposit (S1)

点号	含量/ 10^{-6}											
	Ti	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy
s1-1	4.30	776	3.89	0.18	33.1	0.07	1.56	2.48	0.78	12.7	4.07	59.0
s1-2	51.00	1 005	3.71	10.30	45.7	2.96	10.70	4.53	0.95	16.6	6.26	75.4
s1-3	7.49	1 199	5.17	0.03	36.5	0.03	1.56	2.65	1.17	18.8	6.71	99.2
s1-4	10.10	1 087	7.31	10.20	65.0	2.56	8.41	3.99	1.03	17.4	5.91	84.5
s1-5	1.67	862	4.47	0.01	34.4	0.01	0.27	1.60	0.62	12.0	4.42	61.9
s1-6	6.88	1 056	2.56	1.55	25.6	0.40	2.51	3.69	1.22	18.7	6.62	87.2
s1-7	6.59	1 367	6.43	5.57	40.4	1.09	5.78	5.16	1.12	20.8	7.96	105.0
s1-8	8.06	1 121	4.32	9.48	53.7	3.12	13.90	6.74	1.24	16.9	6.51	83.5
s1-9	2.89	838	3.55	0.60	32.2	0.16	1.54	2.16	0.66	13.2	4.67	62.0
s1-10	2.86	775	3.98	0.44	33.7	0.11	1.28	1.45	0.56	10.8	3.67	51.5
s1-11	4.78	1 374	9.94	0.47	44.5	0.27	1.87	2.67	1.04	20.4	8.35	102.0
s1-12	0.62	868	4.45	0.13	25.0	0.05	0.92	2.13	0.75	10.8	4.57	59.7
s1-13	6.94	901	3.97	8.11	43.8	2.53	11.70	4.65	0.99	15.3	4.98	62.5
s1-14	5.15	1 119	2.53	0.04	24.8	0.06	1.78	4.15	1.15	19.0	6.76	81.3
s1-15	4.14	1314	5.27	0.69	37.3	0.29	2.14	3.27	1.20	19.2	8.33	98.9
s1-16	2.99	1 324	3.84	4.40	38.0	1.13	6.21	5.67	1.59	25.3	8.87	99.5
s1-17	11.70	1 299	3.40	0.28	31.8	0.23	2.83	5.26	1.61	27.3	9.68	107.0

点号	含量/ 10^{-6}									L/H	δEu	δCe
	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	ΣREE			
s1-1	22.7	120	29.6	316	72.4	12 481	1.50	15.80	674	0.06	0.34	71.36
s1-2	30.8	152	37.1	379	81.0	11 904	1.78	10.90	854	0.10	0.30	1.98
s1-3	36.7	187	45.6	476	99.8	12 540	2.18	14.30	1 012	0.04	0.37	264.72
s1-4	32.5	173	42.6	447	97.8	13 018	2.26	18.80	992	0.10	0.32	3.01
s1-5	25.8	136	33.0	364	84.2	12 703	1.94	17.90	758	0.05	0.31	747.38
s1-6	33.7	166	39.6	394	84.0	11 424	1.06	7.53	864	0.04	0.36	7.70
s1-7	43.1	218	52.0	524	114.0	12 186	2.35	19.40	1 145	0.05	0.29	3.74
s1-8	35.3	179	42.8	440	92.9	12 808	1.96	12.20	984	0.10	0.34	2.38
s1-9	26.0	135	30.9	317	71.1	12 671	2.21	12.30	698	0.06	0.29	24.69
s1-10	22.2	121	30.8	332	77.3	12 771	1.72	13.20	687	0.06	0.31	36.17
s1-11	42.3	222	52.3	530	117.0	12 751	3.90	25.20	1 145	0.05	0.31	29.64
s1-12	25.4	137	34.6	360	78.0	13 121	1.95	11.50	740	0.04	0.39	74.99
s1-13	27.4	149	34.2	368	77.4	12 930	2.29	11.80	810	0.10	0.32	2.32
s1-14	33.5	176	39.9	398	86.8	11 985	1.66	8.54	873	0.04	0.33	99.32
s1-15	39.6	213	48.4	487	103.0	12 139	1.61	16.40	1062	0.04	0.36	20.18
s1-16	40.8	216	50.4	507	107.0	12 674	1.44	13.20	1 112	0.05	0.34	4.03
s1-17	40.8	201	41.8	416	86.8	12 865	1.23	12.60	972	0.05	0.33	28.34

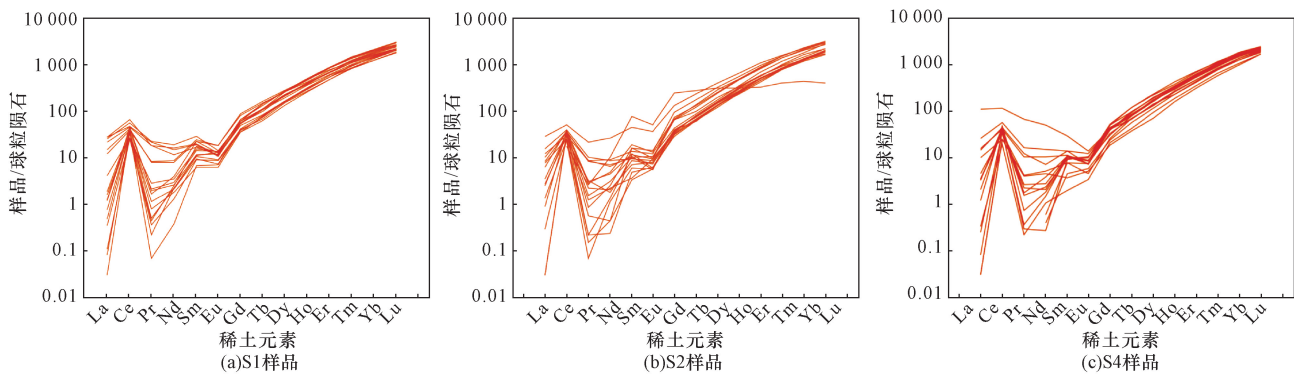
锆石 U 和 Th 质量分数变化较大, 锆石 U、Th 含量及 Th/U 比值可以作为不同成因类型锆石的判断依据, 岩浆成因锆石的 Th/U 值大于 0.4^[30,33]。对 3 组新鲜花岗岩样品进行了锆石 U-Pb 同位素定年 (表 5、表 6、图 6), 去除部分异常数据, 并保留误差范围内分析得到的 53 个有效测试数据, 绘制成等时线年龄图和谐和年龄图, 基本皆分布于谐和曲线及其附近, S1 样品中选取 17 颗锆石进行 U-Pb 同位素分析, 其 Th/U 值为 0.46 ~ 3.99, 加权平均年龄为 (140.4 ± 0.62) Ma (MSWD = 2.84); S2 样品中选取 18 颗锆石进行 U-Pb 同位素分析, 其 Th/U 值为

0.44 ~ 0.85, 加权平均年龄为 (139.9 ± 0.66) Ma (MSWD = 1.95); S4 样品中选取 18 颗锆石进行 U-Pb 同位素分析, 其 Th/U 值为 0.63 ~ 1.92, 加权平均年龄为 (139.6 ± 0.63) Ma (MSWD = 1.63), 研究表明, REE-LREE 和 REE- δEu 图解可用来进一步区分岩浆锆石和热液锆石^[33], 在 REE-LREE 图解 [图 7(a)] 和 REE- δEu 图解中 [图 7(b)], 样品全部落入岩浆锆石区域。因此样品锆石都属于典型的岩浆成因锆石, 其年龄能够代表岩浆形成的年龄, 表明该岩体形成于燕山晚期, 代表其岩浆活动处于早白垩世。

表 3 檀树岭钼矿床锆石 LA-ICP-MS 微量元素数据 (S2)
Table 3 Zircon LA-ICP-MS trace element data of Tanshuling molybdenum deposit (S2)

点号	含量/ 10^{-6}											
	Ti	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy
s2-1	0.98	762	4.19	1.03	27.8	0.31	1.45	1.62	0.70	12.4	4.47	57.6
s2-5	16.00	879	2.97	—	17.3	0.36	7.48	18.00	4.54	76.0	16.20	121.0
s2-7	3.96	692	2.36	4.44	28.5	1.19	4.62	2.49	0.49	12.5	3.61	53.9
s2-8	12.40	978	2.31	3.07	34.0	1.19	6.54	3.23	1.08	20.5	5.81	79.1
s2-9	—	741	4.17	—	22.9	0.02	0.31	0.78	0.50	9.6	3.85	51.2
s2-11	1.85	1 401	9.06	0.01	32.0	0.08	0.31	3.84	1.23	21.4	8.04	111.0
s2-12	6.67	916	4.75	0.51	23.6	0.17	1.57	0.86	0.82	11.2	4.71	64.3
s2-15	2.79	1 400	15.10	0.33	36.6	0.12	1.77	3.71	0.85	23.3	7.84	101.0
s2-16	4.25	1 304	7.86	0.01	33.8	0.03	0.99	2.73	0.83	20.6	7.21	96.3
s2-18	8.84	1 610	3.71	0.93	33.5	0.39	3.47	4.50	1.14	30.1	10.40	125.0
s2-19	6.52	1 765	3.09	10.60	50.8	3.02	19.40	10.60	3.22	41.6	14.10	154.0
s2-20	0.59	713	2.62	—	21.7	0.01	0.81	1.39	0.50	10.2	3.70	51.3
s2-21	0.95	772	2.98	2.82	25.2	0.45	1.28	2.04	0.64	10.4	4.04	52.4
s2-22	2.99	832	4.58	5.81	38.2	1.45	6.13	2.19	0.77	10.9	4.84	61.1
s2-23	3.16	884	5.30	3.88	35.2	1.14	5.03	2.27	0.64	11.6	4.83	63.9
s2-24	11.30	1 093	5.52	1.31	32.7	0.21	2.26	2.36	0.95	13.6	5.22	69.1
s2-25	2.79	705	3.68	0.11	23.7	0.03	0.17	1.12	0.54	8.9	3.65	46.4
s2-26	4.21	799	4.05	2.35	37.6	0.43	3.19	2.88	0.53	11.9	4.53	59.7

点号	含量/ 10^{-6}									L/H	δ Eu	δ Ce
	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Σ REE			
s2-1	23.4	125.0	29.3	325	66.7	13 202	2.27	10.10	677	0.05	0.34	11.79
s2-5	27.6	83.8	14.4	110	15.5	10 687	0.45	4.04	512	0.10	0.32	—
s2-7	20.9	105.0	27.9	304	64.0	12 988	1.31	8.33	634	0.07	0.22	2.95
s2-8	29.7	148.0	33.5	332	66.0	11 319	1.00	5.05	763	0.07	0.31	4.30
s2-9	21.9	115.0	29.8	337	73.8	13 126	1.73	10.20	667	0.04	0.33	—
s2-11	43.7	225.0	55.1	584	122.0	12 179	2.20	13.80	1 208	0.03	0.33	115.28
s2-12	28.2	143.0	37.2	411	86.5	12 296	1.58	8.50	814	0.04	0.47	19.36
s2-15	42.3	214.0	50.4	516	103.0	12 167	2.67	16.50	1 101	0.04	0.21	44.48
s2-16	41.2	211.0	51.2	543	115.0	12 259	2.58	12.80	1 125	0.04	0.24	301.83
s2-18	48.9	243.0	56.1	571	118.0	11 929	2.06	17.40	1 246	0.04	0.22	13.46
s2-19	57.4	276.0	58.2	565	114.0	11 399	1.23	10.70	1 378	0.08	0.41	2.15
s2-20	22.1	116.0	28.6	308	74.0	13 553	1.54	10.00	639	0.04	0.29	—
s2-21	23.0	126.0	31.1	342	78.8	13 395	1.29	12.30	700	0.05	0.34	4.90
s2-22	26.0	131.0	31.1	332	73.3	12 871	2.11	10.30	724	0.08	0.39	3.10
s2-23	27.1	148.0	35.0	363	84.1	12 393	1.90	10.30	786	0.07	0.31	4.00
s2-24	30.4	177.0	42.3	461	109.0	11 560	1.67	13.20	948	0.04	0.40	13.70
s2-25	21.3	118.0	29.1	325	79.5	12 918	1.77	9.80	657	0.04	0.37	98.28
s2-26	23.9	134.0	30.6	326	76.8	12 816	1.89	14.00	714	0.07	0.24	8.43



稀土元素标准值参考文献[32]

图 5 檀树岭钼矿床锆石稀土元素球粒陨石标准化图解

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns trace element spider diagrams of zircons in the Tanshuling molybdenum deposit

表4 檀树岭钼矿床锆石 LA-ICP-MS 微量元素数据 (S4)
Table 4 Zircon LA-ICP-MS trace element data of Tanshuling molybdenum deposit (S4)

点号	含量/ 10^{-6}											
	Ti	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy
4-1	—	802	4.66	10.70	45.7	4.27	14.70	4.20	0.88	13.70	4.05	54.0
4-2	—	876	5.31	0.05	32.9	0.02	1.15	1.77	0.53	13.50	4.37	61.2
4-3	1.54	689	3.27	0.87	28.2	0.28	1.14	1.31	0.49	11.70	3.28	46.2
4-4	4.03	1 139	6.19	0.01	39.1	0.03	0.45	1.50	1.37	18.90	6.66	80.4
4-5	10.40	1 342	3.52	0.08	28.3	0.25	2.80	4.08	1.12	26.90	8.34	104.0
4-6	6.41	922	4.53	0.02	29.2	0.05	0.26	3.29	0.77	16.20	5.83	73.7
4-7	0.86	1 069	2.58	0.04	25.9	0.16	2.12	4.47	1.55	21.80	7.05	85.7
4-9	3.18	868	3.40	3.08	28.2	0.98	4.08	2.42	0.99	12.60	4.47	63.9
4-10	7.24	690	2.76	4.06	30.9	0.93	3.99	2.08	0.49	13.00	4.40	51.2
4-12	5.19	1 277	5.12	1.42	37.9	0.54	3.67	3.22	1.07	17.60	7.31	90.4
4-13	2.88	964	5.61	3.01	47.5	0.43	2.44	2.47	0.77	14.70	5.79	69.7
4-14	5.56	1 160	6.92	0.35	47.2	0.14	1.30	3.06	0.74	18.40	6.67	81.4
4-15	1.65	645	2.92	0.01	20.7	—	0.33	1.18	0.52	9.66	3.71	46.6
4-16	5.72	963	5.01	5.43	46.2	1.32	5.58	3.10	0.93	16.20	5.88	69.8
4-17	6.46	1 322	11.30	0.05	39.3	0.07	0.90	2.36	0.93	17.00	6.80	85.0
4-18	217.00	944	3.64	3.11	32.0	1.40	4.07	3.95	1.19	19.30	5.84	74.9
4-19	4.87	947	5.27	—	34.1	0.00	0.47	2.01	0.71	16.30	5.69	64.6
4-20	5.64	902	5.67	0.67	36.6	0.22	1.44	1.82	0.63	14.10	4.70	56.1

点号	含量/ 10^{-6}									L/H	δ Eu	δ Ce
	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Σ REE			
4-1	23.9	133	33.6	369	84.4	13 786	1.99	13.00	796	0.11	0.32	1.64
4-2	26.5	140	35.2	391	87.0	13 772	2.42	14.60	795	0.05	0.24	251.30
4-3	21.1	119	27.7	314	73.5	14 227	1.89	13.50	648	0.05	0.26	13.74
4-4	35.2	189	45.8	502	107.0	13 242	2.34	16.80	1 028	0.04	0.46	349.23
4-5	44.8	222	50.9	511	108.0	11 495	1.48	9.90	1 113	0.03	0.24	30.50
4-6	29.7	152	35.0	396	82.2	13 168	1.99	10.60	824	0.04	0.26	152.77
4-7	32.6	179	40.1	416	91.1	13 565	1.28	10.50	907	0.04	0.39	44.62
4-9	26.5	148	34.9	384	87.0	13 474	1.53	10.10	801	0.05	0.44	3.90
4-10	21.8	108	27.4	278	59.3	12 844	1.18	8.40	606	0.08	0.22	3.71
4-12	38.0	211	47.6	522	113.0	12 276	1.76	18.20	1 094	0.05	0.35	10.48
4-13	29.2	155	36.0	378	87.2	13 113	1.94	21.80	832	0.07	0.30	8.94
4-14	36.2	181	40.4	441	101.0	12 473	2.14	17.70	959	0.06	0.23	51.59
4-15	20.4	108	26.0	276	60.1	12 788	1.53	9.10	573	0.04	0.33	—
4-16	30.5	152	38.0	397	90.9	12 497	1.82	15.20	862	0.08	0.32	4.06
4-17	39.2	212	52.0	555	121.0	13 588	3.23	21.50	1 131	0.04	0.33	132.83
4-18	30.8	150	33.1	340	72.0	10 967	1.38	7.00	772	0.06	0.34	3.71
4-19	29.1	150	35.8	386	85.1	12 482	2.71	15.50	809	0.05	0.26	—
4-20	27.5	143	34.6	387	86.6	13 084	2.21	14.60	795	0.05	0.27	22.97

3.3 全岩地球化学

根据檀树岭花岗岩闪长岩的地球化学元素分析结果中(表7),烧矢量(LOI)为1.12%~2.47%,表明样品并未经历强烈的蚀变。5件样品(H1~H5)的SiO₂含量为64.50%~66.80%,平均值为65.54%;K₂O含量为3.92%~4.86%,平均值为4.25%;Al₂O₃含量为14.40%~16.00%,平均值为15.40%;Fe₂O₃含量为2.74%~4.03%,平均值为3.51%;Na₂O含量为

2.90%~3.81%,平均值为3.39%;CaO含量为1.56%~2.8%,平均值为2.36%;MgO含量为1.24%~1.53%,平均值为1.40%;FeO含量为1.29%~1.99%,平均值为1.64%;TiO₂含量为0.43%~0.58%,平均值为0.51%;P₂O₅含量为0.16%~0.19%,平均值为0.17%;MnO平均值为0.02%;碱铝比A/NK为1.37~1.59,平均值为1.52;铝过饱和度A/CNK为1.03~1.10,平均值为1.06。

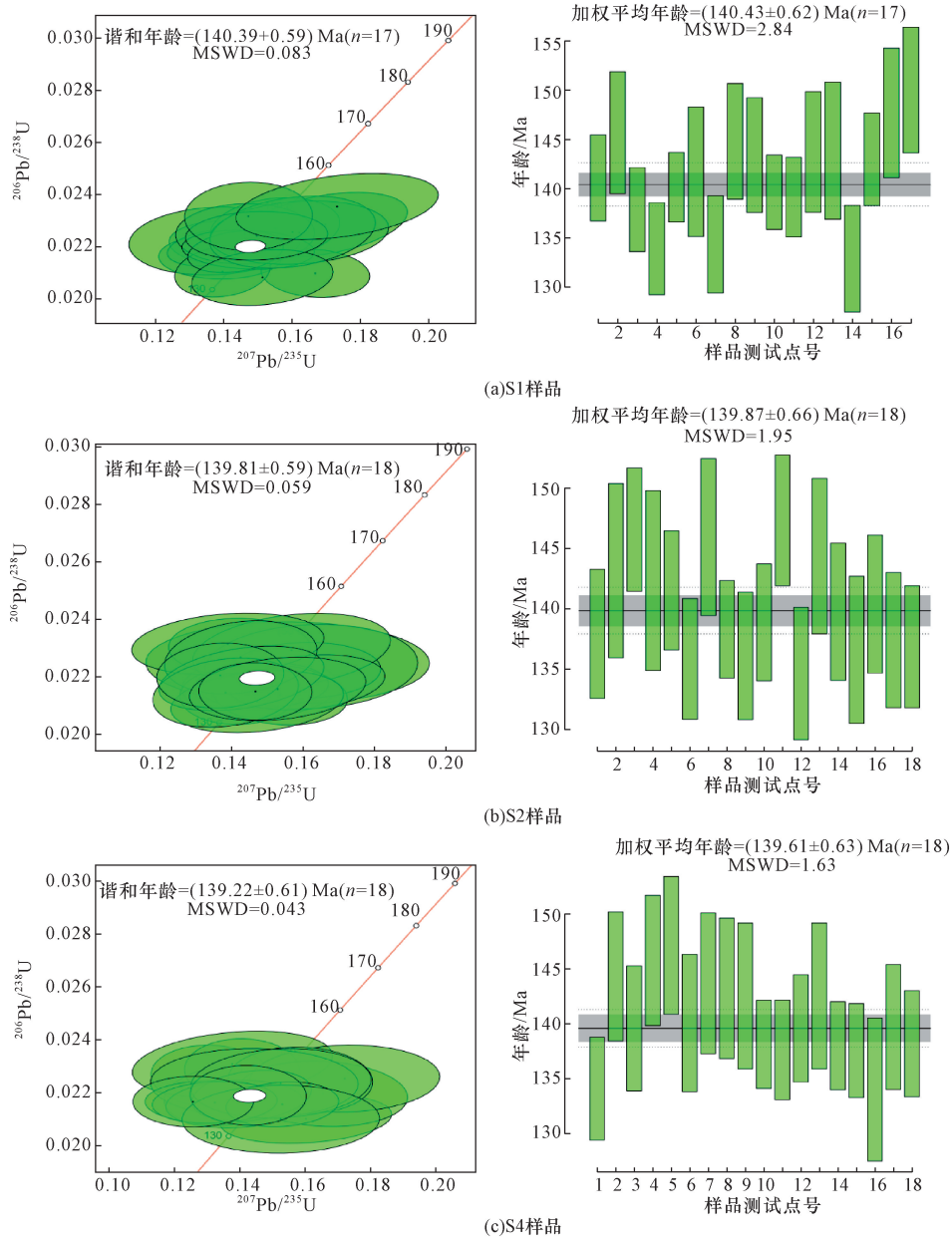


图6 檀树岭钼矿床锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U-²⁰⁷Pb/²³⁵U 谐和图

Fig. 6 Zircon ²⁰⁶Pb/²³⁸U-²⁰⁷Pb/²³⁵U concordia diagrams of Tanshuling molybdenum deposit

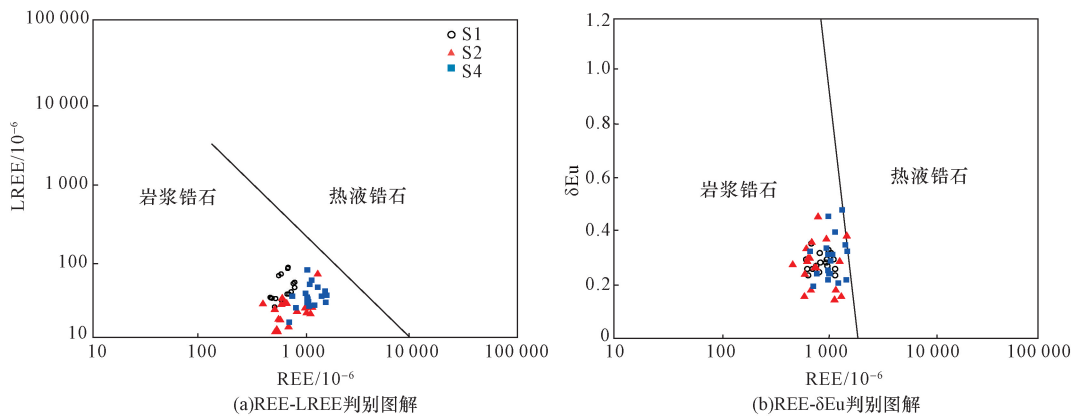


图7 锆石成因判别图解^[33]

Fig. 7 Zircon genetic identification diagram^[33]

表5 檀树岭钼矿床锆石 LA-ICP-MS 定年数据 (S1)

Table 5 Zircon LA-ICP-MS dating data of Tanshuling molybdenum deposit (S1)

测点号	U/ 10^{-6}	Th/ 10^{-6}	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
			比值	$1\sigma/\%$	比值	$1\sigma/\%$	比值	$1\sigma/\%$	年龄/Ma	2σ	年龄/Ma	2σ
s1-1	773	5 082.7	0.049 51	5.82	0.141 6	5.1	0.022 13	1.6	139	15	141	4
s1-2	436	7 068.5	0.053 48	5.46	0.169 7	5.8	0.022 86	2.2	157	17	146	6
s1-3	698	2 784.1	0.046 83	5.41	0.138 9	5.3	0.021 62	1.6	131	13	139	5
s1-4	976	1 640.1	0.058 48	4.17	0.166 8	3.9	0.020 99	1.8	156	11	134	5
s1-5	889	870.5	0.044 87	3.64	0.136 8	4.0	0.021 98	1.3	130	10	140	4
s1-6	382	375.9	0.047 81	8.07	0.137 4	7.5	0.022 23	2.4	128	18	142	7
s1-7	1 065	781.1	0.049 33	4.01	0.139 6	4.1	0.021 06	1.9	134	11	134	5
s1-8	634	458.2	0.049 90	4.99	0.155 0	5.0	0.022 72	2.1	145	14	145	6
s1-9	669	583.5	0.047 93	5.83	0.146 2	5.7	0.022 50	2.1	137	15	143	6
s1-10	712	493.1	0.049 26	5.59	0.147 1	5.4	0.021 90	1.4	138	14	140	4
s1-11	1 354	991.4	0.047 67	3.80	0.143 4	4.0	0.021 82	1.5	137	11	139	4
s1-12	612	411.6	0.051 64	6.23	0.162 1	6.6	0.022 55	2.2	150	19	144	6
s1-13	682	316.0	0.051 69	6.02	0.160 1	6.2	0.022 57	2.5	149	17	144	7
s1-14	514	412.0	0.052 61	5.41	0.151 3	5.6	0.020 83	2.1	141	15	133	6
s1-15	866	908.5	0.047 18	5.44	0.149 6	5.7	0.022 43	1.7	140	15	143	5
s1-16	716	701.2	0.046 60	5.15	0.147 2	5.2	0.023 18	2.3	138	13	148	7
s1-17	505	596.8	0.051 32	6.28	0.173 2	7.0	0.023 55	2.2	159	21	150	7

注: 1σ 表示测试信号的相对统计误差; 2σ 表示单点的测试误差。

表6 檀树岭钼矿床锆石 LA-ICP-MS 定年数据 (S2 + S4)

Table 6 Zircon LA-ICP-MS dating data of Tanshuling molybdenum deposit (S2 + S4)

测点号	U/ 10^{-6}	Th/ 10^{-6}	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
			比值	$1\sigma/\%$	比值	$1\sigma/\%$	比值	$1\sigma/\%$	年龄/Ma	2σ	年龄/Ma	2σ
s2-1	297	148.9	0.050 74	6.06	0.147 9	6.0	0.021 63	2.0	141	16	138	6
s2-5	96	81.9	0.054 62	10.83	0.155 7	10.4	0.022 46	2.6	141	28	143	7
s2-7	236	120.3	0.046 24	6.14	0.142 3	5.7	0.023 00	1.8	137	16	147	5
s2-8	136	98.9	0.055 89	7.74	0.162 3	7.5	0.022 33	2.7	149	21	142	8
s2-9	317	140.4	0.051 98	5.62	0.160 5	5.4	0.022 20	1.8	149	15	142	5
s2-11	456	227.0	0.048 34	4.96	0.141 5	4.6	0.021 30	1.9	133	11	136	5
s2-12	262	127.6	0.048 80	6.94	0.156 8	7.2	0.022 90	2.3	145	20	146	6
s2-15	507	371.1	0.049 35	5.06	0.148 6	5.1	0.021 69	1.5	139	13	138	4
s2-16	442	267.5	0.051 50	5.42	0.153 6	5.0	0.021 34	2.0	146	14	136	5
s2-18	566	434.0	0.054 67	5.50	0.161 2	5.5	0.021 78	1.8	150	15	139	5
s2-19	331	253.8	0.043 46	7.60	0.139 0	7.9	0.023 12	1.9	129	19	147	6
s2-20	617	449.3	0.051 95	6.62	0.147 2	6.7	0.021 11	2.1	137	17	135	6
s2-21	676	393.3	0.044 65	5.81	0.142 6	6.1	0.022 65	2.3	134	15	144	7
s2-22	653	441.6	0.046 96	6.12	0.142 8	6.6	0.021 92	2.1	134	16	140	6
s2-23	691	502.9	0.046 85	5.73	0.138 4	6.0	0.021 42	2.3	130	15	137	6
s2-24	781	619.1	0.046 09	5.94	0.136 9	5.3	0.022 02	2.1	129	13	140	6
s2-25	633	425.9	0.052 25	6.47	0.152 9	6.6	0.021 55	2.1	142	17	137	6
s2-26	857	722.0	0.050 75	4.77	0.146 7	4.4	0.021 46	1.9	138	11	137	5
s4-1	584	1 190.1	0.055 43	6.65	0.160 2	6.7	0.021 02	1.8	148	18	134	5
s4-2	657	2 755.8	0.044 40	6.61	0.131 1	5.7	0.022 64	2.1	124	13	144	6
s4-3	597	4 889.6	0.045 44	5.60	0.135 4	5.6	0.021 89	2.1	128	14	140	6
s4-4	773	1 489.9	0.044 42	5.07	0.140 6	5.1	0.022 87	2.1	132	13	146	6
s4-5	505	750.0	0.042 95	8.62	0.137 7	9.1	0.023 09	2.2	128	22	147	6
s4-6	549	382.6	0.055 70	7.06	0.165 4	6.4	0.021 97	2.3	153	18	140	6
s4-7	566	436.7	0.055 59	7.31	0.172 1	6.9	0.022 54	2.3	158	20	144	6
s4-9	530	291.4	0.049 93	5.71	0.158 5	5.7	0.022 47	2.3	148	16	145	7
s4-10	453	288.9	0.046 43	9.48	0.144 4	9.0	0.022 36	2.4	133	23	143	7
s4-12	1 180	1 063.9	0.042 99	6.43	0.131 2	6.3	0.021 66	1.5	124	15	138	4
s4-13	1 176	1 104.1	0.045 55	6.24	0.138 3	6.2	0.021 58	1.7	130	15	138	5
s4-14	946	721.6	0.046 52	5.14	0.143 6	5.2	0.021 89	1.8	135	13	140	5
s4-15	458	324.2	0.049 29	7.37	0.152 5	7.4	0.022 36	2.4	141	20	143	7
s4-16	843	666.9	0.043 07	5.48	0.132 3	5.9	0.021 64	1.5	125	14	138	4
s4-17	1 151	733.6	0.051 40	4.68	0.153 0	4.6	0.021 57	1.6	143	12	138	4
s4-18	377	360.0	0.050 47	7.98	0.152 5	8.1	0.021 01	2.5	145	23	134	7
s4-19	830	646.4	0.048 20	5.35	0.142 5	5.1	0.021 91	2.1	134	13	140	6
s4-20	782	551.9	0.043 27	6.42	0.125 7	6.0	0.021 67	1.8	119	13	138	5

注: 1σ 表示测试信号的相对统计误差; 2σ 表示单点的测试误差。

表 7 檀树岭花岗闪长岩主量元素和微量元素分析结果

Table 7 Analytical results of main elements and trace elements in the Tanshuling granodiorite

样品编号	H1	H2	H3	H4	H5	
主量元素/%	Al ₂ O ₃	14.9	14.4	15.8	16.0	15.9
	CaO	2.69	1.56	2.01	2.80	2.75
	Fe ₂ O ₃	4.03	3.71	2.74	3.33	3.75
	K ₂ O	4.26	3.92	4.86	4.25	3.99
	MgO	1.53	1.24	1.32	1.38	1.53
	MnO	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	Na ₂ O	2.90	3.81	3.27	3.53	3.43
	P ₂ O ₅	0.18	0.19	0.16	0.18	0.17
	SiO ₂	64.50	66.30	66.80	65.00	65.10
	TiO ₂	0.52	0.49	0.43	0.51	0.58
	FeO	1.74	1.29	1.41	1.80	1.99
	烧失量	1.98	2.47	1.79	1.29	1.12
	总量	99.25	99.40	100.62	100.09	100.33
微量元素/10 ⁻⁶	Y	13.4	14.7	13.7	16.7	16.9
	La	29.9	31.2	28.4	26.8	27.9
	Ce	58.3	61.9	56.0	56.7	60.7
	Pr	7.59	7.64	6.76	7.65	7.84
	Nd	29.2	29.3	25.7	29.1	30.5
	Sm	5.64	5.15	4.66	5.60	5.91
	Eu	1.83	1.80	1.58	1.68	1.70
	Gd	5.76	5.47	4.91	5.76	6.07
	Tb	1.49	1.38	1.27	1.50	1.58
	Dy	3.18	3.00	2.75	3.48	3.70
	Ho	1.25	1.11	1.07	1.29	1.36
	Er	2.83	3.17	3.00	3.65	3.80
	Tm	0.49	0.45	0.42	0.50	0.54
	Yb	2.84	2.85	2.79	3.39	3.46
	Lu	0.51	0.42	0.44	0.48	0.52
	V	62.7	61.7	62.4	71.5	74.1
	Cu	213	2186	381	387	183
	Pb	12.7	22.0	15.1	11.7	11.3
	Zn	35.6	502	66.4	36.9	39.5
	Ni	7.49	7.84	6.70	7.19	7.97
Co	9.33	10.8	5.87	7.20	7.45	
W	18.5	44.4	20.3	17.5	26.1	
Mo	86.4	79.2	27.0	44.6	12.5	
Li	32.6	16.3	42.5	34.1	39.4	
Sr	337	277	361	382	378	
Rb	134	118	143	126	116	
指标分析	A/NK	1.59	1.39	1.48	1.54	1.59
	A/CNK	1.04	1.08	1.10	1.03	1.06
	ΣREE/10 ⁻⁶	150	154	139	147	154
	LREE/10 ⁻⁶	132	136	122	129	134
	HREE/10 ⁻⁶	18.2	17.7	16.5	19.9	20.4
	LREE/HREE	7.24	7.70	7.42	6.37	6.58
	(La/Yb) _N	7.15	7.44	6.91	5.37	5.48
	δEu	0.96	1.04	0.96	0.90	0.86
	δCe	0.91	0.95	0.95	0.95	0.98

根据檀树岭花岗闪长岩地球化学数据(表 7)及稀土元素球粒陨石标准化图解[图 8(a)]可知含有较低的稀土含量(ΣREE) $139.5 \times 10^{-6} \sim 154.9 \times 10^{-6}$, 轻稀土与重稀土比值(LREE/HREE) 6.58 ~

7.70, 重稀土相对轻稀土亏损, 模式斜率(La/Yb)_N 为 5.48 ~ 7.44, 说明轻重稀土分馏明显, 表现出 δEu 的轻微负异常(0.86 ~ 1.04), 在稀土元素球粒陨石标准化图解[图 8(a)]呈右倾。微量元素原始地幔标

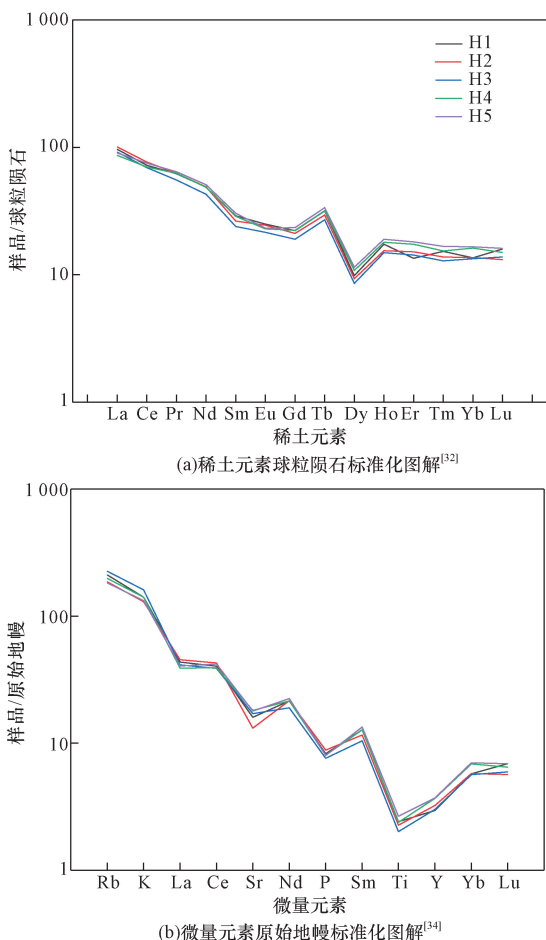


图8 檀树岭花岗闪长岩稀土元素球粒陨石标准化图解和微量元素原始地幔标准化图解

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns and Primitive Mantle-normalized trace element spider diagrams

化图解[图8(b)]中,表现出富集Rb、K、Yb等元素,强烈的Sr、Ti、P元素亏损,Sr负异常表明受长石结晶的影响,而Ti的负异常可能是钛铁矿的分离结晶造成的,在微量元素原始地幔标准化图解[图8(b)]呈右倾。

3.4 硫同位素

5件檀树岭辉钼矿样品 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ 的变化范围为5.0‰~6.3‰(表8),平均值为5.8‰,说明檀树岭钼矿床中的硫来源较为单一,通过硫同位素分析可初步判断成矿物质的来源并探讨矿床的成因。

表8 檀树岭钼矿硫同位素测试结果

Table 8 Sulfur isotope data of Tanshuling molybdenum deposit of granodiorites from Tanshuling

样品编号	检测方法	$\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}/\text{‰}$
M-1-2	直接燃烧法	5.8
M-2	直接燃烧法	5.0
M-3	直接燃烧法	6.0
M-6	直接燃烧法	5.9
M-8	直接燃烧法	6.3

4 讨论

4.1 成岩成矿时代

研究得到的檀树岭岩体花岗闪长岩锆石 U-Pb 模式年龄为 (140.43 ± 0.62) Ma、 (139.87 ± 0.66) Ma、 (139.61 ± 0.63) Ma,代表岩体的形成时代;檀树岭辉钼矿 Re-Os 模式年龄为 (133.09 ± 0.86) Ma,代表矿床的形成时代,均属于早白垩世,为燕山期早期的岩浆活动与成矿作用的产物。檀树岭含矿岩浆结晶时间与矿化时间之间相差约7 Ma,其含矿热液活动时间较长,正是这一长时间的热液活动,使得钼高度富集。中国东部燕山期钼成岩年龄集中在145~135 Ma,成矿年龄集中在145~130 Ma,总体时差为0~15 Ma,杜保峰等^[35]统计出钼的单体矿床成岩成矿时差集中在0~14 Ma,平均为4.1 Ma,其中斑岩型矿床(3.3 Ma)相比矽卡岩型(6.9 Ma)和石英脉型矿床(8.7 Ma)时差更短,也符合热液成矿中岩浆迁移的过程规律。7 Ma较一般斑岩型矿床成岩成矿时差(3.3 Ma)要长,但这个时间差仍符合一般矿床的演化特点,并未脱离钼矿成岩成矿时差的一般规律。如果时差小于14 Ma,可认为该岩体与成矿有直接联系;如果时差高出14 Ma,则认为该岩体与成矿无直接联系,可以理解为该岩体可能为矿床提供了成矿空间或者提供了少部分的物质来源。

综合前人同位素资料,142 Ma代表了江南隆起带上岩石年龄,指示了江南隆起带岩石圈拆沉的开始时间^[36]。檀树岭钼矿的岩浆结晶年龄约140 Ma,成矿年龄约为133 Ma,其处在江南成矿带的成岩成矿年龄范围内,而长江中下游成矿带(安徽段)Cu-Mo-W矿带成岩成矿年龄为139~152 Ma,多数都在143 Ma以上^[4,37-45],可初步判定檀树岭钼矿与江南成矿带成岩时间相吻合。经前人研究显示,檀树岭钼矿床周边的众多钼矿床成岩成矿年龄结果如表9所示,在此阶段,太平洋板块俯冲于亚欧大陆东南缘,该地处于俯冲带环境^[46-47],表明皖南地区存在大规模的岩浆与成矿作用,并且成岩与成矿年龄相对集中[邓家坞钼矿床成岩年龄 (772 ± 11) Ma和天井山金矿成岩年龄 (765.9 ± 3.7) Ma除外],因此檀树岭钼矿床成岩成矿时代代表了皖南地区重要的岩浆与成矿作用,为皖南地区一带找矿提供了重要线索,进一步说明江南皖南地区燕山期成矿作用值得重视。

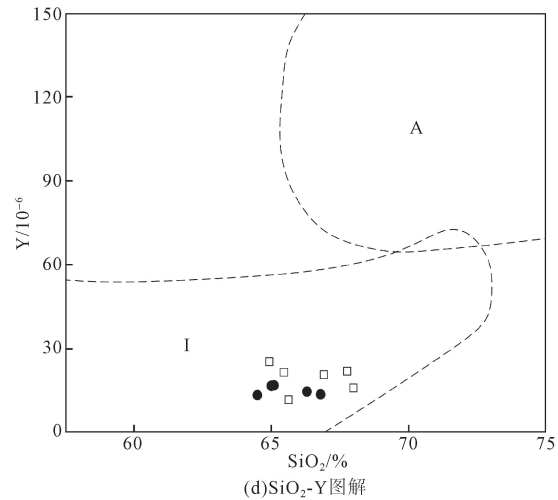
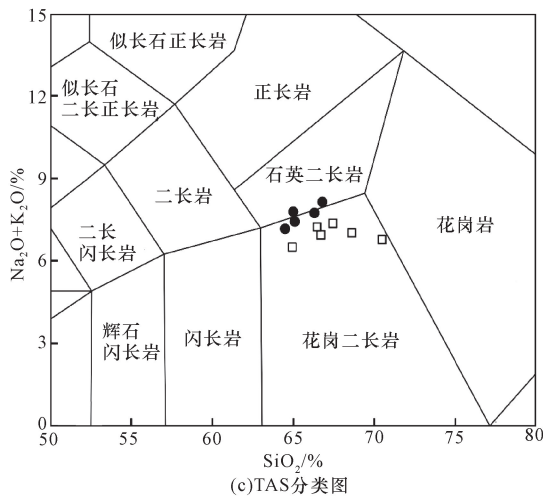
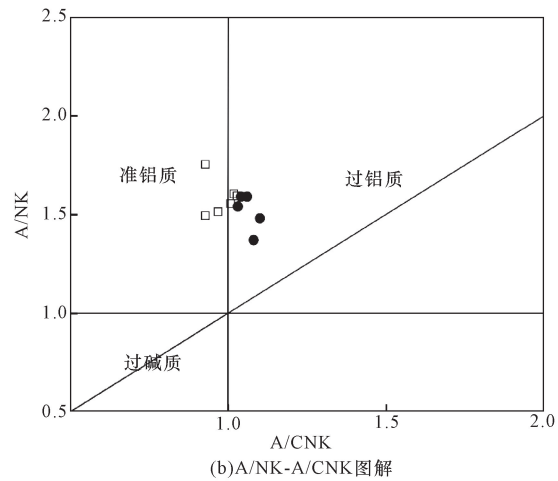
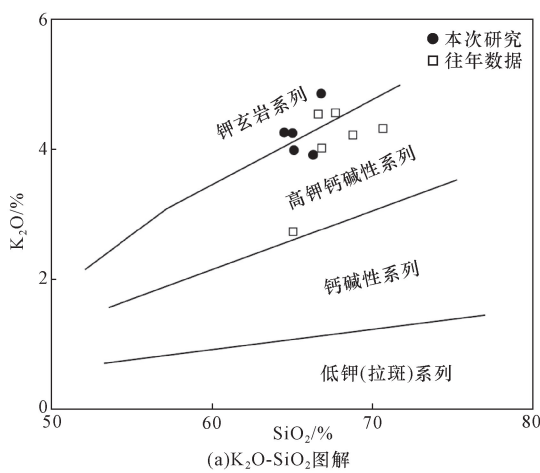
4.2 岩石类型

檀树岭花岗岩主量元素数据 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解[图9(a)]中样品主体落在高钾钙碱性系列与钾玄岩

表 9 檀树岭钼矿床周边矿床成岩成矿年龄统计

Table 9 Statistics on the diagenetic and metallogenic ages of deposits around the Tanshuling molybdenum deposit

地质情况	成岩年龄/Ma	成矿年龄/Ma	数据来源 ^[40-41, 48-58]
湛岭铍钼矿床	138.8 ± 0.6	137.3 ± 1.4	陈雪峰 ^[48]
大坞尖钼矿床	148.5 ± 2.1	144.4 ± 1.5	李斌等 ^[49]
东源钨钼矿床	146 ± 1	146.4 ± 2.3	王德恩等 ^[50]
邓家坞钼矿床	772 ± 11	141.4 ± 0.88	李双等 ^[51]
百丈岩钨钼矿床	130 ± 1.5	136.3 ± 2.6	秦燕等 ^[52]
绩溪太子山钼矿	133.9 ± 1.1	134.6 ± 1.1	万建军等 ^[53]
逍遥钨钼矿床	146.5 ± 1.9	148.7 ± 2.5	Su 等 ^[54]
桂林郑钨钼矿床	126.8 ± 1.4	128.7 ± 2.3	陈雪峰等 ^[40]
高家塆钨矿床	144.9 ± 1.2	146.1 ± 4.8	肖鑫等 ^[55]
竹溪岭钨钼矿床	143.3 ± 1.9	142.7 ± 2.1	黄马等 ^[56]
西坞口钨钼矿床	141.7 ± 1.0	—	陈雪峰等 ^[41]
狮金山铜钼矿床	145.7 ± 1.5	147.0 ± 1.8	徐晓春等 ^[57]
里东坑钼矿床	153.0 ± 0.9	144.9 ± 1.9	陈子微等 ^[58]



底图及往年数据参考文献[19, 59-61]

图 9 岩石判别图解

Fig. 9 Rock discriminant diagram

系列分界线处; A/NK-A/CNK 图解[图 9(b)]中指示为准铝质-弱过铝质岩石; 在花岗岩 TAS 分类图上[图 9(c)], 主要落于石英二长岩和花岗闪长岩二者分界线附近; SiO_2-Y 图解[图 9(d)]中指示为 I 型

花岗岩。可知檀树岭花岗岩属于准铝质-弱过铝质高钾钙碱性-钾玄岩系列的 I 型花岗岩。

4.3 物质来源

Re^{4+} 的离子半径与 Mo^{4+} 相近, Re 以类质同象

的形式替代 Mo 进入辉钼矿中,富集程度在辉钼矿中能达到最大,并且 Re 在地幔中的富集程度大于在地壳中的富集程度,因此辉钼矿中 Re 元素的含量可以指示相关矿床的成矿物质来源,从幔源 ($\times 10^{-4}$)到壳幔混源 ($\times 10^{-5}$)再到壳源 ($\times 10^{-6}$),辉钼矿中 Re 的质量分数呈数量级的降低^[62],檀树岭辉钼矿样品中 Re 质量分数为 $0.6 \times 10^{-6} \sim 91.4 \times 10^{-6}$ (表 1),说明其成矿物质来源于地壳物质的部分熔融,并且含有地幔物质的参与。

5 件檀树岭辉钼矿样品 $\delta^{34}S_{CDT}$ 的变化范围为 5.0‰~6.3‰(表 5),平均值为 5.8‰,说明檀树岭钼矿床中的硫来源较为单一,通过硫同位素分析可初步判断成矿物质的来源。花岗质岩浆硫 $\delta^{34}S_{CDT}$ 在 5‰~15‰,壳源岩浆 $\delta^{34}S_{CDT}$ 在 -5‰~7‰;幔源岩浆 $\delta^{34}S_{CDT}$ 为 $0 \pm 3‰$ ^[63]。通过硫同位素数据及变化范围(图 10),该 5 件辉钼矿样品处在花岗岩 (-5‰~11‰)和花岗质岩浆岩硫(3‰~15‰)范围内,并与壳源岩浆(-4‰~6‰)有部分交集,可知成矿物质部分来源于有地壳部分参与的花岗质熔体,说明檀树岭钼矿床与该地区的花岗斑岩具有密切的成因关系。地幔岩浆对地壳物质的混染,钙碱性系列花岗岩或多或少与地幔有直接关系,其程度取决于部分熔融的时间和作用过程,具有特有的地球化学特征。岩体中的微量元素(表 4),Sr、Ti 元素的亏损可能是岩浆活动中受到了斜长石、钛铁矿或金红石的结晶分异和源区残留造成的,LREE 型的低 Sr 高 Yb 的特征符合中生代的壳幔混合型^[64]; $\delta Eu-(La/Yb)_N$ 图解中(图 11),样品落入壳幔混合的区域。都说明地幔物质与地壳发生了部分熔融^[65]。

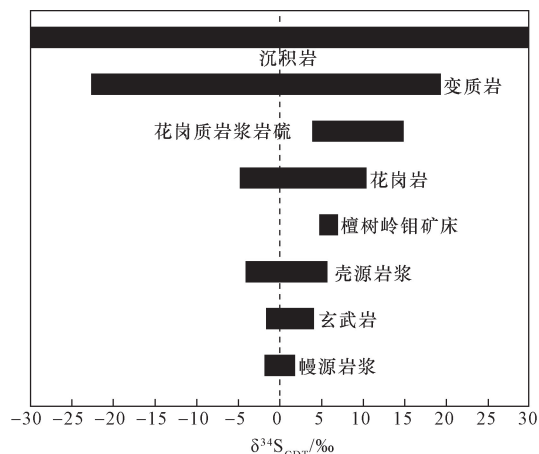


图 10 檀树岭钼矿床硫同位素变化范围
Fig. 10 Range of sulfur isotope changes in the Tanshuling molybdenum deposit

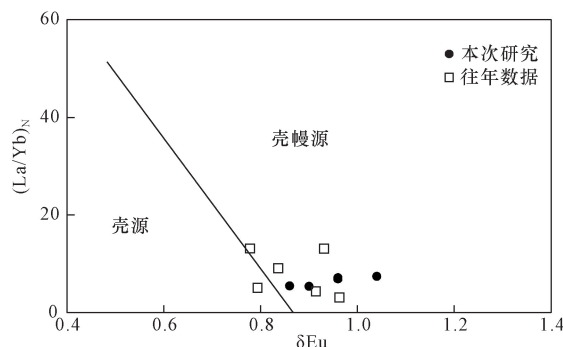


图 11 岩石成岩源区 $\delta Eu-(La/Yb)_N$ 图解^[19]
Fig. 11 Rock source area $\delta Eu-(La/Yb)_N$ diagram^[19]

4.4 构造意义

如图 12 所示,从燕山期岩体构造事件及其对应年龄来看,江南隆起带燕山期的主要岩浆活动正处

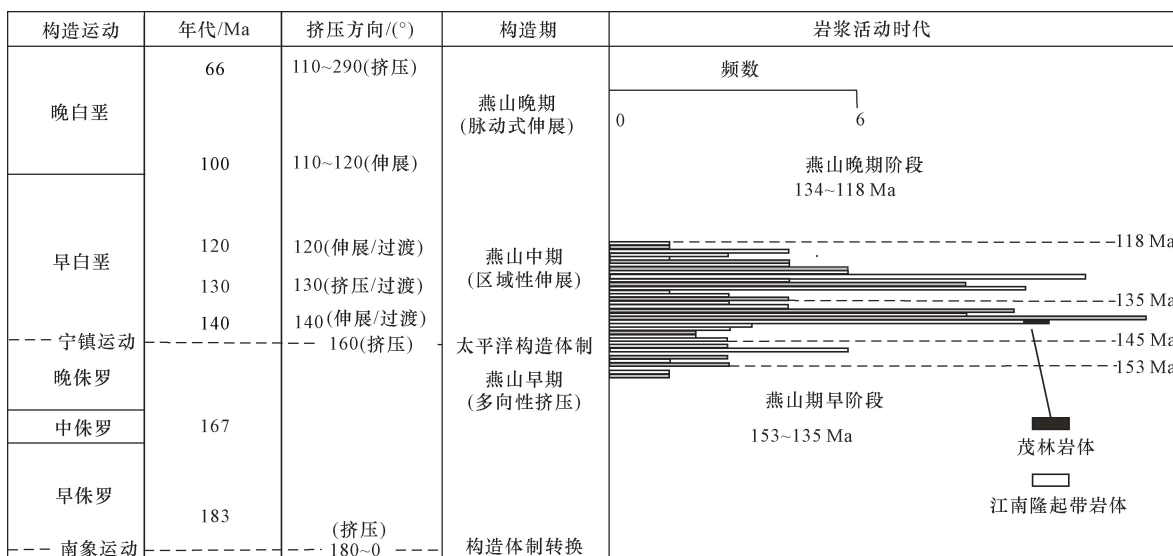


图 12 江南隆起带燕山期岩体年龄频谱图及对应的地质构造事件^[44,46]

Fig. 12 Age spectrum diagram of Yanshanian pluton and corresponding geological tectonic events in Jiangnan uplift^[44,46]

于太平洋构造体制,太平洋板块运动挤压与伸展的相互交替使该地区发生了大规模的岩浆与成矿作用,处在了岩浆活动的高峰期,是早白垩时期由伸展(120 Ma)到挤压(130 Ma)再到伸展(140 Ma)背景的过渡阶段,具有沿江与皖南地区岩浆岩混合类型的过渡特征。燕山期的岩浆活动主要集中在125~140 Ma^[66-67],江南隆起带(安徽段)在146~136 Ma 构造背景由挤压向伸展背景过渡,产生大量逆掩断层和推覆构造;在135 Ma 之后以伸展背景为主,并存在着少数的挤压背景^[11,44,68-71],檀树岭钼矿床所代表的I型花岗岩(140 Ma)即形成于挤压向伸展的过渡背景中。随着太平洋板块的向西俯冲的程度增加,沿陆内俯冲带发生了大量的岩浆活动,驱赶软流圈沿构造薄弱带上涌,地幔侵蚀减薄,致使地幔物质侵入至下地壳部位并发生部分熔融,所产生的壳幔混合岩浆沿着一系列断裂通道侵入,形成了花岗闪长岩、二长花岗岩为主的典型I型花岗岩。

5 结论

(1)檀树岭辉钼矿 Re-Os 模式年龄为(133.1 ± 0.86) Ma,代表矿床的形成时代;檀树岭岩体花岗闪长岩锆石 U-Pb 模式年龄为(140.4 ± 0.62) Ma、(139.9 ± 0.66) Ma、(139.6 ± 0.63) Ma,代表岩体的形成时代,与江南成矿带成岩成矿时间吻合,为中国东部燕山早期岩石圈活化和早白垩世成岩成矿大爆发的一部分。研究结果为后续在江南成矿带,尤其是皖南和赣北地区寻找新的 Mo-W 金属矿产资源提供了新的启示。

(2)地球化学特征表明檀树岭花岗岩富集大离子亲石元素,轻重稀土分馏明显,重稀土相对轻稀土亏损, Eu 负异常,属于准铝质-弱过铝质高钾钙碱性-钾玄岩系列的I型花岗岩。通过辉钼矿样品中 Re 质量分数 $0.6 \times 10^{-6} \sim 91.4 \times 10^{-6}$ 和 $\delta\text{Eu}-(\text{La}/\text{Yb})_N$ 图解,说明其成矿物质来源可能具有壳幔混合源的特点。通过硫同位素示踪得知 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值为 5.8‰,说明硫来源较为单一,其成矿物质来源于花岗质的岩浆岩。

(3)檀树岭钼矿床形成时正处于太平洋构造体制下的挤压向伸展背景转换的构造环境,并形成了典型的I型花岗岩。

参 考 文 献

[1] 毛景文,陈懋弘,袁顺达,等. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律[J]. 地质学报, 2011, 85(5): 636-658.
Mao Jingwen, Chen Maohong, Yuan Shunda, et al. Geological characteristics of the qinhang (or Shihang) metallogenic belt in

South China and spatial-temporal distribution regularity of mineral deposits [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(5): 636-658.

[2] 范羽,周涛发,张达玉,等. 中国钼矿床的时空分布及成矿背景分析[J]. 地质学报, 2014, 88(4): 784-804.
Fan Yu, Zhou Taofa, Zhang Dayu, et al. Spatial and temporal distribution and metallogenic background of the Chinese molybdenum deposits[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(4): 784-804.

[3] 范羽,周涛发,张达玉,等. 皖南地区青阳-九华山复式岩体的成因[J]. 岩石学报, 2016, 32(2): 419-438.
Fan Yu, Zhou Taofa, Zhang Dayu, et al. Genesis of the Qingyang-Jiuhuashan complex pluton in South Anhui Province and its geological significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(2): 419-438.

[4] 常印佛,周涛发,范裕. 长江中下游成矿带矿产勘查-科研工作回顾和展望[J]. 岩石学报, 2017, 33(11): 3333-3352.
Chang Yinbo, Zhou Taofa, Fan Yu. Review of exploration and geological research progress in the Middle-Lower Yangtze River valley metallogenic belt [J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(11): 3333-3352.

[5] 周涛发,范裕,王世伟,等. 长江中下游成矿带成矿规律和成矿模式[J]. 岩石学报, 2017, 33(11): 3353-3372.
Zhou Taofa, Fan Yu, Wang Shiwei, et al. Metallogenic regularity and metallogenic model of the Middle-Lower Yangtze River valley metallogenic belt [J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(11): 3353-3372.

[6] Zhao P, Chu X, Williams-Jones A E, et al. The role of phyllosilicate partial melting in segregating tungsten and tin deposits in W-Sn metallogenic provinces[J]. Geology, 2022, 50(1): 121-125.

[7] Mao J W, Xiong B K, Liu J, et al. Molybdenite Re/Os dating, zircon U-Pb age and geochemistry of granitoids in the Yangchuling porphyry W-Mo deposit (Jiangnan Tungsten ore belt), China: implications for petrogenesis, mineralization and geodynamic setting[J]. Lithos, 2017, 286/287: 35-52.

[8] 孔志岗,毛景文,梁婷,等. 皖南竹溪岭与 W-Mo 成矿密切相关的弱分异 I 型花岗闪长岩成岩条件及其地质意义[J]. 岩石学报, 2023, 39(6): 1619-1648.
Kong Zhigang, Mao Jingwen, Liang Ting, et al. Diagenetic conditions and geological significance of weakly fractionation I-type granodiorite closely related to W-Mo mineralization in Zhuxiling, southern Anhui Province, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2023, 39(6): 1619-1648.

[9] 薛怀民,汪应庚,马芳,等. 皖南太平-黄山复合岩体的 SHRIMP 年代学: 由钙碱性向碱性转变对扬子克拉通东南部中生代岩石圈减薄时间的约束[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2009, 39(7): 979-993.
Xue Huaimin, Wang Yingeng, Ma Fang, et al. Zircon U-Pb SHRIMP ages of the Taiping (calc-alkaline)-Huangshan (alkaline) composite intrusive: constraints on Mesozoic lithospheric thinning of the southeastern Yangtze craton [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2009, 39(7): 979-993.

[10] 张达玉,位鹤祥,陈雪锋,等. 江南古陆北缘青阳钼矿集区成岩成矿作用研究[J]. 岩石学报, 2017, 33(11): 3659-3674.
Zhang Dayu, Wei Ouxiang, Chen Xuefeng, et al. Study on the magmatism and mineralization in the Qingyang W-Mo orefield, northern Jiangnan terrane [J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(11): 3659-3674.

[11] Wu F Y, Ji W Q, Sun D H, et al. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions of the Mesozoic granites in southern Anhui

- Province, China[J]. *Lithos*, 2012, 150: 6-25.
- [12] Song G, Qin K, Li G, et al. Mesozoic magmatism and metallogeny in the Chizhou area, Middle-Lower Yangtze Valley, SE China: constrained by petrochemistry, geochemistry and geochronology [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 91: 137-153.
- [13] Yan J, Hou T J, Wang A G, et al. Petrogenetic contrastive studies on the Mesozoic early stage ore-bearing and late stage ore-barren granites from the southern Anhui Province[J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60: 1920-1941.
- [14] 罗贤文,王安东,赖冬蓉,等. 长江中下游大龙山和黄梅尖 A 型花岗岩锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(25): 1-15.
- Luo Xianwen, Wang Andong, Lai Dongrong, et al. U-Pb chronology and Hf isotopes of A-type granite zircon in Dalongshan and Huangmeijian in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(25): 1-15.
- [15] 姜昶旭,严加永,刘家豪,等. 宁芜火山岩盆地及周缘重磁场多尺度边缘检测与地质意义[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(36): 15381-15392.
- Jiang Changxu, Yan Jiayong, Liu Jiahao, et al. Multi-scale edge detection and geological significance of gravity magnetic field in Ningwu volcanic basin and periphery[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(36): 15381-15392.
- [16] 李光耀,肖荣阁,李志丹,等. 内蒙古查干德尔斯钼矿成矿期花岗岩地球化学特征及成岩背景[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(28): 12010-12019.
- Li Guangyao, Xiao Rongge, Li Zhidan, et al. Geochemical characteristics and diagenetic background of granite during the metallogenic period of Chagandels molybdenum mine in Inner Mongolia [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(28): 12010-12019.
- [17] 陈瑞莉,潘家永,伍俊杰,等. 皖南泾县茂林岩体锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征[J]. *地质通报*, 2019, 38(7): 1219-1227.
- Chen Ruili, Pan Jiayong, Wu Junjie, et al. A study of zircon U-Pb age and characteristics of Hf isotopes of the Maolin granodiorite in Jingxian County, southern Anhui Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(7): 1219-1227.
- [18] 高东升. 皖南泾县茂林地区钼矿成矿地质特征及成因探讨[J]. *世界有色金属*, 2017(6): 184, 186.
- Gao Dongsheng. Jingxian county forest region in the south of Anhui molybdenum ore-forming geological characteristics and genesis discussed[J]. *World Nonferrous Metals*, 2017(6): 184, 186.
- [19] 中国冶金地勘局. 檀树岭钼矿王家矿段详查地质报告[R]. 福州: 中国冶金地勘局一局二队, 2007.
- China Metallurgical Geological Survey Bureau. Detailed geological report of Wangjia section of Tanshuling molybdenum mine [R]. Fuzhou: The Second Team of the First Bureau of China Metallurgical Geological Survey, 2007.
- Detailed geological report of Wangjia section of Tanshuling molybdenum mine. The Second Team of the First Bureau of China Metallurgical Geological Survey, 2007.
- [20] 江西省地质矿产局. 江西省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1984.
- Jiangxi Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional geology of Jiangxi Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1984.
- [21] Li X H, Li Z X, Wingate M T D, et al. Geochemistry of the 755 Ma Mundine Well dyke swarm, northwestern Australia: Part of a Neoproterozoic mantle superplume beneath Rodinia? [J]. *Pre-cambrian Research*, 2006, 146(1/2): 1-15.
- [22] 刘颖,刘海臣,李献华. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素[J]. *地球化学*, 1996(6): 552-558.
- Liu Ying, Liu Haichen, Li Xianhua. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements in rock samples using ICP-MS [J]. *Geochimica*, 1996(6): 552-558.
- [23] 杜安道,何红蓼,殷宁万,等. 辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测定方法研究[J]. *地质学报*, 1994(4): 339-347.
- Du Andao, He Hongliao, Yin Ningwan, et al. A study on the Rhenium-Osmium geochronometry of molybdenites[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1994(4): 339-347.
- [24] 屈文俊,杜安道. 高温密闭溶样电感耦合等离子体质谱准确测定辉钼矿铼-钨地质年龄[J]. *岩矿测试*, 2003(4): 254-257, 262.
- Qu Wenjun, Du Andao. Highly precise Re-Os dating of molybdenite by ICP-MS with Carius tube sample digestion [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2003(4): 254-257, 262.
- [25] 李超,屈文俊,杜安道,等. 铼-钨同位素定年法中丙酮萃取铼的系统研究[J]. *岩矿测试*, 2009, 28(3): 233-238.
- Li Chao, Qu Wenjun, Du Andao, et al. Comprehensive study on extraction of rhenium with acetone in Re-Os isotopic dating [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2009, 28(3): 233-238.
- [26] 李超,屈文俊,周利敏,等. Carius 管直接蒸馏快速分离钨方法研究[J]. *岩矿测试*, 2010, 29(1): 14-16.
- Li Chao, Qu Wenjun, Zhou Limin, et al. Rapid separation of osmium by direct distillation with Carius tube [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2010, 29(1): 14-16.
- [27] Ludwig K. Isoplot /Ex, version 2.0: a geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Geochronology Center, 1999.
- [28] Paton C, Hellstrom J, Paul B, et al. Iolite: freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data electronic supplementary information (ESI) available [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2011, 26: 2508-2518.
- [29] 杜安道,屈文俊,王登红,等. 辉钼矿亚晶粒范围内 Re 和 ¹⁸⁷Os 的失耦现象[J]. *矿床地质*, 2007(5): 572-580.
- Du Andao, Qu Wenjun, Wang Denghong, et al. Subgrain-size decoupling of Re and ¹⁸⁷Os within molybdenite [J]. *Mineral Deposits*, 2007(5): 572-580.
- [30] 吴元保,郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. *科学通报*, 2004(16): 1589-1604.
- Wu Yuanbao, Zhen Yongfei. Mineralogical studies of zircon genesis and its constraints on the interpretation of U-Pb age [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004(16): 1589-1604.
- [31] 曾广骅,陈晔,许国强,等. 海南岛西部近岸海域碎屑锆石 U-Pb 同位素年代学物源示踪及其地质意义[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(16): 6626-6641.
- Zeng Guanghua, Chen Yang, Xu Guoqiang, et al. Tracing the provenance of detrital zircon U-Pb isotope chronology in the coastal waters of western Hainan Island and its geological significance [J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(16): 6626-6641.
- [32] 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.
- [33] 伍俊杰,陈正乐,陈瑞莉,等. 江西新余良山钼矿锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄[J]. *地质通报*, 2017, 36(8): 1407-1416.

- Wu Junjie, Chen Zhengle, Chen Ruili, et al. Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating of the Liangshan Mo deposit in Xinyu City, Jiangxi Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(8): 1407-1416.
- [34] Hoskin P W O. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(3): 637-648.
- [35] 杜保峰,魏俊浩,王启,等. 中国东部钨矿成矿背景与成岩-成矿时差讨论[J]. *矿床地质*, 2010, 29(6): 935-955.
Du Baofeng, Wei Junhao, Wang Qi, et al. Discussion on metallogenic setting and time difference between magmatism and mineralization of molybdenum deposits in East China [J]. *Mineral Deposits*, 2010, 29(6): 935-955.
- [36] 侯明金. 江南隆起带(安徽部分)燕山晚期岩浆活动与深部过程[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2005.
Hou Mingjin. The magmatic activities and its depth process of the later Yanshanian granitoids in the Jiangnan uplift in the area of Anhui Province [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2005.
- [37] 毛景文, Holly Stein, 杜安道, 等. 长江中下游地区铜金(钨)矿 Re-Os 年龄测定及其对成矿作用的指示 [J]. *地质学报*, 2004(1): 121-131.
Mao Jingwen, Holly Stein, Du Andao, et al. Molybdenite Re-Os precise dating for molybdenite from Cu-Au-Mo deposits in the middle-lower reaches of Yangtze River Belt and its implications for mineralization [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004(1): 121-131.
- [38] 陈志洪, 邢光福, 郭坤一, 等. 长江中下游成矿带九瑞矿集区(北部)含矿岩体的锆石 U-Pb 定年及其地质意义 [J]. *地质学报*, 2011, 85(7): 1146-1158.
Chen Zhihong, Xing Guangfu, Guo Kunyi, et al. Zircon U-Pb ages of ore-bearing granitic bodies in Northern Jiujiang-Ruichang metallogenic district of the mineralization belt of the middle-lower reaches of the Yangtze River and its geological significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(7): 1146-1158.
- [39] 李双, 杨晓勇, 孙卫东, 等. 皖南泾县榔桥岩体锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素和地球化学特征及其找矿指示意义 [J]. *地质学报*, 2014, 88(8): 1561-1578.
Li Shuang, Yang Xiaoyong, Sun Weidong, et al. Zircon dating, Hf isotope composition, geochemistry and their prospecting significance of the Langqiao Intrusion in Jingxian County, South Anhui Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(8): 1561-1578.
- [40] 陈雪锋. 江南过渡带桂林郑—黄山岭钨铅锌矿床成矿系统研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
Chen Xuefeng. Ore-forming system of Guilinzheng-Huangshanling deposit in Jiangnan transitional zone [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- [41] 陈雪锋, 范裕, 庾江华, 等. 江南隆起带(安徽段)西坞口钨矿床岩体锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素特征研究 [J]. *岩石学报*, 2019, 35(12): 3797-3810.
Chen Xuefeng, Fan Yu, Yu Jianghua, et al. Zircon U-Pb dating and Lu-Hf isotopes of the ore-associated porphyry in the Xiwukou Rb deposit, Jiangnan Uplift Belt (Anhui Province), SE China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(12): 3797-3810.
- [42] 陈雪锋, 范裕, 周涛发. 安徽泾县湛岭斑岩型钨矿床中铼的赋存状态研究 [J]. *岩石学报*, 2021, 37(9): 2705-2722.
Chen Xuefeng, Fan Yu, Zhou Taofa. The occurrence of rhenium in the Zhanling porphyry molybdenum deposit, Jing County, Anhui Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2021, 37(9): 2705-2722.
- [43] 柯宏飙, 王金泉, 丁勇, 等. 皖南歙县新溪口岩体锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及找矿前景 [J]. *华东地质*, 2020, 41(2): 116-127.
Ke Hongbiao, Wang Jinquan, Ding Yong, et al. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the Xinxikou pluton in Shexian County, southern Anhui Province and its prospecting significance [J]. *East China Geology*, 2020, 41(2): 116-127.
- [44] 张刚, 任升莲, 陈广涛, 等. 江南隆起带后山和茂林岩体年代学、地球化学及其构造意义 [J]. *地质科学*, 2021, 56(3): 884-913.
Zhang Gang, Ren Shenglian, Chen Guangtao, et al. Geochronology, geochemistry and tectonic significance of Houshan and Maolin pluton in the Jiangnan uplift belt [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2021, 56(3): 884-913.
- [45] 武敏, 夏成章. 长江中下游成矿带(安徽段)重要内生矿产成矿时代特征 [J]. *西部资源*, 2022(4): 132-134.
Wu Min, Xia Chengzhang. Metallogenic age characteristics of important endogenous mineral resources in the middle and lower reaches of the Yangtze River metallogenic belt (Anhui section) [J]. *Western Resources*, 2022(4): 132-134.
- [46] 宋传中, 周涛发, 闫峻, 等. 长江中下游及其邻区中生代构造体制转换 [J]. *岩石学报*, 2010, 26(9): 2835-2849.
Song Chuanzhong, Zhou Taofa, Yan Jun, et al. Mesozoic tectonic regime transition of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River and its adjacent area [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(9): 2835-2849.
- [47] 吕新荷, 王国光, 倪培. 大陆再造与江南造山带赣北段巨量铜、钨成矿 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2023, 42(5): 1132-1149, 963.
Lü Xinhe, Wang Guoguang, Ni Pei. Reworking of continental crust and the large-scale Cu and W mineralization in the northern Jiangxi part of the Jiangnan orogen [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2023, 42(5): 1132-1149, 963.
- [48] 陈雪峰. 江南隆起带(安徽段)湛岭钨矿床的成岩成矿作用研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
Chen Xuefeng. Diagenesis and mineralization of rhenium-molybdenum deposits in Zhanling in the Jiangnan uplift belt (Anhui section) [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [49] 李斌, 张赞赞, 吴明安, 等. 皖南宁国大坞尖钨钼矿床成岩成矿年龄——以花岗闪长斑岩锆石 U-Pb 和辉钨矿 Re-Os 年龄为依据 [J]. *地质通报*, 2015, 34(S1): 569-578.
Li Bin, Zhang Zanzan, Wu Ming'an, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and molybdenite Re-Os dating of the Dawujian W-Mo polymetallic deposit, Ningguo, Anhui Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(S1): 569-578.
- [50] 王德恩, 周翔, 余心起, 等. 皖南祁门地区东源钨钼矿区花岗闪长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征 [J]. *地质通报*, 2011, 30(10): 1514-1529.
Wang Deen, Zhou Xiang, Yu Xinqi, et al. SHRIMP zircon U-Pb dating and characteristics of Hf isotopes of the granodiorite porphyries in the Dongyuan W-Mo ore district, Qimen area, southern Anhui [J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(10): 1514-1529.
- [51] 李双, 杨晓勇, 孙卫东. 皖南歙县邓家坞钨矿床年代学及 Hf 同位素地球化学研究 [J]. *岩石学报*, 2012, 28(12): 3980-3992.
Li Shuang, Yang Xiaoyong, Sun Weidong. Ages and zircon Hf isotope geochemistry of the Dengjiawu Mo deposit in Shexian, South Anhui Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28

- (12): 3980-3992.
- [52] 秦燕,王登红,李延河,等. 安徽青阳百丈岩钨铅矿床成岩成矿年龄测定及地质意义[J]. 地学前缘, 2010, 17(2): 170-177.
Qin Yan, Wang Denghong, Li Yanhe, et al. Rock-forming and ore-forming ages of the Baizhangyan tungsten-molybdenum ore deposit in Qingyang, Anhui Province and their geological significance [J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(2): 170-177.
- [53] 万建军,王安东,丁宁,等. 皖南太子山含矿岩体辉钨矿 Re-Os 年龄与硫同位素特征[J]. 矿物学报, 2018, 38(2): 214-222.
Wan Jianjun, Wang Andong, Ding Ning, et al. Re-Os geochronology and S isotope geochemistry of molybdenite from Taizishan ore-bearing pluton, Jixi County, Anhui Province, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2018, 38(2): 214-222.
- [54] Su Q, Mao J, Wu S, et al. Geochronology and geochemistry of the granitoids and ore-forming age in the Xiaoyao tungsten polymetallic skarn deposit in the Jiangnan Massif tungsten belt, China: implications for their petrogenesis, geodynamic setting, and mineralization[J]. Lithos, 2018, 296: 365-381.
- [55] 肖鑫,周涛发,袁峰,等. 安徽青阳高家垌钨铅矿床成岩成矿时代及其地质意义[J]. 岩石学报, 2017, 33(3): 859-872.
Xiao Xin, Zhou Taofa, Yuan Feng, et al. The geochronology of the Qingyang Gaojiabang tungsten-molybdenum deposit and its geological significance, Anhui Province, East China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(3): 859-872.
- [56] 黄马,徐晓春,谢巧勤,等. 皖南宁国竹溪岭钨银矿床及相关岩体的同位素地质年龄[J]. 大地构造与成矿学, 2018, 42(2): 279-290.
Huang Ma, Xu Xiaochun, Xie Qiaoqin, et al. Isotopic ages of the Zhuxiling W-Ag ore deposit and related plutons in Ningguo, southern Anhui [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2018, 42(2): 279-290.
- [57] 徐晓春,吴迪,傅仲阳,等. 安徽青阳高家垌钨铅矿床与狮金山钨铜多金属矿床的成岩成矿系统[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(3): 492-508.
Xu Xiaochun, Wu Di, Fu Zhongyang, et al. Magmatic-hydrothermal metallogenic system of the Gaojiabang Tungsten-molybdenum deposit and Shijinshan molybdenum-copper polymetallic deposit, Qingyang County, Anhui Province[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2021, 45(3): 492-508.
- [58] 陈子微,余心起,周翔,等. 皖南休宁县里东坑似斑状花岗闪长岩成岩成矿特征分析[J]. 中国地质, 2013, 40(6): 1762-1776.
Chen Ziwei, Yu Xinqi, Zhou Xiang, et al. Rock-forming and ore-forming characteristics of the Lidongkeng porphyritic granodiorite in Xiuning County, south Anhui Province[J]. Geology in China, 2013, 40(6): 1762-1776.
- [59] Morrison G W. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association [J]. Lithos, 1980, 13(1): 97-108.
- [60] Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. Earth Science Reviews, 1994, 37(3/4): 215-224.
- [61] Wang Q, Zhu D C, Zhao Z D, et al. Magmatic zircons from I-, S- and A-type granitoids in Tibet: trace element characteristics and their application to detrital zircon provenance study [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 53: 59-66.
- [62] 毛景文,张作衡,张招崇,等. 北祁连山小柳沟钨矿床中辉钨矿 Re-Os 年龄测定及其意义[J]. 地质论评, 1999(4): 412-417.
Mao Jingwen, Zhang Zuoheng, Zhang Zhaochong, et al. Re-Os age dating of molybdenites in the Xiaoliugou tungsten deposit in the northern Qilian Mountains and its significance[J]. Geological Review, 1999(4): 412-417.
- [63] Ohmoto H, Goldhaber M B. Sulphur and carbon isotopes [J]. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, 1997(1): 517-600.
- [64] 张旗,李承东,王焰,等. 中国东部中生代高 Sr 低 Yb 和低 Sr 高 Yb 型花岗岩: 对比及其地质意义[J]. 岩石学报, 2005(6): 1527-1537.
Zhang Qi, Li Chengdong, Wang Yan, et al. Mesozoic high-Sr and low-Yb granitoids and low-Sr and high-Yb granitoids in eastern China: comparison and geological implication[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005(6): 1527-1537.
- [65] 施珂,张达玉,丁宁,等. 皖南逍遥岩体的年代学、地球化学特征及其成因分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017, 47(6): 1746-1762.
Shi Ke, Zhang Dayu, Ding Ning, et al. Geochronology, geochemistry and formation of Xiaoyao rock in southern Anhui Province [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2017, 47(6): 1746-1762.
- [66] 袁峰,周涛发,范裕,等. 皖赣相邻区燕山期花岗岩类构造背景及其意义[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2005(9): 1130-1134.
Yuan Feng, Zhou Taofa, Fan Yu, et al. Tectonic setting of granitoids of Yanshanian Stage in the adjoining region of Anhui and Jiangxi Province and its significance[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2005(9): 1130-1134.
- [67] 袁峰,周涛发,范裕,等. 江南隆起带皖赣相邻区燕山期岩浆岩 Nd-Sr 同位素特征[J]. 地质科学, 2006(1): 133-142.
Yuan Feng, Zhou Taofa, Fan Yu, et al. Characteristics of Nd-Sr isotopes of the Yanshanian magmatic rocks in the Jiangnan rise bordering Anhui and Jiangxi Provinces [J]. Chinese Journal of Geology, 2006(1): 133-142.
- [68] 刘国生. 江南断裂带(皖南段)的变形特征及震旦纪以来的构造演化[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 1997(3): 100-105.
Liu Guosheng. Deformation characteristics and evolution of the Jiangnan fault zone (segment of southern Anhui) since Sinian period [J]. Journal of Hefei University of Technology, 1997(3): 100-105.
- [69] 周涛发,范裕,袁峰,等. 庐枞盆地侵入岩的时空格架及其对成矿的制约[J]. 岩石学报, 2010, 26(9): 2694-2714.
Zhou Taofa, Fan Yu, Yuan Feng, et al. Temporal-spatial framework of magmatic intrusions in Luzong volcanic basin in East China and their constraint to mineralizations [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(9): 2694-2714.
- [70] Li P, Yu X, Li H, et al. Jurassic-Cretaceous tectonic evolution of Southeast China: geochronological and geochemical constraints of Yanshanian granitoids [J]. International Geology Review, 2013, 55(10): 1202-1219.
- [71] 周未召,徐生发,余心起,等. 皖南太平岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄和地球化学特征——对华南中生代岩石圈伸展减薄的启示[J]. 地质论评, 2016, 62(6): 1549-1564.
Zhou Shuzhao, Xu Shengfa, Yu Xinqi, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb ages and geochemical features of Tai Ping Pluton in south Anhui: enlightenment of Mesozoic lithospheric thinning for south China [J]. Geological Review, 2016, 62(6): 1549-1564.