

doi: 10.12029/gc20210316

邹键,唐文龙,丁正江,薄军委,李志强,于森. 2021. 山东牟平院格庄岩体锆石 U-Pb 年龄及其对周缘铜钼多金属成矿的制约[J]. 中国地质, 48(3): 883-899.

Zou Jian, Tang Wenlong, Ding Zhengjiang, Bo Junwei, Li Zhiqiang, Yu Sen. 2021. Zircon U-Pb dating of the Yuangezhuang pluton in Muping of Shandong Province and its constraints on mineralization of Cu-Mo deposits[J]. *Geology in China*, 48(3): 883-899(in Chinese with English abstract).

山东牟平院格庄岩体锆石 U-Pb 年龄及其对周缘铜钼多金属成矿的制约

邹键¹,唐文龙²,丁正江³,薄军委¹,李志强¹,于森¹

(1. 山东省第三地质矿产勘查院, 山东 烟台 264004; 2. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 0650003;
3. 山东省地质矿产勘查开发局, 山东 济南 250013)

摘要:牟平院格庄岩体位于胶东东部,为燕山晚期形成的与斑岩型-矽卡岩型铜钼多金属矿床有关的岩体之一。获得院格庄岩体崖西、后野、西上寨 3 个单元二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果分别为(118.10±0.66)Ma、(118.52±0.78)Ma、(118.80±0.67)Ma,皆为早白垩世晚期。岩石地球化学研究表明:岩石属于高钾钙碱性、准铝质系列(K_2O/Na_2O 值为 1.00~1.29、 $A/CNK=0.98\sim 1.02$)。轻重稀土元素分馏明显($(La/Yb)_n=26.91\sim 35.75$), $\delta Eu=0.84\sim 0.93$,具弱负铕异常。高场强元素 Nb、Ti、P 元素强烈亏损,大离子亲石元素 Rb、K、U 富集。地球化学特征显示院格庄岩体为 I 型花岗岩,为壳幔同溶型花岗岩。该岩体对其周缘铜钼矿空间分布和成矿时代有显著的制约作用,具有铜钼多金属矿的成矿专属性。

关键词:锆石 U-Pb 测年;岩石地球化学;铜钼多金属矿床;矿产勘查工程;院格庄岩体;牟平;山东
中图分类号:P597;P618.41;P618.65 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2021)03-0883-17

Zircon U-Pb dating of the Yuangezhuang pluton in Muping of Shandong Province and its constraints on mineralization of Cu-Mo deposits

ZOU Jian¹, TANG Wenlong², DING Zhengjiang³, BO Junwei¹, LI Zhiqiang¹, YU Sen¹

(1.No.3 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Yantai 264004, Shandong, China; 2. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 3. Shandong Exploration Bureau of Geology and Mineral Resources, Shandong 250013, Jinan, China)

Abstract: The Yuangezhuang Pluton located in the east of Jiaodong area, is formed in the late Yanshanian and is one of the granites associated with Cu-Mo polymetallic deposits hosted in porphyry and skarn. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of Yaxi unite, Houye unite and Xishangzhai unite from the Yuangezhuang monzonitic granite yields (118.10±0.66)Ma, (118.52±0.78) Ma, and (118.80±0.67)Ma respectively, indicating the Late Epoch of Early Cretaceous. The results of petrochemistry indicate the pluton is belong to

收稿日期:2019-05-03; 改回日期:2020-02-24

基金项目:国家重点研发计划课题(2018YFC0603805)、中国地质调查局地质调查项目(DD20160044、DD20190155)及国家自然科学基金项目(41973048)联合资助。

作者简介:邹键,男,1981年生,硕士,高级工程师,从事矿产勘查及成矿规律研究工作;E-mail:zouj3472@163.com。

通讯作者:唐文龙,男,1979年生,高级工程师,主要从事地质矿产调查与区域成矿规律研究工作;E-mail:twl011562@126.com

high-K calc-alkaline serie ($K_2O/Na_2O = 1.00-1.29$, $A/CNK=0.98-1.02$). The results of trace elements are characterized by dramatic fractionation between light REE and heavy ($REE(La/Yb)_N=26.91\sim 35.75$ unapparent Eu anomalies ($\delta Eu=0.84-0.93$), enriched in LILE (i.e. Rb,K,U) and loss in HSFE (i.e. Nb,Ti,P). The geochemical characteristics indicate the Yuangezhuang pluton is an I type granite, crust-mantle syntectonic granite. The pluton has strong constrain on spatial distribution and metallogenic epoch of Cu-Mo deposits.

Keywords: zircon U-Pb dating, petrogeochemistry; Cu-Mo polymetallic deposit; mineral exploration engineering; Yuangezhuang pluton; Muping; Shandong Province

About the first author: ZOU Jian, male, born in 1981, master, senior engineer, engaged in the study of mineral exploration and metallogenic law; E-mail: zouj3472@163.com

Fund support: Funded by Project of National Key R & D Plan (No.2018YFC0603805), the project of China Geological Survey (No. DD20160044, No. DD20190155), Natural Science Foundation of China (No.41973048).

About the corresponding author: TANG Wenlong, male, born in 1979, senior engineer, mainly engages in geological and mineral resources survey and regional metallogenic regularity research; E-mail: twl011562@126.com

1 引 言

中生代以来,胶东地区经历了多期次构造岩浆活动和成矿作用(杨立强等,2014;丁正江等,2015;宋明春等,2018),李洪奎等(2013)提出将成矿作用分为三期,分别为挤压环境下的金铂矿成矿作用、挤压—伸展环境的金银矿成矿作用和后造山环境的金多金属矿成矿作用。胶东特有的成矿环境造就了丰富的金及多金属矿产资源,其中累计探明金矿资源储量4500 t(宋英昕等,2017)。研究区地处山东省烟台市牟平区西南,华北克拉通东缘(谢士稳等,2015),区内左行走滑深大断裂—桃村断裂将本为一体的院格庄岩体和牙山岩体切割为两个独立单元(Cui et al., 1994)(图1),近年来随着其内部及周缘尚家庄铂矿、杏山北铂矿、孔辛头铜铂矿等多金属矿床的发现(李杰等,2013;李超等,2016),为该区多金属矿找矿注入了新活力。本文以中国地质调查局天津地质调查中心“胶东成矿区栖霞—牟平地区地质矿产调查”所属子项目“山东1:5万水道、观水、冯家幅矿产地质调查”为依托,在详细野外调查基础上,借助LA-ICP-MS锆石U-Pb测年及地球化学的系统研究,进一步探讨院格庄岩体的成因机制,分析其与周缘铜铂多金属矿床成因、成矿时间和空间上的联系,为胶东铜铂多金属矿成矿地质背景研究提供基础地质资料,为该区开展多金属矿产勘查提供技术支持。

2 区域地质概况

研究区地层出露较为简单,主要为古元古代荆

山群一套碳酸盐岩建造组合和中生代莱阳群一套砾岩、砂砾岩组合,两者呈角度不整合接触,局部断层接触。区内断裂构造发育,经历多期叠加和改造,按其展布方向大致可分为NE、NW及近EW向3组,其发育程度差别悬殊。比较完整和突出的是NE断裂构造,以朱吴断裂与桃村断裂为代表。朱吴断裂位于研究区SE侧,全长96 km,在区内出露长约9 km,宽20~100 m,走向20°左右,倾向NW,倾角70°,具波状弯曲特征,经历多次活动,中生代燕山晚期活动最为强烈,发生了左旋错动(张勇等,2013);桃村断裂产出于研究区W侧,全长86 km,在区内出露长约4 km,宽20~100 m,走向30~45°,倾向SE,倾角60~80°,经历了压—张—压扭性的构造活动,以晚期左行压扭性影响最大,其左行走滑位移动达30 km(黄永华等,2007;张岳桥等,2007),为院格庄岩体的西界。

区内侵入岩分布广泛,主要有早白垩世伟德山序列含斑二长花岗岩(院格庄岩体)、晚侏罗世玲珑序列弱片麻状二长花岗岩(鹊山岩体)及新太古代栖霞序列条带状英云闪长质片麻岩,其中,院格庄岩体被挟持在桃村和朱吴断裂之间,自外向内划分为3个单元:崖西斑状中粒含角闪二长花岗岩、后野巨斑状中粒含角闪二长花岗岩和西上寨含巨斑中粒黑云二长花岗岩(王世进等,2009),三者呈同心环状产出,半椭圆状展布。其中斑状中粒含角闪二长花岗岩与荆山群野头组大理岩接触带附近常见砂卡岩化蚀变,周边产出有下雨村金矿、孔辛头铜铂矿和杏山北铂矿床(图2)。

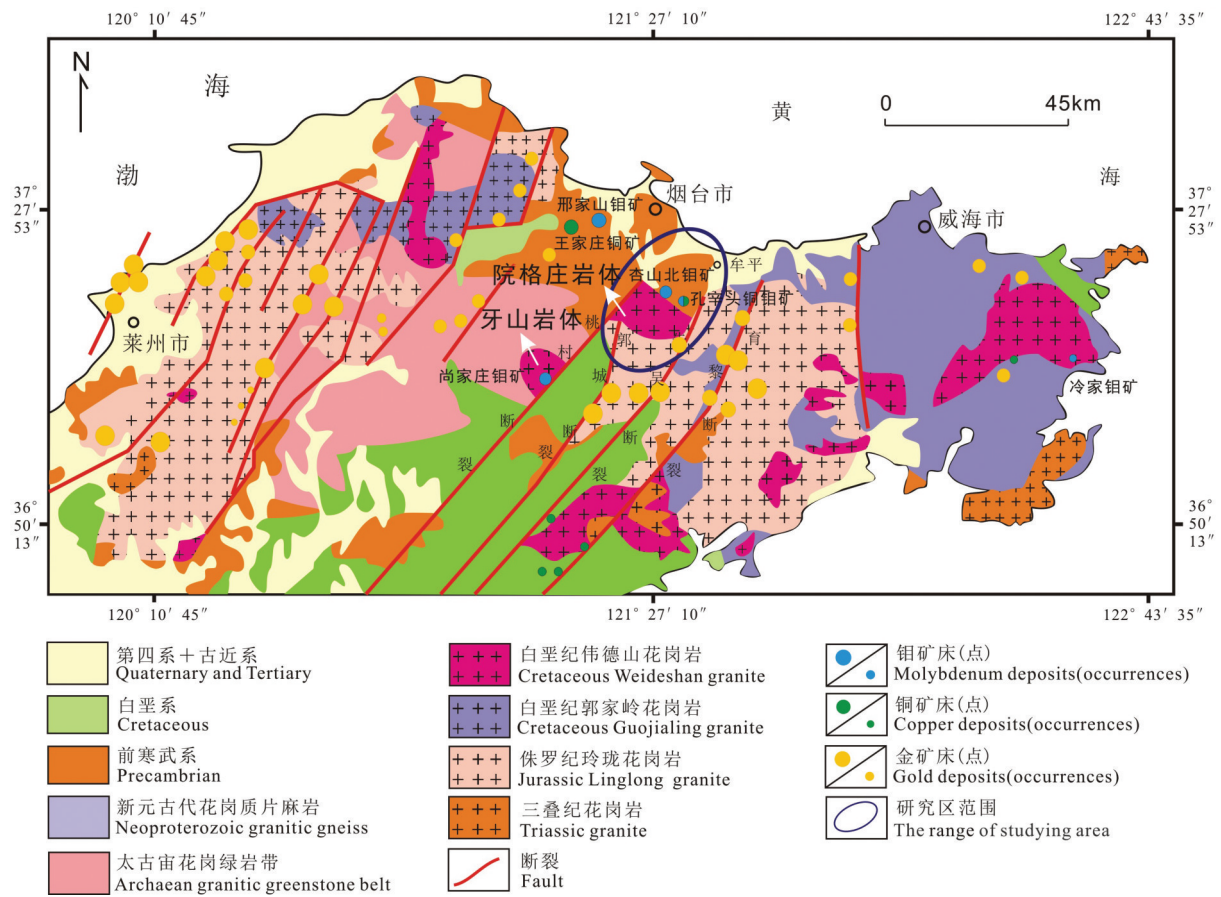


图1 胶东主要金和铜钼矿床分布图(据李超等,2016)

Fig.1 Regional geological map of Jiaodong area showing the distribution of main gold, copper and molybdenum deposits(after Li Chao et al.,2016)

3 院格庄岩体岩相特征

院格庄岩体位于下雨村西北,西邻回里东至王家疃,南接要捷村北达南周山,面积77.52 km²,自外向内可划分为3个单元:崖西单元、后野单元和西上寨单元(图2)。各单元岩石特征进行分述如下:

崖西单元:位于院格庄岩体边部,侵入于荆山群和玲珑序列九曲单元中,界线清晰。岩性为似斑状中粒含角闪二长花岗岩,浅肉红色—灰色,似斑状结构,不等粒半自形粒状结构,块状构造;斑晶成分为钾长石(15%~20%),大小9~20 mm;基质主要矿物为石英(20%~23%),斜长石(41%~55%)、钾长石(12%~23%)、黑云母(2%~6%)、角闪石(3%~8%),粒径2.1~5.0 mm。该单元大斑晶较少,一般情况下小斑晶较多且密集(图3a);在斑晶中,可见其俘获的黑云母微晶;矿物颗粒相对较细,角闪石自形程度高;其内见细粒闪长质包体(图3b),呈椭圆状产出,一般

直径5~20 cm,局部呈群出现。

后野单元:与崖西单元未见明显界线,岩性为巨斑状中粒含角闪二长花岗岩,浅肉红色,似斑状结构,不等粒半自形粒状结构,块状构造;钾长石巨斑占10%~20%,粒径粗大,一般2 cm×4 cm~3 cm×6 cm,大者可达4 cm×8 cm或更大,略具定向性;基质主要矿物成分为斜长石(37%~56%)、钾长石(19%~35%)、石英(18%~28%)、黑云母(2%~5%)、角闪石(<5%),粒径一般2~5 mm。该单元钾长石斑晶增大,局部见其沿长轴方向定向排列(图3c);矿物颗粒均匀性差,黑云母微晶增多,为大斑晶所俘获;局部充填长英质细脉(图3d);闪长质包体零星产出。

西上寨单元:位于院格庄岩体中心,同后野单元无明显界线。地表出露部分由于形成的释重节理和风化作用,呈现上部风化下部完整的形态,且界线明显(图3e)。岩性为含巨斑细中粒含黑云二

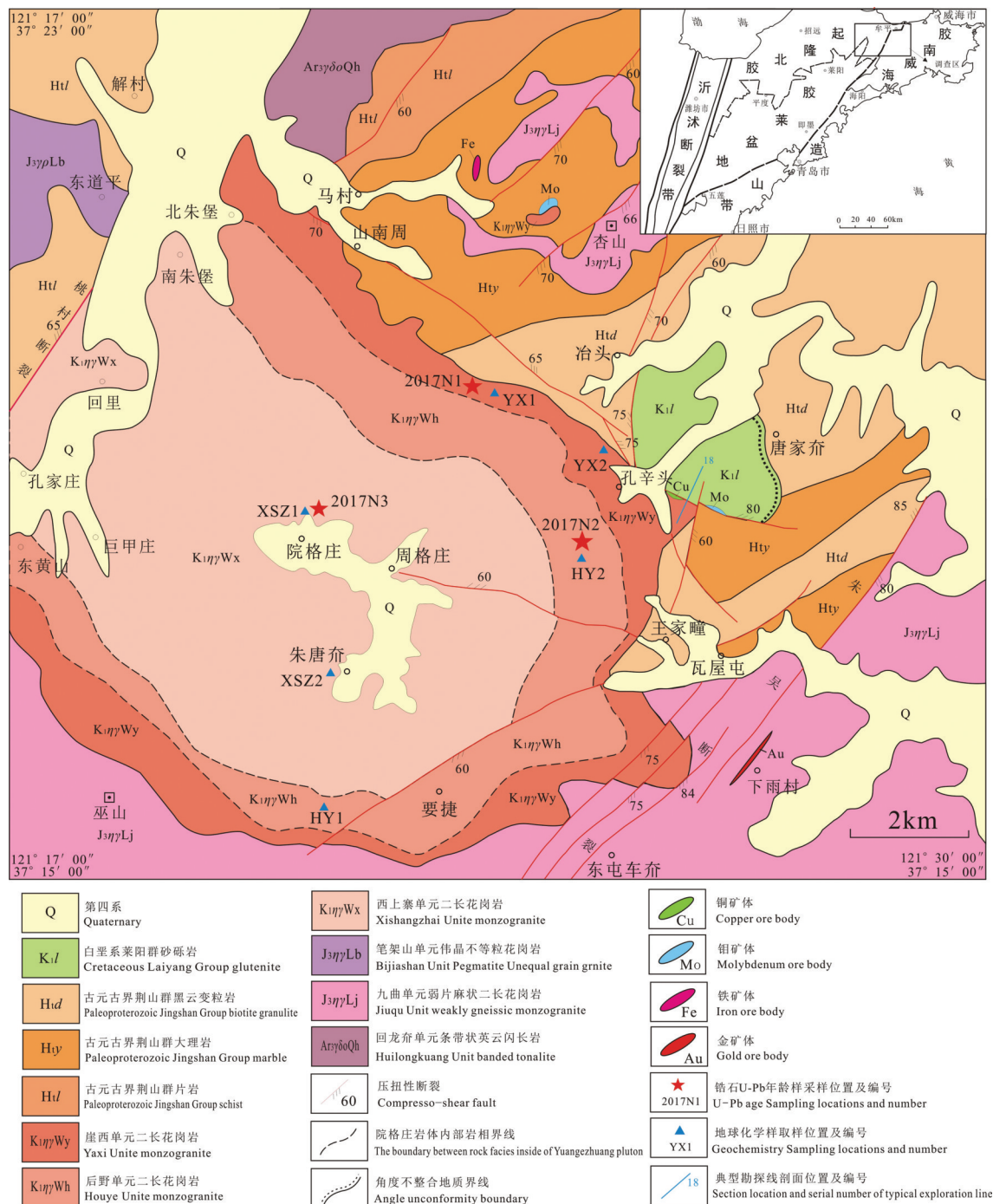


图2 院格庄地区区域地质图(据山东省第三地质矿产勘查院,1990)

Fig.2 Regional geological map of the Yuangezhuang area(afte No.3 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Shandong Province,1990)

长花岗岩,浅肉红色,似斑状结构,块状构造;钾长石斑晶大小一般为1 cm×2 cm,大者可达3 cm×6 cm,含量在10%~15%,大小悬殊,但分布均匀;基质矿物成分:斜长石(30%~49%)、钾长石(21%~30%)、石英(21%~34%)、黑云母(<5%)、角闪石

(<5%),粒径为2~5 mm。该单元斑晶大,分布均匀,含量明显减少(图3f);闪长质包体极为少见。

4 样品的采集与分析方法

本次用于锆石U-Pb测年的3件样品,分别位于

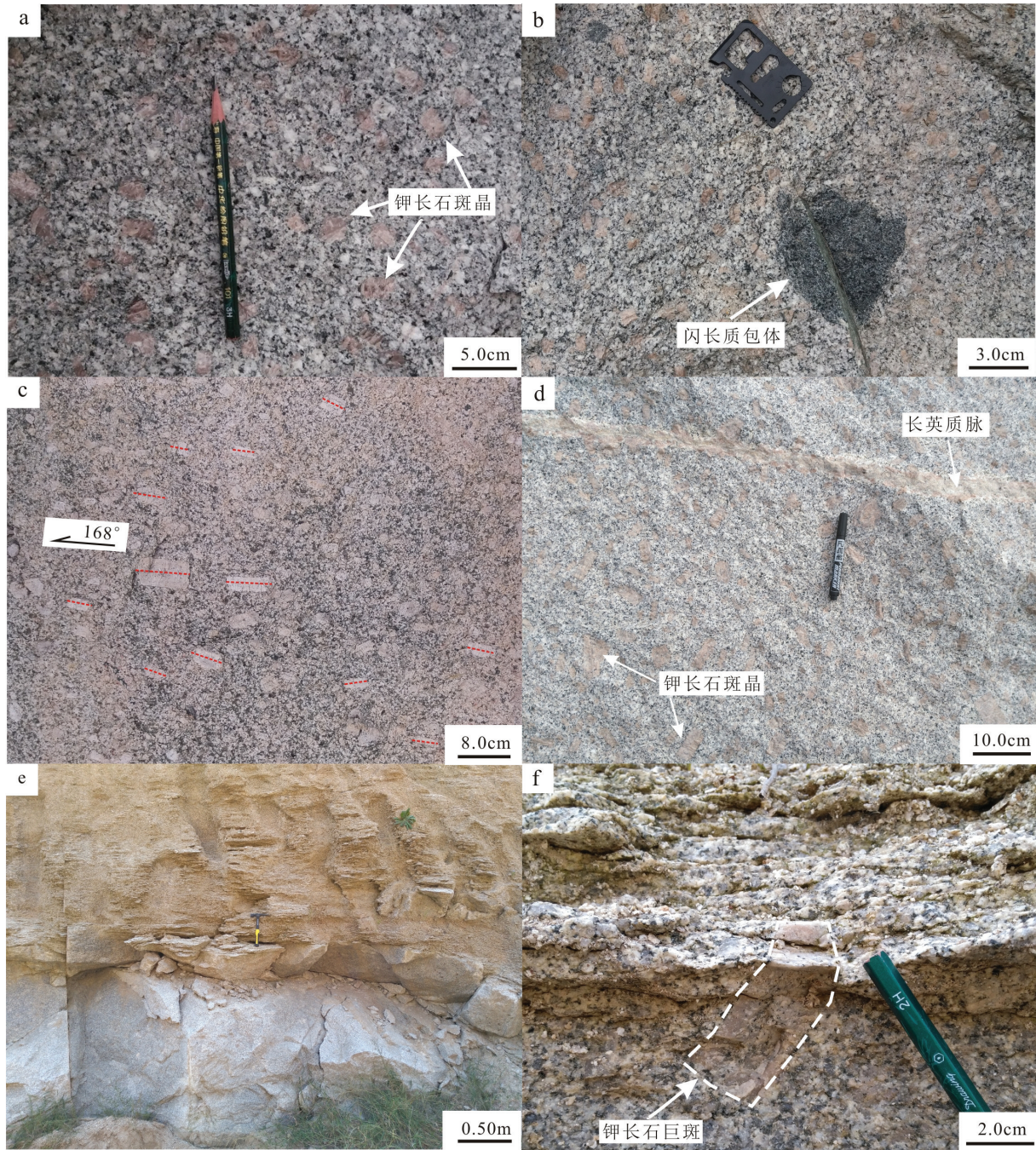


图3 院格庄岩体野外地质特征

a—崖西单元钾长石斑晶密集分布;b—崖西单元闪长质包体;c—后野单元钾长石巨斑呈定向组构;d—后野单元钾长石巨斑;e—西上寨单元岩石野外地质特征;f—西上寨单元钾长石斑晶

Fig.3 Geological characteristics of Yuangezhuang pluton

a-K-feldspar phenocrysts are densely distributed Yaxi unite;b-Diorite inclusions in Yaxi unite granite;c-K-feldspar phenocrysts of Houye unite are in a directional arrangement;d-K-feldspar phenocrysts of Houye unite;e-The geological characteristics of Xishangzai unite granite in the field; f- K-feldspar phenocrysts in Xishangzai unite

崖西单元、后野单元、西上寨单元中心部位的新鲜花岗岩,分别编号2017N1、2017N2、2017N3,岩性特征明显。取样地理坐标分别为:37°19'55.01" N,121°

23' 59" E; 37° 17' 11.53" N,121° 25' 29.46" E; 37° 18' 28.54"N,121°22'30.72"E(图2)。

岩石样品单矿物挑选、制靶、CL照相等项目在

廊坊市宏信地质勘查技术服务有限公司完成,在双目镜下挑出锆石,每件样品选取代表性锆石200颗进行制靶;LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄测定在中国地质调查局天津地质调查中心实验室进行,测试采用的激光剥蚀束斑直径为32 μm ,激光剥蚀60 s,实验中采用He作为剥蚀物质的载气。锆石年龄采用国际标准锆石91500作为外标,元素含量采用NISTSRM610作为外标。 ^{29}Si 作为内标元素锆石中 SiO_2 的质量分数为32.8%,分析方法见文献(Yuan et al., 2004);普通铅校正采用Anderson推荐的方法(Anderson, 2002);样品的同位素比值及元素含量计算采用ICP-MS-DATACAL程序(Liu et al., 2008),年龄计算及谐和图的绘制采用Isoplot程序(Ludwing, 2003)。

本次地球化学分析样品分别于崖西、后野、西上寨单元内各取2件,其中崖西单元样品编号为YX1、YX2;后野单元样品编号HY1、HY2;西上寨单元样品编号为XSZ1、XSZ2(图2)。新鲜岩石进行主量、微量和稀土分析,在山东省地质科学院测试中心完成,主量元素使用熔片法X-射线荧光光谱法(XRF)测试,分析准确度和精度优于5%;微量元素及稀土元素利用酸溶法制备样品,使用等离子体质谱法(ICP-MS)测试,分析准确度和精度优于10%;烧失量采用重量法(GR)测试; Fe_2O_3 、 FeO 采用容量法(VOL)测试,As、Sb采用氢化物-原子荧光光谱法(HG-AFS)测试,分析准确度和精度优于10%。

5 分析结果

5.1 锆石U-Pb年龄

本次选取的3件样品中锆石粒度在150~200 μm ,长短轴比一般为1.5:1~3:1,呈浅褐黄色,半透明或透明,自形短柱状及双锥状晶体,晶棱及晶面清楚,晶型良好。2017N1内选取了26个锆石开展LA-ICP-MS U-Pb同位素测年分析,锆石震荡环带清晰,Th/U比值0.50~1.57,为典型的岩浆锆石。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值(118.10 ± 0.66) Ma(MSWD=1.6)(图4,图5,表1);2017N2内选取了20个锆石开展LA-ICP-MS U-Pb同位素测年分析,锆石震荡环带清晰,Th/U比值0.56~1.35,均大于0.1,锆石震荡环带明显,为岩浆锆石, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值(118.52 ± 0.78) Ma(MSWD=1.8)(图6,图7,表1);2017N3内选取了29个锆石微区开展LA-ICP-MS U-Pb同位素测年分析,锆石震荡环带清晰,Th/U比值0.26~1.35,均大于0.1,属于岩浆锆石, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值(118.80 ± 0.67) Ma(MSWD=1.9)(图8,图9,表1)。3件样品的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄与 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄在误差允许范围内基本一致,在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图(图5,图7,图9)上分析点均落在谐和线及其附近。实验结果显示院格庄岩体锆石的加权平均年龄在118.10~118.80

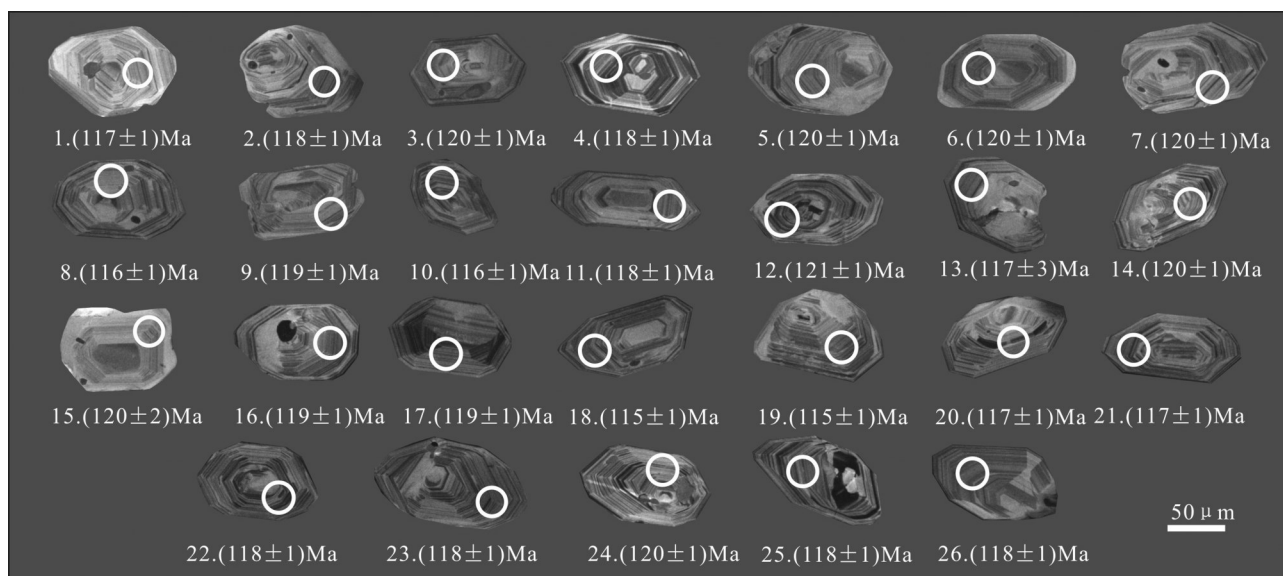


图4 崖西单元样品2017N1锆石阴极发光图像

Fig.4 Representative CL images and U-Pb ages of zircons from samples 2017N1 collected from Yaxi unite

表1 院格庄岩体样品的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotope analytical results of Yuangezhuang pluton

样品号	$^{238}\text{U}/10^{-6}$	$^{232}\text{Th}/10^{-6}$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	同位素比值						年龄/Ma					
				$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ
2017N1-1	165	173	1.0503	0.1197	0.0049	0.0184	0.0002	0.0472	0.0019	117	1	115	5	60	96
2017N1-2	257	390	1.5188	0.1216	0.0035	0.0185	0.0002	0.0478	0.0013	118	1	117	3	89	65
2017N1-3	179	205	1.1420	0.1200	0.0043	0.0187	0.0002	0.0464	0.0016	120	1	115	4	19	85
2017N1-4	387	610	1.5768	0.1249	0.0026	0.0184	0.0002	0.0492	0.0010	118	1	120	2	156	46
2017N1-5	199	193	0.9723	0.1240	0.0044	0.0187	0.0002	0.0480	0.0017	120	1	119	4	101	81
2017N1-6	176	164	0.9344	0.1239	0.0049	0.0188	0.0002	0.0479	0.0018	120	1	119	5	95	91
2017N1-7	188	199	1.0575	0.1218	0.0042	0.0187	0.0002	0.0472	0.0016	120	1	117	4	57	82
2017N1-8	293	459	1.5654	0.1240	0.0035	0.0181	0.0002	0.0497	0.0013	116	1	119	3	180	62
2017N1-9	185	205	1.1058	0.1252	0.0054	0.0186	0.0002	0.0488	0.0020	119	1	120	5	139	98
2017N1-10	326	292	0.8950	0.1275	0.0029	0.0182	0.0002	0.0508	0.0011	116	1	122	3	231	50
2017N1-11	280	303	1.0815	0.1259	0.0032	0.0185	0.0002	0.0492	0.0012	118	1	120	3	158	59
2017N1-12	341	375	1.1007	0.1275	0.0028	0.0189	0.0002	0.0489	0.0010	121	1	122	3	142	49
2017N1-13	190	95	0.5014	0.1310	0.0318	0.0183	0.0004	0.0520	0.0120	117	3	125	30	286	526
2017N1-14	336	368	1.0956	0.1288	0.0070	0.0188	0.0002	0.0496	0.0026	120	1	123	7	177	122
2017N1-15	139	94	0.6712	0.1327	0.0153	0.0188	0.0003	0.0512	0.0058	120	2	127	15	248	260
2017N1-16	186	240	1.2925	0.1224	0.0045	0.0187	0.0002	0.0476	0.0017	119	1	117	4	77	83
2017N1-17	227	194	0.8538	0.1221	0.0040	0.0186	0.0002	0.0477	0.0015	119	1	117	4	85	72
2017N1-18	277	435	1.5687	0.1253	0.0030	0.0180	0.0002	0.0504	0.0012	115	1	120	3	216	54
2017N1-19	215	248	1.1561	0.1213	0.0042	0.0180	0.0002	0.0490	0.0016	115	1	116	4	147	78
2017N1-20	226	286	1.2665	0.1190	0.0039	0.0183	0.0002	0.0471	0.0015	117	1	114	4	54	76
2017N1-21	289	329	1.1364	0.1274	0.0031	0.0183	0.0002	0.0505	0.0012	117	1	122	3	218	54
2017N1-22	326	399	1.2230	0.1290	0.0030	0.0185	0.0002	0.0506	0.0011	118	1	123	3	223	50
2017N1-23	294	367	1.2468	0.1232	0.0029	0.0185	0.0002	0.0482	0.0011	118	1	118	3	111	54
2017N1-24	312	369	1.1810	0.1314	0.0030	0.0188	0.0002	0.0507	0.0011	120	1	125	3	229	50
2017N1-25	356	353	0.9905	0.1249	0.0027	0.0184	0.0002	0.0492	0.0010	118	1	120	3	158	48
2017N1-26	159	118	0.7393	0.1214	0.0048	0.0185	0.0002	0.0475	0.0019	118	1	116	5	74	93
2017N2-1	651	767	1.1775	0.1261	0.0028	0.0186	0.0002	0.0493	0.0010	119	1	121	3	161	50
2017N2-2	456	374	0.8190	0.1195	0.0027	0.0186	0.0002	0.0466	0.0010	119	1	115	3	28	52
2017N2-3	716	910	1.2708	0.1234	0.0027	0.0187	0.0002	0.0479	0.0010	119	1	118	3	92	50
2017N2-4	563	572	1.0159	0.1316	0.0024	0.0191	0.0002	0.0499	0.0009	122	1	126	2	192	41
2017N2-5	660	536	0.8128	0.1275	0.0024	0.0184	0.0002	0.0502	0.0008	118	1	122	2	205	37
2017N2-6	639	554	0.8667	0.1205	0.0020	0.0187	0.0002	0.0467	0.0007	119	1	115	2	36	37
2017N2-7	530	481	0.9077	0.1277	0.0024	0.0188	0.0002	0.0494	0.0009	120	1	122	2	166	41
2017N2-8	91	80	0.8815	0.1233	0.0140	0.0189	0.0002	0.0473	0.0055	121	1	118	13	62	276
2017N2-9	67	91	1.3590	0.1246	0.0213	0.0190	0.0003	0.0475	0.0082	121	2	119	20	75	410
2017N2-10	62	77	1.2355	0.1236	0.0164	0.0187	0.0002	0.0479	0.0067	120	2	118	16	93	331
2017N2-11	76	61	0.8024	0.1279	0.0210	0.0188	0.0003	0.0493	0.0080	120	2	122	20	164	381
2017N2-12	647	589	0.9101	0.1194	0.0021	0.0184	0.0002	0.0471	0.0008	118	1	115	2	52	40
2017N2-13	489	343	0.7012	0.1205	0.0023	0.0184	0.0002	0.0476	0.0009	117	1	115	2	79	43
2017N2-14	486	423	0.8702	0.1293	0.0022	0.0182	0.0002	0.0514	0.0008	117	1	123	2	259	37
2017N2-15	633	540	0.8542	0.1167	0.0020	0.0181	0.0002	0.0467	0.0007	116	1	112	2	32	38
2017N2-16	501	352	0.7023	0.1299	0.0023	0.0185	0.0002	0.0510	0.0008	118	1	124	2	241	38
2017N2-17	472	342	0.7251	0.1231	0.0024	0.0183	0.0002	0.0487	0.0009	117	1	118	2	133	44

续表1

样品号	同位素比值										年龄/Ma					
	$^{238}\text{U}/10^{-6}$	$^{232}\text{Th}/10^{-6}$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	
2017N2-18	503	329	0.6549	0.1222	0.0024	0.0182	0.0002	0.0488	0.0009	116	1	117	2	137	41	
2017N2-19	534	457	0.8564	0.1270	0.0024	0.0186	0.0002	0.0494	0.0009	119	1	121	2	167	41	
2017N2-20	355	199	0.5609	0.1235	0.0031	0.0186	0.0002	0.0481	0.0012	119	1	118	3	106	57	
2017N3-1	422	231	0.5459	0.1279	0.0028	0.0190	0.0002	0.0488	0.0010	121	1	122	3	137	49	
2017N3-2	383	272	0.7102	0.1279	0.0032	0.0188	0.0002	0.0494	0.0012	120	1	122	3	166	56	
2017N3-3	539	428	0.7934	0.1237	0.0021	0.0186	0.0002	0.0482	0.0007	119	1	118	2	111	36	
2017N3-4	526	329	0.6248	0.1304	0.0024	0.0186	0.0002	0.0508	0.0009	119	1	124	2	233	40	
2017N3-5	348	469	1.3454	0.1280	0.0082	0.0189	0.0002	0.0491	0.0029	121	2	122	8	154	136	
2017N3-6	627	406	0.6479	0.1232	0.0020	0.0182	0.0002	0.0492	0.0007	116	1	118	2	158	34	
2017N3-7	938	778	0.8295	0.1287	0.0020	0.0183	0.0002	0.0510	0.0007	117	1	123	2	241	31	
2017N3-8	1016	487	0.4788	0.1289	0.0019	0.0189	0.0002	0.0494	0.0006	121	1	123	2	168	29	
2017N3-9	716	647	0.9031	0.1238	0.0020	0.0191	0.0002	0.0470	0.0007	122	1	118	2	47	35	
2017N3-10	628	441	0.7019	0.1307	0.0029	0.0189	0.0002	0.0501	0.0010	121	1	125	3	201	46	
2017N3-11	431	234	0.5429	0.1262	0.0027	0.0190	0.0002	0.0483	0.0010	121	1	121	3	113	47	
2017N3-12	615	157	0.2560	0.1330	0.0044	0.0185	0.0002	0.0521	0.0017	118	1	127	4	290	73	
2017N3-13	476	308	0.6470	0.1316	0.0024	0.0187	0.0002	0.0510	0.0008	120	1	126	2	241	37	
2017N3-14	413	215	0.5213	0.1314	0.0027	0.0187	0.0002	0.0509	0.0010	120	1	125	3	237	45	
2017N3-15	574	647	1.1263	0.1220	0.0022	0.0182	0.0002	0.0486	0.0008	116	1	117	2	131	40	
2017N3-16	534	443	0.8293	0.1268	0.0023	0.0185	0.0002	0.0496	0.0008	118	1	121	2	177	37	
2017N3-17	668	518	0.7757	0.1221	0.0020	0.0186	0.0002	0.0475	0.0007	119	1	117	2	76	34	
2017N3-18	498	441	0.8862	0.1262	0.0024	0.0186	0.0002	0.0491	0.0008	119	1	121	2	154	40	
2017N3-19	754	768	1.0183	0.1234	0.0019	0.0188	0.0002	0.0477	0.0006	120	1	118	2	85	32	
2017N3-20	643	477	0.7422	0.1268	0.0021	0.0184	0.0002	0.0499	0.0008	118	1	121	2	189	38	
2017N3-21	369	224	0.6065	0.1253	0.0029	0.0188	0.0002	0.0484	0.0010	120	1	120	3	121	50	
2017N3-22	326	273	0.8374	0.1322	0.0036	0.0187	0.0002	0.0513	0.0013	119	1	126	3	253	58	
2017N3-23	443	339	0.7654	0.1264	0.0026	0.0186	0.0002	0.0492	0.0010	119	1	121	3	157	45	
2017N3-24	510	448	0.8781	0.1251	0.0022	0.0180	0.0002	0.0503	0.0008	115	1	120	2	210	38	
2017N3-25	852	659	0.7738	0.1250	0.0019	0.0183	0.0002	0.0495	0.0007	117	1	120	2	172	32	
2017N3-26	575	357	0.6212	0.1237	0.0024	0.0188	0.0002	0.0476	0.0010	120	1	118	2	81	48	
2017N3-27	497	403	0.8112	0.1230	0.0023	0.0187	0.0002	0.0478	0.0008	119	1	118	2	90	41	
2017N3-28	546	663	1.2139	0.1226	0.0027	0.0184	0.0002	0.0483	0.0008	118	1	117	3	114	40	
2017N3-29	468	336	0.7172	0.1216	0.0024	0.0182	0.0002	0.0485	0.0009	116	1	117	2	122	42	

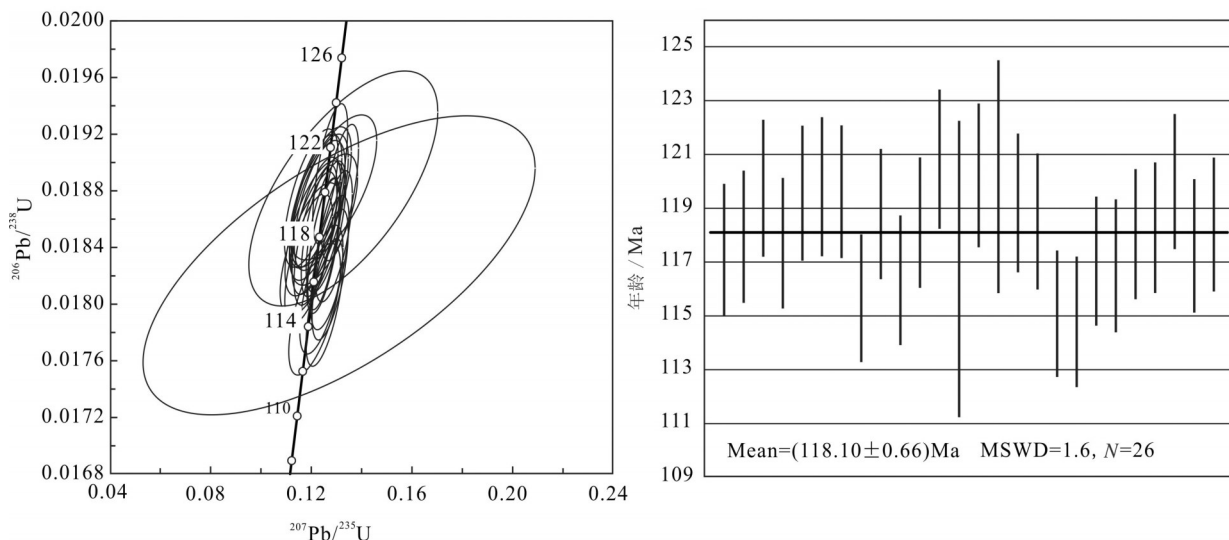


图5 崖西单元样品2017N1 LA-ICP-MS 锆石U-Pb年龄谱和年龄图
Fig.5 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagram of samples 2017N1 form Yaxi pluton

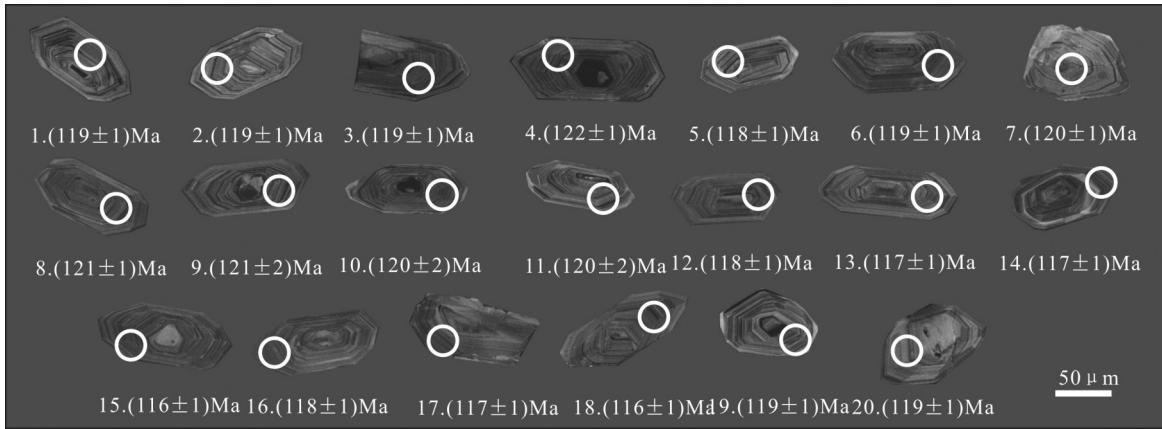


图6 后野单元样品 2017N2 锆石阴极发光图像

Fig.6 Representative CL images and U-Pb ages of zircons from samples 2017N2 collected from Houye unite

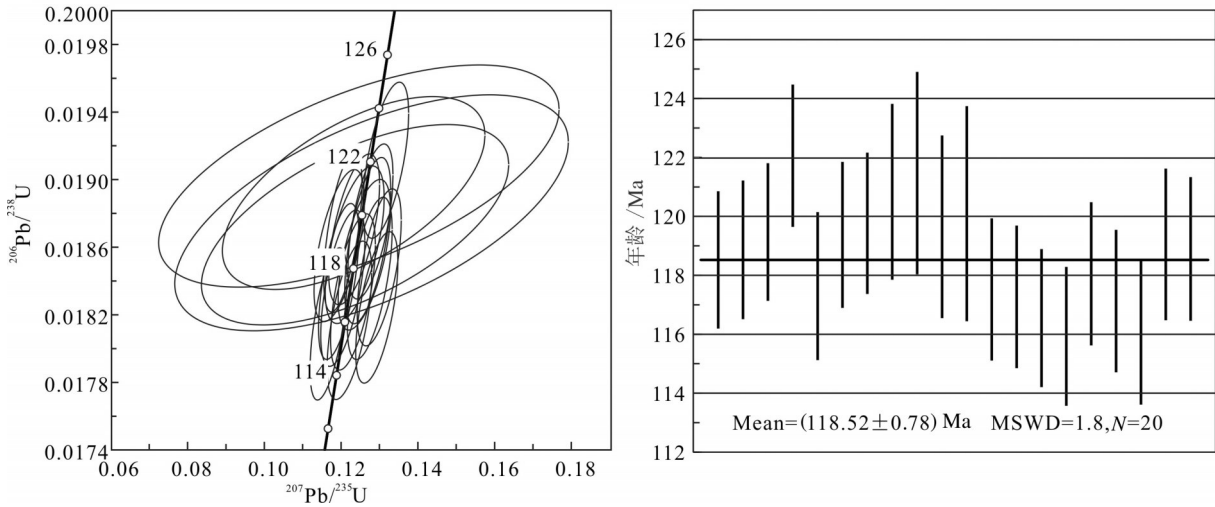


图7 后野单元样品 2017N2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谐和年龄图

Fig.7 LA-ICP-MS zircon U-Pb Concordia diagram of samples 2017N2 form Houye unite

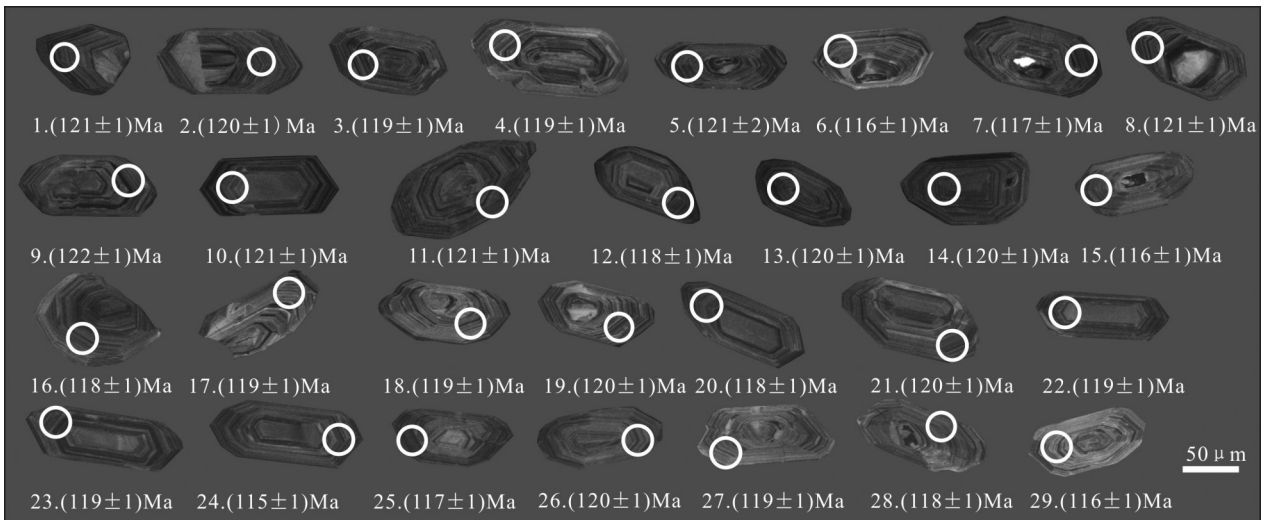


图8 西上寨单元花岗岩样品 2017N3 锆石阴极发光图像及 U-Pb 年龄

Fig.8 Representative CL images and U-Pb ages of zircons from samples 2017N3 collected from Xishangzhai unite

表2 院格庄岩体的主量元素(%),微量元素和稀土元素(10^{-6})化学成分Table 2 Chemical compositions of major elements (%), trace elements and REE elements (10^{-6}) of the Yuangezhuang pluton

组分	YX1	YX2	HY1	HY2	XSZ1	XSZ2	组分	YX1	YX2	HY1	HY2	XSZ1	XSZ2
SiO ₂	68.8	66.49	70.34	71.2	72.28	71.41	B	2	2.5	3.9	3.6	4.4	3.3
TiO ₂	0.36	0.41	0.37	0.32	0.29	0.29	Rb	105.1	97.03	94.9	99.9	129.9	123.6
Al ₂ O ₃	15.4	16.03	14.77	14.39	14.39	14.68	Ta	1.09	1.37	1.18	1.61	0.98	1.19
Fe ₂ O ₃	1.38	2.01	1.13	0.9	0.88	0.94	U	2.73	1.88	2.73	5.04	4.02	2.75
FeO	1.52	1.58	1.48	1.51	1.29	1.26	La	54.58	48.77	38.88	34.04	34.63	34.91
MnO	0.05	0.05	0.05	0.06	0.04	0.04	Ce	77.74	77.95	69.22	53.33	61.29	62.25
MgO	1.47	1.77	1.22	1.00	0.85	0.88	Pr	8.82	8.36	7	6.52	6.4	6.11
CaO	3.04	3.33	2.72	2.62	2.25	2.24	Nd	28.64	28.68	23.76	22.89	21.53	20.6
Na ₂ O	3.55	3.35	3.19	3.26	3.45	3.9	Sm	4.68	4.48	4.16	4.18	3.72	3.69
K ₂ O	4	4.25	4.1	3.97	3.94	3.89	Eu	1.2	1.14	1.04	1.05	0.89	0.92
P ₂ O ₅	0.16	0.18	0.15	0.12	0.11	0.1	Gd	3.43	3.01	2.77	2.83	2.5	2.37
H ₂ O ⁺	0.19	0.43	0.22	0.36	0.16	0.29	Tb	0.56	0.38	0.46	0.48	0.42	0.41
A/CNK	0.98	0.99	1.01	1.00	1.02	1.00	Dy	2.99	2.45	2.27	2.5	2.18	2.16
A/NK	1.51	1.58	1.52	1.49	1.45	1.38	Ho	0.59	0.39	0.44	0.49	0.43	0.43
Li	23.28	19.75	32.46	48.33	49.21	54.81	Er	1.71	1.03	1.2	1.4	1.22	1.19
Be	2.28	1.18	2.58	2.28	2.45	3.92	Tm	0.27	0.21	0.19	0.23	0.2	0.2
Nb	14.68	10.16	15.22	18.98	16.67	18.44	Yb	1.31	1.3	0.78	1.07	0.86	0.86
Ga	18.72	18.86	18.12	20.73	18.73	20.01	Lu	0.26	0.22	0.18	0.22	0.2	0.2
Zr	133.8	98.2	113.8	88.1	110.7	135	Y	16.29	12.38	10.06	11.01	9.97	9.41
Sr	77.24	903.01	548.12	494.33	436.72	483.91	Y+Nb	18.29	14.88	13.96	14.61	14.37	12.71
Hf	2.1	1.53	2.13	3.36	2.93	3.14	ΣREE	186.78	178.37	152.35	131.23	136.47	136.3
V	57.23	53.67	44.16	39.63	34.62	44.07	LREE	175.66	169.38	144.06	122.01	128.46	128.48
Cr	42.29	29.45	24.49	19.68	18.31	20.82	HREE	11.12	8.99	8.29	9.22	8.01	7.82
Ni	14.81	11.99	10.41	8.78	5.74	11.84	LREE/HREE	15.8	18.84	17.38	13.23	16.04	16.43
Cu	1.54	2.63	2.07	2.74	3.04	2.24	La _N /Yb _N	29.89	26.91	35.75	22.82	28.88	29.12
Te	0.12	0.03	0.04	0.07	0.11	0.08	δEu	0.92	0.95	0.94	0.93	0.89	0.95
F	157.9	229.1	275.9	302.9	374.3	302.9	δCe	0.87	0.95	1.03	0.88	1.01	1.05

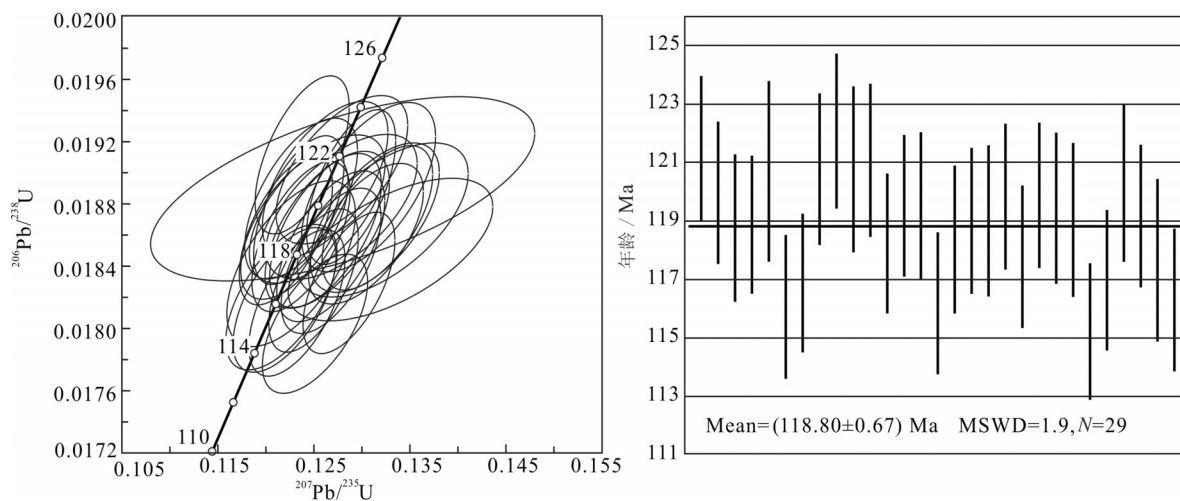


图9 西上寨单元花岗岩样品2017N3 LA-ICP-MS锆石U-Pb谐和年龄图

Fig.9 LA-ICP-MS zircon U-Pb Concordia diagram of samples 2017N3 from Xishangzai unite

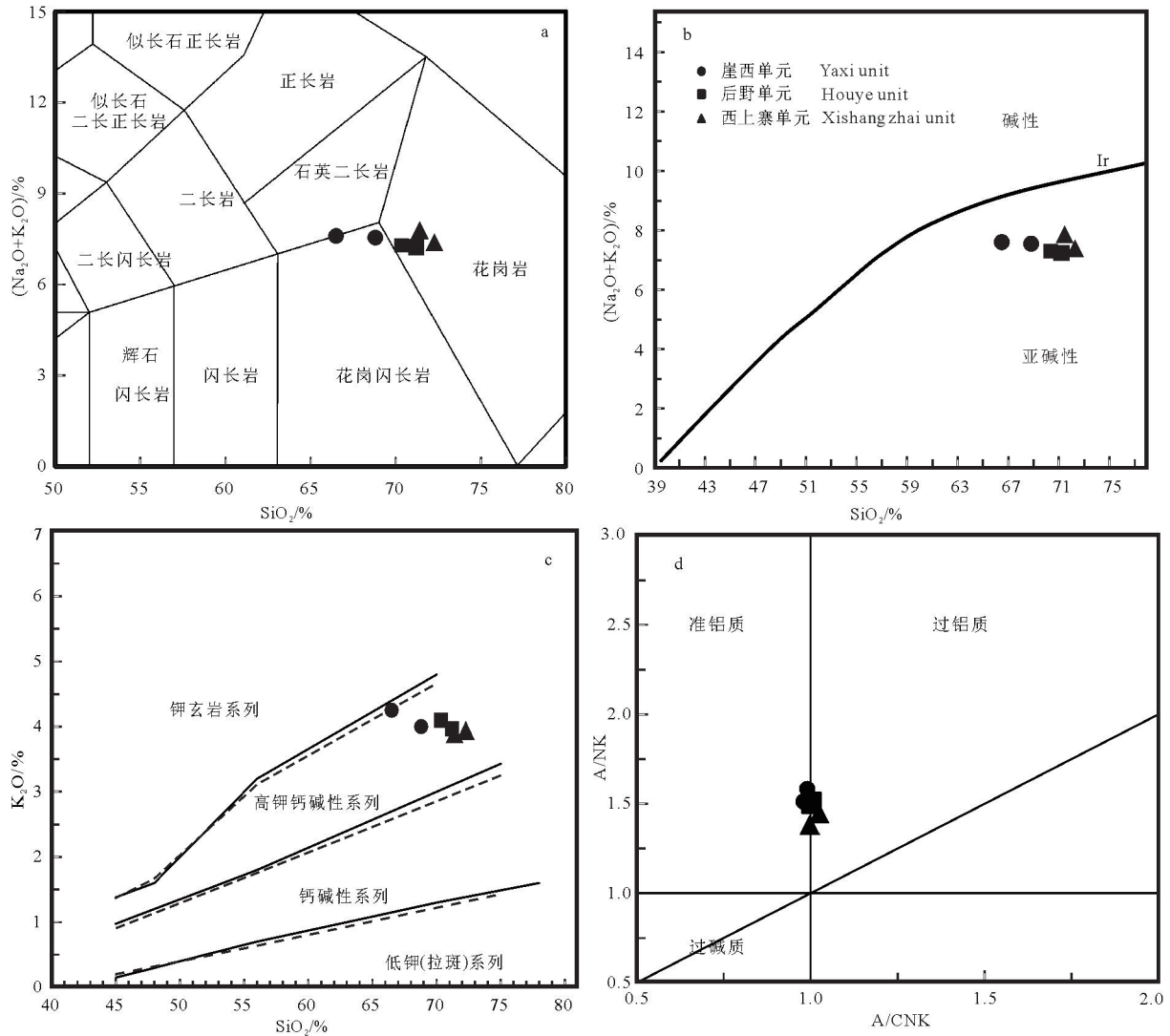


图10 岩石地球化学分类图

a—花岗岩 TAS 分类图 (Middlemost, 1994); b—碱性及亚碱性系列判别图 (Irvine and Baragar, 1971); c—岩石系列 SiO₂-K₂O 图解 (Peccerillo and Taylor, 1976); d—岩石类型 A/CNK-A/NK 图解 (Maniar and Piccoli, 1989)

Fig.10 Geochemical classification diagrams of granite

a-TSA classification diagram of granite (Middlemost, 1994); b-Alkaline and alkaline diagram for granite (Irvine and Baragar, 1971); c-K₂O vs. SiO₂ diagram for granite (Peccerillo and Taylor, 1976); d-A/NK vs. A/CNK diagram for granite (Maniar and Piccoli, 1989)

Ma, 谐和年龄在 115 ~ 122 Ma。

5.2 主量元素

岩石主量元素分析结果列于表2, 从表中可以看出, SiO₂ 含量为 68.8% ~ 72.28%、Al₂O₃ 为 14.39% ~ 16.03%、MgO 为 0.85% ~ 1.77%, K₂O/Na₂O 比值为 1.00 ~ 1.29, 在花岗岩 TAS 图解 (图 10a) 上, 样品数据主要落于花岗岩区域。岩石总体富碱 (K₂O+Na₂O=7.23 ~ 7.79)。在 SiO₂-(K₂O+Na₂O) 图解上, 样品均落在亚碱性岩区域, 属高钾钙碱性系列 (图 10b、c)。铝饱和指数 ASI (A/CNK=0.98 ~ 1.02, < 1.1) 显示为

准铝质花岗岩 (图 10d), 为富铝 (14.39% ~ 16.03%), 富硅 (66.49% ~ 72.28%, >65%) 花岗岩。

5.3 稀土和微量元素

3 个侵入岩单元样品的稀土及微量元素分析结果列于表 2, 岩石稀土元素总量 ΣREE 介于 131.23 × 10⁻⁶ ~ 186.78 × 10⁻⁶, LREE 含量为 122.01 × 10⁻⁶ ~ 175.66 × 10⁻⁶, HREE 含量为 7.82 × 10⁻⁶ ~ 11.12 × 10⁻⁶, δEu=0.84~0.93, δCe=0.87~1.05, LREE/HREE 介于 13.23~18.84, (La/Yb)_N 为 26.91~35.75 显示出明显的轻重稀土分流明显, 轻稀土富集的特征。在球粒陨石

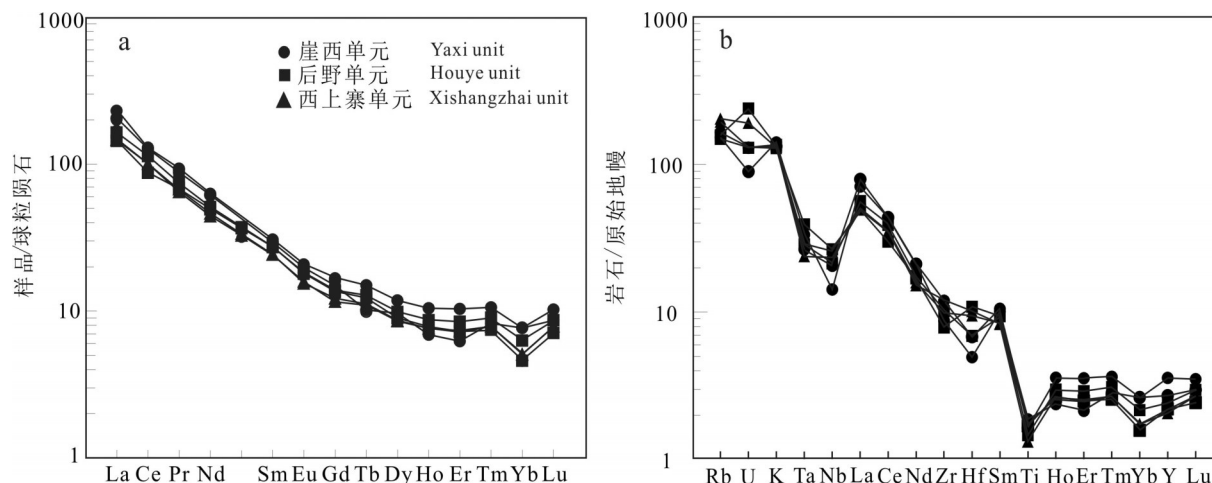


图11 院格庄岩体球粒陨石标准化稀土元素分布型式图(a,球粒陨石标准化值据 Boynton, 1984)及原始地幔标准化微量元素蛛网图(b,原始地幔标准化值据 Sun et al., 1989)

Fig.11 Chondrite-normalized REE patterns(a, chondrite normalized values after Boynton, 1984) and primitive mantle-normalized traceelement spidergrams (b, primitive mantle normalized values after Sun et al., 1989) for the Yuangezhuang pluton

稀土元素配分图解(图11)中可以看出,岩石呈明显的轻稀土富集、重稀土分布平坦的右倾型模式,负锶异常不明显,暗示了斜长石的分离结晶作用较弱。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图中,样品均表现出Rb、K、U等大离子亲石元素相对富集,Nb、Ta、Ti等高场强元素相对亏损的特征,显示弧岩浆岩特征,其中Nb-Ta-Ti的亏损可能是由于含Ti矿物(如钛铁矿、榍石)的分离结晶作用引起的,Eu的亏损则是由于斜长石的分离结晶作用产生的。利用相容性较差的几个强不活动元素比值可以判断岩浆的源区,样品Rb/Nb介于5.26~9.55,平均7.12,La/Nb介于1.79~4.80,平均2.81,接近大陆壳特征(Weaver, 1991),说明岩体起源于上地壳岩石的部分熔融,而暗色包体的存在,暗示了幔源物质的混入。

6 讨论

6.1 成因类型、构造环境分析

院格庄岩体各单元产出空间相邻、无明显界线。岩石为似斑状结构,斑晶皆为钾长石,从边缘到中心有小-大-大-密-疏-少的变化特征。闪长质包体主要分布于岩体边缘。该岩体应为同一次岩浆侵入作用下,由于岩浆结晶温度的不同而展现的特征差异,由外而内分别与边缘相、过渡相、中心相对应。三个侵入单元获得的LA-ICP-MS锆石U-Pb加权平均年龄皆为(118±)Ma,属于伟德山期花岗岩(王世进等,2009)。岩石主量元素显示具有

高硅高碱高铝饱和指数($A/NCK > 1.1$)的特征,同时 P_2O_5 (0.1% ~ 0.18%)、 MgO (0.85% ~ 1.77%)、 TiO_2 (0.29% ~ 0.41%)含量偏低,显示了I型花岗岩的特点。Rb/Sr值绝大多数为0.05 ~ 0.59,数值较低,说明该花岗岩是壳幔混熔成因的深成型花岗岩类,这与岩体中普遍发育的指示地幔来源的暗色包体相符(宋明春等,2003;王对兴等,2019)。在成因类型判别图中,(Zr+Nb+Ce+Y)值 $171.42 \times 10^{-6} \sim 242.51 \times 10^{-6}$,平均 207.44×10^{-6} ,小于 350×10^{-6} ,样品落入OGT范围内(图12a、b);而10000Ga/Al值2.22 ~ 2.72,平均2.43,小于2.6,岩石样品基本落入I&S型花岗岩内(图12c~f),与I型花岗岩的特征相对应。

Pichavant等(1992)指出,磷在强过铝质的熔体中,具有高的溶解度,并随着分异程度的增加含量升高;而在偏铝质或弱过铝质的熔体中,具有很低的溶解度,且随分异程度的增加含量降低。在保证演化样品属于同一岩套的前提下, P_2O_5 和 SiO_2 的关系可以作为鉴别I型和S型花岗岩的一种有效手段。从图13可以看出,院格庄岩体 P_2O_5 含量随着 SiO_2 含量的升高,呈明显降低的趋势,显示出I型花岗岩的特征。

院格庄岩体岩石为准铝质、高钾钙碱性系列的I型花岗岩,类似于活动大陆边缘花岗岩的岩石组合特征。在Nb-Y和(Y+Nb)-Rb构造环境判别图解(图14)上,样品点分别落入火山弧+碰撞花岗岩、火山弧花岗岩区域,亦反映出与火山弧构造环境的

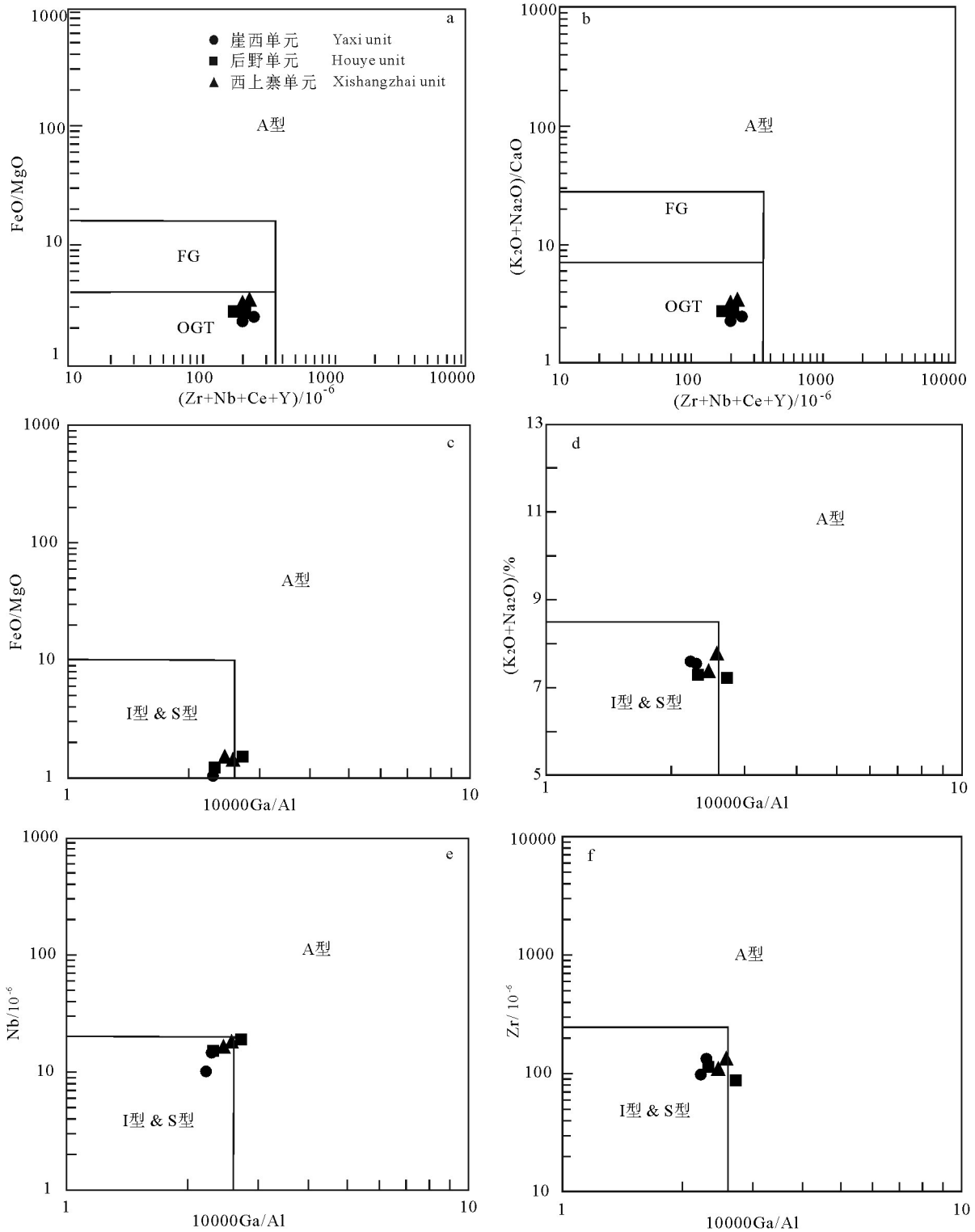


图 12 I 型花岗岩成因类型判别

a— $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})-\text{FeO}/\text{MgO}$ 图解; b— $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}$ 图解; c— $10000\text{Ca}/\text{Al}-\text{FeO}/\text{MgO}$ 图解;
d— $10000\text{Ca}/\text{Al}-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 图解; e— $10000\text{Ca}/\text{Al}-\text{Nb}$ 图解(据 Whalen et al., 1987)

Fig.12 Diagram showing the genetic type of the I-type granite

a—Diagram of $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ versus FeO/MgO ; b—Diagram of $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ versus $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}$; c—Diagram of $10000\text{Ca}/\text{Al}$ versus FeO/MgO ; d—Diagram of $10000\text{Ca}/\text{Al}$ versus $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$; e—Diagram of $10000\text{Ca}/\text{Al}$ versus Nb ; f—Diagram of $10000\text{Ca}/\text{Al}$ versus Zr (after Whalen et al., 1987)

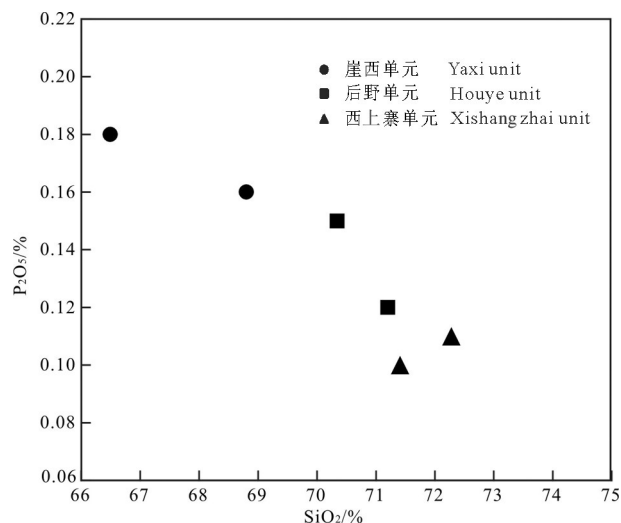


图13 SiO₂-P₂O₅图解
Fig.13 SiO₂ vs. P₂O₅ diagram

亲缘性。

6.2 岩体与成矿作用的关系

伟德山期侵入岩属胶东中生代第三期岩浆活动,与燕山晚期金及多金属成矿期相对应(丁正江等,2013),近年来发现的铜钼多金属矿床(点)均与此期岩浆活动有关。其中孔辛头矽卡岩型铜钼矿就位于院格庄岩体崖西单元与荆山群陡崖组大理岩接触部位形成的矽卡岩矿体(图15),辉钼矿样品Re-Os加权平均值年龄为(117.82±0.82)Ma,黄铜矿Re-Os等时线年龄为(118.4±3.2)Ma(李超等,

2016),孔辛头铜钼矿床的成矿时代为早白垩世,与院格庄岩体成岩时代一致,表明了院格庄岩体为该矿床的成矿母岩(李超等,2016)。与院格庄岩体同源的牙山岩体,其SHRIMP锆石测年为(117.7±2.9)Ma(邱连贵等,2008),亦形成于早白垩世,为壳幔混熔型花岗岩(韩宗珠等,2011)。尚家庄斑岩型钼矿床产于牙山岩体中,对尚家庄钼矿的辉钼矿进行Re-Os同位素测年,其成矿时代为(116.4±1.6)Ma,与牙山岩体成岩年龄相一致;辉钼矿中Re含量 $17.74 \times 10^{-6} \sim 23.72 \times 10^{-6}$,平均 20.21×10^{-6} ,指示成矿物质为壳幔混合来源(李杰等,2013),说明牙山岩体为尚家庄钼矿的成矿母岩。区内早白垩世岩体周缘可形成矽卡岩型矿床,在岩体内可形成斑岩型矿床,具有铜钼矿成矿专属性。

已有研究表明,伟德山期花岗岩是由壳源酸性岩浆与幔源基性岩浆混合形成的(宋明春等,2010),花岗岩中大量的闪长质包体记录了岩浆混合的痕迹(张华峰等,2004)。上述典型矿床成矿物质来源均显示了混合源的岩浆特征,由此分析,伟德山期花岗岩与铜、钼矿床成矿关系密切,而院格庄岩体更是该区铜钼多金属矿的成矿母岩,该期岩体的形成,为铜钼多金属矿成矿提供了热流体和成矿物质。

由前述可知,研究区多金属矿床与院格庄岩体为同一时期岩浆活动的产物,成岩时代限定了成矿时代下限,即多金属矿床成矿时代不早于118 Ma。白垩纪以来,太平洋板块向欧亚板块俯冲,胶

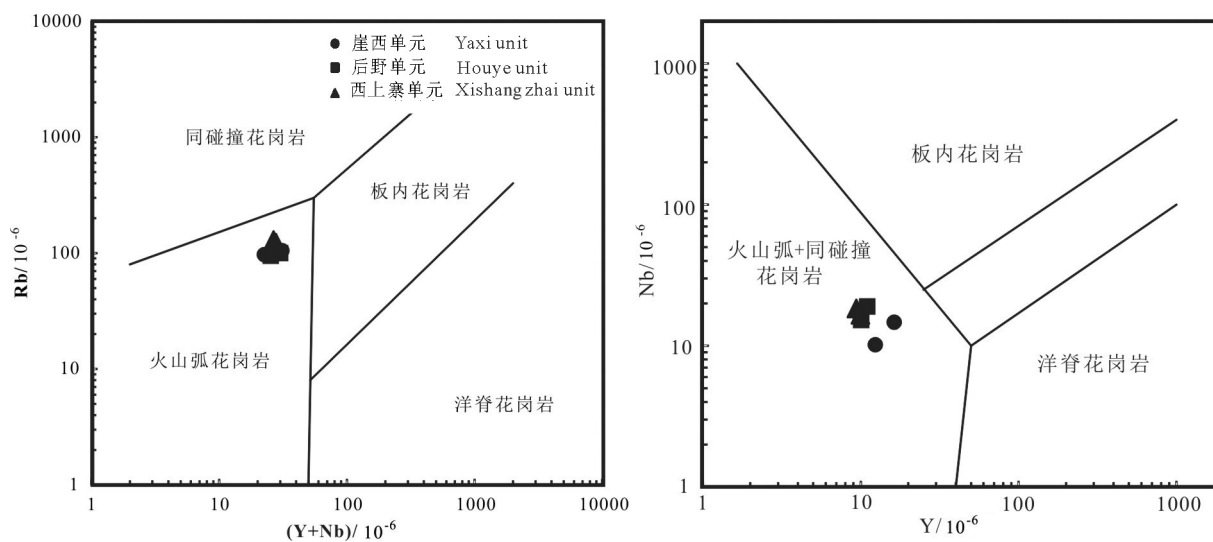


图14 (Y+Nb)-Rb及Y-Nb构造环境判别图解(据Pearce et al., 1984)
Fig.14 The diagrams of (Y+Nb) vs. Pb and Y vs. Nb(after Pearce et al., 1984)

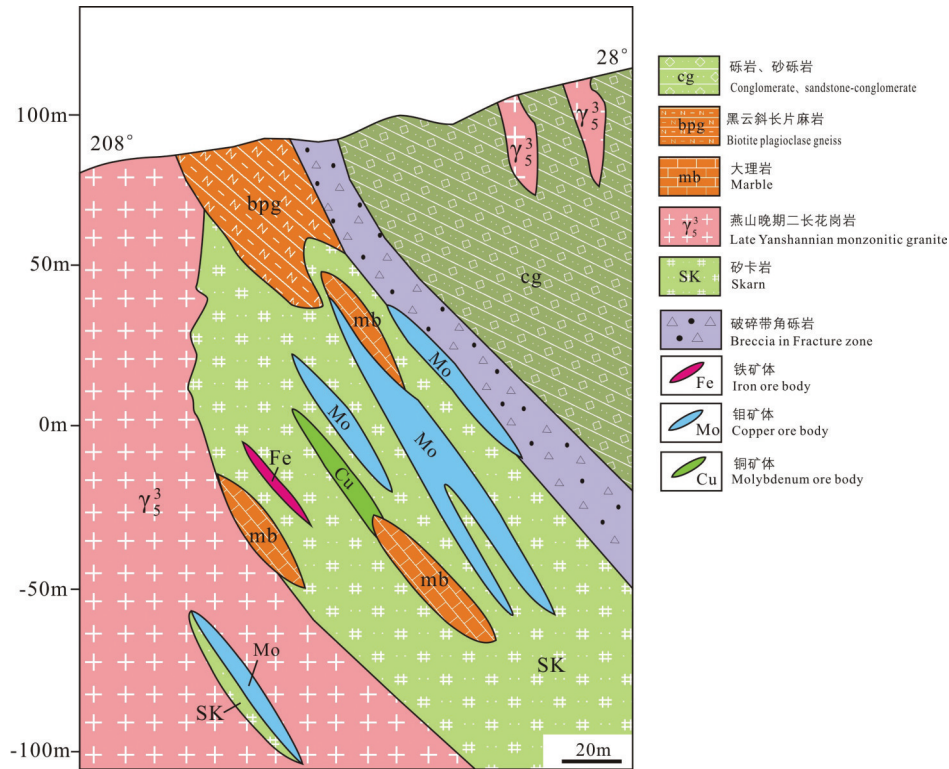


图 15 牟平孔辛头铜钼矿床 18 线地质剖面图
(山东省冶金地质勘探公司第三勘探队, 1979)

Fig.15 Sketch geological section along No.18 exploration line in the Kong Xintou Cu-Mo deposit, Muping
(modified from No.3 Geological Party of Metallurgical Geology Exploration Company Shandong Province)

东地区处于弧后拉张的构造环境之下,岩石圈地幔减薄,软流圈上涌,促使壳幔相互作用,形成壳幔混合岩浆并脉动式上侵,而岩浆中携带的大量的成矿物质由于重力分异作用在岩体侵位边部与碳酸盐岩接触交代,在构造有利部位富集成矿,形成砂卡岩型矿床;而处于中部的含矿流体,在上升过程中,随着温压条件的降低,含矿流体内部物理化学平衡条件受到破坏,成矿物质在裂隙等构造薄弱地带沉积成矿,形成斑岩型矿床。

7 结 论

(1) 院格庄岩体 3 个岩相带 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 加权平均年龄分别为 (118.10 ± 0.66) Ma、 (118.52 ± 0.78) Ma、 (118.80 ± 0.67) Ma, 为同一期岩浆侵入体。

(2) 院格庄岩体具有高钾钙碱性、准铝质系列 (K_2O/Na_2O 值为 1.00 ~ 1.29、 $A/CNK=0.98 \sim 1.02$) 特征,岩石轻重稀土元素分馏明显,轻稀土富集,具有弱的负铕异常,微量元素具富集大离子亲石元素,亏损

高场强元素特征。为 I 型花岗岩,属于壳幔混熔型。

(3) 院格庄岩体对其周缘铜钼成矿具有专属性,制约着矿床的产出时代和空间分布。

致谢: 审稿专家为论文提供了宝贵意见;天津地质调查中心田杰鹏博士和何江涛博士在试验测试工作方面给予了帮助,在此一并诚挚感谢!

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, (1/2):59-79.
- Boynnton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[C]/Henderson P(ed.). *Rare Earth Element Geochemistry*[J]. Elsevier, 63-114.
- Chappell B W, White A J R. 1992. I- and S- type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. *Geological Society of America Special Papers*, 272:1-26.
- Cui Kerui, Shi Yangshen. 1994. Offset of rock bodies on both sides of Muping-Qingdao fault zone in eastern Shandong, China[J]. *Journal of Nanjing University(Natural Science edition)*, 30 (4):648-661.
- Ding Zhengjiang, Sun Fengyue, Liu Fulai, Liu Jianhui, Liu Dianhao,

- Zhang Pijian, Du Shengxian, Li Bing. 2013. U–Pb dating of zircons from the weideshan molybdenum copper polymetallic deposits in Jiaodong peninsula, China, and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2):607–618(in Chinese with English abstract).
- Ding Zhengjiang, Sun Fengyue, Liu Fulai, Liu Jianhui, Peng Qiming, Ji Pan, Li Bile, Zhang Pijian. 2015. Mesozoic geodynamic evolution and metallogenic series of major metal deposits in Jiaodong Peninsula, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(10): 3045–3080 (in Chinese with English abstract).
- Han Zongzhu, Zhang He, Tian Yuan, Deng Shenggui, Zhang Kaidi, Wang Shujie, Gao Fang. 2011. Geochemistry and granodiorites from the Qixia in Shandong Province[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 41(6): 97–103(in Chinese with English abstract).
- Huang Yonghua, You Huichuan, Song Yisheng, Guo Yugui, Huan Wenlin. 2007. Recent activity of faults in Jiaodong Peninsula, Shandong[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2(1): 39–49(in Chinese with English abstract).
- Irvine T N, Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8: 523–548.
- Li Chao, Pei Haoxiang, Wang Denghong, Zhou Limin, Zhao Hong, Li Xinwei, Qu wenjun, Du Andao. 2016. Age and source constraints for Kongxintou copper molybdenum deposit Shandong from Re–Os isotope in molybdenite and chalcopyrite[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(2): 240–249(in Chinese with English abstract).
- Li Hongkui, Shi Wenge, Li Yifan, Li Luyi, Han Daicheng, Cao Lili, Liu Jimei. 2013. Study on gold mineralization ages in Jiaodong Area, Shandong Province[J]. *Gold Science and Technology*, 21(3): 1–9(in Chinese with English abstract).
- Li Jie, Song Mingchun, Wang Meiyun, Li Shiyong, Zhou Mingling, Ni Shijun, Zhang Chengjiang, Ding Zhengjiang, Yue Yaopo. 2013. The molybdenite Re–Os age and genetic analysis of the Shangjiazhuang Mo deposit in Jiaodong area[J]. *Geology in China*, 40(5): 1612–1621(in Chinese with English abstract).
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, Gunther Drtlef, Xu Juan, Gao Changui, Chen Haihong. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA–ICP–MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257(1/2):34–43.
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center. Special Publication, 4: 1–71.
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 635–643.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth Science Review*, 37: 215–224.
- Pearce J A, Harris B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25: 956–983.
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc–alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 58: 63–81.
- Pichanant M, Montel J M, Richard L R. 1992. Apatite solubility in peraluminous liquids: Experimental data and an extension of the Harrison–Watson model[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(10): 3855–3861.
- Qiu Liangui, Ren Fenglou, Cao Zhongxiang, Zhang Yueqiao. 2008. Late Mesozoic magmatic activities and their constraints on geotectonics of Jiaodong region [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 32(1): 117–123(in Chinese with English abstract).
- Song Mingchun, Yin Pihou, Cui Shuxue, Xu Junxiang, Zhou Mingling, Jiang Hongli, Huang Tailing, Jiao Xiumei, Wan Guopu, Cao Chunguo. 2013. Thermal uplifting extension–forming theory and its prospecting significance in Jiaodong gold deposit[J]. *Shandong Land and Resources*, 29(7): 1–12(in Chinese with English abstract).
- Song Mingchun, Song Yingxin, Li Jie, Li Shiyong. 2015. Metallogenic Series of gold and nonferrous metal deposits Related to Cretaceous granites in Eastern Shandong Peninsula, China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(5): 828–843(in Chinese with English abstract).
- Song Mingchun, Song Yingxin, Ding Zhengjiang, Li Shiyong. 2018. Jiaodong gold deposits: Essential characteristics and major controversy[J]. *Gold Science and Technology*, 26(4): 406–422(in Chinese with English abstract).
- Song Yingxin, Song Mingchun, Ding Zhengjiang, Wei Xufeng, Xu Shaohui, Li Jie, Tan Xianfeng, Li Shiyong, Zhang Zhaolu, Jiao Xiumei, Hu Hong, Cao Jia. 2017. Major advances on deep prospecting in Jiaodong gold ore cluster and its metallogenic characteristics[J]. *Gold Science and Technology*, 25(3): 4–18(in Chinese with English abstract).
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[C]//Saunders A D, Norry M J(eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society of London Special Publication, 42:313–345.
- Wang Duixing, Guan Qi, Gao Wanli, Li Chunlin, Zhang Juquan, Zhao Kaihua. 2019. Zircon U–Pb age, geochemistry and genesis of the Early Cretaceous mafic enclaves and granites in Tiantai area, eastern Zhejiang Province[J]. *Geology in China*, 46(6): 1512–1529 (in Chinese with English abstract).
- Wang shijin, Wang laiming, Wan Yusheng, Zhang Chengji, Song Zhiyong, Wang Jinguang. 2009. Age and stage division of intrusive rocks in eastern Shandong Province[J]. *Shandong Land and Resources*, 25(12): 8–20(in Chinese with English abstract).
- Weaver B L. 1991. The origin of ocean island basalt end–member composition: Trace element and isotopic constraints[J]. *Earth Planet*, 104: 381–397.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A–type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419.

- Xie Shiwen, Wang Shijin, Xie Hangqiang, Liu Shoujie, Dong Chunyan, Ma Mingzhu, Ren Peng, Liu Dunyi. 2015. Petrogenesis of ca. 2.7 Ga TTG rocks in the Jiaodong terrane, North China craton and its geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(10): 2974–2990(in Chinese with English abstract).
- Yang Liqiang, Deng Jun, Wang Zhongliang, Zhang Liang, Guo Linnan, Song Mingchun, Zheng Xiaoli. 2014. Mesozoic gold metallogenic system of the Jiaodong gold province, eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(9): 2447–2467(in Chinese with English abstract).
- Yuan Honglin, Gao Shan, Liu Xiaoming, Li Huiming, Detlef Gunther, Wu Fuyuan. 2004. Accurate U–Pb age and Trace element determinations of zircon by laser ablation–inductively coupled Plasma–Mass spectrometry[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3):353–370.
- Zhang Huaifeng, Zhai Mingguo, He Zhongfu, Peng Peng, Xu Baoliang. 2004. Petrogenesis and implications of the sodium-rich granites from the Kunyushan complex eastern Shandong Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 369–380 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yong, Ren Fenglou, Gong Shuyun, Zhang Xianrong, Lin Manman, Liu Shanshan. 2013. Cretaceous stressfield of the Muping–Jimo fault belt and its implication for tectonic evolution[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 33(2): 79–85 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Li Jinliang, Zhang Tian, Yuan Jiayin. 2007. Late Mesozoic kinematic history of the Muping–Jimo fault zone in Jiaodong Peninsula, Shandong Province, East China[J]. *Geological Review*, 53(3): 289–300(in Chinese with English abstract).
- 黄永华, 尤惠川, 宋毅盛, 郭玉贵, 环文林. 2007. 山东胶东半岛地区断裂最新活动性研究[J]. *震灾防御技术*, 2(1):39–49.
- 李超, 裴浩翔, 王登红, 周利敏, 赵鸿, 李欣慰, 屈文俊, 杜安道. 2016. 山东孔辛头铜铅矿成矿时代及物质来源:来自黄铜矿、辉钼矿 Re–Os 同位素证据[J]. *地质学报*, 90(2):240–249.
- 李洪奎, 时文革, 李逸凡, 李璐邑, 韩代成, 曹丽丽, 刘继梅. 2013. 山东胶东地区金矿成矿时代研究[J]. *黄金科学技术*, 21(3):1–9.
- 李杰, 宋明春, 王美云, 李世勇, 周明岭, 倪师军, 张成江, 丁正江, 岳跃破. 2013. 胶东尚家庄钼矿床 Re–Os 同位素年龄及其地质意义[J]. *中国地质*, 40(5):1612–1621.
- 邱连贵, 任凤楼, 曹忠祥, 张岳桥. 2018. 胶东地区晚中生代岩浆活动及对大地构造的制约[J]. *大地构造与成矿学*, 32(1):117–123.
- 宋明春, 伊丕厚, 崔书学, 徐军祥, 周明岭, 姜洪利, 黄太岭, 焦秀美, 万国普, 曹春国. 2013. 胶东金矿“热隆–伸展”成矿理论及其找矿意义[J]. *山东国土资源*, 29(7):1–12.
- 宋明春, 宋英昕, 李杰, 李世勇. 2015. 胶东与白垩纪花岗岩有关的金及有色金属矿床成矿系列[J]. *大地构造与成矿学*, 39(5):828–843.
- 宋明春, 宋英昕, 丁正江, 李世勇. 2018. 胶东金矿床:基本特征和主要争议[J]. *黄金科学技术*, 26(4):406–422.
- 宋英昕, 宋明春, 丁正江, 魏绪峰, 徐韶辉, 李杰, 谭现峰, 李世勇, 张照录, 焦秀美, 胡弘, 曹佳. 2017. 胶东金矿集区深部找矿重要进展及成矿特征[J]. *黄金科学技术*, 25(3):4–18.
- 王对兴, 管琪, 高万里, 李春麟, 张聚全, 赵凯华. 2019. 浙东天台地区早白垩世花岗岩及暗色包体锆石 U–Pb 年龄、地球化学及其成因[J]. *中国地质*, 46(6):1512–1529.
- 王世进, 王来明, 万渝生, 张成基, 宋志勇, 王金光. 2009. 鲁东地区侵入岩形成时代和期次划分[J]. *山东国土资源*, 25(12):8–20.
- 谢士稳, 王世进, 颜炳强, 刘守偈, 董春艳, 马铭株, 任鹏, 刘敦一. 2015. 华北克拉通胶东地区~2.7Ga TTG 岩石的成因及地质意义[J]. *岩石学报*, 31(10):2974–2990.
- 杨立强, 邓军, 王中亮, 张良, 郭林楠, 宋明春, 郑小礼. 2014. 胶东中生代金成矿系统[J]. *岩石学报*, 30(9):2447–2467.
- 张华锋, 翟明国, 何中甫, 彭澎, 许保良. 2004. 胶东昆崙山杂岩中高锶花岗岩地球化学成因及其意义[J]. *岩石学报*, 20(3): 369–380.
- 张勇, 任凤楼, 龚淑云, 张现荣, 林曼曼, 刘珊珊. 2013. 牟平—即墨断裂带白垩纪构造应力场及转化机制[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 33(2): 79–85.
- 张岳桥, 李金良, 张田, 袁嘉音. 2007. 胶东半岛牟平—即墨断裂带晚中生代运动学转换历史[J]. *地质论评*, 53(3): 289–300.

附中文参考文献

- 丁正江, 孙丰月, 刘福来, 刘建辉, 刘殿浩, 张丕建, 杜圣贤, 李兵. 2013. 胶东伟德山地区铜铅多金属矿锆石 U–Pb 法测年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 29(2):607–618.
- 丁正江, 孙丰月, 刘福来, 刘建辉, 彭齐鸣, 纪攀, 李碧乐, 张丕建. 2015. 胶东中生代动力学演化及主要金属矿床成矿系列[J]. *岩石学报*, 31(10): 3045–3080.
- 韩宗珠, 张贺, 田元, 邓声贵, 张凯棣, 王淑杰, 高芳. 2011. 山东省栖霞牙山花岗岩闪长岩岩石地球化学特征及成因探讨[J]. *中国海洋大学学报*, 41(6):97–103.