

doi: 10.12029/gc20200221001

骆念岗, 王彬娜, 尹志刚, 刘国昊, 周俊鹏, 吴子杰, 宋蕴航. 2023. 辽东岫岩地区古元古代盘道岭岩体地球化学特征及构造背景探讨[J]. 中国地质, 50(4): 1217-1232.

Luo Niangang, Wang Binna, Yin Zhigang, Liu Guohao, Zhou Junpeng, Wu Zijie, Song Yunhang. 2023. Geochemistry of the Paleoproterozoic Pandaoling pluton in Xiuyan area of eastern part of Liaoning Province and its implications for tectonic setting[J]. Geology in China, 50(4): 1217-1232(in Chinese with English abstract).

辽东岫岩地区古元古代盘道岭岩体地球化学特征及构造背景探讨

骆念岗¹, 王彬娜², 尹志刚³, 刘国昊¹, 周俊鹏¹, 吴子杰⁴, 宋蕴航¹

(1. 辽宁省地质矿产调查院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110031; 2. 辽宁省地矿集团地质资料中心有限责任公司, 辽宁 沈阳 110122; 3. 辽宁工程技术大学, 辽宁 阜新 123000; 4. 辽宁省地质勘查院有限责任公司, 辽宁 大连 116100)

摘要:【研究目的】位于华北克拉通东部陆块辽吉古元古代活动带内的盘道岭花岗岩形成于古元古代, 岩性为黑云母二长花岗岩。目前关于盘道岭岩体的研究资料较少, 制约了对区域大地构造背景演化的认识。【研究方法】本文基于盘道岭岩体的野外地质特征, 开展了岩相学和岩石地球化学研究。【研究结果】岩石高硅、高钾、富碱, SiO₂ 含量为 74.04%~75.84%, K₂O 含量平均为 3.81%, 全碱(Na₂O+K₂O)含量为 7.29%~7.87%, K₂O/Na₂O 平均值为 1.09, A/CNK 为 1.187~1.394, 属于高钾钙碱性过铝质 I 型花岗岩类。ΣREE 总量偏低, 平均值为 89.78×10⁻⁶, δEu 值 0.19~0.93, (La/Yb)_N 值为 2.95~50.38, 轻稀土相对富集, 重稀土相对亏损, 稀土元素球粒陨石标准化曲线呈 Eu 负异常的右倾“V”型特征。岩体总体上富集大离子亲石元素(LILEs)Rb、K、U 和高场强元素(HFSEs)Hf, 亏损 Ba、Zr、Nb、Ta、P、Ti 等元素, 花岗岩熔体的锆石饱和温度(745℃~774℃)明显低于 A 型花岗岩(868℃~928℃), 显示出高分异 I 型花岗岩的特征。【结论】岩石学及地球化学特征研究表明, 盘道岭岩体形成与幔源岩浆的底侵提供的大量热量使下地壳物质发生部分熔融有关。结合地质特征、构造演化背景、元素判别图解等, 认为该地区花岗岩形成于辽吉古元古代活动带晚期大陆边缘碰撞造山环境。

关键词: 古元古代; 辽吉活动带; I 型花岗岩; 地球化学; 构造背景; 地质调查工程; 辽东

创新点: 研究区盘道岭岩体形成于古元古代, 属于高钾钙碱性系列岩石, 具有 I 型花岗岩地球化学特征, 形成于辽吉古元古代活动带晚期大陆边缘碰撞造山环境。

中图分类号: P581 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)04-1217-16

Geochemistry of the Paleoproterozoic Pandaoling pluton in Xiuyan area of eastern part of Liaoning Province and its implications for tectonic setting

LUO Niangang¹, WANG Binna², YIN Zhigang³, LIU Guohao¹,
ZHOU Junpeng¹, WU Zijie⁴, SONG Yunhang¹

(1. Geological and Mineral Survey Institute Co. Ltd. of Liaoning Province, Shenyang 110031, Liaoning, China; 2. Liaoning

收稿日期: 2020-02-21; 改回日期: 2020-05-12

基金项目: 中国地质调查局项目(1212011120733)资助。

作者简介: 骆念岗, 男, 1990 年生, 硕士, 工程师, 主要从事矿产勘查与研究; E-mail: 956094747@qq.com。

Provincial Geology and Mineral Group Geological Data Central Co. Ltd., Shenyang 110122, Liaoning, China; 3. Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China; 4. Liaoning Provincial Institute of Geological Exploration Co. Ltd., Dalian 116100, Liaoning, China)

Abstract: This paper is the result of geological survey engineering.

[Objective] The Paleo-Proterozoic Pandaoling pluton is a granitic body in the Liaoji active belt, Eastern Block of the North China Craton, which is mainly composed by biotite monzogranite. It has been seldom researched so far, which restricts the recognition of evolution of tectonic setting in North China. **[Methods]** Based on the field geological characteristics of the Pandaoling pluton, it has been studied in terms of petrography and geochemistry in this paper. **[Results]** The rocks contain high silicon (74.04%–75.84%), high potassium (3.81% in average) and are rich in alkali ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=7.29\%-7.87\%$), and the average value of $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ and A/CNK are 1.09 and 1.187–1.394, respectively. The rocks belong to high-K, calc-alkaline series peraluminous I-type granite. The granites have low ΣREE contents (with average of 89.78×10^{-6}) and obvious negative Eu anomalies (0.19–0.93). They has variable $(\text{La}/\text{Yb})_n$ ratios of 2.95 to 50.38, and display enriched LREE patterns, with relatively enrichment of LILEs (Rb, K, U) and HFSEs (Hf), and low contents of Ba, Zr, Nb, Ta, P and Ti. Zircon saturation temperatures (745–774°C) of granite melt are significantly lower than the A-type granites (868°C–928°C). These characteristics suggest that the Pandaoling monzogranite is characteristic of high fractionated I-type granite. **[Conclusions]** The petrological and geochemical features of the Pandaoling pluton indicate that they were originated from partial melting of the deep crust due to mantle magma intraplating. Based on tectonic history and the diagram of structure environment, the Pandaoling pluton was possibly formed in the continental borderland collision tectonic setting of Liaoji Paleoproterozoic active belt.

Key words: Paleoproterozoic; Liaoji active belt; I-type granite; geochemistry; tectonic setting; geological survey engineering; eastern part of Liaoning province

Highlights: The Pandaoling pluton was formed in the Paleoproterozoic. The rocks belong to the high potassium calcium alkaline series with I-type granite geochemical characteristics. It was formed in the continental borderland collision tectonic setting of Liaoji Paleoproterozoic active belt.

About the first author: LUO Niangang, male, born in 1990, master, engineer, mainly engaged in the study of mineral survey and exploration; E-mail: 956094747@qq.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.1212011120733).

1 引 言

岩浆岩是大陆地壳的主要组成部分,岩浆岩的形成往往与大地构造的演化密切相关。华北克拉通是世界上最古老的克拉通之一,其构造单元划分和前寒武纪演化历史一直是该地区研究的热点问题之一(Zhao, 2001; Kusky and Li, 2003; Zhao et al., 2005, 2012; 杨进辉等, 2007; Zhai and Santosh, 2013)。近年来,华北克拉通前寒武纪研究的重要进展之一是将华北克拉通分为东部和西部陆块,并基于岩石学、岩石地球化学和同位素年代学以及P-T-t轨迹的研究认为,东部和西部陆块在~1.85 Ga发生碰撞拼合形成中部造山带(Zhao, 2001; Zhao et al., 2005)。胶辽古元古活动带位于东部陆块,其南北两侧分别是太古宙狼林陆块和龙岗陆块,带内发

育辽河群和古元古代花岗质岩石(图1b;李三忠等, 1997; Li et al., 1998; Zhao et al., 2002; Zhai and Santosh, 2013)。辽河群地层的变质作用(~1.93 Ga; Luo et al., 2004)标志着辽东龙岗、狼林两个陆块的拼合,变质作用前后,伴随着古元古代花岗岩(即辽吉花岗岩;张秋生和杨振升, 1988; Zhao et al., 2012)岩浆活动。辽吉花岗岩包括两种类型,其一是经历变形作用的、侵位于~2.2 Ga的条痕状花岗岩(李三忠等, 2003;路孝平, 2004);其二是未变形的、形成于~1.85 Ga的花岗岩-正长岩类(蔡剑辉等, 2002;李三忠等, 2003;路孝平, 2004;杨进辉等, 2007)。在1.85 Ga花岗岩-正长岩的构造环境认识上,长期以来存在分歧,目前主要有3种观点:第一种观点认为华北克拉通在1.85 Ga处于拉伸状态,产生的岩浆是板内拉张地幔上涌的产物,与地幔柱活动有关,

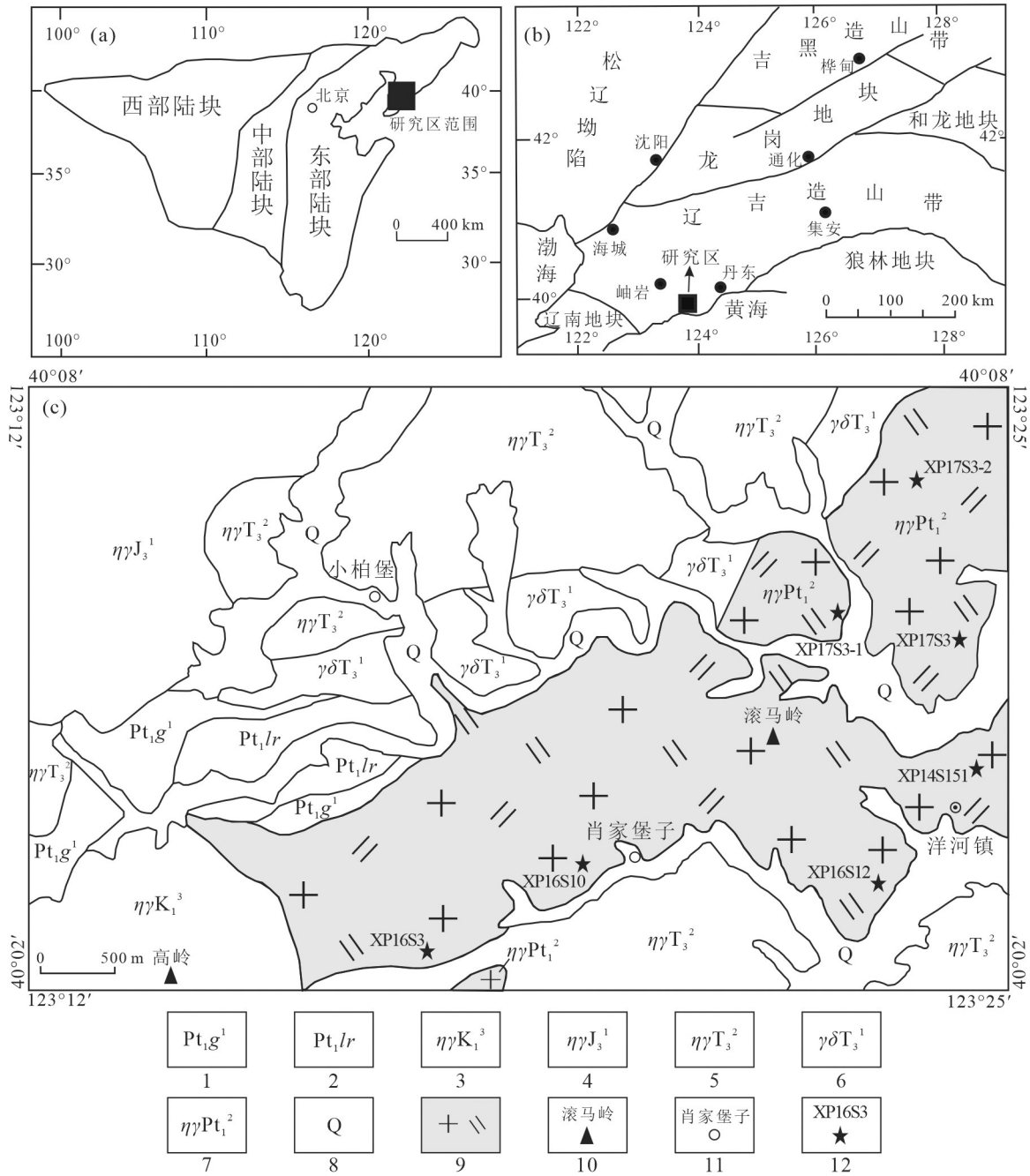


图1 岫岩及相邻地区不同尺度区域地质简图

a—华北克拉通构造分区简图(据杨明春等, 2015); b—构造位置简图(据路孝平, 2004); c—岫岩地区地质简图
 1—古元古界高家峪组; 2—古元古界里尔峪组; 3—早白垩世二长花岗岩; 4—晚侏罗世二长花岗岩; 5—晚三叠世二长花岗岩; 6—晚三叠世花岗闪长岩; 7—古元古代二长花岗岩; 8—第四系; 9—盘道岭岩体; 10—山地; 11—城镇; 12—取样位置

Fig.1 Different scale geological map in Xiuyan and adjacent area

a—Tectonic subdivision of the North China Craton (after Yang Mingchun et al., 2015); b—Tectonic location diagram (after Lu Xiaoping, 2004); c—Simplified geological maps of Xiuyan area; 1—Gaojiayou Formation of Paleoproterozoic; 2—Lieryu Formation of Paleoproterozoic; 3—Early Cretaceous monzogranite; 4—Late Jurassic monzogranite; 5—Late Triassic monzogranite; 6—Late Triassic granodiorite; 7—Paleoproterozoic monzogranite; 8—Quaternary; 9—Pandaoling Pluton; 10—Mountain; 11—City or town; 12—Sample location

是哥伦比亚超大陆裂解在华北克拉通的响应(侯贵廷等,2005;阎国翰等,2007;任康绪等,2006)。第二种观点则认为~1.85 Ga的碱性岩和花岗岩是碰撞后伸展阶段岩浆作用的产物(路孝平,2004;路孝平等,2005;杨进辉等,2007;秦亚,2013)。第三种观点认为~1.85 Ga花岗岩是辽吉古元古代活动带晚期碰撞后地壳加厚阶段的产物(任云伟等,2017)。另外,辽吉活动带的基底性质也是令人困惑的问题,这些问题的回答对了解辽吉活动带的形成演化和构造环境至关重要。

盘道岭岩体是辽吉花岗岩带中一个重要的花岗岩岩体,辽宁省地质矿产调查院1:50000区域地质调查报告对岫岩地区区域地质概况做了详细研究,认为其Rb-Sr年龄为1953 Ma^①;宋运红等(2016)认为该地区古元古代花岗岩体的锆石SHRIMP U-Pb年龄为(1892±16)Ma。基于此,本文在前人研究的基础上,采用野外地质调查和室内综合研究相结合的方法,通过岩石的主微量元素特征对盘道岭岩体的源岩物质、成岩机理进行研究,探讨其成因和形成的构造环境,对进一步探讨辽吉古元古代造山带的大地构造演化具有重要意义。

2 区域地质背景

研究区位于华北板块东北缘辽吉古元古代造山带上,是研究华北板块东北缘板内岩浆活动带的经典地区(图1a、b)。本区出露地层以前寒武纪变质地层(古元古界辽河群)的发育为特征(图1c),位于营口—草河口复向斜南翼,是虎皮峪次级复背斜南翼的南东延伸部分,地层出露较完整齐全,该群沉积建造成层性较好,其岩石组合为浅粒岩类、变粒岩类、片岩类、大理岩类等,具有明显的沉积韵律和旋回特征,遭受后期变质变形作用的改造,发生了不同程度的构造置换,存在地层褶皱和倒转现象,主要分布在盘道岭岩体的西侧。第四系主要分布在地势较低洼处。

研究区广泛发育中生代晚三叠世、晚侏罗世及早白垩世侵入岩(图1c),岩石类型单一,基本全部为酸性岩类。晚三叠世侵入岩出露面积广泛,分布于研究区的北部和南部,主要岩性为二长花岗岩和花岗闪长岩,其Rb-Sr年龄为207 Ma^①;晚侏罗世侵入岩主要分布于研究区西北部,岩性为二长花岗

岩,侵入到高家峪组,其Rb-Sr年龄为(151.53±4.79)Ma^①;早白垩世侵入岩分布于研究区西南部,岩性为二长花岗岩,其Rb-Sr年龄为(126.37±2.35)Ma^①。区内构造活动、岩浆活动和变质作用都十分强烈,具有复杂的发展演化历史。

3 岩体地质及样品采集

盘道岭岩体分布于盘道岭、肖家堡子、滚马岭一带,平面上呈北东向带状展布,面积约87.26 km²,侵入辽河群及古元古代三道沟岩体,被晚三叠世花岗闪长岩侵入(图2a、b)。在岩体边部见辽河群捕虏体,捕虏体长椭圆状,其最大扁平面方向与片麻理方向平行一致。

灰白色中细粒黑云母二长花岗岩:岩石呈灰白色,中细粒花岗结构,块状构造,弱片麻状构造,主要矿物成分有斜长石、钾长石、石英、黑云母,局部含白云母(图2c)。斜长石:为更长石成分,半自形板状,被钾长石交代呈孤岛状或蠕英结构(图2d),轻度绢云母化,大小多在0.3~5.0 mm;钾长石:为微斜长石,呈他形粒状充填于其他矿物粒间,有的钾长石中有斜长石和石英包体(图2e),大小多在1.0~3.0 mm;石英:粒状或粒状集合体,轻度碎裂,具波状消光、细粒化,毕姆纹、发育亚颗粒,粒径0.15~2.5 mm;黑云母:片状集合体,具绿泥石化,大小为0.5~1.5 mm。

4 分析方法

在盘道岭岩体中采集了7块编号分别为XP14S151、XP16S3、XP16S10、XP16S12、XP17S3、XP17S3-1、XP17S3-2的新鲜样品,用于主量、微量和稀土元素分析。用水将样品表面冲洗干净并晾干,切去风化面,机械破碎至200目以下,分析测试均在在吉林大学测试科学实验中心完成。主量元素在样品制成熔片后通过X射线荧光光谱法(XRF)测试,按照国家标准GB/T14506.28-1993执行,相对误差在元素丰度大于1.0%时为±1%,元素丰度小于1.0%时为±10%;FeO用湿化学单独分析测定,分析误差优于2%,烧失量在烘箱中经1000℃高温烘90 min后称重所得。微量元素使用Finnigan MAT Element I型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测试,样品测定值和推荐值的相对误差小于10%,且绝大多数值在5%以内。分析结果见表1。

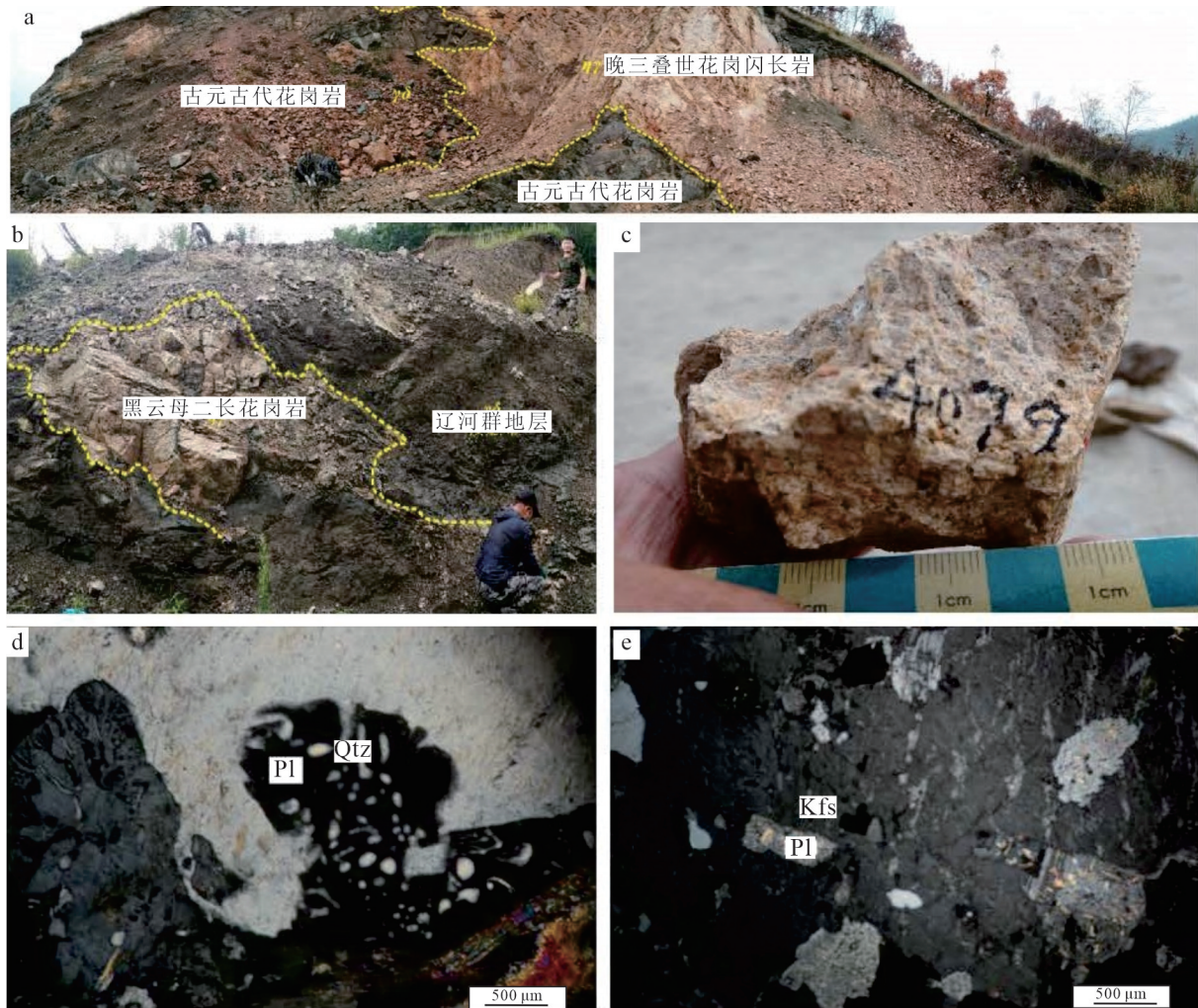


图2 盘道岭岩体野外及镜下照片

a—晚三叠世花岗闪长岩侵入古元古代花岗岩; b—黑云母二长花岗岩侵入辽河群; c—黑云母二长花岗岩野外特征; d、e—黑云母二长花岗岩镜下特征; Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Qtz—石英

Fig.2 Field and microscope photographs for Pandaoling pluton

a—Late Triassic granodiorite intruded into Paleoproterozoic monzogranite; b—Biotite monzogranite intruded into Liaohe Group; c—Field feature of biotite monzogranite; d, e—Microscope feature of biotite monzogranite; Kfs—K-feldspar; Pl—Plagioclase; Qtz—Quartz

5 分析结果

5.1 主量元素

盘道岭岩体二长花岗岩全岩 SiO_2 含量为 74.04%~75.84%, K_2O 含量为 3.58%~4.12%, Na_2O 含量为 3.61%~3.93%, 全碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)含量为 7.19%~7.87%, 在 TAS 图中, 样品点都落入花岗岩的岩区(图 3a), 在 SiO_2 - K_2O 图中, 样品点落入高钾钙碱性系列区域(图 3b); Al_2O_3 含量为 13.7%~14.7%, A/CNK 为 1.187~1.394, 在 A/CN - A/CNK 图解中, 样品点落入过铝质区域(图 3c)。盘道岭岩体总体上具有较高的 SiO_2 、 K_2O 、 Na_2O 含量; Ti_2O 、 Al_2O_3 、 CaO 、

P_2O_5 、 MgO 、 FeO_t 的含量较低。在部分主量元素哈克(Harker)图解中(图 4), Ti_2O 、 Al_2O_3 、 CaO 、 P_2O_5 、 MgO 、 FeO_t 与 SiO_2 呈负相关线性关系, K_2O 、 Na_2O 与 SiO_2 呈正相关线性关系。

5.2 微量元素及稀土元素

岩体稀土总量偏低, 稀土总量(ΣREE)在 31.67×10^{-6} ~ 122.85×10^{-6} , 其中, 轻稀土元素总量(LREE)为 24.98×10^{-6} ~ 117.48×10^{-6} , 重稀土元素总量(HREE)介于 4.78×10^{-6} ~ 8.04×10^{-6} , LREE/HREE 值为 3.87~24.21, 稀土配分曲线右倾; $(\text{La}/\text{Yb})_n=2.95$ ~ 50.38 , 轻重稀土分馏明显。稀土配分曲线呈现明显的负铈异常的“V”型曲线, 铈异常系数 δEu 为 0.19~0.93(图

表1 盘道岭二长花岗岩主量元素(%)和微量元素(10^{-6})分析结果
 Table 1 Major (%) and trace elements (10^{-6}) data of the Pandaoling monzogranites

样品	黑云母二长花岗岩						
	XP14S151	XP16S3	XP16S10	XP16S12	XP17S3	XP17S3-1	XP17S3-2
SiO ₂	74.74	75.04	74.52	74.48	74.36	75.84	75.66
Fe ₂ O ₃	0.33	0.23	0.69	0.34	0.30	0.13	0.30
FeO	0.36	0.40	0.36	0.68	0.50	0.32	0.50
Al ₂ O ₃	14.39	14.22	14.50	14.22	14.70	14.07	13.70
TiO ₂	0.08	0.15	0.13	0.15	0.18	0.10	0.15
MnO	0.03	0.02	0.05	0.02	0.03	0.02	0.02
CaO	0.78	0.60	1.02	1.19	0.56	0.51	0.77
MgO	1.04	0.37	0.64	0.73	0.49	0.40	0.61
K ₂ O	3.58	3.94	3.58	3.58	4.12	3.82	3.82
Na ₂ O	3.73	3.93	3.61	3.61	3.67	3.87	3.86
P ₂ O ₅	0.02	0.01	0.02	0.07	0.05	0.01	0.02
LOI	0.96	0.48	0.55	0.57	1.16	0.53	0.40
Total	99.43	99.39	99.67	99.64	99.34	99.42	99.59
K ₂ O+Na ₂ O	7.31	7.87	7.19	7.19	7.37	7.69	7.68
FeOt	0.66	0.60	0.97	0.98	0.77	0.44	0.77
(Na ₂ O+K ₂ O)/CaO	9.37	13.12	7.05	6.04	13.16	15.08	9.97
FeOt/MgO	0.63	1.64	1.53	1.35	1.57	1.09	1.26
Rb	140.00	95.23	96.62	168.40	184.00	107.20	275.90
Sr	253.70	372.90	296.30	298.70	226.40	382.00	81.80
Ba	567.32	601.34	578.39	581.03	604.67	593.49	591.37
Ga	18.35	16.66	18.37	19.29	18.73	19.05	24.95
Nb	7.58	11.22	8.79	12.37	9.04	9.19	10.03
Ta	0.53	0.89	0.71	1.67	0.92	0.70	0.99
Hf	3.30	1.67	0.94	4.18	2.42	3.79	1.64
Th	7.14	3.83	7.20	7.81	6.26	6.18	3.76
V	4.07	3.13	3.97	4.89	2.27	5.43	2.27
Cr	2.27	3.64	7.54	3.04	4.17	3.21	4.16
Co	0.19	0.91	0.90	0.73	0.19	0.76	0.26
Ni	1.62	3.12	3.23	2.54	2.19	2.53	2.24
B	6.48	2.74	3.58	4.52	1.67	2.91	4.33
Li	3.25	1.70	8.10	6.99	9.34	4.25	26.40
U	1.17	0.47	0.51	1.19	1.45	1.16	1.62
Ti	813.80	488.60	812.80	980.00	506.60	941.00	243.20
Cu	3.45	3.67	4.37	3.91	3.90	4.22	12.74
Zn	20.80	27.80	46.10	33.60	50.60	15.10	26.10
Ge	1.02	0.91	0.92	1.27	1.19	1.18	1.84
Zr	89.29	46.13	25.85	119.70	54.32	108.00	19.40
Pb	25.27	22.96	24.26	23.95	25.37	20.10	12.94
La	28.04	14.00	30.15	30.78	16.93	23.32	5.38
Ce	54.48	26.93	55.71	59.30	33.86	40.14	11.98
Pr	5.42	2.82	5.78	5.50	3.65	4.50	1.34
Nd	18.75	9.81	20.72	18.77	13.01	15.88	4.71
Sm	3.09	1.75	3.05	2.61	2.66	2.46	1.49
Eu	0.49	0.50	0.44	0.51	0.37	0.49	0.09
Gd	2.43	1.83	2.13	1.91	2.39	1.84	1.56
Tb	0.34	0.32	0.24	0.24	0.41	0.25	0.32
Dy	1.92	2.33	1.20	1.30	2.45	1.27	1.94
Ho	0.34	0.51	0.19	0.22	0.46	0.22	0.33
Er	0.95	1.53	0.51	0.64	1.30	0.59	0.95
Tm	0.14	0.17	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13
Yb	0.71	1.18	0.36	0.57	1.16	0.51	1.08
Lu	0.10	0.17	0.06	0.09	0.16	0.08	0.15
Y	9.47	15.17	5.35	6.59	14.26	6.13	10.85
ΣREE	117.41	64.10	121.33	122.85	79.20	91.92	31.67
LREE	110.27	55.82	115.85	117.48	70.48	86.78	24.98
HREE	6.94	8.04	4.78	5.07	8.44	4.88	6.48
LREE/HREE	15.45	6.74	23.41	22.30	8.08	17.19	3.73
δEu	0.58	0.93	0.77	0.87	0.48	0.85	0.19
Sm/Nd	0.17	0.18	0.15	0.14	0.20	0.16	0.32
(La/Yb) _N	23.31	7.06	50.38	31.96	8.69	27.08	2.95
(La/Sm) _N	5.66	4.99	6.17	7.37	3.99	5.92	2.26
(Gd/Yb) _N	2.09	0.95	3.68	2.05	1.27	2.21	0.88
R ₁	2820	2686	2836	2833	2790	2793	2764
R ₂	421	365	429	446	386	353	383
T _z /°C	751.2	744	766.8	755.4	774	747	759

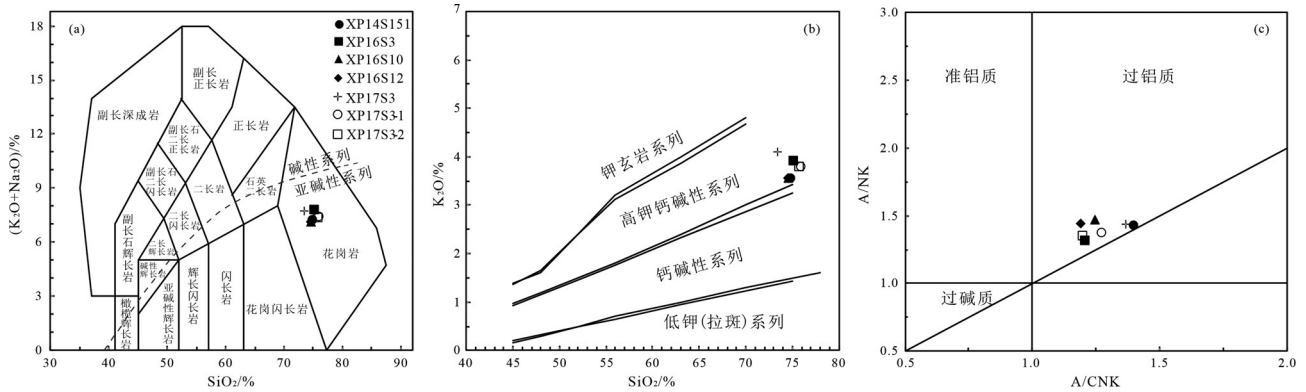


图3 盘道岭二长花岗岩岩石判别图解

a—TAS图解(据 Irvine and Baragar, 1971); b—SiO₂-K₂O图解(据 Rickwood, 1989); c—A/CNK-A/NK图解(据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig.3 Discrimination diagrams of the Pandaoling monzogranites

a—TAS diagram (after Irvine and Baragar, 1971); b—SiO₂-K₂O diagram (after Rickwood, 1989); c—A/CNK-A/NK diagram (after Maniar and Piccoli, 1989)

5a),说明在部分熔融作用中,源区可能有斜长石残留或岩浆在向上运移演化过程中发生了斜长石的分离结晶。

在微量元素原始地幔标准化蛛网图上,所有样品的微量元素分布形式相似(图5b),岩石相对富集Rb、Th、K等大离子亲石元素(LILEs),相对亏损Nb、Ta、P、Ti等高场强元素(HFSEs),具有类似后碰撞花岗岩的特征。Sr含量介于 81.8×10^{-6} ~ 372.9×10^{-6} ,平均值 273.11×10^{-6} (小于 400×10^{-6}),Sr弱亏损,Yb含量介于 0.35×10^{-6} ~ 1.17×10^{-6} ,岩石具有低Sr,低Yb的特征(张旗等,2006)。Cr、Ni含量相对较低。岩石地球化学特征反映出盘道岭二长花岗岩经历

了较强的结晶分异作用。

6 讨论

6.1 岩石成因类型

盘道岭二长花岗岩主量元素显示高硅,高碱,高铝饱和指数的特点,同时具有低磷、低镁、低钛等特征。微量元素表现出相对亏损Nb、Ta、P、Ti等高场强元素,相对富集Rb、Ba、Th、K等大离子亲石元素,稀土元素具有中等的负Eu异常,这些特征表明了岩浆经历了高分异演化。以上特征使得盘道岭二长花岗岩既有A型花岗岩富硅、钾,贫磷的特征,又具有S型花岗岩高硅、富铝的特征,同时,

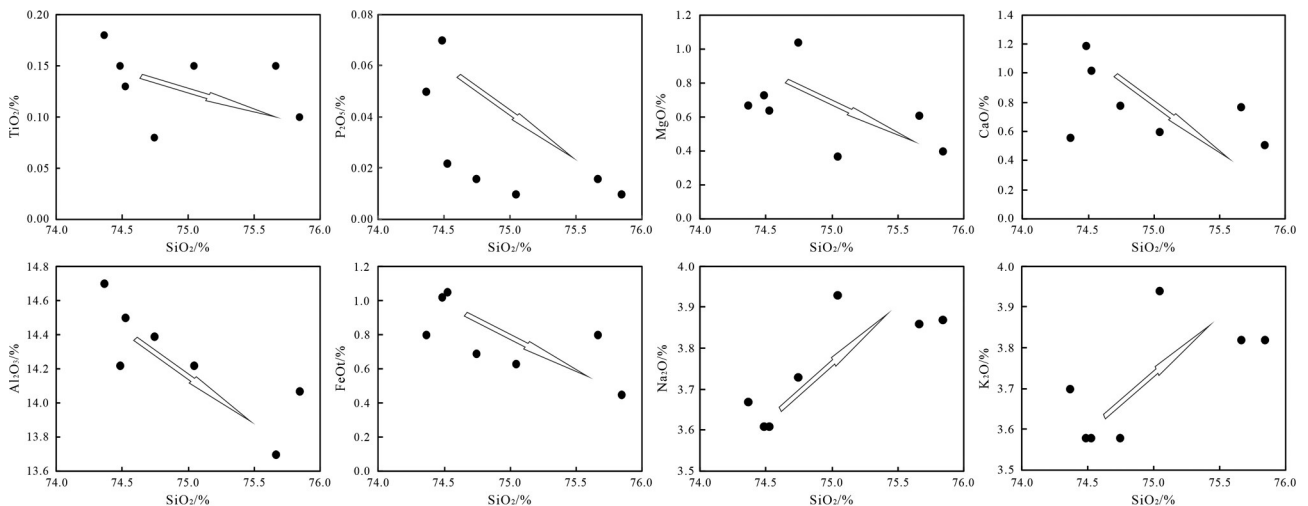


图4 盘道岭二长花岗岩主要氧化物哈克图解

Fig.4 Harker plots of selected major elements of the Pandaoling monzogranites

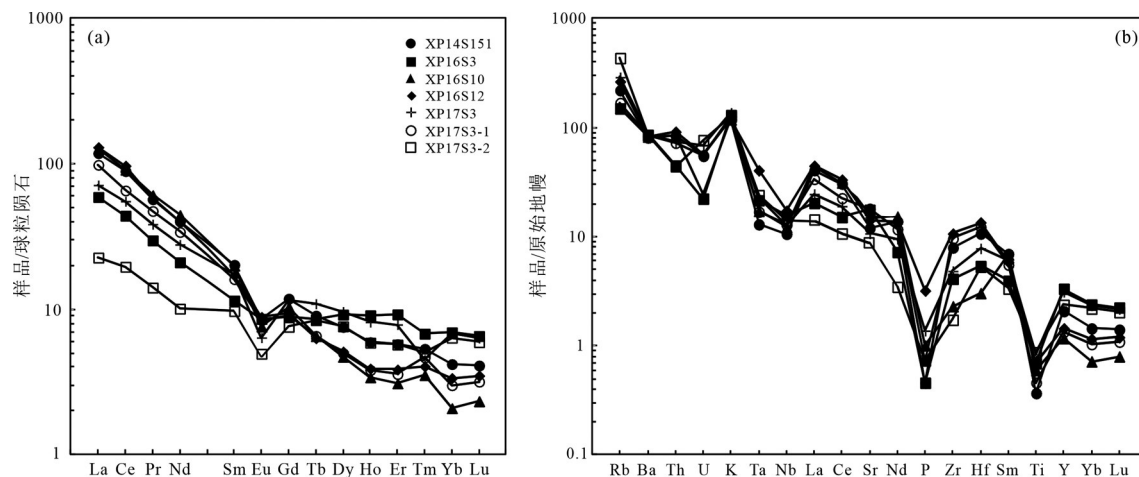


图5 盘道岭二长花岗岩稀土元素配分图(a)及微量元素元素地幔蛛网图(b)(据 Sun and Mcdonough, 1989)

Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive-mantle normalized trace element spider diagrams (b) of the Pandaoqing monzogranites (normalization values after Sun and Mcdonough, 1989)

又具有I型花岗岩富钠、高 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 的特征(杨明春等, 2015;任云伟等, 2017)。因此,盘道岭二长花岗岩的成因类型是一个值得讨论的问题。盘道岭花岗岩在薄片中没有观察到典型的A型花岗岩矿物,且根据全岩主量元素含量及Zr含量,可以计算出花岗岩熔体的锆石饱和温度集中在745~774℃,明显低于A型花岗岩的锆石饱和温度变化范围(868~928℃)(刘昌实等, 2003),接近I型花岗岩平均温度781℃(King et al., 1997)。微量元素中,盘道岭二长花岗岩中Ga、Zr、Nb等高场强元素的含量较低,10000Ga/Al(2.21~2.56)和Zr+Nb+Ce+Y值范围(52.26×10^{-6} ~ 163.46×10^{-6})均明显低于Whalen et al. (1987)建议的A型花岗岩的下限值3.75和 350×10^{-6} 。同时,在10000Ga/Al-(K₂O+Na₂O)、10000Ga/Al-Y和SiO₂-Ce判别图解中(图6a、b、c),岩体样品点均落入非A型花岗岩类区域,在(Zr+Nb+Ce+Y)-(K₂O+Na₂O)/CaO判别图解中(图6d),样品点均落入分异的长英质花岗岩区域。岩石中富含高U锆石,并且具有较低的Zr/Hf值(11.81~28.62),进一步说明了盘道岭二长花岗岩具有高分异花岗岩的特点(吴福元等, 2017;郭春丽等, 2017)。因此,可以判断盘道岭二长花岗岩不属于A型花岗岩,而应该属于高分异的I型或S型花岗岩。

高分异I型和S型花岗岩往往具有相似的主量元素特征和矿物组合,其成因类型难以准确识别(吴福元等, 2017)。在矿物学上, Sylvester(1998)对

强过铝质S型花岗岩做了系统阐述,指出典型S型花岗岩是指含白云母、堇青石和石榴子石等矿物的强过铝质花岗岩类岩石,其A/CNK>1.1,刚玉标准分子大于1%。研究表明,S型花岗岩的特征矿物是白云母、堇青石和石榴石,I型花岗岩的典型矿物是角闪石和辉石(Chappell and White, 1992)。盘道岭二长花岗岩CIPW标准矿物中无刚玉成分或小于1%,其暗色矿物为黑云母,虽含有少量白云母,但研究表明这些白云母以高Fe和低Al、Na为特征,它们都是岩浆高度结晶分异演化的产物,不同于典型的S型花岗岩中原生白云母的组成(于津海等, 2004)。另外,虽然岩体具过铝质特性,但岩石中未见到典型的S型花岗岩富铝矿物,如堇青石、石榴子石、电气石、刚玉等,此外,斜长石、角闪石和黑云母的分馏作用也可以导致其成分向过铝质转换,故排除属于S型花岗岩的可能(Zen, 1986)。从地球化学角度来看,实验研究表明,在强过铝质的熔体中,磷的溶解度较高,并随着分异程度的增加含量升高,而在偏铝质或弱过铝质熔体中,磷的溶解度很低,含量随着分异程度的增加而降低(Pichavant et al., 1992)。磷灰石在I型和S型花岗岩浆中这种不同行为已被成功地用于区分I型和S型花岗岩类(Wu et al., 2003a),S型花岗岩具有较高的P₂O₅含量,且随着分异作用的进行P₂O₅具有递增的演化趋势(Chappell, 1999)。盘道岭二长花岗岩中P₂O₅含量较低,且在SiO₂-P₂O₅图解中(图4),P₂O₅随SiO₂含量

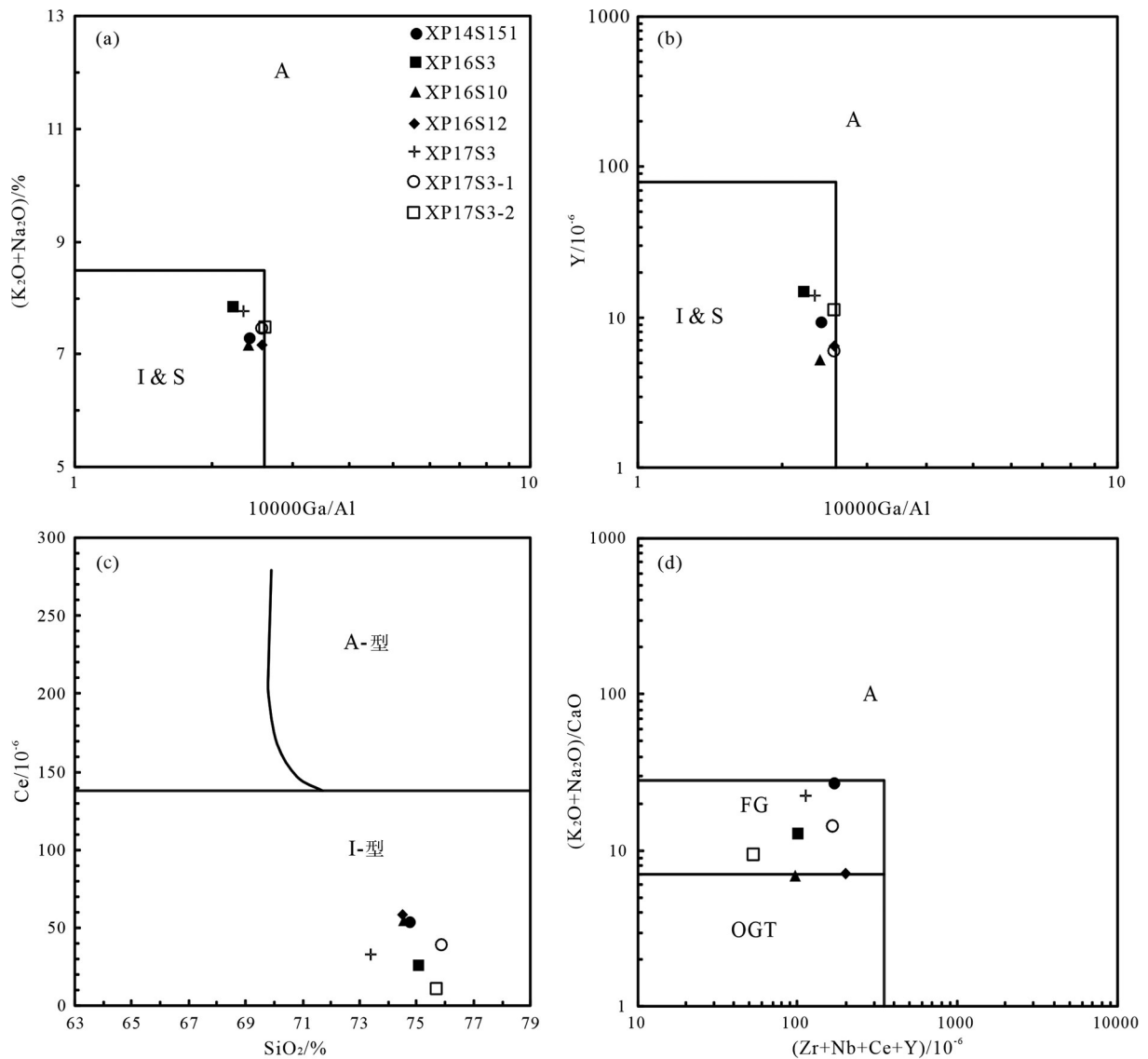


图6 盘道岭二长花岗岩分类判别图解(据 Whalen et al., 1987)

FG—分异的长英质花岗岩;OGT—未分异的M、I、S型花岗岩

Fig.6 Classification diagram of the Pandaoling monzogranites (after Whalen et al., 1987)

FG—Fractionated felsic granites; OGT—Unfractionated M-, I- and S-type granites

的增加而降低,不符合典型的S型花岗岩特征(Hine et al., 1978;Chappell, 1999)。综上所述,盘道岭岩体应为高分异I型花岗岩。

6.2 分离结晶作用

盘道岭二长花岗岩具有高的SiO₂含量,P、Nb、Ti等元素显著亏损,Ba相对于Rb和Th亏损,分异指数(DI)为88.5~93.08,这些特征表明,岩体经历了分离结晶作用(邱检生等,2003)。Ba、Sr、P、Ti、Eu的元素的异常,指示岩浆演化过程中有明显的矿物分异结晶,其中,P和Ti的亏损可能是由于副矿物,

例如磷灰石和Fe-Ti氧化物的分异结晶作用导致的。Sr、Ba和Eu亏损反映了岩浆冷却结晶的成岩过程中斜长石和钾长石发生了分离结晶(邱检生等,2003)。

盘道岭花岗岩具有低Sr($81.8 \times 10^{-6} \sim 372.9 \times 10^{-6}$,平均值 273.11×10^{-6})、低Yb($0.35 \times 10^{-6} \sim 1.17 \times 10^{-6}$,平均值 0.79×10^{-6})特征,根据Ba-Sr图解(图7),盘道岭花岗岩微量元素含量的变化趋势,同造岩矿物钾长石和斜长石分离结晶趋势一致,因此,研究区花岗质岩浆在演化过程中,主要经历了斜长石、钾长

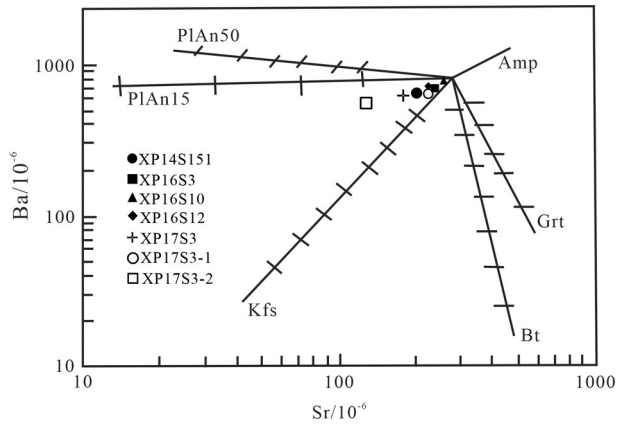


图7 盘道岭二长花岗岩造岩矿物Sr-Ba图(据Hanson, 1978)

PlAn50—斜长石(An=50); PlAn15—斜长石(An=15); Kfs—钾长石; Bt—黑云母; Ms—白云母; Grt—石榴子石; Amp—角闪石
Fig.7 Sr-Ba relations of the Pandaoling monzogranites (after Hanson, 1978)

PlAn50—Plagioclase (An=50); PlAn15—Plagioclase (An=15); Kfs—K-feldspar; Bt—Biotite; Ms—Muscovite; Grt—Garnet; Amp—Amphibole

石的分异结晶,这些造岩矿物的分离结晶控制了花岗岩主量元素以及Sr、Ba、Eu的变化。与此同时,盘道岭高分异I型花岗岩具有较低的Zr含量和Zr/Hf比值(11.8~27.6),可能与锆石的分离结晶有关。因此,盘道岭岩体可能来源于残留相富集斜长石、石榴子石和角闪石的部分熔融岩浆。

6.3 源区特征

前人资料显示,I型花岗岩可能有以下三种成因:(1)由于幔源分异的岩浆底侵,导致地壳物质发生部分熔融形成高分异I型花岗岩(Wu et al., 2003a, b; Richards, 2011; Wang et al., 2014);(2)幔源分异的基性岩浆底侵到下地壳并与壳源长英质岩浆混合在浅源形成混源岩浆房并在后期发生分离结晶作用(Champion and Chappell, 1992; 邱检生等, 2008);(3)幔源岩浆的部分熔融与分离结晶(Chen and Arakawa, 2005)。

由于地幔部分熔融或者分离结晶作用形成的岩浆是基性或中性的,因此,应具有低的SiO₂含量和高的Mg[#]值(Valley et al., 2005)。然而,盘道岭二长花岗岩SiO₂含量高,在74.04%~75.84%,变化范围较小,缺乏从玄武岩到花岗闪长岩再到花岗岩的分离序列,且Mg[#](20~35)值和Cr、Ni含量较低,说明其岩浆源区不可能直接来自幔源岩浆部分熔融与

分离结晶。

高场强元素(HFSEs)的质量分数及两个共生的元素质量分数比能够较为准确地反映岩浆岩的物质源区,如Nb/Ta、Zr/Hf等比值(陈军林等, 2014)。盘道岭二长花岗岩的Nb/Ta比值为7.42~14.22,平均值11.27, Zr/Hf比值为11.81~28.62,平均值23.81; Nb/Ta比值低于地幔平均值(17.5),更加接近地壳平均值(11); Zr/Hf比值同样低于地幔值(34~60),而接近于地壳平均值(35.5)(Wedepohl, 1995),表明岩体可能来源于地壳的部分熔融。

由于幔源岩浆与壳源岩浆之间的不完全混合作用是花岗岩中暗色包体形成的一个重要成因(Dodge and Kistler, 1990; Chappell and White, 1992; Griffin et al., 2002),暗色包体经常被视为发生岩浆混合作用的一个直接标志(肖庆辉等, 2002),而盘道岭二长花岗岩中不发育幔源镁铁质及超镁铁质岩石,并且无镁铁质包体发育,说明花岗岩源区未发生幔源镁铁质岩浆与壳源岩浆的混合作用。

相关研究表明,低Sr、低Yb型花岗岩可能是在中等压力作用下形成的,估计形成压力至少>0.8 GPa,相应的形成深度为30 km(张旗等, 2006),而下地壳深度在30 km左右,进一步说明花岗岩源区为地壳物质。

综上所述,盘道岭二长花岗岩是由于幔源岩浆底侵,提供大量热量导致上覆下地壳发生部分熔融并在地壳深部形成酸性岩浆房,酸性岩浆向上运移冷却,发生分离结晶形成花岗岩岩体。

6.4 构造背景分析

花岗岩的构造背景划分为造山和非造山两大类,造山类包括岛弧、大陆弧、陆陆碰撞和造山后四类花岗岩,非造山类包括裂谷带花岗岩、陆壳上升花岗岩和大洋斜长花岗岩(Maniar and Piccoli, 1989)。前人的研究结果已经证实强过铝质花岗岩的形成与造山作用中的碰撞有关(Strong and Hanmer, 1981; Pitcher, 1982; Pearce, 1982; Harris et al., 1986; Wickham, 1987; Finger et al., 1997)。Sylvester(1998)对强过铝质花岗岩进行了总结,认为形成于两种构造环境,一种是高压环境,由于碰撞过程中地壳的堆叠加厚(厚度>50 km)而产生,由于地壳太厚,使得来自软流圈地幔的热量无法对浅部地壳进行加热,而放射性元素衰变产生的热量成

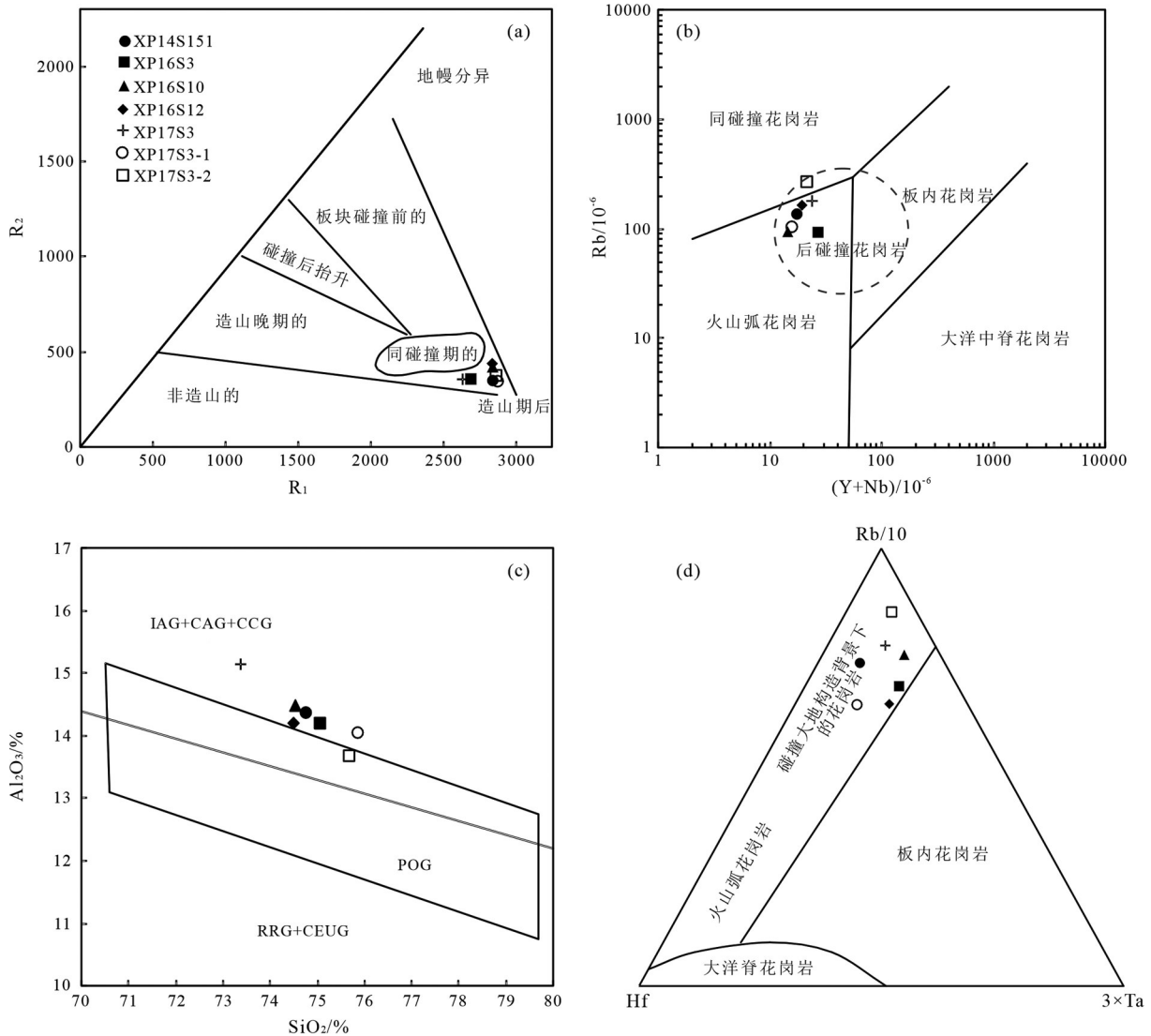


图8 盘道岭二长花岗岩构造环境判别图解

a— R_1-R_2 (据Pearce, 1996); b— $(Y+Nb)-Rb$ (据Pearce, 1996); c— $SiO_2-Al_2O_3$ (据Batchelor and Bowden, 1985); d— $Rb/10-Hf-3 \times Ta$ (据Harris et al., 1986); IAG—岛弧花岗岩类; CAG—大陆弧花岗岩类; CCG—大陆碰撞花岗岩类; POG—后造山花岗岩类; RRG—与裂谷有关的花岗岩类; CEUG—与大陆的造陆抬升有关的花岗岩类

Fig. 8 Discriminant relations of tectonic environment of the Pandaoling monzogranites

a— R_1-R_2 (after Pearce, 1996); b— $(Y+Nb)-Rb$ (after Pearce, 1996); c— $SiO_2-Al_2O_3$ (after Batchelor and Bowden, 1985); d— $Rb/10-Hf-3 \times Ta$ (after Harris et al., 1986); IAG—Island arc granitoids; CAG—Continental arc granitoids; CCG—Continental collision granitoids; POG—Post-orogenic granites; RRG—Rift-related granitoids; CEUG—Continental epeirogenic uplift granitoids

为浅部地壳岩石熔融的主要热源。另一种是高温环境,碰撞造山过程中地壳加厚一般小于50 km,由于地壳加厚而导致部分岩石圈沉入软流圈,软流圈上涌导致岩石圈地幔发生部分熔融,热的幔源熔体加热地壳而导致下地壳熔融形成碰撞花岗岩。盘道岭二长花岗岩的A/CNK为1.187~1.394(大于1.1),属强过铝质花岗岩,因此,盘道岭二长花岗岩属造山类花岗岩。

盘道岭岩体位于辽吉造山带,而关于辽吉造山带的构造属性一直存在争议,前人有陆内裂谷(张秋生和杨振升,1988; Peng and Palmer, 1995)和弧-陆碰撞模式(白瑾,1993; Faure et al., 2004)或陆-陆碰撞模式(He and Ye, 1998; Zhao et al., 2012)之争。本文倾向于用弧-陆碰撞模式来解释辽吉造山带古元古代构造演化,主要原因有两点:(1)辽河群火山岩硼含量很高,并有大型硼矿床发育(张秋生和杨振

升, 1988; Peng and Palmer, 1995; Yan and Chen, 2014; 刘凯等, 2018), 而硼的富集通常与俯冲带流体有关, 遭受海水交代蚀变的洋壳和大洋沉积物在俯冲带位置脱水形成富硼流体, 并交代地幔楔, 从而形成富硼的岩系(Palmer, 1991); (2) 狼林地块上保存了大量古元古代岩浆、变质事件的记录(Zhao et al., 2006; 吴福元等, 2007), 狼林地块在物质组成、岩浆作用及变质作用特征与辽吉古元古代活动带存在密切关系(刘福来等, 2015), 说明狼林地块曾参与到辽吉活动带古元古代的构造演化过程中。综上所述, 辽吉造山带形成于俯冲带环境, 而非裂谷环境。

盘道岭二长花岗岩属高钾钙碱性—钾玄岩系列, 富集大离子亲石元素, 贫化高场强元素, 强烈亏损 Nb、P、Ta、Ti, 显示出碰撞花岗岩的特征。在 R_1-R_2 图解中(图 8a), 样品点主要落在造山晚期区域; 在 $(Y+Nb)-Rb$ 判别图解中(图 8b), 样品点均落在同碰撞与后碰撞的重叠区域; 在 $SiO_2-Al_2O_3$ 判别图解中(图 8c), 样品点绝大部分落在大陆弧和大陆碰撞区域; 在 $Rb/10-Hf-3 \times Ta$ 判别图解中(图 8d), 样品点均落在同碰撞大地构造背景的花岗岩区域, 进一步表明盘道岭二长花岗岩为大陆边缘碰撞造山的产物。

辽吉造山带古元古代岩浆作用强烈, 以往的研究初步划分出三期古元古代花岗质岩浆事件: 2.2~2.1 Ga 张裂阶段的辽吉花岗岩、1.95~1.86 Ga 造山阶段的强过铝花岗岩与 1.86~1.84 Ga 后造山阶段的碱性岩侵入岩浆作用(Lu et al., 2006; Li and Zhao, 2007)。盘道岭岩体的年龄为 1953 Ma^①, 也表明盘道岭岩体为碰撞造山阶段的产物。

结合区域地质背景认为, 岫岩地区经历了辽吉古元古代活动带早期活动陆缘盆地扩张与晚期大陆边缘碰撞造山两个阶段。第一阶段, 古元古代早期(2.18~2.10 Ga), 此时区域应力场以拉伸为主, 太古宙克拉通受近南北向拉伸而裂解, 形成近东西向裂谷带, 岩浆活动强烈, 侵位形成条纹状二长花岗岩, 与此同时, 海水入侵在辽东地区沉积、变形形成辽河群, 另外, 在弧后盆地靠近岩浆弧一侧的辽河群里尔峪组中沉积了含硼建造。第二阶段, 古元古代晚期(1.95~1.87 Ga), 区域应力场由挤压向伸展转换, 在北西-南东向挤压力作用下, 南部狼林陆块向北部龙岗陆块俯冲碰撞, 导致弧陆碰撞并伴随强烈变形变质作用, 地壳加厚而导致部分岩石圈沉入

软流圈, 软流圈上涌导致岩石圈地幔发生部分熔融, 热的幔源熔体加热地壳而导致下地壳熔融形成碰撞强过铝花岗岩。

7 结 论

(1) 盘道岭二长花岗岩具有高 SiO_2 、 K_2O , 铝过饱和, 低 P_2O_5 , 富集 K、Rb、Th, 亏损 Nb、Ta、P、Ti 的特征, 属于高分异的 I 型花岗岩。

(2) 盘道岭岩体是由于幔源岩浆底侵, 提供大量热量导致下地壳发生部分熔融, 并经历一定程度的分离结晶而形成的。

(3) 盘道岭岩体形成于辽吉古元古代活动带晚期大陆边缘碰撞造山环境。

致谢: 本文野外工作得到辽宁省地质勘查院有限责任公司张国仁教授和辽宁工程技术大学尹志刚老师的指导和帮助, 审稿专家和编辑部老师为本文的最终定稿付出了辛勤的汗水, 对他们的帮助一并表示感谢。

注释

①辽宁省地质矿产调查院. 2010. 中华人民共和国区域地质调查报告(石灰窑乡幅 K51E023013、岫岩满族自治县幅 K51E023014、塔岭满族镇幅 K51E024013 和洋河镇幅 K51E024014)[R].

References

- Bai Jin. 1993. Precambrian Geology and Lead-zinc Mineralization on the Northern Margin of North China Platform[M]. Beijing: Geological Publishing House, 47-89 (in Chinese).
- Batchelor R A, Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. *Chemical Geology*, 48(1/4): 43-55.
- Cai Jianhui, Yan Guohan, Mu Baolei, Xu Baoliang, Shao Hongxiang, Xu Ronghua. 2002. U-Pb and Sm-Nd isotopic ages of an alkaline syenite complex body in Liangtun-Kuangdongguo, Gai County, Liaoning Province, China and their geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 349-354 (in Chinese with English abstract).
- Champion D C, Chappell B W. 1992. Petrogenesis of felsic I-type granites: An example from northern Queensland[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh Earth Science*, 83: 115-126.
- Chappell B W, White A J R. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan fold belt[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83: 1-26.
- Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*,

- 46: 535–551.
- Chen B, Arakawa Y. 2005. Elemental and Nd–Sr isotopic geochemistry of granitoids from the West Junggar fold–belt NW (China), with implications for Phanerozoic continental growth[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(5): 1307–1320.
- Chen Junlin, He Yuli, Yang Guolin, Sun Bainian, Liu Kenan. 2014. Geochemical features and significance of the Late Permian granites in northern Sonid Zuoqi, Inner Mongolia[J]. *Geological Journal of China Universities*, 20(1): 68–80 (in Chinese with English abstract).
- Dodge F C W, Kistler R W. 1990. Some additional observations on inclusions in the granitic rocks of the Sierra Nevada[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 95(B11): 17841–17848.
- Faure M W, Lin W, Monie P, Bruguier O. 2004. Palaeoproterozoic arc magmatism and collision in Liaoning Peninsula (Northeast China)[J]. *Terra Nova*, 16(2): 75–80.
- Finger F, Roberts M P, Haunschmid B, Schermaier A, Steyrer H P. 1997. Variscan granitoids of central Europe: Their typology, potential sources and tectonothermal relations[J]. *Mineralogy and Petrology*, 61(1/4): 67–96.
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, Pearson N J, O'Reilly S Y, Xu X S, Zhou X M. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In–situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 61(3): 237–269.
- Guo Chunli, Zeng Lingsen, Gao Lie, Su Hongzhong, Ma Xinghua, Yin Bing. 2017. Highly fractionated granitic minerals and whole–rock geochemistry prospecting markers in Hetian, Fujian Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(8): 1796–1817 (in Chinese with English abstract).
- Hanson G N. 1978. The application of trace elements to the petrogenesis of igneous rocks of granitic composition[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 38(1): 26–43.
- Harris N B W, Pearce J A, Tindle A G. 1986. Geochemical characteristics of collision–zone magmatism[J]. *Geological Society London Special Publications*, 19(1): 67–81.
- Hine R, Williams I S, Chappell B W, White A J R. 1978. Contrasts between I and S–type granitoids of the Kosciusko Batholith[J]. *Journal of the Geological Society of Australia*, 25: 219–234.
- Hou Guiting, Li Jianghai, Liu Yulin, Qian Xianglin. 2005. Extension events at the end of Paleoproterozoic in the North China Craton: Depression valley and dike swarm[J]. *Progress in Natural Science*, 15(11): 1366–1373 (in Chinese).
- Irvine T H, Baragar W R. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523–548.
- King P L, White A J R, Chappell B W, Allen C M. 1997. Characterization and origin of aluminous A–type granites from the Lachlan fold belt, southeastern Australia[J]. *Journal of Petrology*, 38: 371–391.
- Kusky T M, Li J H. 2003. Palaeoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22: 383–397.
- Li Sanzhong, Yang Zhensheng, Liu Yongjiang, Liu Junlai. 1997. Emplacement model of Palaeoproterozoic early granite in Jiao Liao Ji area and its relation to the uplift bedding delamination structural series[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 13(2): 189–202 (in Chinese with English abstract).
- Li Sanzhong, Hao Defeng, Han Zongzhu, Zhao Guochun, Sun Min. 2003. Paleoproterozoic deep processes and tectono–thermal evolution in Jiao–Liao Massif[J]. *Acta Geologica Sinica*, 77(3): 328–340 (in Chinese with English abstract).
- Li S Z, Yang Z S, Liu Y J. 1998. Stratification of metamorphic belts and its genesis in the Liaohe Group[J]. *Chinese Science Bulletin*, 43(5): 430–434.
- Li S Z, Zhao G C. 2007. SHRIMP U–Pb zircon geochronology of the Liaoji granitoids: Constraints on the Paleoproterozoic Jiao–Liao–Ji belt in the eastern block of the North China craton[J]. *Precambrian Research*, 158(12): 1–16.
- Liu Changshi, Chen Xiaoming, Chen Peirong, Wang Rucheng, Hu Huan. 2003. Subdivision, discrimination criteria and genesis for A type rock suites[J]. *Geological Journal of China Universities*, 9(4): 573–591 (in Chinese with English abstract).
- Liu Fulai, Liu Pinghua, Wang Fang, Liu Chaohui, Cai Jia. 2015. Progresses and overviews of voluminous meta–sedimentary series within the Paleoproterozoic Jiao–Liao–Ji orogenic/mobile belt, North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(10): 2816–2846 (in Chinese with English abstract).
- Liu Kai, Wu Taotao, Liu Jinlong, Bao Qingzhong, Du Shouying. 2018. Geochronology and geochemistry of volcanic rocks in Manketou'ebo Formation of Tulihe area, northern Da Hinggan Mountains[J]. *Geology in China*, 45(2): 367–376 (in Chinese with English abstract).
- Lu Xiaoping. 2004. Paleoproterozoic Tectonic Magmatic Event in Tonghua Area[D]. Changchun: Jilin University, 29–94 (in Chinese with English abstract).
- Lu Xiaoping, Wu Fuyuan, Guo Jinghui, Yan Changjian. 2005. Late Paleoproterozoic granitic magmatism and crustal evolution in the Tonghua region, northeast China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 721–736 (in Chinese with English abstract).
- Lu X P, Wu F Y, Gou J H, Wilde S A, Yang J H, Liu X M, Zhang X O. 2006. Zircon U–Pb geochronological constraints on the Paleoproterozoic evolution of the eastern block in the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 146: 138–164.
- Luo Y, Sun M, Zhao G C, Li S Z, Ye K, Xia X P. 2004. LA–ICP–MS U–Pb zircon ages of the Liaohe Group in the Eastern Block of the North China Craton: Constraints on the evolution of the Jiao–Liao–Ji Belt[J]. *Precambrian Research*, 134(3/4): 349–371.
- Maniar P, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635–643.
- Palmer M R. 1991. Boron isotope systematic of hydrothermal fluids and tourmalines: A Synthesis[J]. *Chemical Geology*, 94(2): 111–121.

- Pearce J A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries[C]//Thorpe R S(ed.). *Orogenic Andesites and Related Rocks*. Chichester, England: John Wiley and Sons, 525–548.
- Pearce J A. 1996. Sources and settings of granitic rocks[J]. *Episodes*, 19: 120–125.
- Peng Q M, Palmer M R. 1995. The Paleoproterozoic boron deposits in eastern Liaoning, China: A metamorphosed evaporate[J]. *Precambrian Research*, 72: 185–197.
- Pichavant 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.
- Pitcher W S. 1982. Granite type and tectonic environment[C]//Hus K J (ed.). *Mountain Building Processes[M]*. London: Academic Press, 19–40.
- Qin Ya. 2013. Geochronological Constraints on the Tectonic Evolution of the Liao– Ji Paleoproterozoic Rift Zone[D]. Changchun: Jilin University, 23–132 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiansheng, Xu Xisheng, Jiang Shaoyong. 2003. Deep subduction of crust materials and its implication to the genesis of potash–rich volcanic rocks[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 191–200 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiansheng, Xiao E, Hu Jian, Xu Xisheng, Jiang Shaoyong, Li Zhen. 2008. Petrogenesis of highly fractionated I–type granites in the coastal area of northeastern Fujian Province: Constraints from zircon U–Pb geochronology, geochemistry and Nd–Hf isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2468–2484 (in Chinese with English abstract).
- Ren Kangxu, Yan Guohan, Cai Jianhui, Mu Baolei, Li Fengtang, Wang Yanbin, Chu Zhuyi. 2006. Chronology and geological implication of the Paleo–Mesoproterozoic alkaline–rich intrusions belt from the northern part in the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 377–386 (in Chinese with English abstract).
- Ren Yunwei, Wang Huichu, Kang Jianli, Chu Hang, Tian Hui. 2017. Paleoproterozoic magmatic events in the Hupiyu area in Yingkou, Liaoning Province and their geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(11): 2456–2472 (in Chinese with English abstract).
- Richards J P. 2011. Magmatic to hydrothermal metal fluxes in convergent and collided margins[J]. *Ore Geology Reviews*, 40(1): 1–26.
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 22(4): 247–263.
- Song Yunhong, Yang Fengchao, Yan Guolei, Wei Minghui, Shi Shaoshan. 2016. SHRIMP U– Pb ages and Hf isotopic compositions of Paleoproterozoic granites from the eastern part of Liaoning Province and their tectonic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(10): 2620–2636.
- Strong D F, Hanmer S K. 1981. The leucogranites of southern Brittany: Origin by faulting, frictional heating, fluid flux and fractional melting[J]. *The Canadian Mineralogist*, 19: 163–176.
- 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 Ocean Basins*. Geological Society London Special Publications, 42(1): 313–345.
- Sylvester P J. 1998. Post– collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 45(1/4): 29–44.
- Valley J W, Lackey J S, Cavosie A J. 2005. Billion years of crustal maturation: Oxygen isotope ratios of magmatic zircon[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 150(6): 561–580.
- Wang X S, Bi X W, Leng C B, Zhong H, Tang H F, Chen Y W, Yin G H, Huang D Z, Zhou M F. 2014. Geochronology and geochemistry of Late Cretaceous igneous intrusions and Mo– Cu– (W) mineralization in the southern Yidun Arc, SW China: Implications for metallogenesis and geodynamic setting[J]. *Ore Geology Reviews*, 61: 73–95.
- Wedepohl K H. 1995. The composition of the continental crust[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 1217–1232.
- 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.
- Wickham S M. 1987. Crustal anatexis and granite petrogenesis during low pressure regional metamorphism: The Trois Seigneurs Massif, Pyrenees, France[J]. *Journal of Petrology*, 28(1): 127–169.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, Zheng Yongfei. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217–1238(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Liu Xiaochi, Ji Weiqiang, Wang Jiamin, Yang Lei. 2017. Highly fractionated granites: Recognition and research[J]. *Science China Earth Sciences*, 47: 745–765 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, Lo C H, Yui T F, Lin Q, Ge W C, Sun D Y. 2003a. Highly fractionated I– type granites in NE China(I): Geochronology and petrogenesis[J]. *Lithos*, 66(3/4): 241–273.
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, Lo C H, Yui T F, Lin Q, Ge W C, Sun D Y. 2003b. Highly fractionated I–type granites in NE China (II): Isotopic geochemistry and implications for crustal growth in the Phanerozoic[J]. *Lithos*, 67(3/4): 191–204.
- Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Ma Daquan, Hong Dawei, Mo Xuanxue, Lu Xinxiang, Li Zhichang, Wang Xiongwu, Ma Changqian, Wu Fuyuan, Luo Zhaohua, Wang Tao. 2002. *The Ways of Investigation on Granitoids[M]*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Yan Guohan, Cai Jianhui, Ren Kangxu, He Guoqi, Mu Baolei, Xu Baoliang, Li Fengtang, Yang Bin. 2007. Intraplate extensional magmatism of North China Craton and break– up of three supercontinents and their deep dynamics[J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(2): 161–174 (in Chinese with English abstract).

- Yan X L, Chen B. 2014. Chemical and boron isotopic compositions of tourmaline from the Paleoproterozoic Houxianyu borate deposit, NE China: Implications for the origin of borate deposit[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 94: 252–266.
- Yang JinHui, Wu Fuyuan, Xie Liewen, Liu Xiaoming. 2007. Petrogenesis and tectonic implications of Kuangdonggou syenites in the Liaodong Peninsula, east North China Craton: Constraints from in-situ zircon U–Pb ages and Hf isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 263–276 (in Chinese with English abstract).
- Yang Mingchun, Chen Bin, Yan Cong. 2015. Petrogenesis of Paleoproterozoic gneissic granites from Jiao–Liao–Ji belt of North China Craton and their tectonic implications[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 37(5): 31–51 (in Chinese with English abstract).
- Yu Jinhai, Zhao Lei, Zhou Xuan. 2004. Mineralogical characteristics and origin of garnet-bearing I-type granitoids in southeastern Fujian Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 10(3): 364–377 (in Chinese with English abstract).
- Zen E A. 1986. Aluminum enrichment in silicate melts by fractional crystallization: Some mineralogic and petrographic constraints[J]. *Journal of Petrology*, 27(5): 1095–1117.
- Zhai M G, Santosh M. 2013. Metallogeny of the North China Craton: Link with secular changes in the evolving Earth[J]. *Gondwana Research*, 24(1): 275–297.
- Zhang Qi, Wang Yan, Li Chengdong, Wang Yuanlong, Jin Weijun, Jia Xiuqin. 2006. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2249–2269 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qiusheng, Yang Zhensheng. 1988. *The Early Crust and Deposits in Liaodong Peninsula*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 218–450 (in Chinese).
- Zhao G C. 2001. Palaeoproterozoic assembly of the North China Craton[J]. *Geological Magazine*, 138: 87–91.
- Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, Sun M. 2002. SHRIMP U–Pb zircon ages of the Fuping complex: Implications for Late Archean to Paleoproterozoic accretion and assembly of the North China Craton[J]. *American Journal of Science*, 302(3): 191–226.
- Zhao G C, Sun M, Wilde S A, Li S Z. 2005. Late Archean to Palaeoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited[J]. *Precambrian Research*, 136: 177–202.
- Zhao G C, Cao L, Wilde S A, Sun M, Choe W J, Li S Z. 2006. Implications based on the first SHRIMP U–Pb zircon dating on Precambrian granitoid rocks in North Korea[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 251: 365–379.
- Zhao G C, Cawood P A, Li S Z, Wilde S A, Sun M, Zhang J, He Y H, Yin C Q. 2012. Amalgamation of the North China Craton: Key issues and discussion[J]. *Precambrian Research*, 222/223: 55–76.
- 地质出版社, 47–89.
- 蔡剑辉, 阎国翰, 牟保磊, 许保良, 邵宏翔, 许荣华. 2002. 辽宁盖县梁屯-矿洞沟碱性正长岩杂岩体的U–Pb和Sm–Nd年龄及其地质意义[J]. *岩石学报*, 18(3): 349–354.
- 陈军林, 何雨粟, 杨国林, 孙柏年, 刘珂男. 2014. 内蒙古苏左旗北部晚二叠世花岗岩地球化学特征及意义[J]. *高校地质学报*, 20(1): 68–80.
- 郭春丽, 曾令森, 高利娥, 苏红中, 马星华, 尹冰. 2017. 福建河田高分异花岗岩的矿物和全岩地球化学找矿标志研究[J]. *地质学报*, 91(8): 1796–1817.
- 侯贵廷, 李江海, 刘玉琳, 钱祥麟. 2005. 华北克拉通元古代末的伸展事件: 坳拉谷与岩墙群[J]. *自然科学进展*, 15(11): 1366–1373.
- 李三忠, 杨振声, 刘永江, 刘俊来. 1997. 胶辽吉地区元古代早期花岗岩的侵位模式及其与隆滑构造的关系[J]. *岩石学报*, 13(2): 189–202.
- 李三忠, 郝德峰, 韩宗珠, 赵国春, 孙敏. 2003. 胶辽地块元古代构造-热演化与深部过程[J]. *地质学报*, 77(3): 328–340.
- 刘昌实, 陈小明, 陈培荣, 王汝成, 胡欢. 2003. A型岩套的分类、判别标志和成因[J]. *高校地质学报*, 9(4): 573–591.
- 刘福来, 刘平华, 王舫, 刘超辉, 蔡佳. 2015. 胶-辽-吉元古代造山/活动带巨量变沉积岩系的研究进展[J]. *岩石学报*, 31(10): 2816–2846.
- 刘凯, 吴涛涛, 刘金龙, 鲍庆中, 杜守营. 2018. 大兴安岭北段图里河地区满克头鄂博组火山岩年代学及地球化学[J]. *中国地质*, 45(2): 367–376.
- 路孝平. 2004. 通化地区元古代构造岩浆事件[D]. 长春: 吉林大学, 29–94.
- 路孝平, 吴福元, 郭敬辉, 殷长建. 2005. 通化地区元古代晚期花岗岩岩浆作用与地壳演化[J]. *岩石学报*, 21(3): 721–736.
- 秦亚. 2013. 辽吉元古代裂谷带构造演化的年代学制约[D]. 长春: 吉林大学, 23–132.
- 邱检生, 徐夕生, 蒋少涌. 2003. 地壳深俯冲与富钾火山岩成因[J]. *地学前缘*, 10(3): 191–200.
- 邱检生, 肖娥, 胡建, 徐夕生, 蒋少涌, 李真. 2008. 福建北东沿海高分异I型花岗岩的成因: 锆石U–Pb年代学、地球化学和Nd–Hf同位素制约[J]. *岩石学报*, 24(11): 2468–2484.
- 任康绪, 阎国翰, 蔡剑辉, 牟保磊, 李凤棠, 王彦斌, 储著银. 2006. 华北克拉通北部地区古-中元古代富碱侵入岩年代学及意义[J]. *岩石学报*, 22(2): 377–386.
- 任云伟, 王惠初, 康健丽, 初航, 田辉. 2017. 辽宁营口虎皮峪地区元古代岩浆事件及地质意义[J]. *地质学报*, 91(11): 2456–2472.
- 宋运红, 杨凤超, 闫国磊, 魏明辉, 石绍山. 2016. 辽东地区元古代花岗岩SHRIMP U–Pb年龄、Hf同位素组成及构造意义[J]. *地质学报*, 90(10): 2620–2636.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 23(6): 1217–1238.
- 吴福元, 刘小池, 纪伟强, 王佳敏, 杨雷. 2017. 高分异花岗岩的识别与研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 47(7): 745–765.
- 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 洪大卫, 莫宣学, 卢欣祥, 李志昌, 汪雄武, 马昌前, 吴福元, 罗照华, 王涛. 2002. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京: 地质出版社.

附中文参考文献

白瑾. 1993. 华北陆台北缘前寒武纪地质及铅锌成矿作用[M]. 北京:

阎国翰, 蔡剑辉, 任康绪, 何国琦, 牟保磊, 许保良, 李凤棠, 杨斌. 2007. 华北克拉通板内拉张性岩浆作用与三个超大陆裂解及深部地球动力学[J]. 高校地质学报, 13(2): 161-174.

杨进辉, 吴福元, 谢烈文, 柳小明. 2007. 辽东矿洞沟正长岩成因及其构造意义: 锆石原位微区U-Pb年龄和Hf同位素制约[J]. 岩石学报, 23(2): 263-276.

杨明春, 陈斌, 闫聪. 2015. 华北克拉通胶-辽-吉带古元古代条痕状

花岗岩成因及其构造意义[J]. 地球科学与环境学报, 37(5): 32-53.

于津海, 赵雷, 周旋. 2004. 闽东南含石榴子石I型花岗岩的矿物学特征及成因[J]. 高校地质学报, 10(3): 364-377.

张旗, 王焰, 李承东, 王元龙, 金惟俊, 贾秀勤. 2006. 花岗岩的Sr-Yb分类及其地质意义[J]. 岩石学报, 22(9): 2249-2269.

张秋生, 杨振升. 1988. 辽东半岛早期地壳与矿床[M]. 北京: 地质出版社.

【简讯与热点】

贵州发现稀土矿新类型:古陆相沉积型稀土矿, 开发前景广阔

李亚萍, 郭慧, 郭博然

(中国地质调查局发展中心, 北京, 100037)

Discovery of a new rare earth deposit type in Guizhou: paleo-continental sedimentary rare earth deposit and broad prospects for development

LI Yaping, GUO Hui, GUO Boran

(Development Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China)

由中国地质调查局成都矿产综合利用研究所牵头完成的“川滇黔相邻区古陆相沉积型稀土综合调查评价”项目团队的科技人员,发现川滇黔相邻区广泛分布的古陆沉积相中的稀土是一种全新的稀土矿床类型,被命名为:“古陆相沉积型稀土矿”。

“古陆相沉积型稀土矿”赋存在川滇黔相邻区二叠系宣威组底部黏土岩系中,稀土氧化物平均品位0.39%,平均厚度约2 m,分布广泛,现已新发现找矿远景区9处,圈定找矿靶区8处。

“古陆相沉积型稀土矿”赋存状态十分特殊,大量纳米级的含稀土矿物颗粒嵌布在黏土矿物层状结构中,独特的赋存状态使得该类型稀土选冶分离难度极大。成都综合利用所经过六轮持续攻关,成功研发出环境友好的“纳米晶型转变-稀土靶向分离”短流程一体化选冶技术,使稀土全元素浸出率跃升至90%左右,最高达92.1%,同时铝、硅、铁等主要杂质浸出率小于5%,工艺流程通过吨级规模连续扩大实验验证,成功制备出稀土氧化物含量大于92%的商品级混合稀土氧化物产品,奠定了沉积型稀土矿开发利用的基础,推动了商业性勘查开发进程。

自2018年以来,历经5年调查评价与科技攻关,成都综合利用所首次提出并明确定义的“古陆相沉积型稀土矿”被正式认定为一种具有商业开发利用价值的新类型稀土资源,这是继离子吸附型稀土后,新发现的又一个全新稀土矿床类型。同时,成都综合利用所与贵州省相关单位共同推进找矿工作,优选了3个找矿靶区推进普查工作及区域潜力评价,已查明稀土氧化物推断资源量44万吨以上。

成都综合利用所研发团队表示,与碳酸岩型、碱性岩型稀土相比“古陆相沉积型稀土矿”在开采条件、镨钕铽镱等高价值、关键稀土元素占比方面明显占优;与离子吸附型稀土及深海富稀土软泥相比,在品位、规模、集中程度、环境影响等方面具有优势,开发利用前景广阔;对南方离子型稀土的接替作用逐步突显。

依托新一轮找矿突破战略行动项目,进一步加强沉积型稀土矿勘查开发,对提高我国稀土资源保障程度具有重要意义。

(资料来源:据中国地质调查局网站报道 整理)