1000-0569/2005/021(01)-0113-24 *Acta Petrologica Sinica* 岩石学报

姚安和马厂箐富碱侵入岩体的地球化学特征*

毕献武[1] 胡瑞忠[1] 彭建堂[1] 吴开兴[1,2] 苏文超[1] 战新志[1]

BI XianWu[1], HU RuiZhong[1], PENG JianTang[1], WU KaiXin[1,2], SU WenChao[1] and ZHAN XinZhi[1]

1. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学重点实验室，贵阳 550002
2. 中国科学院研究生院，北京 100039

1. *The Key Laboratory of Ore Deposit, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang* 550002, *China*
2. *The Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100039, *China*

2004-03-18 收稿，2004-11-28 改回.

Bi XW, Hu RZ, Peng JT, Wu KX, Su WC and Zhang XZ. 2005. Geochemical characteristics of the Yao'an and Machangqing alkaline-rich intrusions. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 113 – 124

Abstract The Yao'an and Machangqing alkaline-rich intrusions, lying in east margin of the NW-WNW Ailaoshan-Jinshajiang fault zone, form parts of the Ailaoshan-Jinshajiang alkaline-rich intrusive belt. The Yao'an intrusion consists mainly of syenite porphyry, and the Machangqing intrusion consists mainly of granite porphyry. Chemically these two intrusions are characterized by enrichment in alkaline and potassium. They enrich in LREE and LILE (such as Rb, Sr, Ba, Th, La *etc.*), deplet HFSE (such as Nb、Ta and Ti etc.), have high Rb/Sr, La/Nb, Ba/Nb and LREE/HREE ratios, and don't show obvious Eu anomalies. The I_{Sr} values of these two intrusions are relatively high, and ε_{Nd} values are relatively low. It is suggested that the intrusions were derived from partial melting of an enriched upper mantle (EMII), a mixture between normal mantle and subducted oceanic crust, in a continental arc of extension tectonic setting. Although these two intrusions share similar characteristics on tectonic setting in the Himalayan period, age and source region, they have some difference on lithology and chemical composition, which was probably related to the difference on physical-chemical condition (such as T, P and fO_2 etc.) during magmatic crystallization, and on different melted degress of source rocks. Au mineralization is considered to be associated with the intrusions of alkaline series while Cu mineralization with the intrusions of alkaline-subalkaline series in Ailaoshan- Jinshajiang alkaline intrusive belt.

Key words Alkaline-rich Intrusions, Geochemical Characteristics, Genesis of the intrusions

摘 要 姚安岩体和马厂箐岩体属哀牢山-金沙江富碱侵入岩带的组成部分，位于 NW-WNW 向哀牢山-金沙江深大断裂东侧。姚安岩体主要为正长斑岩，马厂箐岩体主要为花岗斑岩。两岩体化学成分上具有富碱、高钾的特点。岩石富轻稀土和 Rb、Sr、Ba、Th、La 等大离子亲石元素而亏损 Nb、Ta 和 Ti 等高场强元素。岩石的 Rb/Sr、La/Nb 和 Ba/Nb 以及 LREE/HREE 比值高，铕异常不明显，I_{Sr} 值偏高，ε_{Nd} 值偏低。研究表明：(1)姚安岩体和马厂箐岩体形成于喜山期大陆弧伸展环境。两岩体的岩浆均起源于富集地幔(EMII)，其壳幔混合特征，主要是俯冲带地幔楔内壳-幔物质源区混合的结果；(2)尽管姚安和马厂箐岩体在成岩构造背景、成岩时代、成岩方式和源区特征以及成分上高碱富钾等方面具相似性，但它们在岩性和组成上仍存在较大差异。这种差异可能是由源区物质部分熔融程度不同，以及岩浆结晶时温压和氧逸度等条件的不同所造成；(3)金矿化主要与相对高温、低压和高氧逸度的碱性系列岩浆活动有关，而铜矿化则主要与相对低温、高压和低氧逸度的碱性-亚碱性过度系列岩浆活动有关。

关键词 富碱侵入岩；地球化学特征；岩石成因

中图法分类号 P588.13；P594.1；P581

---

* 本项研究由中科院知识创新重要方向项目(KZCX3-SW-125)、国家自然科学基金项目(40071543、40003007)和国家 973 项目(G1999043209)资助.

第一作者简介：毕献武，女，1967 年 2 月生，博士，研究员，主要从事矿床地球化学和岩石学研究，E-mail：xwbi@163.com

1 引言

富碱侵入岩是一组产于特定构造环境、具有特殊性质的岩石类型,与钙碱性岩石相比,具有较高的碱含量($K_2O + Na_2O > 8\%$)。这类岩石主要包括碱性花岗岩和正长岩,也包括高碱含量的碱长花岗岩,常产于裂谷、地堑、地幔上拱带的拉张条件下,常与幔源岩浆活动相联系(涂光炽等,1984;涂光炽,1989)。

"三江"地区是青藏高原东缘非常活跃的新生代陆内变形区,位于印度板块和欧亚板块的缝合带附近,是目前世界上研究新生代岩石圈构造演化和地球动力学过程的典型地区之一。沿印度大陆与欧亚大陆的碰撞边界哀牢山-金沙江深大断裂及其附近,分布着一总体呈北西走向的喜山期巨型富碱侵入岩带。对该岩带内喜山期富碱侵入岩进行深入的地质地球化学研究,不仅对揭示这些岩石本身的形成演化过程及其相关成矿作用具有重要价值,而且把其作为了解上地幔性质的一个重要窗口,对揭示该区喜山期的上地幔特征及其相关地球动力学过程也将具有重要启迪。

80 年代初以来,部分学者对哀牢山-金沙江岩带内富碱侵入岩产出的构造背景、岩石特征及成因作过某些研究(涂光炽等,1984;张玉泉等,1987;张玉泉等,1995)。近年来,随着在岩带内与部分富碱侵入岩有关的若干铜、金矿床的发现(如玉龙铜矿床、马厂箐铜矿床、姚安金矿床、北衙金矿床等;李文桦,1982;沈秋伟,1991;王会远,1993;莆为民,1994;向树元等,1995;Peng *et al.*,1998;闫升好等,2001),有关富碱侵入岩产出地质背景、成因及其与成矿作用关系等方面的研究引起了学者们的广泛关注(张玉泉等,1997;邓万明等,1998a,1998b;Hu *et al.*, 1998,2004;毕献武,1999;Bi *et al.*, 2002,2004;王建等,2002;Hou *et al.*, 2003),但已有的研究工作主要是宏观的、面上的,对岩带内的具体岩体则缺乏深入系统的解剖。为进一步探讨富碱侵入岩形成的地质背景和成因,深入研究富碱侵入岩与成矿的关系,本文以分别与金、铜矿床具有成因联系的姚安岩体和马厂箐岩体为研究对象,探讨了两岩体的成因机制。

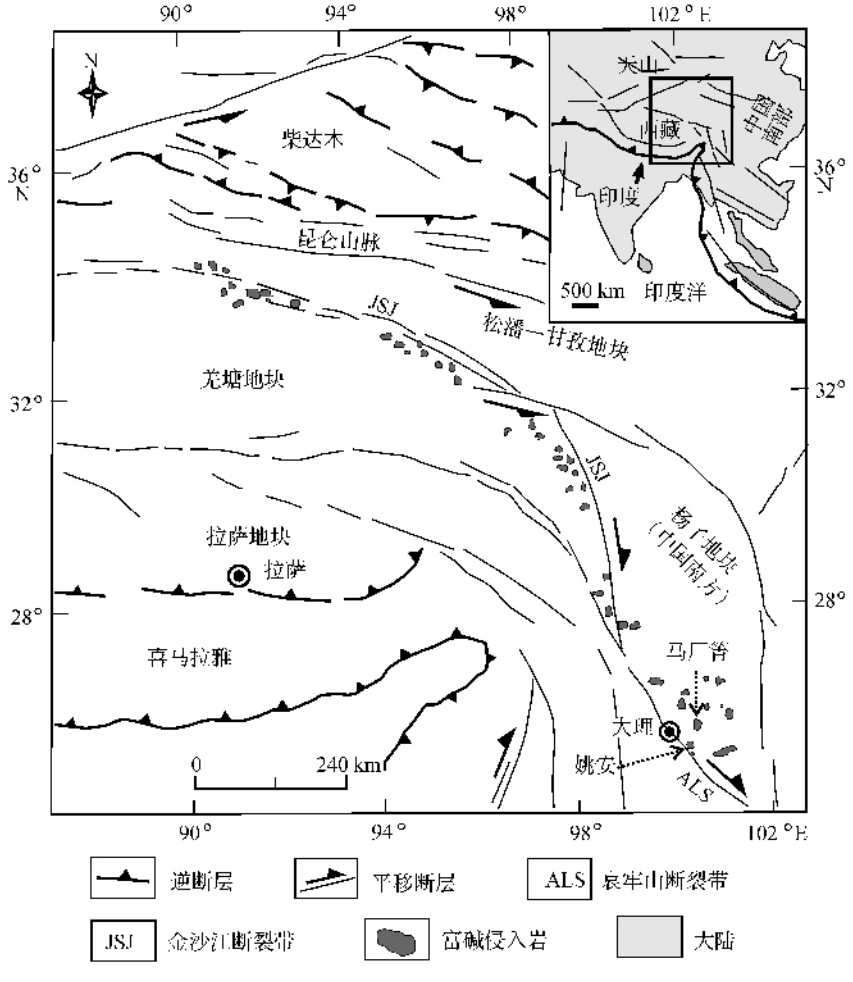

图 1 哀牢山-金沙江富碱侵入岩分布区构造地质简图(据 Chung *et al.*,1998 修改)

Fig. 1 A sketch geological map of the Ailaoshan-Jinshajiang alkaline intrusion belt (modified from Chung *et al.*,1998)

2 地质背景

青藏高原东部从北向南由松潘甘孜、羌塘、拉萨和扬子地块组成，这些地块在白垩纪前已拼合为一体而成为欧亚板块的一部分。早第三纪期间，由于印度-欧亚板块碰撞导致青藏高原隆升并形成了 NW-WNW 向的哀牢山-金沙江断裂带（张玉泉等，1987；Turner *et al.*，1996；Chung *et al.*，1997，1998；Yin and Harrison，2000；Hou *et al.*，2003），众多富碱侵入岩体沿该断裂带及其附近分布，形成了长达 1000 余公里、宽 50～80 公里的富碱岩浆岩带，即哀牢山-金沙江富碱侵入岩带（图 1）。

K-Ar 和 Ar-Ar 定年结果显示，这些富碱侵入岩的形成时代约为 30～40Ma（张玉泉等，1997；Chung *et al.*，1998；Wang *et al.*，2001）。富碱侵入岩主要呈小岩基、岩株、岩筒、岩脉、岩瘤和岩枝侵入于不同时代的地层中，岩体规模相对较小。岩石类型有辉石正长岩、闪辉正长岩、英碱正长岩、霞石正长岩、霓石正长岩、正长斑岩、石英正长斑岩、花岗斑岩、二长斑岩和碱长花岗岩等。富碱斑岩中富含石榴透辉岩、石榴辉石岩、辉石岩等深源包体，伴有大量同时代的玄武岩和基性脉岩（张乾等，2002；王建等，2002；金志升等，1997；李献华等，2002）。地球化学研究表明，岩带内岩石成分为玄武质-粗面质-流纹质，显示了超钾质和橄榄粗玄质的特征。

姚安岩体和马厂箐岩体属哀牢山-金沙江富碱侵入岩带的组成部分，地处哀牢山-金沙江断裂带东侧（图 1）大理-楚雄一带的小型拉张盆地中。两岩体分别与金、铜矿床具有密切的时空和成因联系（Hu *et al.*，1998，2004；Bi *et al.*，2000，2002，2004）。

与姚安金矿床具有成因联系的姚安岩体呈岩株侵位于侏罗系妥甸组（J_3t）灰褐色粉砂质泥岩中（图 2），主要由正长斑岩和石英正长斑岩组成。正长斑岩为灰白色，块状构造，斑状结构。斑晶由微纹正长石、斜长石、辉石、角闪石及黑云母组成，基质为显晶质，成分与斑晶类似，副矿物以磷灰石、榍石、磁铁矿为主，含少量锆石；石英正长斑岩在姚安岩体中占的比例很小。作者对岩体中的角闪石进行了 Ar-Ar 定年，结果显示该岩体的成岩时代为 28.9±0.1Ma。金矿体产于姚安岩体与侏罗系地层的内外接触带中。

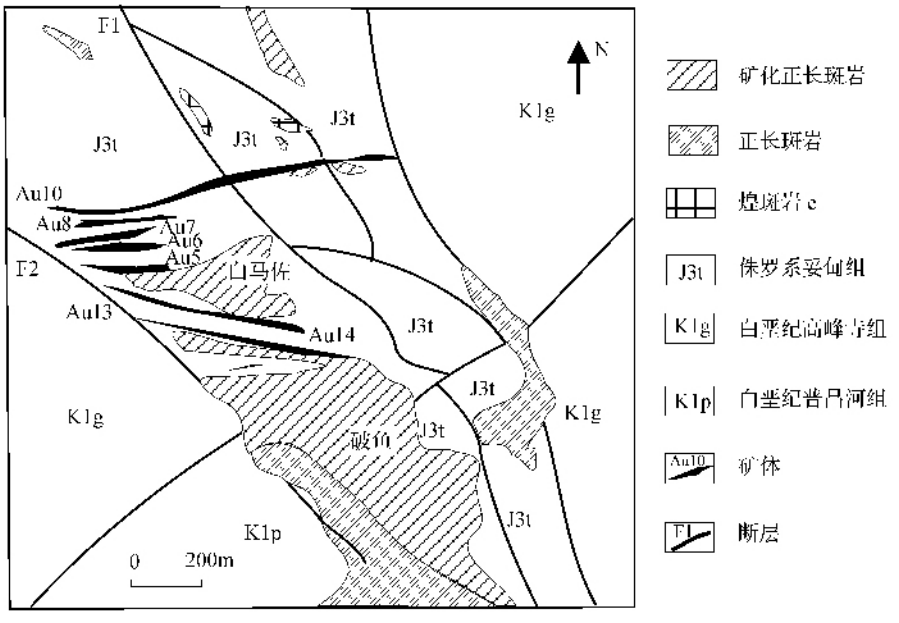

图 2 姚安岩体地质简图（据 Bi *et al.*，2004）

Fig. 2 Geological map of Yao'an alkaline intrusion (after Bi *et al.*, 2004)

与马厂箐铜矿床具有成因联系的马厂箐岩体出露面积约 1.3km^2，位于洱海断裂与程海断裂的夹持部位，呈岩株、岩墙和岩脉侵位于下奥陶统（O_1）细碎屑岩和下泥盆统（D_1）灰岩中（图 3）。该岩体主要岩性为花岗斑岩和石英二长斑岩。花岗斑岩为灰白色，块状构造，斑状结构。斑晶由条纹长石、斜长石、石英、角闪石及黑云母组成。基质为显晶质，成分与斑晶类似。副矿物有磷灰石、榍石、磁铁矿和少量锆石。石英二长斑岩为灰白色，块状构造，斑状结构。斑晶为条纹长石、斜长石、石英和黑云母。基质为长英质，微粒结构。副矿物为自形粒状磷灰石、榍石和磁铁矿。石英 Ar-Ar 定年结果显示该岩体的成岩时代为 33.7±0.1Ma（彭建堂等，2004）。铜矿体产于岩体内部钾硅酸盐蚀变带内和岩体与下奥陶统（O_1）细碎屑岩的接触带中。

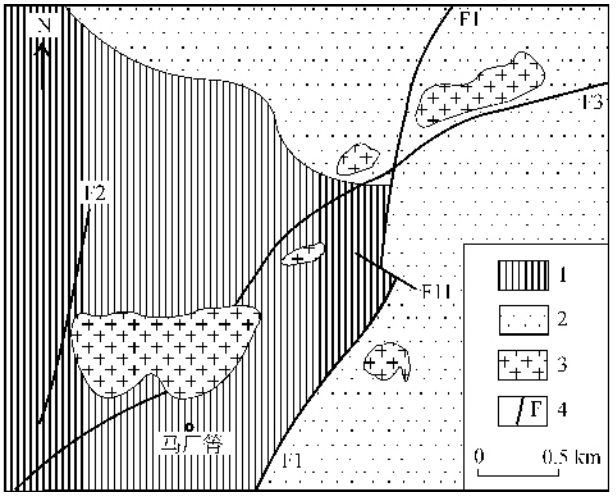

图3 马厂箐岩体地质简图(据 Hu *et al.*,1998)

1. 下奥陶统(O_1)细碎屑岩;2. 下泥盆统(D_1)灰岩;3. 马厂箐花岗斑岩;4. 断层

Fig. 3 Geological map of Machangqing alkaline intrusion (after Hu *et al.*,1998)

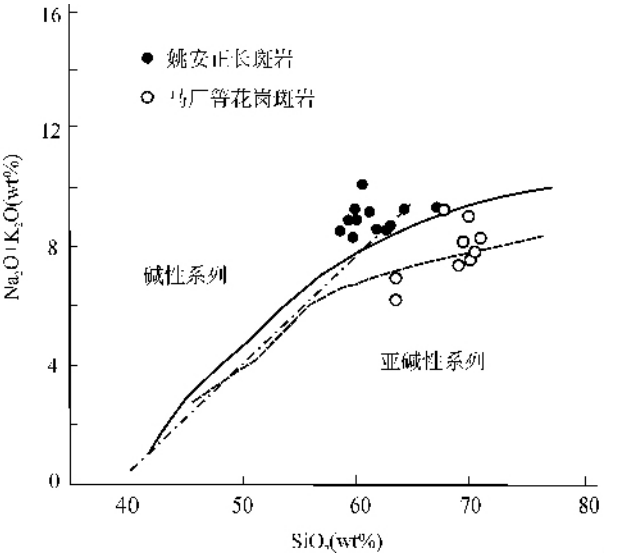

图4 全岩的 K_2O+Na_2O-SiO_2 图解(据 Rollinson,1993)

图中线条为亚碱性与碱性火成岩分界线。其中实线、虚线和点划线分别由 Irvine *et al.*(1971)、Kuno(1966)和 Macdonnald *et al.*(1964)确定。

Fig. 4 Diagram of K_2O+Na_2O vs. SiO_2 for the whole rocks from Yao'an and Machangqing intrusions (after Rollinson, 1993)

3 分析方法

以姚安岩体和马厂箐岩体的新鲜岩石样品为分析对象,主量元素采用常规湿化学法分析,微量元素采用 ICP-MS 分析,Rb-Sr、Sm-Nd 同位素组成采用 MC-ICP-MS 分析。主量元素和微量元素分析在中国科学院地球化学研究所完成,微量元素分析方法见 Qi 等(2000)。Rb-Sr、Sm-Nd 同位素分析在中国科学院广州地球化学研究所完成,分析方法见韦刚健等(2002)和梁细荣等(2003)。

4 结果与讨论

4.1 岩石化学

姚安正长斑岩和马厂箐花岗斑岩的岩石化学分析结果及岩石化学参数列于表 1 中。根据岩石化学成分,结合镜下鉴定特征,姚安岩体和马厂箐岩体的岩石化学特征可归纳为以下几点:

(1)姚安正长斑岩的平均 SiO_2 含量为 61.4%,马厂箐花岗斑岩为 67.7%,马厂箐岩体的 SiO_2 含量高于姚安岩体;(2)姚安岩体平均全碱(Na_2O+K_2O)含量为 9.0%,马厂箐岩体为 8.1%,两岩体的全碱含量均大于 8%,相对于正常的世界花岗岩($Na_2O+K_2O=7.75\%$,邱家骧,1985)和我国花岗岩类岩石($Na_2O+K_2O=7.82\%$,冶金工业部地质研究所,1984)的平均成分,这两个岩体的碱质含量均偏高。但在 Na_2O+K_2O-SiO_2 图解(图 4)中,姚安岩体的样品点均落入碱性系列岩区,而马厂箐岩体的样品点却落在碱性-亚碱性岩石的过渡区,姚安岩体显示了碱性更强的特征;(3)在 K_2O-Na_2O 图解(图 5)中,两岩体的样品点落入橄榄粗玄岩和超钾质岩系列,除个别样品外,绝大部分样品的 K_2O/Na_2O 比值大于 1.0,总体显示出富钾的特征,且岩石 K_2O 含量与 SiO_2 含量间不具相关性,表明富钾是岩石本身固有的特征;(4)两岩体的 TiO_2 含量均在 1.0% 以下,姚安岩体 $Fe_2O_3>FeO$,而马厂箐岩体 Fe_2O_3 与 FeO 相近,表明姚安岩体形成的氧化指数高于马厂箐岩体(邱检生等,2002);(5)在 Harker 图解上,两岩体的 SiO_2 与 TiO_2、FeO、MgO、CaO、P_2O_5 等呈现负相关趋势(图 6),表明存在着辉石、磷灰石及磁铁矿等矿

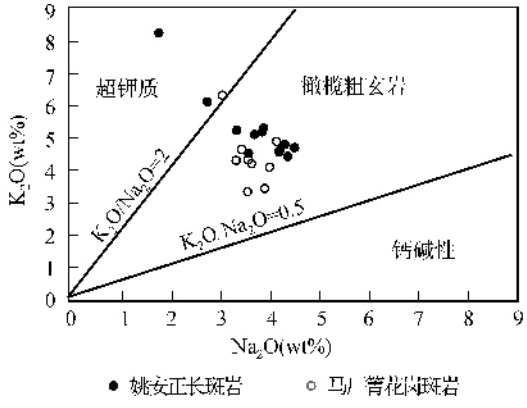

图5 全岩的 K_2O-Na_2O 图解(底图据徐义刚,2001)

Fig. 5 Diagram of K_2O vs. Na_2O for the whole rocks from Yao'an and Machangqing intrusions (after Xu, 2001)

表 1　姚安岩体和马厂箐岩体岩石化学分析结果(wt%)

Table 1　The analytical results of major elements (wt%) of Yao'an and Machangqing intrusions

	姚安正长斑岩													马厂箐花岗斑岩								
	YA-2	YA-4	YA-5	YA-17	YA-59	YA-60	YST-31	YST-33	YST-34	YST-35	YST-41	LJ-50	平均值	MCQ-22	MCQ-24	MCQ-25	MCQ-37	MCQ-39	HM-24	HM-34	HM-39	HM-47	平均值	
SiO_2	60.71	59.93	58.90	58.51	60.94	58.21	59.91	63.01	67.09	63.97	62.89	62.35	61.37	69.89	70.01	68.67	62.37	61.72	69.72	70.82	66.94	69.12	67.68
TiO_2	0.21	0.37	0.44	0.48	0.55	0.45	0.67	0.62	0.40	0.37	0.47	0.38	0.45	0.04	0.06	0.15	0.11	0.12	0.32	0.12	0.29	0.24	0.16
Al_2O_3	15.82	16.77	16.53	16.30	16.77	16.06	14.88	17.01	15.11	16.77	17.47	16.7	16.37	15.25	15.25	14.51	16.22	17.19	15.18	14.96	14.94	15.09	15.40
Fe_2O_3	3.70	1.90	2.10	3.20	2.05	1.82	3.10	2.50	2.05	2.10	2.20	2.3	2.42	0.73	0.97	1.26	1.56	0.75	1.12	0.85	1.22	1.35	1.09
FeO	0.90	0.70	0.90	1.20	1.15	2.48	1.30	0.90	0.75	0.70	0.60	1.50	1.09	1.08	1.10	1.20	1.80	2.51	1.18	0.85	1.18	0.63	1.28
MnO	0.05	0.04	0.05	0.09	0.05	0.07	0.09	0.08	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.10	0.13	0.17	0.13	0.12	0.05	0.04	0.07	0.05	0.10
MgO	1.60	1.30	1.50	1.90	1.30	2.30	3.30	2.20	1.20	1.20	1.60	1.70	1.76	0.83	0.98	1.83	3.57	3.62	0.80	0.40	1.00	1.10	1.57
CaO	1.50	3.30	3.40	3.80	2.30	3.50	5.80	3.90	2.60	3.00	3.30	3.30	3.31	1.80	1.66	1.94	3.23	3.30	1.60	1.20	2.90	1.90	2.17
Na_2O	1.81	3.91	3.73	2.78	3.88	3.37	3.61	4.22	4.33	4.53	4.40	4.23	3.73	3.67	3.60	3.36	3.93	3.59	4.03	3.47	3.08	4.17	3.66
K_2O	8.20	5.30	5.10	6.10	5.18	5.23	4.53	4.56	4.79	4.70	4.43	4.6	5.23	4.21	4.33	4.31	3.45	3.35	4.1	4.64	6.30	4.89	4.40
烧失量	4.41	5.30	6.25	4.43	4.91	5.45	1.98	0.62	0.50	1.70	1.76	0.30	3.25	1.67	1.27	2.37	3.05	3.17	0.13	0.05	0.76	0.16	1.59
P_2O_5	0.50	0.57	0.46	0.60	0.22	0.40	0.73	0.45	0.47	0.33	0.37	1.69	0.45	0.07	0.47	0.07	0.32	0.30	0.90	1.70	0.11	0.64	0.33
合计	99.41	99.39	99.36	99.39	99.30	99.34	99.90	100.07	99.34	99.42	99.55	99.12	99.47	99.34	99.83	99.13	99.64	99.74	99.13	99.10	99.31	99.34	99.47
K_2O/Na_2O	4.53	1.36	1.37	2.19	1.34	1.55	1.25	1.08	1.11	1.04	1.01	1.08	1.40	1.15	1.20	1.28	0.88	0.93	1.02	1.34	2.05	1.17	1.20
全碱	10.01	9.21	8.83	8.88	9.06	8.60	8.14	8.78	9.12	9.23	8.83	8.83	8.96	7.88	7.93	7.67	7.38	6.94	8.13	8.11	9.38	9.06	8.05

分析测试单位:中国科学院地球化学研究所化学分析实验室。

表2 姚安岩体和马厂箐岩体微量元素分析结果(μg/g)和特征参数

Table 2 The analytical results of trace elements (μg/g) of Yao'an and Machangqing intrusions

	姚安正长斑岩											马厂箐花岗斑岩				
	YA-2	YA-4	YA-5	YA-17	YA-59	YA-60	YST-31	YST-33	YST-34	YST-35	YST-41	MCQ-22	MCQ-24	MCQ-25	MCQ-37	MCQ-39
微量元素																
Sr	484.2	807.4	749.9	592.3	954.3	1109.3	2093.4	2026.0	2020.9	2103.6	2172.5	740.9	846.6	835.8	956.0	916.6
Rb	417.9	228.2	262.2	315.1	281.7	286.6	175.3	151.8	174.7	159.8	159.5	167.4	197.6	273.0	294.9	312.5
Ba	2946.5	2771.5	2645.1	3384.4	2295.7	3089.9	3623.3	2999.1	2959.7	3125.1	2936.5	870.9	1380.0	1329.1	1439.5	1396.4
Th	37.8	44.9	43.2	45.2	62.3	50.6	49.8	43.4	51.6	47.4	42.0	31.4	29.8	28.0	17.4	16.9
Ta	0.9	1.1	1.0	1.1	1.3	0.9	1.2	1.0	1.1	1.1	1.0	1.1	1.0	1.1	0.6	0.6
Nb	17.1	20.8	19.1	21.2	22.8	18.0	21.5	18.0	20.1	18.1	19.1	15.6	13.9	15.4	10.1	9.8
Zr	214.8	260.3	226.8	216.7	288.7	267.0	196.6	147.9	150.9	146.9	130.9	89.9	116.9	156.5	165.7	170.6
Hf	6.2	7.0	6.2	5.9	7.9	7.4	6.1	4.7	4.7	4.7	4.1	3.4	3.9	4.9	4.7	4.9
Y	15.8	19.4	18.2	19.9	27.0	25.8	27.8	21.0	34.3	18.4	18.1	15.7	15.0	17.6	18.0	17.2
Sc	7.1	10.2	8.5	7.1	8.5	11.9	13.1	8.8	8.8	7.6	7.3	7.1	6.7	8.4	12.8	12.6
Cr	29.4	33.0	32.1	23.4	23.8	102.7	149.3	67.0	27.8	23.1	40.3	44.7	34.9	93.0	142.4	146.0
稀土元素																
La	141.5	170.4	165.4	193.6	163.8	176.6	211.4	151.5	218.2	150.2	144.6	53.7	58.3	65.6	53.5	57.6
Ce	258.6	284.5	306.0	365.1	273.0	284.2	365.9	279.5	319.6	273.0	269.4	95.1	102.0	117.4	104.9	106.4
Pr	26.4	33.5	31.5	38.2	30.2	34.2	40.5	28.9	45.3	27.3	27.5	10.6	10.3	12.2	11.4	11.3
Nd	89.3	114.1	108.6	129.2	100.4	117.1	140.6	98.6	158.0	92.8	94.0	37.0	35.7	42.7	41.8	40.9
Sm	12.0	16.1	15.4	18.0	14.8	16.6	20.9	14.1	22.9	12.6	13.2	5.5	5.6	6.5	6.9	7.0
Eu	2.9	3.4	3.3	4.2	3.4	3.7	4.6	3.6	5.1	3.4	3.4	1.3	1.3	1.4	1.7	1.7
Gd	7.8	9.8	9.2	10.8	10.0	11.0	13.7	9.3	14.7	8.7	8.7	3.9	3.7	4.6	5.1	4.9
Tb	0.9	1.0	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.0	1.7	1.0	1.0	0.6	0.5	0.6	0.7	0.7
Dy	3.5	4.2	3.8	4.5	5.4	5.5	6.4	4.4	7.3	4.0	4.4	2.6	2.4	2.9	3.2	3.2
Ho	0.6	0.6	0.6	0.7	0.9	0.9	1.0	0.7	1.2	0.7	0.7	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6
Er	1.3	1.7	1.6	1.7	2.3	2.3	2.5	1.7	3.0	1.6	1.7	1.3	1.3	1.5	1.5	1.5
Tm	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Yb	1.1	1.2	1.2	1.4	1.9	1.8	1.7	1.3	2.2	1.3	1.2	1.4	1.2	1.5	1.3	1.3
Lu	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
REE	546.1	640.8	648.0	768.9	607.8	655.7	811.2	595.1	800.0	577.0	570.1	213.6	223.2	257.9	233.1	237.5
La/Sm	7.4	6.7	6.8	6.8	7.0	6.7	6.4	6.8	6.0	7.5	6.9	6.2	6.5	6.4	4.9	5.2
Gd/Yb	5.9	6.7	6.3	6.4	4.3	5.0	6.4	5.6	5.4	5.4	5.8	2.3	2.6	2.5	3.2	3.0
La/Yb	89.5	97.9	93.9	96.1	59.3	66.7	82.4	76.6	66.7	78.2	80.4	26.6	33.8	29.5	27.5	29.4
δEu	0.92	0.82	0.85	0.92	0.87	0.84	0.83	0.95	0.85	0.99	0.97	0.86	0.85	0.81	0.86	0.87
δCe		1.02	0.97	0.92	0.93	1.02	0.97	1.02	0.95	1.02	0.93	0.91	1.01	0.96	1.00	1.00

测定单位:中国科学院地球化学研究所矿床地球化学重点实验室,分析误差<5%。

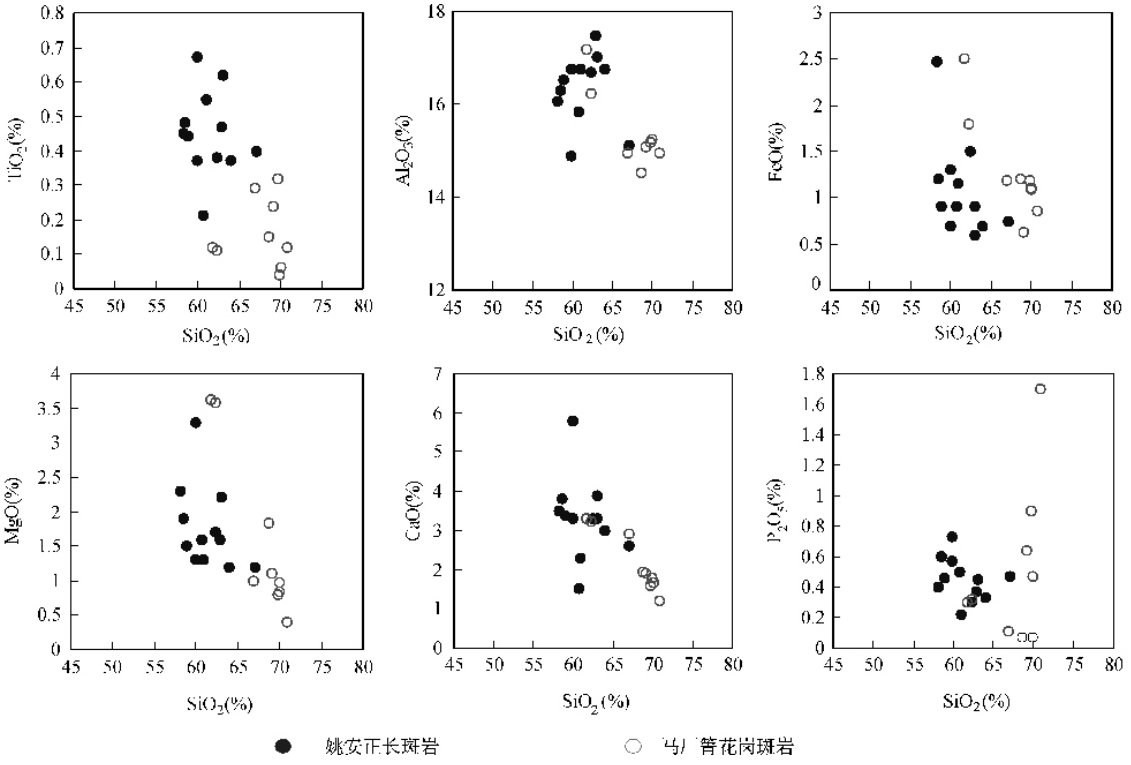

图 6　全岩的 Harker 图解(据邱检生等,2002)　图中实心圆圈为姚安岩体样品点,空心圆圈为马厂箐岩体样品点

Fig. 6　Harker Diagram for the whole rocks from Yao'an and Machangqing intrusions(after Qiu *et al.*, 2002)

物的显著分离结晶作用(李献华等,2000);(6)两岩体都不含标准矿物 Lc(白榴石)和 Ne(霞石),与实际矿物中未出现副长石类和碱性镁铁矿物是一致的,表明它们不属于传统上认为的含碱性暗色矿物的碱性岩类。

4.2　微量元素地球化学

姚安岩体和马厂箐岩体的微量元素分析结果见表 2。在以原始地幔标准化的蛛网图(图 7)中,姚安与马厂箐岩体的微量元素变化特征类似。相对于原始地幔,它们明显富集 K、Rb、Sr、Ba、Th 和 La 等大离子亲石元素,而相对亏损 Ta、Nb 和 Ti 等高场强元素,且 Ta、Nb 和 Ti 具'TNT'负异常,显示出俯冲带幔源岩石的成分特点(Sun and McDonough, 1989; Cornell *et al.*, 1995)。姚安岩体和马厂箐岩体 Rb/Sr 比值的变化范围分别为 0.07 ~ 0.86 和 0.23 ~ 0.68,均高于地幔的相应值(0.025)。姚安岩体 La/Nb 和 Ba/Nb 比值的变化范围分别为 7.18 ~ 10.86 和 133.21 ~ 172.74,马厂箐岩体的 La/Nb 和 Ba/Nb 比值变化范围分别为 2.92 ~ 8.33 和55.77 ~ 59.67,它们都较洋脊玄武岩、洋岛玄武岩及原始地幔值明显偏高,在 La/Nb-Ba/Nb 关系图上,样品点均投影在岛弧火山岩区(图 8)。

姚安岩体和马厂箐岩体的稀土元素组成特征见表 2。从中可以发现,姚安岩体的 REE 总量为 546.1 ~ 811.2μg/g,$(La/Yb)_N$ = 66.7 ~ 97.9,$(La/Sm)_N$ = 6.0 ~ 7.5,δEu = 0.82 ~ 0.99;马厂箐岩体的 REE 总量为 213.6 ~ 257.9μg/g,

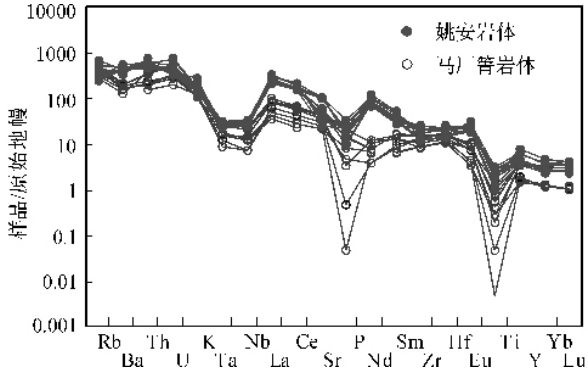

图 7　两岩体微量元素相对于原始地幔标准化蛛网图(原始地幔值引自 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7　Primitive mantle-normalized trace element concentrations of Yao'an and Machangqing intrusions

$(La/Yb)_N$ = 26.6 ~ 33.8,$(La/Sm)_N$ = 4.9 ~ 6.5,δEu = 0.81 ~ 0.87。姚安岩体与马厂箐岩体的 REE 组成具有类似的特征,即强烈富集轻稀土,轻、重稀土分馏显著,在球粒陨石标准化稀土模式图(图 9)上,两岩体表现为右倾的平滑曲线,无明显的 Eu 负异常,表明两岩体的源区组成及成岩方式相似,岩浆源区均有较多的富重稀土矿物残留,岩浆来源较深(邱检生,2002)。但姚安岩体的 REE 总量明显高于马厂箐岩体,且前者的轻重稀土分馏程度亦大于后者。

表 3 姚安正长斑岩和马厂箐花岗斑岩 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素比值和含量

Table 3 Rb-Sr and Sm-Nd isotopic ratios and abundances for the Yao'an syenite porphyry and the Machangqing granite porphyry.

		Rb(μg/g)	Sr(μg/g)	$^{87}Sr/^{86}Sr$	$(^{87}Sr/^{86}Sr)t$	Sm(μg/g)	Nd(μg/g)	$(^{143}Nd/^{144}Nd)$	$\varepsilon_{Nd}(t)$
姚安岩体	YA-2	899.4	598.9	0.710429(13	0.70895	15.42	88.21	0.512134 ±9	−9.2
	YA-17	616.3	694.9	0.709706 ±10	0.70883	15.59	114.9	0.512115 ±9	−9.6
	YST-33	348.7	4321	0.709419 ±13	0.70934	15.01	99.70	0.512114 ±11	−9.6
	YST-34	355.6	6683	0.709266 ±16	0.70921	22.72	135.8	0.512092 ±10	−10.0
	YST-35	346.1	5519	0.709325 ±13	0.70926	12.84	95.2	0.512088 ±10	−10.1
	YST-41	328.8	4038	0.709279 ±14	0.70919	13.40	96.97	0.512071 ±9	−10.4
马厂箐岩体	JC-23	1716	779.5	0.708558 ±8	0.70609	5.000	30.63	0.512441 ±5	−3.1
	HM-90	519.8	795.3	0.708134 ±5	0.70740	5.409	34.43	0.512153 ±6	−8.8
	HM-25	508.6	739.6	0.708285 ±7	0.70751	5.412	34.30	0.512088 ±6	−10.0
	HM-34	845.3	640.0	0.708332 ±8	0.70685	3.771	23.93	0.512081 ±5	−10.2
	HM-39	491.6	1049	0.707932 ±6	0.70741	6.655	43.49	0.512282 ±6	−6.2
	MCQ-22	167.4	740.9	0.707190 ±6	0.70694	5.485	36.95	0.512342 ±6	−5.1
	MCQ-25	273.0	835.8	0.707333 ±6	0.70697	6.491	42.65	0.512372 ±6	−4.5

$(^{87}Sr/^{86}Sr)t$ 和 $\varepsilon Nd(t)$ 计算 姚安为 29Ma,马厂箐为 33Ma;

测试单位 :天津地质研究所同位素实验室和广州地球化学研究所同位素实验室。

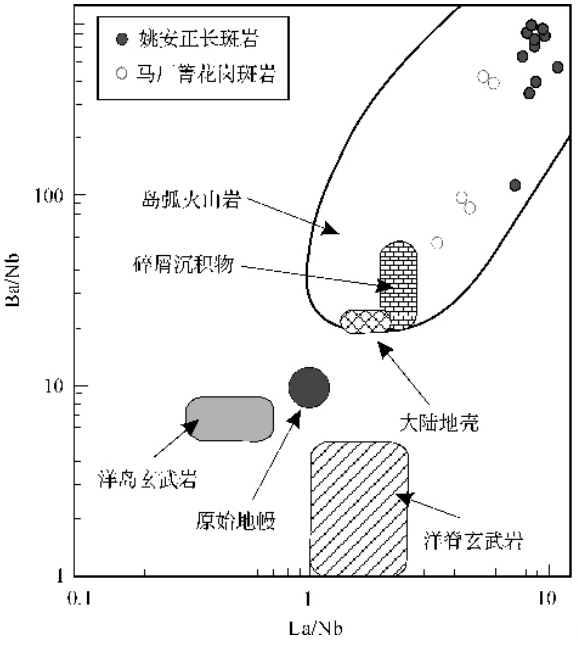

图 8 两岩体 La/Nb-Ba/Nb 关系图

(底图据 Jahn *et al*. 1999)

Fig. 8 Diagram of La/Nb vs. Ba/Nb of Yao'an and Machangqing intrusions (afrer Jahn *et al*. 1999)

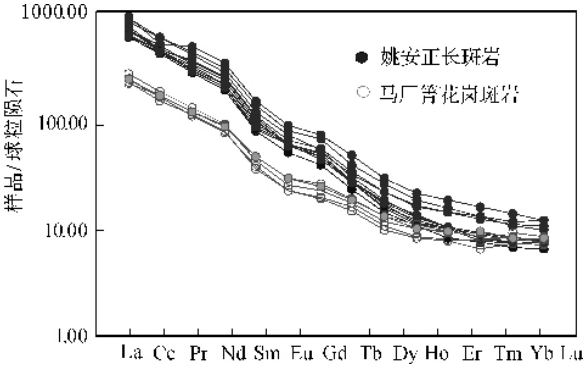

图 9 两岩体稀土元素球粒陨石标准化配分型式

(球粒陨石标准化值引自 Evensen *et al*., 1978)

Fig. 9 Chondrite-normalized rare earth element distribution patterns of Yao'an and Machangqing intrusions

4.3 Sr、Nd 同位素地球化学

Sr、Nd 同位素分析结果见表 3。结果表明,两岩体具有高 I_{Sr} 值和低 ε_{Nd} 值的特征。其中,姚安岩体 I_{Sr} 值为 0.7088 ~ 0.7093,ε_{Nd} 值为 −9.2 ~ −10.6;马厂箐岩体 I_{Sr} 值为 0.7061 ~ 0.7082,ε_{Nd} 值为 −3.1 ~ −10.2。在 Nd、Sr 同位素相关图(图 10)上,数据点均落入第四象限,与前人测定的哀牢山 ~ 金沙江岩带内其他岩体的 Sr、Nd 同位素组成(I_{Sr} 比值为 0.7054 ~ 0.7072,ε_{Nd} 为 −1.8 ~ −6.3;张玉泉等,1997;邓万明等,1998a)有类似的变化趋势,接近 EMII 地幔端元。EMII 地幔是与壳幔物质再循环相联系的交代富集地幔,具有较高的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 和较低的 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 值(路凤香,1988;郑永飞,1999)。

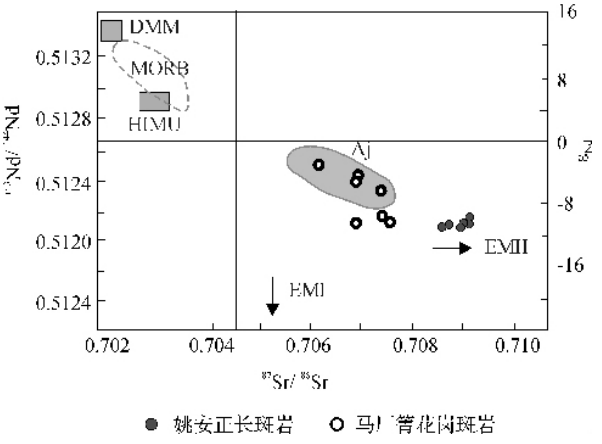

图 10 两岩体 Nd-Sr 同位素图解

Aj-哀牢山-金沙江富碱侵入岩（张玉泉等，1997；邓万明等，1998a）

Fig. 10 Diagram of Nd vs. Sr isotope

4.4 构造环境

研究表明，钾质火成岩产出的构造环境可划分为五种主要类型 板块内部（WIP）、早期洋弧（IOP）、晚期洋弧（LOP）、后碰撞弧（PAP）和大陆弧（CAP）（Morrison，1980；Müller *et al.*，1992，1993a，1993b）。将姚安岩体和马厂箐岩体的样品点投影到 Müller *et al.*（1992）的 $Zr/Al_2O_3 - TiO_2/Al_2O_3$ 和 $Ce/P_2O_5 - Zr/TiO_2$ 图解（图 11）中，可见它们主要形成于大陆弧环境。研究区的地震层析和深源包体的岩石学等证据证实，地幔上涌带制约了本区新生代岩浆岩的空间分布，显示出岩石圈伸展的构造背景（钟大赉等，2000）。

上述研究结果表明，在地球化学特征上，姚安和马厂箐岩体均表现出富大离子亲石元素和轻稀土元素，La/Nb、Ba/Nb比值高，富放射成因锶，并具有显著偏低的 ε_{Nd} 值，表现出富碱侵入岩具有壳幔混合的特点。导致壳幔混合的可能原因有（1）岩浆源区有俯冲进入地幔的地壳物质；（2）幔源岩浆在上升过程中受到了大陆地壳物质的强烈混染（邱检生，2002）。

由于（1）马厂箐岩体的 SiO_2 含量明显高于姚安岩体，但其 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值却明显低于姚安岩体。假如马厂箐岩体较高的 SiO_2 含量是由于岩浆上侵过程中同化了较多地壳物质的结果，则与该岩体具有相对较低的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值相矛盾。结论自然是两岩体所具有的 SiO_2 含量和 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值是原始岩浆所固有的；（2）两岩体明显富集 K、Rb、Sr、Ba、Th 和 La 等大离子亲石元素，而相对亏损 Ta、Nb 和 Ti 等高场强元素，且 Ta、Nb 和 Ti 具“TNT”负异常，显示出俯冲带幔源岩石的成分特点；（3）Sr、Nd 同位素结果表明两岩体具有高 I_{Sr} 值和低 ε_{Nd} 值的特征，接近于有俯冲带地壳物质参与的 EMII 地幔端元；

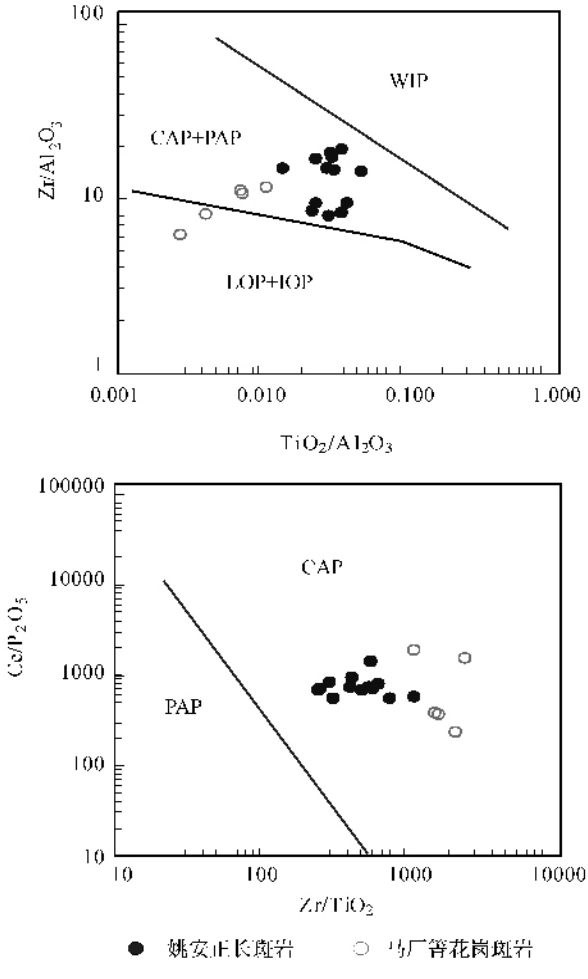

图 11 两岩体构造环境判别图解（据 Muller *et al.* 1992）

WIP 板内；CAP 大陆弧；PAP 后碰撞弧；LOP 晚期洋弧；IOP：早期洋弧

Fig. 11 Discrimination diagrams of tectonic settings of Yao'an and Machangqing intrusions (after Muller *et al.* 1992)

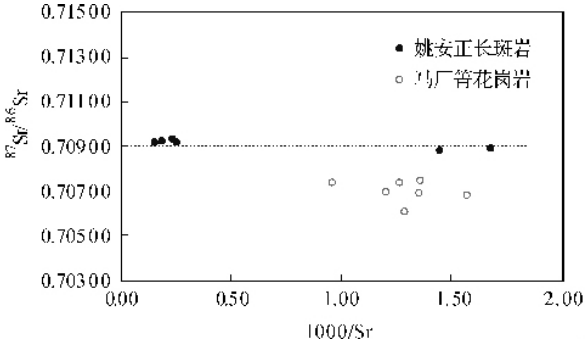

图 12 两岩体 $^{87}Sr/^{86}Sr - 1000/Sr$ 关系图解

Fig. 12 Diagram of $^{87}Sr/^{86}Sr$ vs. 1000/Sr

（4）在 $^{87}Sr/^{86}Sr$-1000/Sr 图解（图 12）中，随着样品 Sr 含量的变化，两岩体的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值基本不变，指示岩浆上侵过程中地

壳物质混染作用不明显。因此,两岩体所具有的壳幔混合特征,应主要是俯冲地幔楔内壳-幔物质源区混合的结果。根据本区的构造演化历史,在晚二叠纪-第三纪时期,本区的确经历了印度板块向欧亚板块俯冲、特提斯洋消亡的过程(张之孟等,1979;张玉泉等,1995)。在洋壳消减过程中,俯冲进入地幔的地壳物质作为源区的一个印记被保留了下来,从而使得由该源区形成的富碱侵入岩具有壳-幔混合成因的岩石成分特征。由此可见,两岩体某些类似地壳岩石的地球化学特征,较难用地幔岩浆在上升过程中混染地壳物质的模式来解释,而最可能是含有地壳物质的俯冲带地幔源区的显示。

姚安岩体和马厂箐岩体都属于哀牢山-金沙江富碱侵入岩带的组成部分。但是对比结果显示,尽管姚安和马厂箐岩体在成岩构造背景、成岩时代、成岩方式和源区特征以及成分上高碱富钾等方面具相似性,但两岩体在岩性和组成上仍存在较大差异 姚安岩体岩石类型主要为正长斑岩,马厂箐岩体主要为花岗斑岩;姚安岩体属于碱性系列岩石,马厂箐岩体则属于碱性-亚碱性系列的过渡岩石;姚安岩体的稀土总量明显高于马厂箐岩体,Sr、Nd 同位素组成亦显示出具有一定的差异。

姚安和马厂箐富碱斑岩的稀土模式均无明显的 Eu 负异常,表明形成富碱斑岩的岩浆不是幔源玄武质岩浆经分离结晶后的残余岩浆,加之斑岩的 K_2O 含量不随 SiO_2 含量变化而变化,表明两岩体所具有的地球化学特征是由源区性质决定的。已知的事实是:

(1)两岩体均为具壳幔混合特征的富集地幔部分熔融的产物。尽管两岩体成岩方式均为部分熔融作用,但部分熔融程度不同(毕献武,1999);

(2)尽管两岩体侵入的地层层位不同,但地球化学证据显示,它们在成岩过程中受地壳混染的程度较小,从而排除了主要由地壳物质混染造成岩性差异的可能性;

(3)岩石化学结果显示,姚安岩体形成的氧化指数高于马厂箐岩体;

(4)研究者近年对姚安正长斑岩和马厂箐花岗斑岩进行了较系统的矿物学和矿物化学研究。

结果表明,姚安岩体形成的温压条件为 818 ± 50℃和 0.9 ~ 1.3kbar;马厂箐岩体为 729 ± 50℃和 2.2 ~ 2.8 kbar;两岩体的氧逸度均高于地幔石英-橄榄岩-磁铁矿出溶线,但相对于马厂箐岩体,姚安岩体结晶时的氧逸度更高(Bi *et al.*, 2004)。根据这些事实,我们似乎有理由推测,两岩体岩性和组成上的差异,可能是由源区物质部分熔融程度不同以及岩浆结晶时温压和氧逸度等条件的不同所造成的。

值得指出的是,姚安岩体与姚安金矿床具有成因联系,马厂箐岩体与马厂箐铜矿床具有成因联系,即姚安金矿床和马厂箐铜矿床分别系由两岩体成岩过程中分异出的成矿流体而形成(Hu *et al.*, 1998, 2004; Bi *et al.*, 2000, 2002, 2004)。根据上述岩石学研究结果可以初步认为,在哀牢山-金沙江富碱侵入岩带内,铜矿化主要与碱性-亚碱性过度系列的岩浆活动有关,而金矿化则主要与碱性系列的岩浆活动有成因联系。原始岩浆成分和岩浆结晶时温压和氧逸度等条件的差异,可能是导致碱性系列岩浆和碱性-亚碱性过度系列岩浆分别分异出富金和富铜流体,进而分别形成金矿床和铜矿床的主要原因。

5 结论

(1)姚安岩体和马厂箐岩体均位于 NW-WNW 向哀牢山-金沙江深大断裂东侧,形成于喜山期大陆弧伸展环境。两岩体的岩浆均起源于富集地幔(EMII),其壳幔混合特征,主要是俯冲带地幔楔内壳-幔物质源区混合的结果。

(2)尽管姚安和马厂箐岩体在成岩构造背景、成岩时代、成岩方式和源区特征以及成分上高碱富钾等方面具相似性,但两岩体在岩性和组成上仍存在较大差异。这种差异可能是由源区物质部分熔融程度不同,以及岩浆结晶时温压和氧逸度等条件的不同所造成。

(3)金矿化主要与相对高温、低压和高氧逸度的碱性系列岩浆活动有关,而铜矿化则主要与相对低温、高压和低氧逸度的碱性-亚碱性过度系列岩浆活动有关。

致谢 野外研究工作得到姚安金矿、云南 310 地质队和云南省黄金管理局的大力支持。本项研究由中科院知识创新重要方向项目(KZCX3-SW-125)、国家自然科学基金项目(40071543、40003007)和国家 973 项目(G1999043209)资助。

References

Bi Xianwu. 1999. Study on alkali-rich intrusive rocks and their relation with metallogenesis of copper and gold in the "Sanjiang" region, western Yunnan. Guiyang: Ph. D. dissertation of the Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract)

Bi Xianwu, Hu Ruizhong, Ye Zaojun, Shao Shuxun. 2000. Relations between A-type granites and copper mineralization as exemplified by the Machangqing Cu deposit. Science in China (Series D), 43(1): 93 – 102

Bi Xianwu, Hu Ruizhong, Cornell, DH. 2002. The origin of altered fluid: REE evidence from primary and secondary feldspars in the mineralization- alteration zone. Ore Geology Review, 19: 69 – 78

Bi Xianwu, Hu Ruizhong, Cornell, DH. 2004. Trace element and isotope evidence for the evolution of ore-forming fluid of Yao'an gold deposit, Yunnan province , China. Mineralium Deposita, 39: 21 – 30

Bi Xianwu, Hu Ruizhong, Mineral chemistry studies on crystallization conditions (T, P, fO_2) of Cu-Au mineralized alkaline intrusions in Ailaoshan-Jinshajiang alkaline intrusion blet, western Yunnan, China. Contrib. Mineral. Petrol., 2004 (in review)

Chung SL, Lee TY, Lo CH, Wang PL, Cheng CY, Yem NT, Hoa TT, Wu GY. 1997. Intraplate extension prior to continental extrusion along the Ailaoshan Red River shear zone. Geology 25: 311 – 314

Chung SL, Lo CH, Lee TY, Zhang YQ, Xie YW, Li XH, Wang LW,

Wang PL. 1998. Diachronous uplift of the Tibetan plateau starting 40 Myr ago. Nature, 394: 769 – 773

Cornell D H. *et al*. 1995. The Ongeluk basaltic andesite formation in Grigualancl West South Africa: submarine alteration in a 2222Ma Proterozoic sea. Precambrian Research, 79: 101 – 123

Deng WM, Huang X, Zhong DL. 1998a. Alkali-rich porphyry and its relation with intraplate deformation of north part of Jinsha River belt in western Yunnan, China. Science in China (ser. D), 28(2): 111 – 117 (in Chinese)

Deng WM, Huang X, Zhong DL. 1998b. Petrological characteristics and genesis of Cenozoic alkali-rich porphyry in west Yunnan, China. Scientia Geologica Sinica, 33(4): 412 – 425 (in Chinese with English abstract)

Hou ZQ, Ma HW, Khin Z, Zhang YQ, Wang MJ, Wang Z, Pan GT, Tang RL. 2003. The Himalaya Yulong porphyry copper belt: product of large-scale strike-slip faulting in eastern Tibet. Econ. Geol. 98, 125 – 145

Hu Ruizhong, Burnard P G, Turner G, Bi Xianwu. 1998. Helium and argon isotope systematics in fluid inclusions of Machangqing copper deposit in west Yunnan province, China. Chem. Geol., 146: 55 – 63

Hu Ruizhong, Burnard P G, Bi Xianwu, Zhou Meifu, Pen Jiantang, Su Wenchao, Wu Kaixing. 2004. Helium and argon isotope geochemistry of alkaline intrusion-associated gold and copper deposits along the Red River-Jinshajiang fault belt, SW China. Chem. Geol. 203: 305 – 317

Institute of Geology of Metallurgical Industrial Department. 1984. Porphyry copper deposit of China. Beijing: Science Press (in Chinese)

Jahn B M, Wu F Y, Lo C H, Tsai C H. 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central Chhina. Chem. Geol., 157(1-2): 119 – 146

Jin Zhisheng, Huang Zhilong, ZhuChengming. 1997. Consanguinity of alkaline intrusions and lamprophyres of Sanjiang district, Yunnan Province. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 16(4): 222 – 224

Liang Xirong, Wei Gangjian, Li Xianhua. 2003. Precise measurement for $^{143}Nd/^{144}Nd$ and Sm/Nd ratios using muliple-collectors inductively coupled plasma-mass spectrometer (MC-ICPMS). Geochimica, 2003, 32(1): 91 – 96 (in Chinese with English abstract)

Li Xianhua, Zhou Hanwen, Liu Ying, Li Jiyu, Chen Zhenhong, Yu Jinsheng, Gui Xuntang. 2000. Mesozoic shoshonitic intrusives in the Yangchun Basin, western Guangdong, and their tectonic significance: 1. Petrology and isotope geochronology. Geochimica, 29(6): 513 – 520 (in Chinese with English abstract)

Li Xianhua, Zhou Hanwen, Wei Gangjian, Liu Ying, Chung Sunlin, Lo Chinghua, Lee Chiyu. 2002. Geochemistry and Sr-Nd isotopes of Cenozoic ultrapotassic lamprophyres in western Yunnan: Constraints on the composition of sub-continental lithospheric mantle. Geochimica, 31(1): 26 – 34 (in Chinese with English abstract)

Lu Fengxiang. 1988. The Petrology of Mantle. Wuhan: Press of China University of Geosciences

Morrison G W. 1980. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association. Lithos, 13: 97 – 108

M ller D, Rock N M S, Groves D I. 1992. Geochemical discrimination between shoshonitic and settings: a pilot study. Mineral. Petrol., 46: 259 – 289

M ller D, Morris B J, Farrand M G.. 1993a. Potassic alkaline lamprophyres with affinities to lamproites from the Karinya Syncline, South Australia. Lithos, 30: 123 – 137

M ller D, Groves D I. 1993b. Direct and indirect associations between potassic igneous rocks, shoshonites and gold-copper deposits. Ore Geology Reviews, 8: 383 – 406

Peng Jiantang, Bi Xianwu, Hu Ruizhong, Wu Kaixing, Sang Haiqing. Determination on the time limits of the Machangqing rocks' intrusion and the related Cu-Mo mineralization, western Yunnan. Acta Mineralogica Sinica (in press)

Peng Z, Matanabe M, Hoshino K, Sueoka S, Yano T. 1998. The Machangqing copper-molybdenum deposits, Yunnan, China- an example of Himalayan porphyry-hosted Cu-Mo mineralization. Mineralogy and Petrology, 63: 95 – 117

Pu W M, Hu C P. 1994. Petrological characters and tectonic environment of the Beiya alkali-rich intrusive porphyry at Heqing. Geology of Yunnan, (1): 33 – 41 (in Chinese with English abstract)

Qi Liang, Hu Jing, D. Conrad Gregoire. 2000. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry. Talanta, 51: 507 – 513

Qiu JS, Wang DZ, Liu H, Lin WL. 2002. Post-collisional potash-rich volcanic rocks in the north margin of Dabie orogenic belt: geochemistry and petrogenesis. Acta Petrologica Sinica, 18(3): 319 – 330 (in Chinese with English abstract)

Qiu Jiaxiang. 1985. Petrology of igneous rocks. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)

Rollinson H. 1993. Using geochemistry data: evaluation, presentation, interpretation. John Wiley & Sons, New York, pp 43

Shen Q W. 1991. Gold deposits relation to the Cenozoic alkaline magmatic process over mid-Yunnan basin. Journal of Changchun University of Earth Science, 21(4): 403 – 410 (in Chinese with English abstract)

Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systemmatics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes. In: Saunder A D and Norry M J (eds.). Magmatism in the ocean basins, geological society of special publications 42, pp. 313 – 345. Geological society of London and Blackwell Scientific Publications, London

Wang H Y. 1993. Geological characteristics of the Beiya gold deposit and its ore-forming conditions-A preliminary analysis. Mineral Resources and Geology of Southwest China, (2): 17 – 24 (in Chinese with English abstract)

Wang JH, Yin A, Harrison T M, Grove M, Zhou JY, Zhang YQ, Xie GH. 2001. Thermochronogical constraints on the timing of Cenozoic high-potassic magmatism in eastern Tibet. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 20(4): 231 – 233

Wang J, Li JP, Wang JH, Ma ZH. 2002. Geological implications for the mafic enclaves of deep derivation from cenozic shoshonitic rocks in Jianchuan- Dali area, western Yunnan. Acta Mineralogica Sinica, 22(2): 113 – 125

Wei Gangjian, Liang Xirong, Li Xianhua. 2002. Precise measurement of Sr isotopic composition of Sr isotopic composition of liquid and solid base using (LP) MC-ICPMS. Geochimica. 31(3): 295 – 299

Xiang S Y, Ye J L. 1995. A new type of gold deposits- gold deposits associated with alkaline rocks. Mineral Resources and Geology, (2): 73 – 76 (in Chinese with English abstract)

Yan Shenghao, Wang Denghong, Yu Jinjie. 2001. Himalayan mineralization in Tibet, Qingzang plateau. In: Chen Yuchuan, Wang Denghong, Study on Himalayan endognic mineralization. Beijing:

Seismological Press, 38 – 45 (in Chinese with English abstract)
Yin A., Harrison TM. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 28: 211 – 280
Turner S, Arnaud N, Liu J, Rogers N, Hawkesworth C, Harris N, Kelley S, VanCalsteren P, Deng W. 1996. Post-collision, shoshonitic volcanism on the Tibetan plateau: implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts. J. Petrol., 37: 45 – 71
Tu G C, Zhang Y Q, Zhao Z H. 1984. A preliminary study on the two alkali-rich intrusive rock belts in South China. In: Geology of granites and its relations with mineralization. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 21 – 37 (in Chinese)
Tu G C. 1989. On the alkali-rich intrusive rocks. Mineral Resources and Geology, 13 (3): 1 – 4 (in Chinese with English abstract)
Zhang Q, Pan JY, Liu JJ, Shao SX, Liu ZH. 2002. Determination and application of the upper mantal lead composition in western Yunnan. Geology Geochemistry, 30(3): 1 – 6
Zhang Y Q, Xie Y W, Tu G C. 1987. A preliminary study on the relationship between rift and Ailaoshan-Jianshajiang alkaline intrusive rocks. Acta Petrologica Sinca, (1): 17 – 25 (in Chinese with English abstract)
Zhang Y Q, Xie Y W. 1995. Geochemistry of granitoid rocks in Hengduanshan region. Science Press, Beijing, pp 38 – 42 (in Chinese)
Zhang Y Q, Xie Y W, Tu G C. 1997. Nd, Sr isotopic character and chronology of Ailaoshan-Jinshajiang alkali-rich intrusive rocks. Science in China, 27: 289 – 293 (in Chinese)
Zhang Zhimeng, Jin Meng. 1979. Two kinds of melange and their tectonic significance in Xiangcheng- Derong area, southwestern Sichuan. Chinese Journal of Geology, (3): 205 – 214 (in Chinese with English abstract)
Zhong DL, Ding L, Liu FT, Liu JH, Zhang JJ, Ji JQ, Chen H. 2000. Multi-oriented and layered structures of lithosphere in erogenic belt and their effects on Cenozoic magmatism--A case study of western Yunnan and Sichuan, China. Science in China (Series D), 30 (suppl.): 1 – 9
Zheng Yongfei. 1999. Chemical geodynamics. Beijing: Science Press, 30 – 33

附中文参考文献：

毕献武. 1999. 滇西'三江'地区富碱侵入岩及其与铜、金成矿关系的研究. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所
邓万明,黄萱,钟大赉. 1998a. 滇西金沙江带北段的富碱斑岩及其与板内变形的关系. 中国科学(D辑),28(2): 111 – 117
邓万明,黄萱,钟大赉. 1998b. 滇西新生代富碱斑岩的岩石学特征与成因. 地质科学,33(4): 412 – 425
金志升,黄智龙,朱成明. 1997. 云南三江地区富碱侵入岩与煌斑岩的同源性. 矿物岩石地球化学通报,16(4): 222 – 224
梁细荣,韦刚健,李献华. 2003. 利用 MC-ICPMS 精确测定$^{143}Nd/^{144}Nd$和 Sm/Nd 比值. 地球化学,32(1): 91 – 96
李献华,周汉文,刘颖,李寄嵎,陈振宏,于津生,桂训唐. 2000. 粤西阳春中生代钾玄质侵入岩及其构造意义: 1. 岩石学和同位素地质年代学. 地球化学,29(6): 513 – 520
李献华,周汉文,韦刚健,刘颖,钟孙霖,罗清华,李寄嵎. 2002. 滇西新生代超钾质煌斑岩的元素和 Sr-Nd 同位素特征及其对岩石圈地幔组成的制约. 地球化学,31(1): 26 – 34
李文桦. 1982. 藏东-滇西斑岩铜、铅多金属矿带岩石化学特征及其与成矿的关系. 地质与勘探,(4): 10 – 16
路凤香,1988,地幔岩石学,武汉: 中国地质大学出版社
彭建堂,毕献武,胡瑞忠,吴开兴,桑海清. 滇西马厂箐斑岩铜(钼)矿床成岩成矿时限的厘定. 矿物学报(印刷中)
莆为民. 1994. 鹤庆北衙富碱斑岩侵入体的岩石学特征及其构造环境. 云南地质,(1): 33 – 41
邱检生,王德滋,刘洪,凌文黎. 2002. 大别造山带北缘后碰撞富钾火山岩: 地球化学与岩石成因. 岩石学报,18(3): 319 – 330
邱家骧. 1985. 岩浆岩石学. 北京: 地质出版社
沈秋伟. 1991. 论滇西喜山期碱性岩浆作用有关的金矿床. 长春地质学院学报,21: 403 – 410
王会远. 1993. 北衙金矿地质特征及成矿地质条件的初步分析. 西南矿产地质,(2): 17 – 24
王江海,尹安,T. M. Harrison, M. Grove,周江羽,张玉泉,解广轰. 2001. 青藏东缘新生代高钾岩浆活动的热年代学制约. 矿物岩石地球化学通报,20(4): 231 – 233
王建,李建平,王江海,马志红. 2002. 滇西剑川-大理地区新生代钾玄岩系中深源包体的地质意义. 矿物学报,22(2): 113 – 125
韦刚健,梁细荣,李献华. 2002. (LP) MC-ICPMS 方法精确测定液体和固体样品的 Sr 同位素组成. 地球化学,31(3): 295 – 299
向树元,叶俊林. 1995. 新的金矿类型-与碱性岩有关的金矿床. 矿产与地质,(2): 73 – 76
阎生好,王登红,余金杰. 2001. 青藏高原西藏地区的喜马拉雅期成矿. 见陈毓川和王登红主编'喜马拉雅期内生成矿作用研究". 北京: 地震出版社,38 – 45
冶金工业部地质研究所. 1984. 中国斑岩铜矿. 北京: 科学出版社
涂光炽,张玉泉,赵振华. 1984. 华南两个富碱侵入岩带的初步研究. 花岗岩地质与成矿关系. 南京: 江苏科学出版社, 21 – 37
涂光炽. 1989. 关于富碱侵入岩. 矿产与地质, 13(3): 1 – 4
张乾,潘家永, 刘家军,邵树勋,刘志浩. 2002. 滇西地区上地幔铅同位素组成的确定及其应用. 地质地球化学, 30(3): 1 – 6
张玉泉,谢应雯,涂光炽. 1987. 哀牢山-金沙江富碱侵入岩及其与裂谷构造关系初步研究. 岩石学报, (1): 17 – 25
张玉泉,谢应雯. 1995. 横断山区花岗岩类地球化学. 北京: 科学出版社,1 – 186
张玉泉,谢应雯,涂光炽. 1997. 哀牢山-金沙江富碱侵入岩年代学和 Nd,Sr 同位素特征. 中国科学(D辑), 27: 289 – 293.
张之孟等. 1979. 川西南乡城-得荣地区的两种混杂岩及其构造意义. 地质科学,(3): 205 – 214
钟大赉,丁林,刘福田,刘建华,张进江,季建清,陈辉. 2000. 造山带岩石层多向层架构造及其对新生代岩浆活动制约-以三江及邻区为例. 中国科学(D辑),30(增刊): 1 – 9
郑永飞. 1999. 化学地球动力学. 北京: 科学出版社