

稀土元素 Sc 的矿床类型及找矿前景

范亚洲¹, 周伟¹, 王子玺¹, 凌锦兰¹, 姜常义^{1,2}

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054;

2. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘 要: Sc 是一种典型的稀土元素, 常类质同象进入镁铁质矿物中。自然界中罕见钪的富集体。Sc 主要是从铝土矿、钛铁矿、磷块岩、黑钨矿、锡石等矿石中作为伴生元素加以回收。近几年, 随着对复杂硅酸盐矿物 Sc 浸出试验的研究, Sc 元素也可从富 Sc 的基性-超基性岩体 ($\text{Sc}_2\text{O}_3 > 50 \times 10^{-6}$) 中提取。主要富 Sc 矿物有单斜辉石、角闪石。云南二台坡岩体源区可能具有富 Sc 的特性, 在岩浆结晶早期大量进入镁铁质硅酸盐矿物, 形成钪的独立矿床 ($\text{Sc}_2\text{O}_3 = 66.08 \times 10^{-6}$)。这类矿床在国内外还属首例, 其发现扩大了独立钪矿床类型, 对寻找新型钪矿具有重要的指导意义。

关键词: 钪; 矿床类型; 基性-超基性岩体; 二台坡; 云南牟定

中图分类号: P618.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-6248(2014)01-0234-10

The Types of Rare and Disperse Scandium Deposits and Prospecting Potential

FAN Ya-zhou¹, ZHOU Wei¹, WANG Zi-xi¹, LING Jin-lan¹, JIANG Chang-yi^{1,2}

(1. College of Earth Science and Recourses, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, China)

Abstract: Scandium is a typical rare and disperse element, and distributes widely in trace amounts in rocks consisting of ferromagnesian minerals. Scandium-concentrated ores are rare in nature, thus the scandium was mainly recovered as a by-product from the ores of monohydrallite, ilmenite, phosphorite, wolframite, tinstone etc. Recently, with the analysis and study on the enrichment experiment of the complex silicate mineral containing scandium, scandium can be extracted from mafic-ultramafic scandium-rich ore bodies containing scandium oxide more than 50×10^{-6} . The ores of scandium are mainly consisted of clinopyroxene, amphibole. The origin of Ertaipo intrusion is of high scandium, which enters the ferromagnesian minerals during the early fractional crystallization largely to form the new independent deposit, whose Sc_2O_3 is equal to 66.08×10^{-6} . This kind of deposit is firstly discovered at home and abroad, enlarging the new types of independent deposit and having great significance to the prospecting of Scandium deposit.

Key words: scandium; ore deposit; mafic-ultramafic ore body; Ertaipo; Mouding of Yunnan

20 世纪, 世界主要国家和地区主要在铝土矿、钛铁矿、磷块岩、黑钨矿、锡石等矿石中回收富集钪, 其中铝土矿、钛铁矿和磷块岩的研究程度最为成熟。我国的钪资源丰富, 全部以副产品形式赋

收稿日期: 2013-05-28; 修回日期: 2013-09-25

基金项目: 中国地质矿产调查局地质矿产调查评价项目 (1212011120498、12120113043100) 和国家自然科学基金 (41102045、41302070) 联合资助

作者简介: 范亚洲 (1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩石学及地球化学研究。E-mail: yazhouf@163.com

存。从生产情况看,大部分钪主要从含 $\text{Sc } n0 \times 10^{-6} \sim n00 \times 10^{-6}$ 的铝土矿和稀土矿(占 75%~85%)、磷块岩和铁钛精矿(占 15%~20%)(杨军臣, 2004; 匡敬忠, 2012; 张玉学, 1997; 龙志奇, 2009; 宋万灏, 1997; 王华, 2002; 张玉学, 1997; 刘水庚, 1989; 马升峰, 2012; 吕宪俊, 1992; 王彦斌等, 2010), 以及一些铀、钍、钨等矿石中(Л. Ф. Борисенко, 1988)提取。纵观近年来国内外针对 Sc 的地球化学行为和富集规律等问题的研究, 主要是从资源综合利用的角度来了解钪的含量和回收钪, 缺少对钪的来源、地球化学示踪、富集条件、成矿机制等方面的探索, 尤其是国内, 这方面工作甚少。笔者系统总结了前人在钪元素及其矿床的研究成果, 认为云南牟定地区二台坡富 Sc 岩体源区可能具有富 Sc 的特性, 这类矿床在国内外还属首例, 其发现扩大了钪的独立矿床类型, 具有很高的研究意义。

1 Sc 元素地球化学性质及用途

Sc 是一种典型的稀散元素, 原子序数为 21, 第四周期第三副族, 位于铁族元素之首, 与镧系稀土金属属同一副族, 与 Ti、V、Cr 同属于过渡元素(Cotton et al., 1988)。Sc 的液态密度为 2.80 g/cm^3 , 熔点为 1541°C , 沸点为 2842°C 。氧化钪的晶体密度为 3.89 g/cm^3 。金属钪呈银白色, 性硬而脆, 是一种很活泼的金属, 很容易与酸反应, 在空气中很快失去金属光泽。钪的氧化物不溶于水, 但溶于沸腾的浓硝酸或浓盐酸中。自然界中, 钪只有+3价, 不受氧化还原的影响, 没有变价, 很难被还原为金属, 故无自然元素矿物。在地壳中平均丰度值为 22×10^{-6} , 排在第 31 位(Hedrick, 2010b), 在自然界中很少形成显著富集体, 而是相当广泛地分散于各种矿物, 尤其是含 Mg 和 Fe^{2+} 的硅酸盐矿物(Wang et al., 2011)。这是由于 Sc 的晶体化学性质所致, Sc 的离子半径为 $0.83\text{\AA}$ (Goldschmidt, 1959), 与 Mg^{2+} ($0.78\text{\AA}$) 和 Fe^{2+} ($0.83\text{\AA}$) 的离子半径接近, 在岩浆结晶过程中总是以类质同象形式置换 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 进入硅酸盐矿物中。例如, 橄榄石、辉石、角闪石等, 该过程常伴随 Al 的加入以维持电价平衡: $\text{Sc}^{3+} + \text{Al}^{3+} = \text{Fe}^{2+} + \text{Si}^{4+}$ (刘英俊等, 1986)。

由于能量上不利, Sc^{3+} 不易置换 Zr^{4+} 和 Hf^{4+} , 所以 Sc^{3+} 并不聚集于富含锆铪的矿物中, 相反含 Sc 的矿物可有显著量的锆、铪, 富含 Sc 的硅酸盐矿物(钪钇石)经常含有相当量的锆、铪, 为保持电价平衡, 又有 Be 或部分 P 的加入(刘英俊等, 1986)。有些研究者也常以异价类质同象来解释锡石和钨锰铁矿中的钪, 并认为有铌、钽进行电价补偿。Щербина (1959) 认为锡石中存在 Sc 可能是由于下面的类质同象置换: $\text{Sc}^{3+} + \text{Nb}^{5+} = 2\text{Sn}^{4+}$; Goldschmidt (1959) 认为钨锰铁矿中的 Sc 可能是由于 Fe^{2+} 及部分的 Mn^{2+} 被 Sc^{3+} 所替代, WO_4^{2+} 为 NbO_4^{3+} 或 TaO_4^{3+} 所替代。等价的类质同象置换主要表现为 Sc^{3+} 置换三价的稀土元素, 另外也可进入含 Al^{3+} 或 Fe^{3+} 的矿物中, 所以 Sc 经常存在于稀土元素矿物中。有些研究者认为绿柱石中的 Sc 很可能是替换了六次配位的 Al 离子, 云母中含 Sc 高的原因可能是置换 Al^{3+} 或 Fe^{3+} 的结果。此外, In^{3+} 与 Sc^{3+} 共生也是完全可能的(刘英俊等, 1986)。

Sc 具有较高的化学活泼性、良好的导电性以及质软易切割等特点, 近 20 年被广泛用于国防、冶金、化工、宇航、原子能电站、高效多功能激光器、医疗等领域(Guo et al., 1988; Hedrick, 2010b; Irvine et al., 2005; 朱敏杰等, 2006; 徐刚, 2007)。

2 钪提取技术

虽然含 Sc 矿物赋存有相当可观的 Sc 元素。例如, 钪钇矿含 Sc 量为 21.2%~24.9%, 黑稀金矿 1%, 硅铍钇矿 1.2%, 但这些矿物在自然界中分布极少, 仅在少数地区发现具有工业价值的钪独立矿床。例如, 挪威、马达加斯加和莫桑比克花岗伟晶岩中的钪钇矿, 美国犹他州 Fairfield 磷铝石矿床中的水磷钪矿, 但产量均不大(A. Д. Капенов, 1962; E. S. Larsen et al., 1940)。近几十年来, 世界各地再未找到 Sc 的独立工业矿床, Sc 主要以微量元素形式共存于含 Al、Co、Fe、Mo、Ni、P、Ta、Sn、Ti、W、U、Zn、REE、Zr 等为主的矿石中(Hedrick, 2010b), 这些矿石钪含量达到 $20 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$ 就可以作为伴生组分综合回收利用(Xu and Li, 1996), 这已成为

钨的主要工业来源。谭俊峰(2012)对复杂硅酸盐含钨精矿钨浸出助浸剂试验研究发现:当入浸物料粒度约为0.05 mm,液相中HCl质量分数为15.2%,液固比5:1,添加二号助剂量为4%,温度为90℃,连续搅拌浸出时间为12 h,以类质同象形式进入复杂硅酸盐矿物中Sc的浸出率达88.33%。马升峰(2012)对白云鄂博稀选尾矿中的含Sc矿物钠闪石和钠辉石进行分析,发现当活化剂用量60%,焙烧温度950℃,焙烧时间1.5 h,盐酸浓度6 mol/L,酸浸时间6 h,Sc的浸出率大于99%。这为寻找新型钨矿床奠定了基础。

3 钨矿床类型

美国、澳大利亚、中国、哈萨克斯坦、马达加斯加、挪威、俄罗斯以及乌克兰都含有丰富的钨资源,但钨矿床类型却不尽相同。例如,在美国,Sc主要赋存于以U、Ta、Al、Zr为主的矿石中;在澳大利亚,Sc主要赋存于红土镍矿中;在中国,Sc主要赋存于以Fe、Sn、W、REE为主的矿石中;在哈萨克斯坦,Sc主要赋存于U矿石中;在马达加斯加以及挪威,Sc主要赋存于花岗伟晶岩中;在俄罗斯与乌克兰,Sc主要赋存于铁矿中(Hedrick, 2010a; Munnoch et al., 2003; Wang et al., 2011)。由于Sc元素总体丰度很低及分离技术落后,金属钨年产量较低(2 t/a),价格昂贵(Sc_2O_3 : 5 900 \$/kg, 2012) (Deschamps, 2003)。

根据已有资料以及前人的工作经验,笔者将含钨矿床分为内生矿床和外生矿床两大类,其中内生矿床包括基性超基性岩型、伟晶岩型以及气成热液型;外生矿床包括沉积型砂矿床、风化淋滤沉积型以及沉积吸附型(表1)。对于部分Sc丰度较低,在生产过程中无法回收利用钨的地质体(如煤田, A. Д. Капенов, 1962),未列出。

4 富Sc复杂硅酸盐岩体

二台坡基性超基性岩体位于元谋-绿汁江基性超基性岩带南段(图1-I),隶属川滇新裂谷带,形成于晚二叠世(260 Ma),与攀枝花岩体年龄接近(姬琦, 2011; Zhou et al., 2005),多呈陡倾岩墙

及岩盆侵位于元古界龙川群变质岩系中。岩体在平面上呈梨形,走向北西55°,北宽南窄,长360 m,宽100~300 m(云南有色楚雄勘察院, 2009)。岩体分异较好,呈明显的岩相分带,从下向上岩石类型为橄榄辉石岩-磁铁矿辉石岩-辉长岩-含正长石辉长岩-二长辉长岩,各岩性带均以过渡接触,互不穿插。岩体属钙碱性系列, $m/f=0.23\sim2.02$,为富铁质-铁质基性超基性岩(吴利仁, 1963; 朱智华, 2010)。朱智华(2012)根据钨元素的地球化学特征,分析研究了该岩体的含钨性,发现该岩体虽属低品位小型铁矿床,但其伴生Sc元素规模已超过铁矿床规模,达到特大型钨矿床工业指标,其 Sc_2O_3 平均品位为 66.08×10^{-6} 。郭远生等(2012)发现二台坡岩体、凹溪河岩体、碗厂岩体等含 Sc_2O_3 为 $60\times10^{-6}\sim110\times10^{-6}$,平均品位 $>50\times10^{-6}$,已构成独立的钨矿体,初步控制的 Sc_2O_3 资源量占攀枝花地区钨资源量的16.8%,潜在经济价值巨大。这为寻找独立钨矿床提供了新思路。而且,沿绿汁江断裂方向,共分布有华力西晚期基性-超基性岩体近70个,全长达130 km,找矿前景非常可观。

二台坡岩体中钨主要赋存于磁铁矿辉石岩、橄榄辉石岩(图1-II、图1-III)中,总体看,与攀枝花铁矿石中Sc的赋存状态类似(吕宪俊等, 1992),但Sc含量更高(表2)。经分析,岩石中未见Sc的独立矿物,Sc主要以类质同象的形式分布于单斜辉石,角闪石、斜锆石和锆石中,其在各种矿物中的含量变化较大(表3)。所以基性-超基性岩体赋存的独立钨矿体具有较大研究意义。

5 岩浆作用及成矿

二台坡岩体分异较好,岩性有橄榄岩、辉石岩、辉长岩以及闪长岩,其东南方向有安益岩体出露。郭远生(2012)认为该岩体与最南端的安益岩体属同源岩浆分异演化的产物,共同构成基性-碱性杂岩体。但从形成时代来说,二台坡岩体形成于晚二叠世(~260 Ma),是华力西运动晚期形成的(Zhou et al., 2005)。而安益岩体形成于晚白垩纪(~80 Ma)(矿区调查资料),是攀西裂谷燕山期岩浆活动的产物(田世洪等, 2008),将这2个岩体放在一起研究有待商榷。滇中地区的基性-超基

表 1 钪矿床分类表（据张涛石，1980 有改动）

Tab. 1 The classified chart of scandium deposits (After Zhang, 1980 modified)

矿床类型		赋矿岩石类型	主成矿元素	主要含钪矿物	产地	备注
内生矿床	基性超基性岩型		磁铁矿辉石岩、橄榄辉石岩、暗色辉长岩、角闪辉长岩及部分闪长岩	钪，含低品位的铁	透辉石、角闪石、单斜锆石和锆石	中国云海 独立钪矿床
	花岗伟晶岩型		花岗伟晶岩	钪、钇	钪钇矿、硅铍钇矿	挪威、马达加斯加 独立钪矿床
			与 Fe、Nb、Ta 有关的伟晶岩	铌、钽、铁、锆	锆钪钇矿、褐帘石	芬兰、马尔加什 伴生矿床
				钨、锰、铁、锡	钨锰铁矿、锡石、锆石	秦瓦里德、马乌克兰 伴生矿床
			与其性超基性岩有关的伟晶岩	钛、铁、稀土元素	铁硅钪矿、铌钽酸盐矿物、硅铍钇矿、绿柱石、黑稀金矿—复稀金矿等稀土硅酸盐矿物、钛铀矿、钛铁矿、白云母	苏联卡累利亚、莫桑比克、马达加斯加 伴生矿床
	气成热液型	钠长石化花岗岩	花岗岩、花岗斑岩、细晶岩	稀土元素	铌铁矿、铌钇矿、褐钇铌矿、斜锆石、锆石、磷灰石	苏联、哈萨克斯坦 伴生矿床
		云英岩型以及与云英岩型有关的石英脉	花岗岩、花岗斑岩、细晶岩、其他硅酸铝盐类	钨、锡	黑钨矿、锡石、钪钇矿、绿柱石、铁白云母	中国浙江、苏联中哈萨克斯坦 伴生矿床
		高温石英脉型	花岗岩及与围岩接触带	钨、锡	黑钨矿、锡石、铌钽铁矿、硅铍钇矿、绿柱石	中国江西、福建 伴生矿床
		矽卡岩型	花岗岩及灰岩接触带	钛、铁	钛铁矿—磁铁矿、绿柱石、铁白云母、透辉石、透闪石、石榴石	中国福建、美国新泽西州、苏联中哈萨克斯坦 伴生矿床
		碳酸岩	与超基性岩—碱性岩有密切关系的碳酸岩	铁、铌、稀土元素	烧绿石、铌铁矿、钙钛矿、锆石、黄硅镍钙石、磷灰石	加拿大魁北克省、苏联 伴生矿床
			与萤石矿有关的碳酸岩	氟钪钇矿、黑稀金矿、复稀金矿	美国拉巴里县	伴生矿床
		老变质杂岩中的钪钛磁铁矿	片麻岩、石英岩、角闪岩	铁、钛、铀	铀钛磁铁矿、钛铀矿、钍沥青铀矿	澳大利亚雷山 伴生矿床
外生矿床	沉积型砂矿床		各种砂岩、砾岩砾石	钨、钛、锡、铁、铀	钛铀矿—铀钛矿、铌铁矿、褐钇铌矿、钽铁矿、黑钨矿、锡石、锆石、斜锆石、黑稀金矿—复稀金矿	中国广东、美国布兰德河流域 伴生矿床
	风化淋滤沉积型		砾状、角砾状灰岩、页岩	磷、铝	水磷钪矿、纤磷钙铝石、磷铝锆石、银星石、磷铝石	美国犹他州 Fairfield 伴生矿床
	沉积吸附型		生物沉积岩、磷酸盐、粘土、红土砂岩、粉砂岩、铝土矿、磷块岩	磷、铝	褐铁矿、赤铁矿、次生铀矿物、次生磷矿物、蒙脱石、三水铝石钪的稀土矿物	南美、苏联 伴生矿床

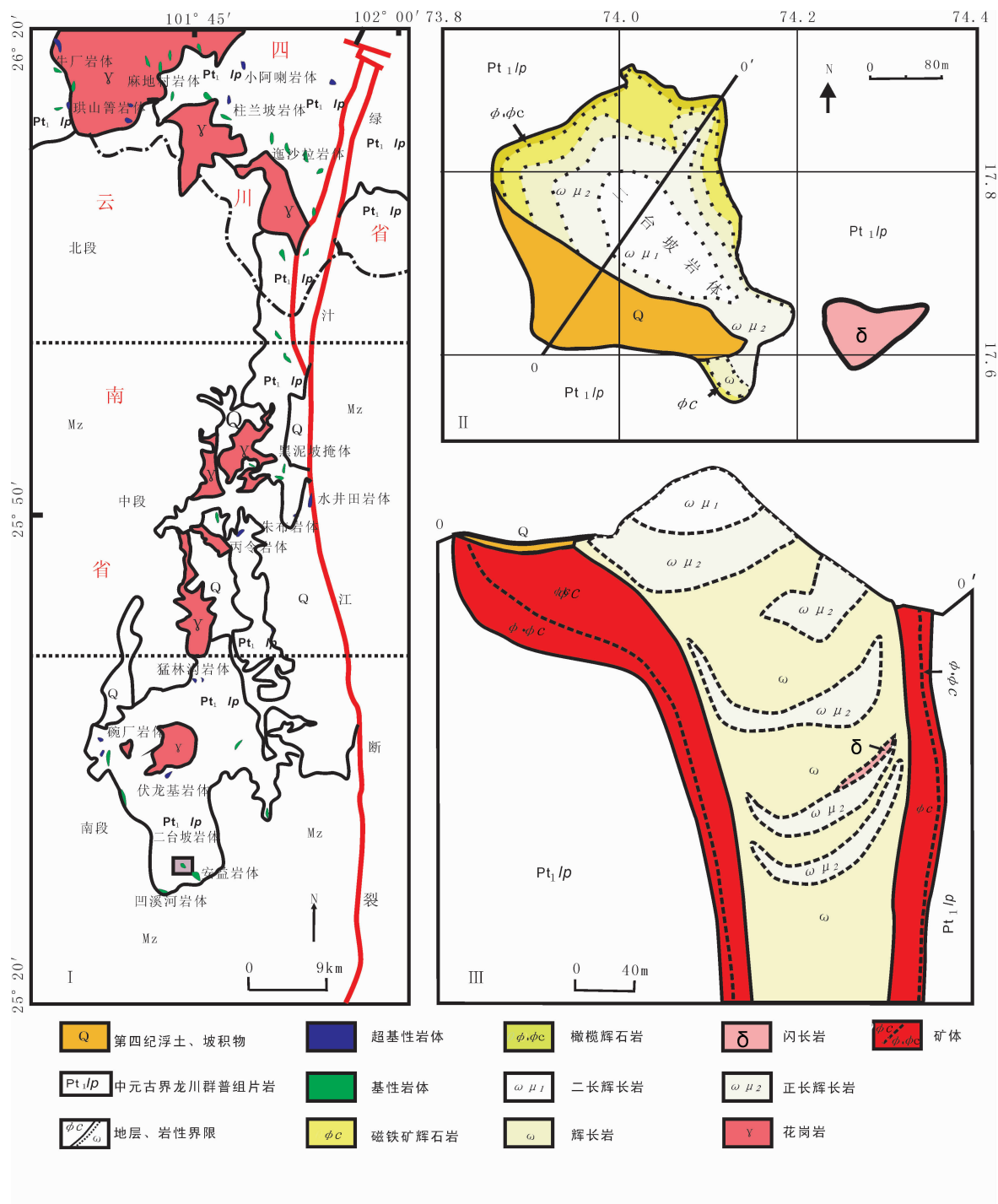


图 1 绿汁江基性超基性岩带 (I)、二台坡岩体简易地质图 (II) 及剖面图 (III) (据郭远生, 2012, 有改动)
Fig.1 Distribution of basic-ultrabasic intrusion belt (I), simplified geologic map of Ertaipo intrusion (II) and its' profile (III) (after Guo., 2012 modified)

表 2 二台坡岩体及围岩部分样品 Sc 含量表 (×10⁻⁶)
(据郭远生等, 2012; 有改动)

Tab.2 Scandium content of Ertaipo intrusion and wall rocks
(×10⁻⁶) (After Guo et al., 2012 modified)

样号	岩石	I Sc ₂ O ₃	II Sc ₂ O ₃
1	外接触带蚀变砂岩	73.60	62.76
2	片岩	15.33	17.90
3	磁铁矿辉石岩	88.93	88.33
4	磁铁矿辉石岩	58.27	59.16
5	橄榄辉石岩	95.07	96.12
6	橄榄辉石岩	82.80	76.83
7	橄榄辉石岩 (低铁)	70.53	72.28
8	闪长岩	76.67	68.56

注：I：数据由北京矿业研究总院测定；II：数据由中国地质科学院地球物理化学勘察研究所测定。

表 3 Sc 在各主要矿物中的分配率表 (据郭远生等, 2012)
Tab.3 Distribution of scandium in main minerals
(After Guo et al., 2012)

矿物	矿物含量 (%)	Sc 含量 (×10 ⁻⁶)	Sc 分布量 (×10 ⁻⁶)	分布
单斜辉石	38	158.1	60.078	0.688
黑云母	7	6.2	0.434	0.005
磁铁矿	6	8	0.48	0.005
角闪石	5	85.8	4.29	0.049
锆石	<1	320	3.2	0.037
石英、斜长石	43	43.8	18.834	0.216
合计	100			1.00

性岩体属热侵位的环状岩体 (图 1-II), 与攀枝花岩体 (Zhou et al., 2002, 2005; 夏林圻等, 2012; 沈发奎, 1986; 姚家栋, 1987; 刘红英等, 2004; 张招崇, 2009; 马言胜等, 2009; 陶琰等, 2006, 2007b; 姜常义等, 2012)、金宝山岩体 (陶琰等, 2002, 2004, 2007a, 2007b, 2008, 2011; 王生伟等, 2007; 马言胜等, 2007; 战新志, 1992)、白马寨岩体 (张旗等, 1984; 姚家栋, 1987; Wang et al., 2006a, 2006b)、朱布岩体 (朱丹等, 2007) 等具有相似的地质背景和地质时代, 说明这些岩体在成因上可能与晚二叠世峨眉山大火成岩省 (ELIP) 有关。

二台坡岩体受岩浆期后热液蚀变较弱, 主要有自变质作用为主, 有碳酸盐化、蛇纹石化、滑石化、次闪石化、绿泥石化等 (朱智华, 2010)。表

2 中, 围岩的 Sc₂O₃ 含量均低于磁铁矿辉石岩、橄榄辉石岩以及闪长岩的 Sc₂O₃ 含量, 说明岩体富钪性不是由原生岩浆同化围岩造成的, 而应作为该岩体自身的一个特征。Sun S S., et al. (1989) 计算出原始地幔的 Sc 含量为 16.2 × 10⁻⁶, 黎彤 (1985) 计算出岩石圈地幔的钪含量为 10 × 10⁻⁶, 这些数值均小于二台坡岩体的 Sc 含量, 说明二台坡岩体的源区可能具有富 Sc 的性质。所有研究者的资料都一致表明, Sc 在基性和超基性岩石中的含量比在中性、酸性和碱性岩中要高, 它是玄武质岩浆早期结晶作用的典型元素。大量的实际资料也证实, 从岩浆演化早期到晚期, Sc 的绝对含量总体呈下降趋势。二台坡富 Sc 玄武质母岩浆在岩浆结晶早期大量进入镁铁质硅酸盐矿物中, 形成钪的独立矿床。

6 找矿标志

自然界中, 钪只有三种罕见的独立矿物: 钪钇矿、硅铍钪矿、水磷钪矿, 这些矿物一般产于花岗岩伟晶岩或沉积型矿床中, 在基性-超基性岩体中还未报道过。基性-超基性岩体中 Sc 以微量元素形式主要赋存于基性岩、超基性岩中, 尤其是辉石岩 (最高含量达 200 × 10⁻⁶ ~ 300 × 10⁻⁶) (刘英俊, 1986)。郭远生等 (2012) 在研究滇中地区基性-超基性岩含 Sc 性中, 得出以下认识: ①岩体的含 Sc 性与岩体的基性程度及分异程度具有密切的关系, 即 Sc 在辉石岩端元中富集程度较高, 基性程度过高或过低, 其 Sc 的富集程度均较低; 岩浆分异程度越高, 岩相分带越明显, 其钪的富集程度越高; ②赋矿岩体 TFe 与 Sc₂O₃ 的含量呈反相关关系; ③岩体的 (K₂O + Na₂O) 与 Sc₂O₃ 的含量具反相关关系, 而且过碱性环境中 (K₂O + Na₂O > 8%), 不利于 Sc₂O₃ 的富集。这些标志都可作为基性-超基性岩体含 Sc 性的评价指标。另外, 构造背景、源区特征、岩体规模也都对岩体的含 Sc 性有较大的影响。总之, 对众多基性-超基性岩体含矿性的评价需要从构造环境、岩浆源区性质、原生岩浆、岩体类型、岩浆分异程度、同化混染、矿物学、造岩矿物晶体化学、主量元素地球化学等要素出发。由于这类矿床目前研究程度很低, 该评价体系尚需不断深化、完善。

7 结论

(1) 在铝土矿、钛铁矿和磷块岩中, Sc 主要以伴生元素加以回收, Sc 主要赋存于含 Al、Co、Fe、Mo、Ni、P、Ta、Ti、Sn、U、W、Zn、Zr 等矿石矿物中。

(2) 二台坡岩体主要富钪矿物有单斜辉石、角闪石、斜锆石和锆石。岩区可能具有富 Sc 的性质, 其富 Sc 玄武质母岩浆在岩浆结晶早期大量进入镁铁质硅酸盐矿物中, 形成钪的独立矿床。

(3) 这类新型钪独立矿床, 在国内外还属首例, 其发现扩大了钪的独立矿床类型, 具有很高的研究意义, 也拉开了我国寻找富钪基性—超基性岩体的序幕。

致谢: 感谢中国地质科学院地质研究所王彦斌研究员、长安大学夏明哲老师, 两位审稿人仔细审阅文稿并提出宝贵的审稿意见, 在此谨致谢忱!

参考文献 (References):

杨军臣, 王凤玲, 李德胜, 等. 铝土矿中伴生稀有稀土元素赋存状态及走向查定 [J]. 矿冶, 2004, 2 (13): 89-92.

Yang Junchen, Wang Fengling, Li Desheng, et al. Investigation on occurrence and trend of rare and rare-earth elements associated in bauxite [J]. Mining & Metallurgy, 2004, 13 (2): 89-93.

匡敬忠, 肖坤明, 曾军龙. 从铝土矿磷矿及铌钽矿中综合回收稀土的研究进展 [J]. 稀土, 2012, 1 (33): 81-85.

Kuang Jingzhong, Xiao Kunming, Zeng Junlong. Progress in Research on Rare Earth Recovery from Bauxite, Phosphorite and Nb-Ta Minerals [J]. Chinese Rare Earths, 2012, 33 (1): 81-85.

张玉学. 分散元素钪的矿床类型与研究前景 [J]. 地质地球化学, 1997, 4: 93-97.

Zhang Yuxue. Types of Sc deposits and research prospects [J]. Geology-Geochemistry, 1997, 4: 93-97.

龙志奇, 王良士, 黄小卫, 等. 磷矿中微量稀土提取技术研究进展 [J]. 稀有金属, 2009, 3 (33): 434-441.

Long Zhiqi, Wang Liangshi, Huang Xiaowei et al. Progress in Extraction Technique for Trace Rare Earths from Phosphorite [J]. Chinese journal of rare metals

宋万颢, 王桂芳, 宋学全. 磷矿石中稀土元素赋存状态的研究 [J]. 地质实验室, 1997, 2 (13): 123-125.

Song Wanhao, Wang Guifang, Song Xuequan. Research on the state of rare earth elements in phosphates [J]. Geological laboratory, 1997, 2 (13): 123-125.

王华, 洪业汤, 朱咏煊, 等. 黄磷生产中的稀土元素分布 [J]. 稀土, 2002, 4 (23): 25-28.

Wang Hua, Hong Yetang, Zhu Yongxuan, et al., Rare Earth Distribution during Production of Yellow Phosphorus [J]. Chinese Rare Earths, 2002, 4 (23): 25-28.

刘水庚. 试论江西钨选矿中钪元素的走向 [J]. 有色金属 (选矿部分), 1989, 6: 5-10.

Liu Shuigeng. Research on the trend during the scandium dressing in tungsten ore, Jiangxi [J]. Non-ferrous metals (concentration), 1989, 6: 5-10.

吕亮俊, 程系翱, 周国华. 攀枝花铁矿石中钪的赋存状态研究 [J]. 矿冶工程, 1992, 4 (12): 35-38.

Lü Xianjun, Cheng Xiao, Zhou Guohua. Occurrence state of scandium in Panzhihua iron ore [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 1992, 12 (4): 35-39 (in Chinese with English abstract).

王彦斌, 王登红, 韩娟, 等. 湖南益将稀土-钪矿的石英闪长岩锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素特征: 湘南加里东期岩浆活动的年代学证据 [J]. 中国地质, 2010, 37 (4): 1062-1070.

Wang Yanbin, Wang Denghong, Han Juan, et al. U-Pb dating and Hf isotopic characteristics of zircons from quartz-diorite in the Yijiang REE-Sc deposit, Rucheng County, Hunan: constraints on the timing of Caledonian magmatic activity in South China [J]. Geology in China, 2010, 37 (4): 1062-1070 (in Chinese with English abstract).

刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1986.

Liu Yingjun, Cao Liming, Li Zhaolin, et al. Element geochemistry [M]. Science Press, 1986.

朱敏杰, 沈春英, 丘泰. 稀有元素钪的研究现状 [J]. 材料导报, 2006, 20 (S1): 379-381.

Hu MinJie, Shen Chunying, Qiu Tai. Research State of Lanthanum; Scandium [J]. Material Guide, 2006, 20 (S1): 379-381 (in Chinese with English abstract).

徐刚. 我国钪资源开发利用的战略思考. 中国选矿技术网, 2007, 8-14. http://www.mining120.com/html/0708/20070814_10150.asp. 2007-8-14.

XU Gang. Strategy on development and utilization of scan-

- dium resources of China. Mining120. com, http://www. mining120. com/html/0708/20070814_10150. asp. 2007-8-14.
- A. Д. Капенов, Р. М. Риберацал 著. 陈云祥译. СКАНДИЙ (钪) [M]. 北京工业出版社. 1962.
- A. Д. Капенов, Р. М. Риберацал (write). Chen Yunxiang (translte). СКАНДИЙ [M]. China Industry Press . 1962; 5-22.
- 谭俊峰. 云南复杂硅酸盐含钪矿物选矿-浸出试验研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.
- Tan Junfeng. Research on the Experiments of Scandium dressing and leaching from complex silicate ore with scandium [D]. Kunming; Kunming University of Science and Technology, 2012.
- 马升峰. 白云鄂博稀选尾矿中钪的提取工艺研究 [D]. 内蒙古: 内蒙古大学, 2012.
- Bai Shengfeng . Study on extraction technology of scandium form the Bayanobo tailings [D]. Inner Mongolia University, 2012.
- 张涛石. 论含钪矿床 [J]. 中国地质科学院院报, 1980, 1 (1): 89-96.
- Zhang Taoshi. On the deposit containing scandium [J]. Chinese Academy of Geological Sciences. 1980, 1 (1): 89-96.
- 姬琦, 张世涛, 邹国富, 等. 元谋地区超基性岩浆型铂钼矿成矿作用探讨 [J]. 地质找矿论丛, 2011, 4 (26): 393-398.
- Qi Ji, Zhang Shitao, Zou Guofu, et al. Discussion on ultrabasic magmatic Pt -Pd mineralization in Yuanmou area [J]. Contributions to geology and mineral resources research, 2011, 4 (26): 393-398.
- 云南有色楚雄勘察院. 云南牟定县二台坡基性超基性岩详查报告 [R]. 2009, 12.
- 吴利仁. 论中国基性岩、超基性岩的成矿专属性 [J]. 地质科学. 1963, 1: 29-41.
- Wu Liren. Metallogenic specialization of basic and ultrabasic rocks, China [J]. Geoscience, 1963, 1: 29-41.
- 朱智华. 云南牟定县二台坡岩体中钪的发现及其意义 [J]. 云南地质. 2010, 3 (29): 235-244.
- Zhu Zhihua. The discovery and significance of Sc in Er-taipo intrusion of Mouding, Yunnan [J]. Yunnan Geology, 2010, 29 (3): 235-244 (in Chinese with English abstract).
- 郭远生, 曾普胜, 郭欣, 等. 钪的有关问题暨滇中地区基性-超基性岩含钪性研究 [J]. 地球学报. 2012, 5 (33): 745-754.
- Guo Yuansheng, Zeng Pusheng, Guo Xin, et al. , Some Problems concerning Scandium and Scandium-bearing Potential of the Mafic-ultramafic Intrusions in Central Yunnan Province [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2012, 5 (33): 745-754.
- 夏林圻, 徐学义, 李向民, 等. 亚洲 3 个大火成岩省 (峨眉山西伯利亚、德干) 对比研究 [J]. 西北地质, 2012, 45 (2): 1-26.
- Xia Linqi, Xu Xueyi, Li Xiangmin, et al. , Comparison of three large igneous province (Emeishan, Siberia, Deccan) in Asia [J]. Northwestern geology, 2012, 45 (2): 1-26.
- 沈发奎. 攀西裂谷岩浆系列 [J]. 矿物岩石, 1986, 6 (3): 39-50.
- Shen Fakui. Magmatic series of Pan-Xi Rift [J]. Minerals and Rocks, 1986, 6 (3): 39-50 (in Chinese with English abstract).
- 姚家栋. 四川攀西地区阿拉斯加型岩体的发现及其地质意义 [J]. 中国地质, 1987, (5): 25-26.
- Yao Jiadong. Discovery of Alaska-type intrusions in Pan-Xi area, Sichuan and their geological significances [J]. Geology in China, 1987, (5): 25-26 (in Chinese).
- 刘红英, 夏斌, 张玉泉. 攀西裂谷带内超基性碱性岩和层状辉长岩⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄: 以鸡街大向坪和太和岩体为例 [J]. 地质论评, 2004, 50 (2): 175-179.
- Liu Hongying, Xia Bin, Zhang Yuquan. ⁴⁰Ar/³⁹Ar Ages of the ultrabasic alkalic rock and layered gabbro in Panzhihua-Xichang rift zone: examples from the Jijie, Daxianping and Taihe pluton [J]. Geological Review, 2004, 50 (2): 175-179 (in Chinese with English abstract).
- 张招崇. 关于峨眉山大火成岩省一些重要问题的讨论 [J]. 中国地质, 2009, 36 (3): 634-646.
- Zhang Zhaochong. A discussion on some important problems concerning the Emeishan large igneous province [J]. Geology in China, 2009, 36 (3): 634-646 (in Chinese with English abstract).
- 马言胜, 陶琰, 钟宏, 等. 四川阿布郎当超镁铁质侵入体成岩机制的地球化学约束 [J]. 岩石学报, 2009, (5): 1146-1158.
- Ma Yansheng, Tao Yan, Zhong Hong, et al. Geochemical constraints on the petrogenesis of the Abulangdang ultramafic intrusion, Sichuan Province, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25 (5): 1146-1158 (in Chinese with English abstract).
- 姜常义, 凌锦兰, 赵彦锋, 等. 镁铁质-超镁铁质岩体含矿性评价指标体系——应用于寻找岩浆硫化物矿床 [J].

- 西北地质, 2012, 45 (4): 51-60.
- Jiang Changyi, Ling Jinlan, Zhao Yanfeng, et al., Ore-bearing Potential Evaluation Index System of Mafic and Ultramafic Intrusions-Used to Search for Magmatic Sulfide Deposits [J]. *Northwestern geology*, 2012, 45 (4): 51-60.
- 王生伟, 孙晓明, 史贵勇, 等. 云南金宝山和白马寨铜镍硫化物矿床铂族元素 (PGE) 地球化学的差异及其成因意义 [J]. *地质学报*, 2007, 81 (1): 93-108.
- Wang Shengwei, Sun Xiaoming, Shi Guiyong, et al. Distinction of Platinum Group Elements (PGE) Geochemistry between the Jinbaoshan and Baimazhai Magmatic Sulfide Deposits in Yunnan Province, China, and Its Implication for Ore Genesis [J]. *Acta geologica sinica*, 2007, 81 (1): 93-108.
- 陶琰, 高振敏, 罗泰义, 等. 云南金宝山超镁铁岩原始岩浆成分反演 [J]. *岩石学报*, 2002, 18 (1): 70-82
- Tao Yan, Gao Zhenmin, Luo Taiyi, et al. Inversion of Primary magma composition for Jinbaoshan ultramafic intrusion, Yunnan [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2002, 18 (1): 70-82 (in Chinese with English abstract).
- 陶琰, 高振敏, 罗泰义, 等. 金宝山岩体铂族元素特征及成因意义 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2004, 23 (1): 28-31.
- Tao Yan, Gao Zhenmin, Luo Taiyi, et al., PGE in Jinbaoshan Intrusion: Possible Evidence of Mantle Plume Origin [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2004, 23 (1): 28-31 (in Chinese with English abstract).
- 陶琰, 罗泰义, 高振敏, 等. 西南暗色岩铜镍硫化物矿化岩体与峨眉山玄武岩的关系以云南金宝山岩体为例 [J]. *地质论评*, 2006, 50 (1): 9-15.
- Tao Yan, Luo Taiyi, Gao Zhenmin, et al. The relation between Emeishan continental flood basalts and Cu-Ni-PGE deposits of southwestern China trap: a case study on Jinbaoshan mafic-ultramafic intrusion, Yunnan [J]. *Geological Review*, 2006, 50 (1): 9-15 (in Chinese with English abstract).
- 陶琰, 胡瑞忠, 漆亮, 等. 四川力马河镁铁-超镁铁质岩体的地球化学特征及成岩成矿分析 [J]. *岩石学报*, 2007a, 23 (11): 2785-2800.
- Tao Yan, Hu Ruizhong, Qi Liang, et al. Geochemical characteristics and metallogenesis of the Limahe mafic-ultramafic intrusion, Sichuan [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007a, 23 (11): 2785-2800 (in Chinese with English abstract).
- 陶琰, 朱丹, 高振敏, 等. 云南金宝山铂钯矿 Pd 赋存状态的补充研究 [J]. *矿物学报*, 2007b, 27 (3-4): 262-264.
- Tao Yan, Zhu Dan, Gao Zhenmin, et al. An additional study on the Pd-occurrence states in the Jinbaoshan Pt-Pd deposit [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, . 2007b, 27 (3-4): 262-264 (in Chinese with English abstract).
- 陶琰, 马言胜, 苗来成, 等. 云南金宝山超镁铁岩体锆石 SHRIMP 年龄 [J]. *科学通报*, 2008, 53 (22): 2828-2832.
- Tao Yan, Ma Yansheng, Miao Laicheng, et al. SHRIMP dating of zircon from Jinbaoshan ultramafic intrusion in Yunnan, SW China [J]. *Bulletin of Science in China*, 2008, 53 (22): 2828-2832 (in Chinese).
- 陶琰, 朱飞霖, 于宋月, 等. 四川会理小关河地区岩浆硫化物矿床成矿系统 [J]. *矿物学报*, 2011, (S1): 174.
- Tao Yan, Zhu Feixia, Yu Songyue, et al. Metallogenic system of the magmatic sulfide ore deposits in Xiaoguanhe district, Huili, Sichuan Province [J]. *Mineralogica Acta*, 2011, (S1): 174 (in Chinese).
- 马言胜, 陶琰, 钟宏, 等. 四川阿布郎当超镁铁质侵入体成岩机制的地球化学约束 [J]. *岩石学报*, 2009, (5): 1146-1158.
- Ma Yansheng, Tao Yan, Zhong Hong, et al. Geochemical constraints on the petrogenesis of the Abulangdang ultramafic intrusion, Sichuan Province, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25 (5): 1146-1158 (in Chinese with English abstract).
- 战新志. 金宝山铂矿床硫化物共生组合的演化及铜、钴、镍、铂族元素成矿阶段 [J]. *地球化学*, 1992, (1): 95-100.
- Zhan Xinzhi. Evolution of paragenetic sulfide assemblages and Cu-Co-Pt mineralization stages of Jinbaoshan platinum deposit [J]. *Geochemistry*, 1992, (1): 95-100.
- 张旗, 李达周, 张魁武. 对云南阿拉斯加型基性-超基性岩及其地质-找矿意义的初步认识 [J]. *云南地质*, 1984, 3 (3): 245-255.
- Zhang Qi, Li Dazhou, Zhang Kuiwu. Preliminary study on Alaska-type basic-ultrabasic rocks in Yunnan and their geological-prospecting significance [J]. *Yunnan Geology*, 1984, 3 (3): 245-255 (in Chinese).
- 姚家栋. 四川攀西地区阿拉斯加型岩体的发现及其地质意义 [J]. *中国地质*, 1987, (5): 25-26.
- Yao Jiadong. Discovery of Alaska-type intrusions in Pan-Xi area, Sichuan and their geological significances [J]. *Geology in China*, 1987, (5): 25-26 (in Chinese).

- Wang C Y, Zhou M F. Genesis of the Permian Baimazhaimagmatic Ni-Cu- (PGE) sulfide deposit, Yunnan, SW China [J]. *Mineralium Deposita*, 2006a, 41 (8): 771-783.
- Wang C Y, Zhou M F, Keays R R. Geochemical constraints on the origin of the Permian Baimazhai mafic-ultramafic intrusion, SW China [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2006b, 152 (3): 309-321.
- 朱丹, 徐义刚, 罗泰义, 等. 峨眉山玄武岩的输送通道: 云南元谋朱布岩体 [J]. *矿物学报*, 2007, 3/4 (27): 273-280.
- Zhu dan, Xu Yigang, Luo Taiyi, et al. Conduit of the Emeishan basalts: the Zhubu mafic-ultramafic intrusion in the Yuanmou area of Yunnan province, china [J]. *Acta mineralogical sinica*, 2007, 3/4 (27): 273-280.
- 黎彤. 岩石圈及其结构层的元素丰度 [J]. *地质学报*, 1985, 3: 219-227.
- Li Tong. The abundance of chemical elements in the lithosphere and its structural layers [J]. *Acta geologica sinica*. 1985, 3: 219-227.
- Борисенко Л. Ф. Генетические типы месторождений скандия [J]. *Лцшолоея ц попеые цскопаемые*, 1988, (4): 82-90
- Cotton F A, Wilkinson G, Bochmann M, et al. *Advanced Inorganic Chemistry* [M]. 5th ed. New York: Wiley Inter Science. 1988.
- Hedrick, J. B. Scandium. *Mineral Commodity Summaries* [J]. U. S. Geological Survey, 2010b: 140-142.
- Wang Weiwei, Pranolo Yoko, Cheng Chu Yong. Metallurgical processes for scandium recovery from various resources; A review [J]. *Hydrometallurgy*. 2011, 108: 100-108.
- V. M. Goldschmidt. *Geochemistry* [M]. Oxford at the Clarendon Press. 1959.
- Щербина В. В.. Факторы, определяющие геохимическое распределение скандия Геохимия [J]. 1959, 8.
- Guo, G., Chen, Y., Li, Y. Solvent extraction of scandium from wolframite residue [J]. *JOM*, 1988, 40 (7), 28-31.
- Hedrick, J. B., *Rare Earth. Minerals Yearbook* [M]. 2010b. U. S. Geological Survey.
- Irvine, J. T. S., Politova, T., Zakowsky, N., et al. Scandia-Zirconia Electrolytes and Electrodes for SOFCs [J]. In: *Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Fuel Cell Technologies: State and Perspectives* [J]. Kyiv, Ukraine, 2004, 35-47.
- E. S. Larsen and Montgomery A., Sterrettite, a new mineral from Fairfield [J]. *Utah. American mineralogist*, 1940, 25 (8): 513-518.
- Xu, S., Li, S. Review of the extractive metallurgy of scandium in China (1978-1991) [J]. *Hydrometallurgy*, 1996, 42, 337-343.
- Munnoch, S., Worstall, T. Scandium. *Report of Minor metals Trade Association* [M], 2003.
- Descamps, Y., 2003. Scandium, In *Report of BRGM* (in French). <http://www.mineralinfo.org/Substance/Scandium/Sc.pdf>.
- Zhou M F, Robinson P T, Lesher C M, et al. Geochemistry, Petrogenesis and Met-allogeneses of the Panzhihua Gabbroic Layered Intrusion and Associated Fe-Ti-V-Oxide Deposits, Sichuan Province, SW China [J]. *Journal of Petrology*, 2005, 46 (11): 2253-2280.
- Zhou M F, Malpas J, Song X Y, et al. A temporal link between the Emeishan large igneous province (SW China) and the end-Guadalupian mass extinction [J]. *Earth and Planetary Science Letters*. 2002, 196 (3-4): 113-122.
- Sun S S., McDougal W F. Chemical and isotope systematic of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds). *Magmatism in the Ocean Basins* [J]. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 1989, 42: 313-315.