

# 青藏高原南部谢通门侏罗纪埃达克质岩地球化学特征及其形成机制

呼建雄<sup>1</sup>, 陈建林<sup>2</sup>, 张占武<sup>1</sup>, 姚胜<sup>1</sup>, 王贝<sup>1</sup>, 杨文<sup>1</sup>, 许继峰<sup>2</sup>, 邬建斌<sup>2,3</sup>,  
黄丰<sup>2,3</sup>, 曾云川<sup>2,3</sup>

(1. 陕西省地矿局 区域地质矿产研究院, 陕西 咸阳 712000; 2. 中国科学院 广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 青藏高原南部谢通门地区出露一些中侏罗世的闪长岩, 岩石具有类似于埃达克质岩的地球化学特征, 如高的  $\text{SiO}_2$  ( $>59\%$ )、 $\text{Sr}$  ( $771 \sim 798 \mu\text{g/g}$ )、低 HREE 和  $\text{Y}$  ( $<12 \mu\text{g/g}$ ) 含量, 高  $\text{Sr/Y}$  ( $>64$ )、 $\text{La/Yb}$  ( $4.4 < (\text{La/Yb})_N < 19.2$ ) 值, 较高的  $\text{MgO}$  ( $3.02\% \sim 3.17\%$ ), 具有一定  $\text{Sr}$  正异常和无明显  $\text{Eu}$  负异常。拉萨地块南部在中侏罗世时期不仅发育有基性和酸性的岩浆作用, 而且还发育有斑岩型矿床——雄村斑岩  $\text{Cu-Au}$  矿床。另外, 谢通门闪长岩具有与太平洋西北部 Bowes Ridge 地区中基性埃达克质岩十分相似的地球化学特征, 而后者形成于中新世俯冲大洋板片断离的构造环境之中。因此研究区中侏罗世谢通门闪长岩很可能为北向俯冲的新特提斯洋板片断离并发生部分熔融的产物。

**关键词:** 地球化学; 埃达克质岩; 中侏罗世; 谢通门; 青藏高原

**中图分类号:** P595 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-4552(2013)02-0320-013

## 0 前言

青藏高原作为大洋俯冲和陆-陆碰撞的典型实例, 备受国内外地质学者的关注。过去几十年, 大量的研究工作主要集中在新生代以来的印度与欧亚大陆板块碰撞以及青藏高原抬升的重大问题方面。随着对青藏高原研究的不断深入, 人们逐渐意识到新生代以前的演化历史对理解青藏高原在新生代的隆升有着十分重要的意义。一定时期的岩浆作用为同时期的地壳深部构造演化响应, 因此青藏高原上广泛发育的中生代岩浆岩为人们探讨其大陆碰撞之前的深部构造演化和动力学机制提供了一个重要的途

径。虽然近年来, 拉萨地块南部中生代岩浆活动事件引起了人们的极大关注 (Coulon et al., 1986; Pearce and Mei, 1988; 李才等, 2003; 翟庆国等, 2005; 和钟铨等, 2006; 董彦辉等, 2006; 张宏飞等, 2007; Wen et al., 2008a, b; 康志强等, 2009; Ji et al., 2009; Zhu et al., 2009, 2011, 2012; Zhang et al., 2012), 而且这些岩浆事件与北向俯冲的新特提斯洋有着十分紧密的关系, 但目前对新特提斯洋的演化尚不清楚并存在一些不同的认识。如新特提斯洋是何时形成并开始俯冲等问题 (董彦辉等, 2006; 张宏飞等, 2007; Zhu et al., 2009, 2012; Zhang et al., 2012), 它们是以何种形式俯冲

收稿日期: 2012-07-30; 改回日期: 2012-11-02

项目资助: 国家 973 项目 (编号: 2011CB403100, 2009CB421004)、中国科学院战略性发展科技专项 (B 类) (XDB03010301)、中国地质调查局项目 (编号: 1212011121225, 1212010818098)、国际合作项目 (编号: IGCP/SIDA-600) 和国家自然科学基金项目 (批准号: 40872055、40930316) 联合资助。

第一作者简介: 呼建雄 (1984-), 男, 本科, 工程师, 研究方向为区域地质矿产调查。

通信作者: 陈建林, Email: lzdxcchen@gig.ac.cn

(Zhu et al., 2009; Zhang et al., 2012) 等等。本文试图通过对出露于拉萨地块南部日喀则地区的中侏罗世闪长岩进行详细的地球化学研究, 探讨其岩石成因以及构造背景, 同时结合前人对拉萨地块南部中侏罗世岩浆作用的研究成果以及世界上具有类似地球化学特征的火山岩, 以期对拉萨地块南部中侏罗世的构造演化加以约束。

## 1 区域地质概况

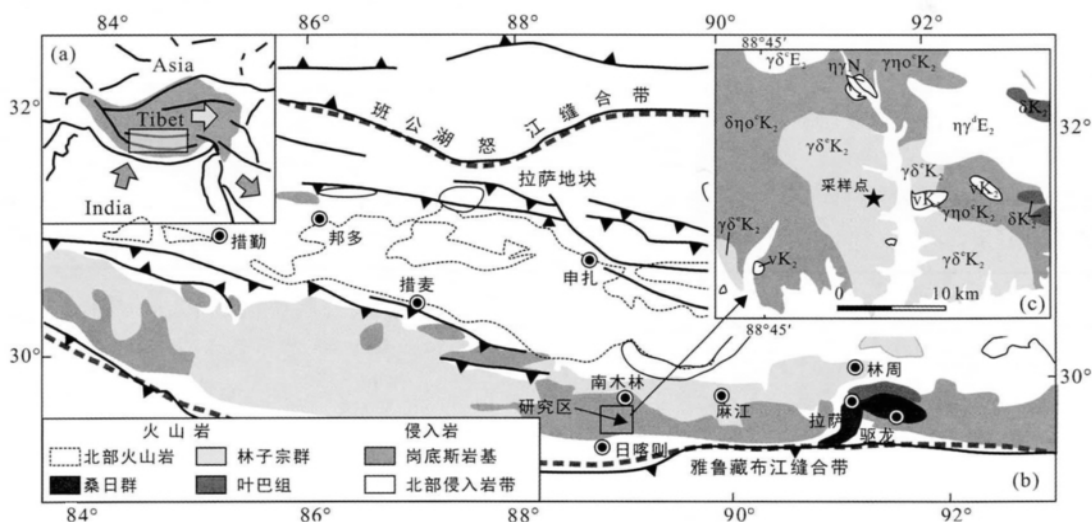
青藏高原是地球上抬升最高的构造单元, 由一系列东西向延伸的地块组成, 由北向南分别为松潘-甘孜地块、羌塘地块、拉萨地块(图 1a)。拉萨地块的南北分别以雅鲁藏布江缝合带和班公-怒江缝合带为界(常承法和郑锡澜, 1973; Allègre et al., 1984; Pearce and Deng, 1988; Dewey et al., 1988)(图 1b), 它们分别形成于中晚侏罗世和晚白垩世-古近纪(Dewey et al., 1988; 潘桂棠等, 2006)。

拉萨地块的沉积地层由奥陶系-石炭系-三叠系浅海碎屑沉积序列组成(Yin et al., 1988)。其基底时代是中元古代至早寒武世, 以沿拉萨地块北部格尔木-拉萨公路分布的安多片麻岩为代表(Xu et al., 1985; Harris et al., 1988; Dewey et al., 1988)。沿着拉萨地块南缘, 其古生界和中生界地层被少量的侏罗纪和大量白垩纪-古近纪冈底斯岩基侵入,

这些冈底斯岩基与新特提斯洋和印度板块北向俯冲有着紧密的联系(常承法和郑锡澜, 1973; Allègre et al., 1984)。

进入新生代之后, 在拉萨地块的林子宗火山岩和与之有联系的最年轻的冈底斯深成岩在青藏高原南缘形成了一个东西向分布的线状带。林子宗火山岩为形成于 60~45 Ma 的具有安第斯大陆边缘特征的钙碱性安山岩和熔结凝灰岩(Coulon et al., 1986; Pearce and Deng, 1988; Mo et al., 2007, 2008)。在继印度-亚洲大陆碰撞弧岩浆作用结束约 20 Ma 岩浆作用平静期之后, 冈底斯进入新近纪以来(25~10 Ma)出现了又一次岩浆作用高峰期。而在 10 Ma 之后, 在拉萨地块则无明显的岩浆活动。

研究区位于日喀则以西东嘎乡地区, 采样点周围主要为中生代-新生代侵入岩, 为冈底斯岩基的组成部分(图 1c)。侏罗纪地层主要为位于研究区西南部的叶巴组( $J_{1-2}$ ); 白垩纪地层主要为比马组和昂仁组, 该时期的侵入岩分布于研究区的大部分地区, 分布面积约占侵入岩的一半。古近系分布在研究区的东部, 主要为秋乌组和大竹卡组; 其侵入岩主要分布在研究区的东部和西部。前人认为研究区内发育大规模白垩纪的侵入岩, 最新的锆石年龄研究显示它们均形成于中晚侏罗世(170~150 Ma, 呼建雄等, 1:5 万谢通门等四幅区调报告)。



$\delta\eta^0K_2$  代表晚白垩世中粒角闪黑云石英二长闪长岩;  $\gamma\delta^0K_2$  代表晚白垩世中细粒黑云角闪花岗岩闪长岩;  $VK_2$  代表晚白垩世中粗粒辉长岩;  $\delta K_2$  代表晚白垩世中基性岩;  $\eta\gamma^d E_2$  代表始新世黑云二长花岗岩;  $\eta\gamma N_1$  代表中新世黑云二长花岗岩。

图 1 拉萨地块火山岩和侵入岩分布简图(图 1a, b 据 Lee et al., 2012)和研究区地质简图(图 1c)

Fig. 1 Simplified geologic map showing the distribution of the igneous rocks in the Lhasa Block (Fig. 1a, b based on Lee et al., 2012)

本文所研究的样品采集于谢通门县东嘎乡北部。采集的样品新鲜,呈浅灰白色,矿物颗粒较粗,主要组成矿物为石英、斜长石、黑云母和角闪石。石英和斜长石均呈浅白色,二者矿物颗粒粒径为 1~5 mm,其中石英略带浅灰红色;角闪石和黑云母含量均大于 5%;副矿物主要为锆石、磷灰石和铁钛氧化物。

## 2 分析方法

本文对所采集的样品进行的主、微量元素分别采用 XRF 和 ICP-MS 分析测试。分析测试在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成。进行分析测试的样品在处理前选取新鲜样品,去除风化面,手工碎至 1~5 mm(与杏仁体粒径相当),用 mill-Q 水在超声波清洗仪中清洗,以除去表面灰尘的影响,烘干后用不锈钢钵粉碎至 200 目用于化学分析。主量元素采用碱熔玻璃片

XRF 法分析,微量元素采用高温高压消解并利用 PE Elan 6000 型 ICP-MS 分析。主量和微量元素元素的分析精度均好于 5%。具体流程详见刘颖等(1996)和李献华等(2002)。

## 3 分析结果

### 3.1 主量元素

研究区样品的主量和微量元素分析结果见表 1。在  $\text{SiO}_2-(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$  (TAS) 图(图 2a)中,本研究所采集的样品主要为闪长岩;在  $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ (图 2b)和  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ (图 2c),研究区的样品属于钙碱性系列;在铝饱和指数图(图 2d)中,谢通门闪长岩  $A/\text{CNK} < 1.0$  为铝质系列。在  $\text{SiO}_2$  与主量元素的相关图中(图 3),研究区主量元素含量与同期拉萨地块南部叶巴组以及太平洋西北部 Bowers Ridge 中基性火山岩有着相似分布范围。

表 1 研究区谢通门闪长岩主量(%)和微量( $\mu\text{g/g}$ )元素分析结果

Table 1 Major (%) and trace ( $\mu\text{g/g}$ ) element concentrations of the diorite in Xietongmen

样品编号	11XTM-45	11XTM-46	11XTM-47	11XTM-48	11XTM-49	11XTM-20
岩石类型	闪长岩	闪长岩	闪长岩	闪长岩	闪长岩	闪长岩
$\text{SiO}_2$	60.20	60.81	59.74	60.42	59.47	60.29
$\text{TiO}_2$	0.69	0.66	0.67	0.68	0.69	0.67
$\text{Al}_2\text{O}_3$	17.44	17.15	17.12	17.45	17.57	17.38
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	6.82	6.76	7.36	6.71	7.25	6.69
MnO	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
MgO	3.08	3.04	3.09	3.02	3.17	3.05
CaO	6.41	6.21	6.50	6.35	6.55	6.41
$\text{Na}_2\text{O}$	3.85	3.76	4.11	3.86	3.86	3.99
$\text{K}_2\text{O}$	1.20	1.31	1.09	1.21	1.12	1.21
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.21	0.19	0.21	0.20	0.21	0.20
$\text{Mg}^\#$	47	47	46	47	47	48
Sc	14.8	14.1	15.9	14.1	15.7	14.7
V	150	145	150	147	155	150
Cr	55.9	35.1	46.8	33.9	45.5	42.0
Co	18.6	18.2	18.0	18.1	18.3	18.0
Ni	46.3	26.1	27.7	24.8	28.0	26.6
Cu	58.2	40.3	91.6	84.9	81.6	67.0
Zn	72.4	74.5	73.3	75.4	78.9	75.6
Ga	19.8	20.0	19.5	20.3	20.1	20.2
Ge	1.39	1.40	1.57	1.35	1.49	1.36
Cs	0.76	0.90	0.74	0.89	0.63	0.71
Rb	23.9	26.5	21.1	24.1	22.2	23.9
Ba	338	387	313	356	324	358
Th	1.33	1.51	7.49	3.38	2.18	0.26
U	0.42	0.46	0.73	0.44	0.38	0.42
Nb	3.03	3.07	3.32	2.98	3.01	2.99
Ta	0.22	0.15	0.32	0.17	0.20	0.16
La	9.44	11.8	31.5	18.8	14.2	6.28
Ce	21.0	24.6	56.2	36.2	29.4	16.2
Pb	5.88	5.28	6.61	5.95	5.36	5.78
Pr	3.03	3.30	6.36	4.54	3.90	2.60

(续表 1)

样品编号	11XTM-15	11XTM-16	11XTM-17	11XTM-18	11XTM-19	11XTM-20
岩石类型	闪长岩	闪长岩	闪长岩	闪长岩	闪长岩	闪长岩
Sr	798	777	771	784	789	791
Nd	13.8	14.1	23.2	17.9	16.5	12.6
Zr	110	101	105	105	102	88.20
Hf	1.59	1.34	2.24	1.86	2.05	1.43
Sm	2.84	2.84	3.76	3.18	3.20	2.84
Eu	0.93	0.92	1.09	1.00	0.98	0.96
Gd	2.48	2.46	3.35	2.87	2.83	2.50
Tb	0.38	0.38	0.49	0.41	0.42	0.39
Dy	2.02	2.04	2.38	2.18	2.27	2.07
Y	10.4	10.5	12.1	10.9	11.6	10.7
Ho	0.40	0.41	0.47	0.42	0.45	0.43
Er	1.10	1.10	1.30	1.17	1.21	1.11
Tm	0.15	0.15	0.17	0.16	0.19	0.16
Yb	0.98	0.98	1.18	1.04	1.06	1.02
Lu	0.15	0.15	0.18	0.15	0.16	0.16

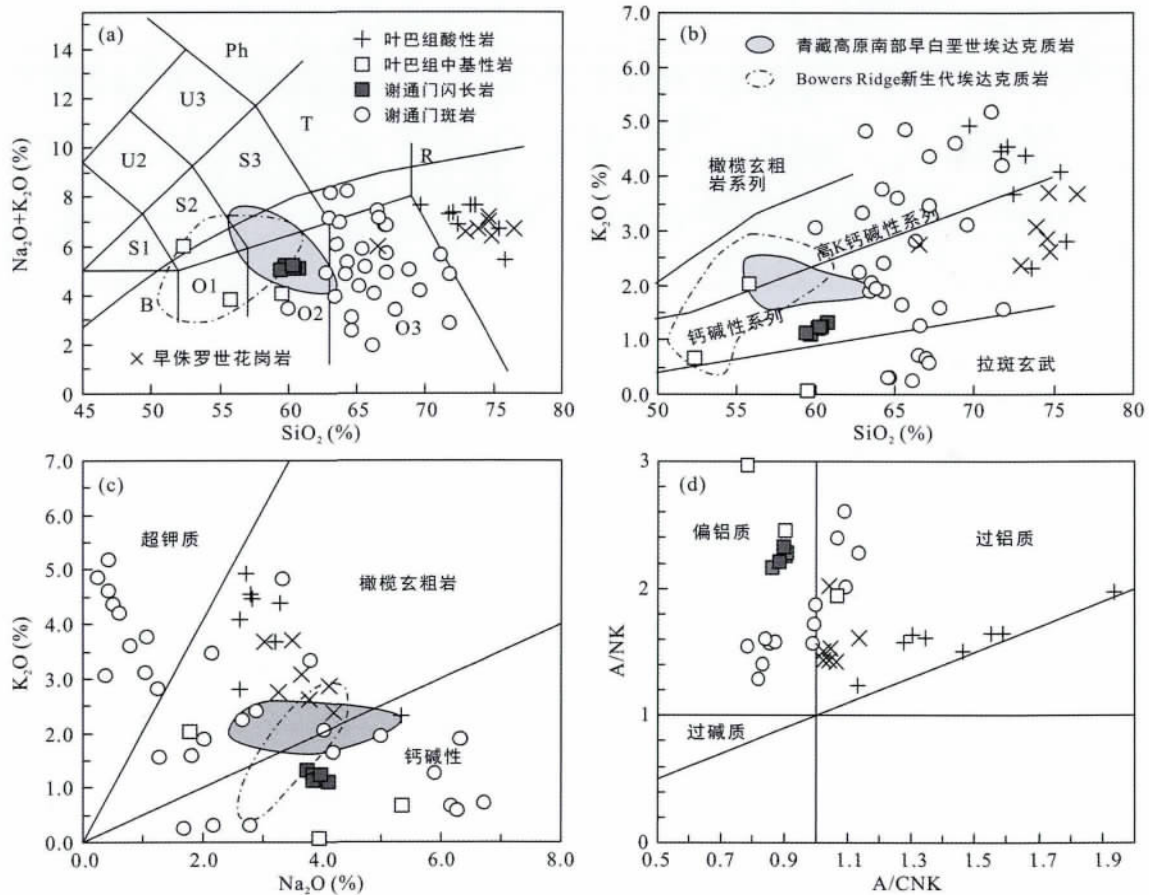


图 2 研究区中侏罗世谢通门闪长岩  $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  (a),  $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$  (b),  $\text{Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$  (c),  $\text{A/CNK-A/NK}$  (d) 图解(数据来源: 谢通门斑岩: 郎兴海等(2010), 黄勇等(2011), 曲晓明等(2007); 叶巴组火山岩: 董彦辉等,(2006); 早侏罗世花岗岩: Chu et al. (2006), 杨志明等(2008); 青藏高原南部早白垩世埃达克质岩: Zhu et al. (2009); Bowers Ridge 新生代埃达克质岩: Wanke et al. (2012))

Fig.2  $\text{SiO}_2$  vs.  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  (a),  $\text{SiO}_2$  vs.  $\text{K}_2\text{O}$  (b),  $\text{Na}_2\text{O}$  vs.  $\text{K}_2\text{O}$  (c),  $\text{A/CNK}$  vs.  $\text{A/NK}$  (d) diagrams for the diorite from Xietongmen (data sources, porphyry rocks from Lang et al. (2010), Huang et al. (2011), Qu et al. (2007); the volcanic rocks of the Yeba group from Dong et al. (2006); the Early Jurassic granite from Chu et al. (2006), Yang et al. (2008); the Early Cretaceous adakite of Southern Tibet from Zhu et al. (2009); Cenozoic adakitic rocks in Bowers Ridge from Wanke et al. (2012))

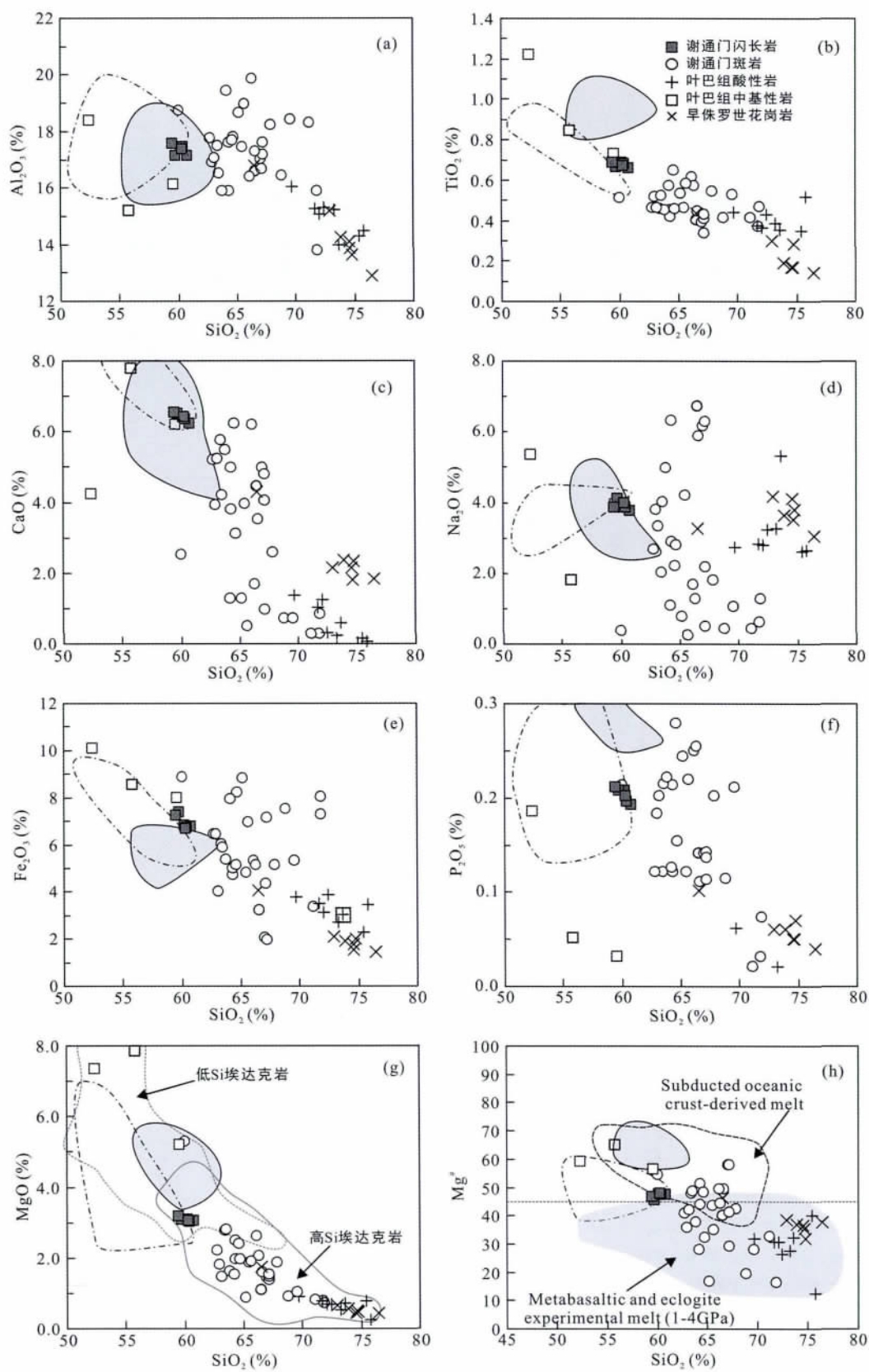


图 3 研究区中侏罗世谢通门闪长岩主量元素相关图 (数据来源同图 2)

Fig.3 Harker diagrams of major element concentrations vs. SiO<sub>2</sub> for the diorite in Xietongmen (data source same as in Fig.2)



### 3.2 微量元素

谢通门闪长岩球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(图4a,b)表现为轻稀土富集型, Eu表现出无明显的异常。轻、重稀土分异比较明显( $4.4 < (La/Yb)_N < 19.2$ , 平均值为 10.3)。谢通门闪长岩同叶巴组中基性火山岩、Bowers Ridge 中基性火山岩相比有着相似的轻稀土元素含量和相对较低的重稀土元素含量, 却有着比青藏高原南部早白垩世埃达克质岩相对较低 LREE 和相对较高的 HREE 含量。在微量元素蛛网图中(图4c,d), 谢通门闪长岩具有富集不相容性元素 Rb、Ba、U 和亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 的特点, 并且具 Sr 正异常; 谢通门闪长岩同同期叶巴组中基性火山岩、Bowers Ridge 中基性火山岩相比, 除了 HREE 具有较低的含量外, 其他微量元素有着相似分布范围和分布形式; 而与青藏高原南部早白垩世埃达克质岩相比, 除 HREE 含量相对较高外, 其余的微量元素虽然有着相似分布特征, 但却有着相对较低的含量。

## 4 岩石成因

### 4.1 埃达克质岩地球化学特征

研究区中侏罗世谢通门闪长岩具有一定的类似于埃达克岩的地球化学特征, 如高的  $SiO_2$  ( $> 59\%$ )、Sr 含量(771~798  $\mu g/g$ )、高 Sr/Y 比值( $> 64$ ) (图5)、低 HREE 和 Y ( $< 12 \mu g/g$ )、LREE 和 HREE 分异明显(图4,5), 具有一定 Sr 正异常和无明显 Eu 负异常(图4); 以及具有相对较高的 MgO (3.02%~3.17%) 和  $Mg^\#$  ( $> 46$ )。同时它们有着类似于源于大洋俯冲环境中的青藏高原南部早白垩世埃达克质岩和太平洋西北部 Bowers Ridge 地区新生代埃达克质岩相似的主量元素分布范围(图2)和类似的微量元素分布特征(图3,4,5)。

### 4.2 埃达克质岩的岩石成因

自从 Defant and Drummond (1990) 提出埃达克岩是俯冲大洋壳在石榴子石的稳定区域内部分熔融的产物之后, 随后的研究显示埃达克(质)岩同样可以通过幔源玄武质岩浆的结晶分异(Castillo et al., 1999; Macpherson et al., 2006; Richards and Kerrich, 2007) 以及部分熔融加厚或拆沉的下地壳

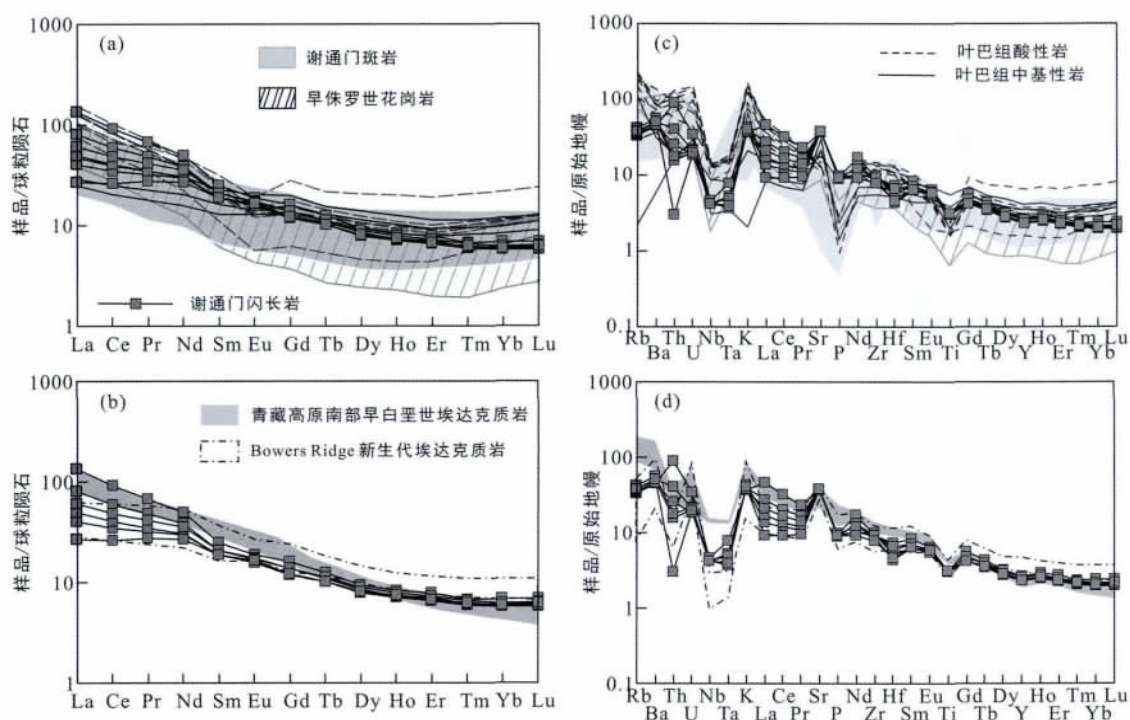


图4 研究区中侏罗世谢通门闪长岩稀土元素和微量元素标准化配分图  
(标准化数据为 Sun and McDonough, (1989) 数据来源同图2)

Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns (a, b) and primitive mantle normalized spider diagrams (c, d) for the diorite in Xietongmen (normalizing values are from Sun and McDonough (1989), data sources same as in Fig.2)

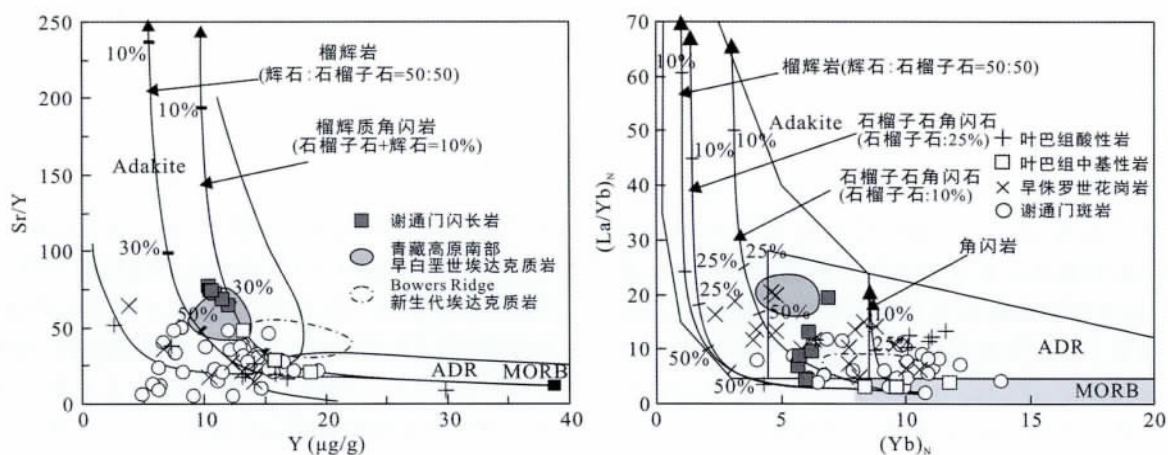


图 5 研究区中侏罗世谢通门闪长岩 Sr/Y-Y 和 (La/Yb)<sub>N</sub>-Yb<sub>N</sub> 图( 据 Castillo ,2012. 数据来源同图 2)

Fig.5 Sr/Y vs. Y and (La/Yb)<sub>N</sub> vs. Yb<sub>N</sub> diagrams for the diorite from Xietongmen ( data sources are as Fig. 2. Based on Castillo ,2012)

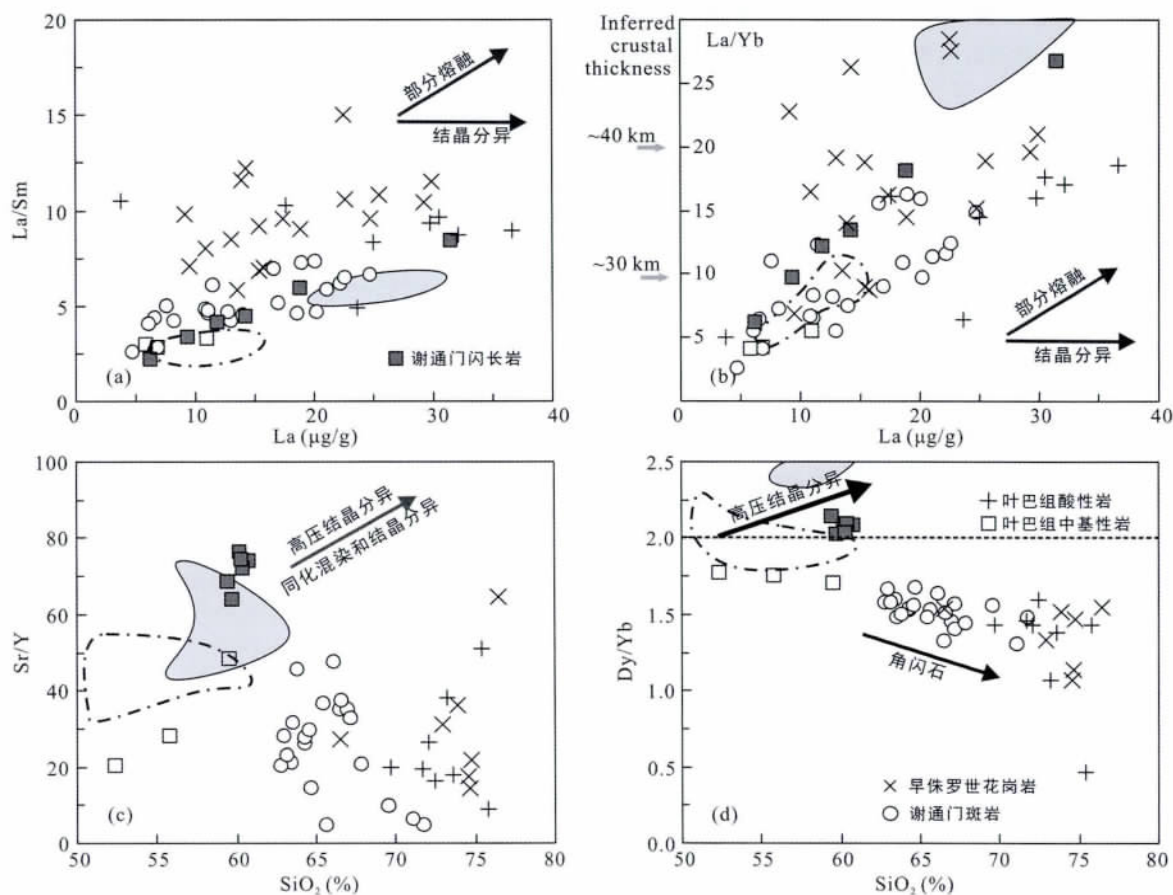


图 6 研究区中侏罗世谢通门闪长岩 La-La/Sm ( a ) , La-La/Yb ( b ) ( 据 Chung et al. , 2009 ) , SiO<sub>2</sub>-Sr/Y ( c ) , SiO<sub>2</sub>-Dy/Yb ( d ) 相关图 ( 数据来源同图 2)

Fig.6 La vs. La/Sm ( a ) , La vs. La/Yb ( b ) ( based on Chung et al. , 2009 ) , SiO<sub>2</sub> vs. Sr/Y ( c ) , SiO<sub>2</sub> vs. Dy/Yb ( d ) diagrams for the diorite from Xietongmen ( data sources are as Fig. 2)

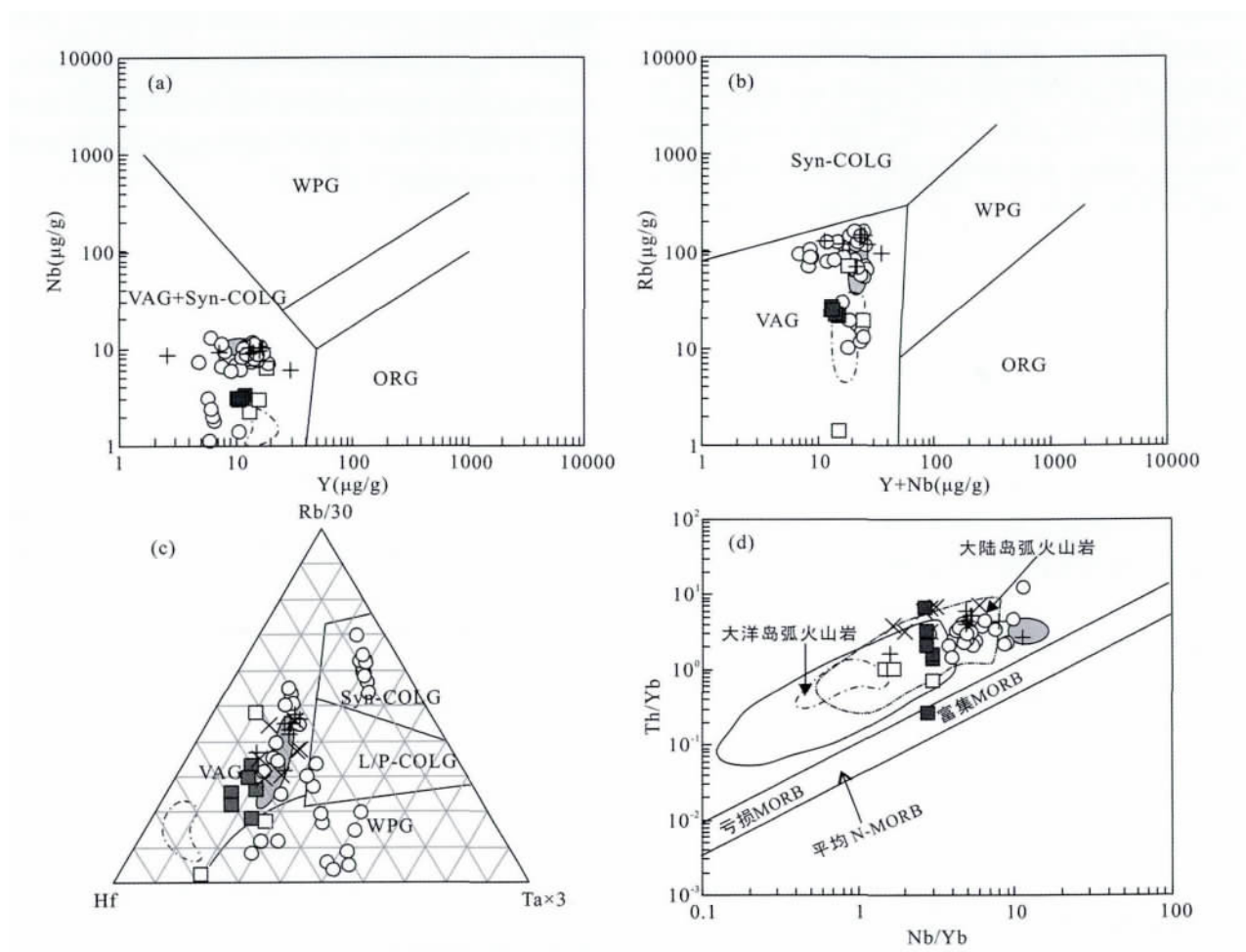
(Atherton and Petford, 1993; Xu et al., 2002; Gao et al., 2004; Chung et al., 2003; Hou et al., 2004) 而形成。

谢通门闪长岩可能不是玄武质岩浆结晶分异的产物, 因为: (1) 在研究区没有发现同时期的超镁铁质岩或者玄武质岩; (2) 缺乏明显的 Sr、Eu 负异常; (3) La-La/Sm 和 La-La/Yb 图(图 6a, b) 可知, 研究区闪长岩类的岩浆主要是通过部分熔融形成; (4) 在 SiO<sub>2</sub>-Sr/Y 和 SiO<sub>2</sub>-Dy/Yb 图(图 6c, d) 中, 没有明显的结晶分异特征。

Kay et al. (1991, 1994), Kay and Mpodozis (2001) 认为 La/Yb 比值可用来指示地壳厚度并反映岩浆来源的深度(Haschke et al., 2002; Chung et al., 2009), La/Yb 比值大于 30 其岩浆产生于较厚的地壳(50~60 km)背景, 岩浆源区较深; 而 La/Yb < 15 的岩浆产于地壳厚度 30~35 km, 岩浆源区较

浅。而且前人的研究结果表明, 在深度为 30~45 km 石榴子石可能成为一种重要的残留相。Chung et al. (2003)、Hou et al. (2004) 等认为青藏高原南部形成于中新世的埃达克质岩其物质源区的深度大于 40 km; 而 Xu et al. (2002) 等认为中国东部在中生代发生拆沉时地壳的厚度大于 40 km。由 La-La/Yb 图可知, 研究区大部分样品形成的深度小于 40 km。虽然研究区闪长岩在 Y-Sr/Y, La-La/Yb 和 SiO<sub>2</sub>-Dy/Yb 图中均显示出其物质源区存在有一定的石榴子石, 但其并非是加厚下地壳或者拆沉下地壳发生部分熔融的产物。

在微量元素蛛网图(图 4c, d) 和构造成因判别图上(图 7) 研究区中侏罗世闪长岩均与火山弧环境有着密切的联系。另外由于 Nb、Ta 地球化学性质相似而在部分熔融和结晶分异过程中不会造成大分异, 可以指示岩浆源区特征及其演化过程, 其中源



Syn-COLG. 同碰撞花岗岩; VAG. 岛弧花岗岩; OGR. 洋脊花岗岩; WPG. 板内花岗岩。

图 7 研究区中侏罗世谢通门闪长岩构造环境判别图(数据来源和图例同图 2)

Fig. 7 Tectonic discrimination diagrams for the diorite from Xietongmen (data sources are as Fig. 2)



于地幔的岩浆的 Nb/Ta 比值为  $17.5 \pm 2$ , 而壳源岩浆的 Nb/Ta 比值为  $11 \sim 12$  (Green, 1995)。谢通门闪长岩有着较高的 MgO (3.02% ~ 3.17%) 和  $Mg^{\#}$  (46 ~ 48) 以及 Cr、Ni 含量, 变化范围较宽的 Nb/Ta 值 (10.4 ~ 20.2), 暗示它们很可能为俯冲洋壳发生部分熔融并与上覆壳 - 幔物质发生反应的结果; 由此看来, 研究区具有埃达克质岩特征的谢通门闪长岩很可能是北向俯冲的新特提斯洋壳发生部分熔融的产物。

## 5 研究区中侏罗世区域构造演化

李文霞等 (2012) 最近通过对沿着雅鲁藏布江缝合带分布的形成于侏罗纪 - 早白垩世的蛇绿岩研究之后认为, 其形成的构造环境至少存在大陆岛弧、地幔柱 - 洋内热点、洋中脊 - 大洋岛弧和典型的岛弧等多种洋壳类型, 表明拉萨地块南部的新的特提斯洋演化过程存在多种复杂的构造环境。早期研究认为蛇绿岩形成时代为侏罗纪 - 白垩纪, 主体时代为晚侏罗世 - 早白垩世 (吴浩若, 1984; Girardeau and Mercier, 1988; 肖序常和李廷栋, 2000)。然而最近的研究表明, 雅鲁藏布江缝合带蛇绿岩形成时代为中晚三叠世 - 早白垩世 (Mahéo et al., 2002; Miller et al., 2003; Malpas et al., 2003; 钟立峰等, 2006; 钟立峰, 2006; 韦振权等, 2006; 韦栋梁等, 2004; 张宏飞等, 2007; 徐德明等, 2007; 李建峰等, 2009; Zhu et al., 2011, 2012)。由此可以认为, 新的特提斯洋壳的俯冲早于早中侏罗世 (裴树文, 1999; 董彦辉等, 2006; 和钟铎等, 2006; 曲晓明等, 2007; 唐菊兴等, 2009, 2010), 因此研究区在中侏罗世为新特提斯洋北向俯冲时期。

俯冲大洋板片的熔融暗示其具有异常高的温度 (Defant and Drummond, 1990), 发生俯冲洋壳部分熔融的机制有: (1) 年轻的热的俯冲洋壳 (如: Peacock et al., 1994); (2) 高角度的俯冲导致其俯冲板片前缘在岛弧底部有足够的时间被加热 (Kelemen et al., 2003); (3) 俯冲板片的撕裂 (Yogodzinski et al., 2001)。如果新的特提斯洋形成于中晚三叠世, 那么谢通门闪长岩可能并非是年轻的热的洋壳发生部分熔融的产物。另一方面, 青藏高原南部不仅发育有中侏罗世的中酸性和中基性岩浆作用 (叶巴组火山岩, 董彦辉等 (2006)), 而且也发育有形成于俯冲环境下的研究区最大斑岩型矿床——雄村 Cu-Au 斑岩矿床 (唐菊兴等, 2009, 2010), 而 Richards

(2009) 认为斑岩型 Cu-Au 矿床的物质源区在地壳深部需要部分软流圈物质的加入或热反弹 (如板片断离等)。而且, 谢通门闪长岩具有太平洋西北部 Bowes Ridge 地区中基性埃达克质岩十分相似的地球化学特征, 而后者形成于中新世俯冲大洋板片断离的构造环境之中。因此谢通门闪长岩很可能为北向俯冲的新特提斯洋板片断离并发生部分熔融所致, 而并非是俯冲前缘因残留时间比较长而被加热熔融的结果。

中侏罗世, 北向俯冲的新特提斯洋很可能发生高角度俯冲进而发生板片断离, 其底部的软流圈物质沿着板片窗的上升而引起两侧俯冲洋壳发生熔融, 它们在上升过程中与上覆的壳 - 幔物质发生反应并侵入到地壳浅部从而形成谢通门闪长岩; 软流圈的上升因其减压而发生部分熔融从而形成高原南部的基性岩浆作用; 软流圈的上升以及中基性岩浆的侵入和喷发, 导致前期形成的中下地壳发生部分熔融, 从而形成研究区部分中酸性岩浆。另外, 因前期新的特提斯洋的俯冲而形成的底侵玄武质岩浆也很可能因软流圈的上升而发生部分熔融, 从而形成研究区大规模的成矿作用。

## 6 结 论

青藏高原南部谢通门地区出露一些形成于中侏罗世的闪长岩, 它们具有类似于埃达克岩的地球化学特征, 如高的  $SiO_2$  (> 59%), Sr (771 ~ 798  $\mu g/g$ ) 含量, 低 HREE 和 Y (< 12  $\mu g/g$ ), LREE 和 HREE 分异明显, 高 Sr/Y 值 (> 64), 具有一定 Sr 正异常和无明显 Eu 负异常。结合青藏高原南部同期发育的中侏罗世从基性到酸性的岩浆作用和形成于中侏罗世的雄村斑岩 Cu-Au 矿床, 以及研究区闪长岩具有与太平洋西北部 Bowes Ridge 地区新生代中基性埃达克质岩相类似的地球化学特征, 我们认为谢通门闪长岩很可能为北向俯冲的新特提斯洋板片断离并发生部分熔融产物。

致谢: 野外工作期间得到西藏地质调查院刘鸿飞院长、徐开峰高工的帮助; 审稿人提出了不少具体的、建设性的修改意见, 在此一并表示衷心感谢!

### 参考文献 (References):

- 常承法, 郑锡澜. 1973. 中国西藏南部珠穆朗玛地区地质构造特征及其青藏高原东西向诸山系形成的探讨. 中国科学 (D 辑), (2): 190 - 201.

- 董彦辉,许继峰,曾庆高,王强,毛国政,李杰. 2006. 存在比桑日群弧火山岩更早的新特提斯洋俯冲记录么? 岩石学报, 22(3): 661-668.
- 和钟铨,杨德明,郑常青,王天武. 2006. 冈底斯带门巴岗岩同位素测年及其对新特提斯洋俯冲时代的约束. 地质论评, 52(1): 100-106.
- 黄勇,丁俊,唐菊兴,浪兴海,陈渊,张丽. 2011. 西藏雄村铜金矿床I号矿体成矿构造背景与成矿物质来源探讨. 成都理工大学学报(自然科学版), 38: 306-312.
- 康志强,许继峰,陈建林,王保弟. 2009. 藏南白垩纪桑日群麻木下组埃达克质岩的地球化学特征及其成因. 地球化学, 38(4): 334-344.
- 郎兴海,陈毓川,唐菊兴,李志军,黄勇,王程辉,陈渊,张丽. 2010. 西藏谢通门县雄村斑岩型铜金矿集区I号矿体的岩石地球化学特征: 对成矿构造背景的约束. 地质与勘探, 46(5): 887-898.
- 李才,王天武,李惠民,曾庆高. 2003. 冈底斯地区发现印支期巨斑花岗岩闪长岩——古冈底斯造山的存在证据. 地质通报, 22(5): 364-366.
- 李建峰,夏斌,刘立文,徐力峰,何观生,王洪,张玉泉,杨之青. 2009. 西藏群让蛇绿岩辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及地质意义. 大地构造与成矿学, 33(2): 294-298.
- 李文霞,赵志丹,朱弟成,董国臣,周肃,莫宣学, DePaolo D, Dilek Y. 2012. 西藏雅鲁藏布蛇绿岩形成构造环境的地球化学鉴别. 岩石学报, 28(5): 1663-1673.
- 李献华,刘颖,涂湘林,胡光黔,曾文. 2002. 硅酸盐岩石化学组成的 ICP-AES 和 ICP-MS 准确测定: 酸溶与碱熔分解样品方法的对比. 地球化学, 31(3): 289-294.
- 刘颖,刘海臣,李献华. 1996. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素. 地球化学, 25(6): 552-558.
- 潘桂棠,莫宣学,侯增谦,朱弟成,王立全,李光明,赵志丹,耿全如,廖忠礼. 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化. 岩石学报, 22(3): 521-533.
- 裴树文. 1999. 拉萨地块火山岩系内早-中侏罗世双壳类动物群及其古生物地理. 现代地质, 13(3): 291-298.
- 曲晓明,辛洪波,徐文艺. 2007. 三个锆石 U-Pb SHRIMP 年龄对雄村特大型铜金矿床容火成岩时代的重新厘定. 矿床地质, 26(5): 512-518.
- 唐菊兴,李凤信,李志军,张丽,唐晓倩,邓起,郎兴海,黄勇,姚晓峰,王友. 2010. 西藏谢通门县雄村铜金矿主要地质体形成的时限: 锆石 U-Pb、辉钼矿 Re-Os 年龄的证据. 矿床地质, 29(3): 461-475.
- 唐菊兴,张丽,黄勇,王成辉,李志军,邓起,郎兴海,王友. 2009. 西藏谢通门县雄村铜金矿主要地质体的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄及地质意义. 矿床地质, 28(6): 759-769.
- 韦栋梁,夏斌,周国庆,王冉. 2004. 西藏泽当蛇绿岩壳层火山熔岩的岩石地球化学及成因. 大地构造与成矿学, 28(3): 270-278.
- 韦振权,夏斌,张玉泉,王冉,杨之青,韦栋梁. 2006. 西藏休古嘎布蛇绿岩中辉绿岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义. 大地构造与成矿学, 30(1): 93-97.
- 吴浩若. 1984. 西藏南部白垩纪深海沉积层: 冲堆组及其地质意义. 地质科学, 19(1): 26-33.
- 肖序常,李廷栋. 2000. 青藏高原的构造演化与升降机制. 广州: 广东科技出版社: 123-134.
- 徐德明,黄圭成,雷义均. 2007. 西藏西南部休古嘎布蛇绿岩的成因: 岩石学和地球化学证据. 大地构造与成矿学, 31(4): 490-501.
- 杨志明,侯增谦,夏代祥,宋玉财,李政. 2008. 西藏驱龙铜矿西部斑岩与成矿关系的厘定: 对矿床未来勘探方向的重要启示. 矿床地质, 27(1): 28-36.
- 翟庆国,李才,李惠民,王天武. 2005. 西藏冈底斯中部淡色花岗岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地质通报, 24(4): 349-353.
- 张宏飞,徐旺春,郭建秋,宗克清,蔡宏明,袁洪林. 2007. 冈底斯南缘变形花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成: 新特提斯洋早侏罗世俯冲作用的证据. 岩石学报, 23(6): 347-353.
- 钟立峰,夏斌,周国庆,张玉泉,王冉,韦栋梁,杨之青. 2006. 藏南罗布莎蛇绿岩辉绿岩中锆石 SHRIMP 测年. 地质论评, 52(2): 224-229.
- 钟立峰. 2006. 藏南罗布莎蛇绿岩岩石学、地球化学及其构造环境. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 博士学位论文: 109.
- Allègre C J, Courtillot V, Tapponnier P, Tapponnier P, Hirn A, Mattauer M, Coulon C, Jaeger J J, Achache J, Schärer U, Marcoux J, Burg J P, Girardeau J, Armijo R, Gariépy C, Göpel C, Li T, Xiao X, Chang C, Li G, Lin B, Teng J, Wang N, Chen G, Han T, Wang X, Den W, Sheng H, Cao Y, Zhou J, Qiu H, Bao P, Wang S, Wang B, Zhou Y and Xu R. 1984. Structure and evolution of the Himalaya-Tibet orogenic belt. *Nature*, 307: 17-22.
- Atherton M P and Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362: 144-146.
- Castillo P R, Janney P E and Solidum R U. 1999. Petrology and geochemistry of Camiguin island, southern Philippines: Insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(1): 33-51.
- Castillo P R. 2012. Adakite petrogenesis. *Lithos*, 134-135: 304-316.
- Chu M F, Chung S L, Song B, Liu D, O'Reilly S Y, Pearson N J, Ji J and Wen D J. 2006. Zircon U-Pb and Hf isotope

- constraints on the Mesozoic tectonics and crustal evolution of southern Tibet. *Geology*, 34(9): 745 – 748.
- Chung S L, Chu M F, Ji J Q, O' Reilly S Y, Pearson N J, Liu D Y, Lee T Y and Lo C H. 2009. The nature and timing of crustal thickening in Southern Tibet: Geochemical and zircon Hf isotopic constraints from postcollisional adakites. *Tectonophysics*, 477(1–2): 36 – 48.
- Chung S L, Liu D Y, Ji J Q, Chu M F, Lee H Y, Wen D R, Lo C H, Lee T Y, Qian Q and Zhang Q. 2003. Adakites from continental collision zones: Melting of thickened lower crust beneath southern Tibet. *Geology*, 31(11): 1021 – 1024.
- Coulon C, Maluski H, Bollinger C and Wang S. 1986. Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet:  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  dating, petrological characteristics and geodynamical significance. *Earth and Planetary Science Letters*, 79(3–4): 281 – 302.
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662 – 665.
- Dewey J F, Shackleton R M, Chang C and Sun Y. 1988. The tectonic evolution of the Tibetan Plateau. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, 327: 379 – 413.
- Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, Liu X M, Liu Y S, Xu W L, Ling W L, Ayers J, Wang X C and Wang Q H. 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432: 892 – 897.
- Girardeau J and Mercier J C C. 1988. Petrology and texture of the ultramafic rocks of the Xigaze ophiolite (Tibet): Constraints for mantle structure beneath slow-spreading ridges. *Tectonophysics*, 147(1–2): 33 – 58.
- Green T H. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system. *Chemical Geology*, 120(3–4): 347 – 359.
- Harris N B W, Xu R H, Lewis C L, Hawkesworth C J and Zhang Y. 1988. Isotope geochemistry of the 1985 Tibet Geotraverse, Lhasa to Golmud. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 327: 263 – 285.
- Haschke M, Siebel W, Günther A and Scheuber E. 2002. Repeated crustal thickening and recycling during the Andean orogeny in north Chile (21° – 26°S). *Journal of Geophysical Research*, 107. doi: 10.1029/2001JB 000328.
- Hou Z Q, Gao Y F, Qu X M, Rui Z Y and Mo X X. 2004. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east-west extension in southern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 220(1–2): 139 – 155.
- Ji W Q, Wu F Y, Chung S L, Li J X and Liu C Z. 2009. Zircon U-Pb chronology and Hf isotopic constraints on the petrogenesis of Gangdese batholiths, southern Tibet. *Chemical Geology*, 262(3–4): 229 – 245.
- Kay S M and Mpodozis C. 2001. Central Andean ore deposits linked to evolved shallow subduction systems and thickening crust. *GSA Today*, 11: 4 – 9.
- Kay S M, Mpodozis C, Tittler A and Cornejo P. 1994. Tertiary magmatic evolution of the Maricunga mineral belt in Chile. *International Geology Review*, 36(12): 1079 – 1112.
- Kay S M, Mpodozis C, Ramos V P and Munizaga F. 1991. Magma source variations for midlate Tertiary magmatic rocks associated with a shallowing subduction zone and a thickening crust in the central Andes (22 to 33°S) // Harmon R S and Rapela C W. Andean Magmatism and its Tectonic Settings. *GSA Spec. Paper*, 265: 113 – 137.
- Kelemen P B, Hangfj K and Greene A R. 2003. One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust // Rudnick P L. The Crust. Vol. 3, Treatise on Geochemistry. Oxford, UK, Elsevier-Pergamon: 593 – 659.
- Lee H Y, Chung S L, Ji J Q, Qian Q, Gallet S, Lo C H, Lee T Y and Zhang Q. 2012. Geochemical and Sr-Nd isotopic constraints on the genesis of the Cenozoic Linzizong volcanic successions, southern Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 96 – 114.
- Macpherson C G, Dreher S T and Thirlwall M F. 2006. Adakites without slab melting: High pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines. *Earth and Planetary Science Letters*, 243(3–4): 581 – 593.
- Mahéo G, Guillot S, Blichert-Toft J, Rolland Y and Pecher A. 2002. A slab breakoff model for the Neogene thermal evolution of South Karakorum and South Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 195(1–2): 45 – 58.
- Malpas J, Zhou M F, Robinson P T and Reynolds P H. 2003. Geochemical and geochronological constraints on the origin and emplacement of the Yarlung Zangbo ophiolites, Southern Tibet. *Geological Society London Special Publications*, 218(1): 191 – 206.
- Miller C, Thoni M, Frank W, Schuster R, Melcher F, Meisel T and Zanetti A. 2003. Geochemistry and tectonomagmatic affinity of the Yungbwa ophiolite, SW Tibet. *Lithos*, 66(3–4): 155 – 172.
- Mo X X, Hou Z Q, Niu Y L, Dong G C, Qu X M, Zhao Z D and Yang Z M. 2007. Mantle contributions to crustal thickening during continental collision: Evidence from Cenozoic igneous rocks in southern Tibet. *Lithos*, 96(1–2): 225 – 242.

- Mo X X , Niu Y L , Dong G C , Zhao Z D , Hou Z Q , Zhou S and Ke S. 2008. Contribution of syncollisional felsic magmatism to continental crust growth: A case study of the Paleogene Linzizong volcanic succession in southern Tibet. *Chemical Geology* , 250( 1 - 4 ) : 49 - 68.
- Peacock S M , Rushmer T and Thompson A B. 1994. Partial melting of subducting oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters* , 121( 1 - 2 ) : 227 - 244.
- Pearce J A and Deng W M. 1988. The ophiolites of the Tibet Geotraverse , Lhasa to Golmud ( 1985 ) and Lhasa to Kathmandu ( 1986 ) . *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A* , 327: 215 - 238.
- Pearce J A and Mei H. 1988. Volcanic rocks of the 1985 Tibet Geotraverse: Lhasa to Golmud. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A* , 327 , 169 - 201.
- Richards J P and Kerrich B. 2007. Adakite-like rocks: Their diverse origins and questionable role in metallogenesis. *Economic Geology* , 102( 4 ) : 537 - 576.
- Richards J P. 2009. Postsubduction porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits: Products of remelting of subduction-modified lithosphere. *Geology* , 37( 3 ) : 247 - 250.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. // Saunders AD ( eds ) . *Magmatism in ocean Basins*. Geological Society Publication , 42: 313 - 345.
- Wanke M , Portnyagin M , Hoernle K , Werner R , Hauff F , van den Bogaard P and Garbe-Schonberg D. 2012. Bowers Ridge ( Bering Sea ) : An Oligocene-Early Miocene island arc. *Geology* , 40( 8 ) : 687 - 690.
- Wen D R , Chung S L , Song B , Iizuka Y , Yang H J , Ji J Q , Liu D Y and Gallet S. 2008a. Late Cretaceous Gangdese intrusions of adakitic geochemical characteristics , SE Tibet: Petrogenesis and tectonic implications. *Lithos* , 105( 1 - 2 ) : 1 - 11.
- Wen D R , Liu D Y , Chung S L , Chu M F , Ji J Q , Zhang Q , Song B , Lee T Y , Yeh M W and Lo C H. 2008b. Zircon SHRIMP U-Pb ages of the Gangdese Batholith and implications for Neotethyan subduction in southern Tibet. *Chemical Geology* , 252( 3 - 4 ) : 191 - 201.
- Xiong X L , Adam J and Green T H. 2005. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis. *Chemical Geology* , 218( 3 - 4 ) : 339 - 359.
- Xu J F , Shinjo R , Defant M J , Wang Q and Rapp R T. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust? *Geology* , 30( 12 ) : 1111 - 1114.
- Xu R H , Schärer U and Allègre C J. 1985. Magmatism and metamorphism in the Lhasa block ( Tibet ) : A geochronological study. *Journal of Geology* , 93( 1 ) : 41 - 57.
- Yin J , Xu J , Liu C and Li H. 1988. The Tibetan plateau , Regional stratigraphic context and previous work. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London , Series A: Mathematical and Physical Sciences* , A327: 5 - 52.
- Yogodzinsk G M , Lees J M , Churikova T G , Dorendorf F , Wonerer G and Volynets O N. 2001 , Geochemical evidence for the melting of subducting oceanic lithosphere at plate edges. *Nature* , 409: 500 - 504.
- Zhang K J , Zhang Y X , Tang X C and Xia B. 2012. Late Mesozoic tectonic evolution and growth of the Tibetan plateau prior to the Indo-Asian collision. *Earth Science Reviews* , 114( 3 - 4 ) : 236 - 249.
- Zhu D C , Zhao Z D , Niu Y L , Mo X , Chung S L , Hou Z Q , Wang L Q and Wu F Y. 2011. The Lhasa Terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth. *Earth and Planetary Science Letters* , 301( 1 - 2 ) : 241 - 255.
- Zhu D C , Zhao Z D , Niu Y L , Dilek Y , Hou Z Q and Mo X. 2012. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau. *Gondwana Research* , doi: 10. 1016/j. gr. 2012. 02. 002
- Zhu D C , Zhao Z D , Pan G T , Lee H Y , Kang Z Q , Liao Z L , Wang L Q , Li G M , Dong G C and Liu B. 2009. Early cretaceous subduction-related adakite-like rocks of the Gangdese Belt , southern Tibet: Products of slab melting and subsequent melt-peridotite interaction? *Journal of Asian Earth Sciences* , 34( 3 ) : 298 - 309.

## Geochemistry and Genesis of Middle Jurassic Adakitic Rocks in the Xietongmen Area of Southern Tibet

HU Jianxiong<sup>1</sup>, CHEN Jianlin<sup>2</sup>, ZHANG Zhanwu<sup>1</sup>, YAO Sheng<sup>1</sup>, WANG Bei<sup>1</sup>,  
YANG Wen<sup>1</sup>, XU Jifeng<sup>2</sup>, WU Jianbin<sup>2,3</sup>, HUANG Feng<sup>2,3</sup> and ZENG Yunchuan<sup>2,3</sup>

(1. Institute of Regional Geology and Mineral Resources, Mineral Bureau of Shaanxi, Xi'an 712000, China; 2. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The Middle Jurassic diorite exposed in the Xietongmen area of Southern Tibet, have some adakitic characteristics, such as high SiO<sub>2</sub> (>59%) and Sr (771 ~ 798 μg/g), and low HREE, and Y (<12 μg/g) concentrations, high Sr/Y (>64) and La/Yb (4.4 < (La/Yb)<sub>N</sub> < 19.2) ratios, with positive Sr anomalies but no obvious Eu anomalies. Middle Jurassic basic and acidic magmatism and related porphyry deposits (Xiongcu porphyry Cu-Au deposits) were recognized in Southern Tibet. In addition, the geochemical characteristics of the diorite are similar to those of the Cenozoic volcanic rocks at Bowers Ridge resulting from partial melting of slab-tearing in north-western Pacific Ocean. So, we suggest that the diorite in the Xietongmen area was most likely derived from partial melting of the slab break-off during the northern-dipped Neotethys Ocean in Middle Jurassic.

**Keywords:** geochemistry; adakitic rock; Middle Jurassic; Xietongmen, Tibet

### 本刊进入 RCCSE《2013 - 2014 年学术期刊分学科排行榜》核心区

根据武汉大学中国科学评价研究中心 (Research Center for Chinese Science Evaluation (RCCSE)) 发布的《中国学术期刊评价研究报告 2013 - 2014》,《大地构造与成矿学》首次入选《2013 - 2014 年学术期刊分学科排行榜——地球科学》核心区 (<http://www.nseac.com/>)。

本次沿用得分排序和划分等级相结合的方法,对中国内地出版的 6448 种中文学术期刊进行了评价,共有 1939 种学术期刊进入核心期刊区,其中权威期刊(A<sup>+</sup>) 327 种,核心期刊(A) 964 种,扩展核心期刊(A<sup>-</sup>) 648 种。