



西藏泽当英云闪长岩的地球化学和 Sr-Nd 同位素特征: 特提斯洋内俯冲的新证据

韦栋梁^{①②} 夏 斌^{①*} 周国庆^{①③} 闫 俊^① 王 冉^{①②} 钟立峰^{①②}

(① 中国科学院边缘海地质重点实验室, 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640; ② 中国科学院研究生院, 北京 100039; ③ 南京大学地球科学系, 南京 210093)

摘要 对雅鲁藏布江缝合带泽当段岛弧火成岩组合中英云闪长岩的分析表明, 该岩石具有与典型埃达克岩相似的特征: 高 SiO_2 (58%~63%), Al_2O_3 (18.4%~22.4%), Sr (810×10^{-6} ~ 940×10^{-6}), Sr/Y (77~106), 低 HREE ($\text{Y} = 9 \times 10^{-6}$ ~ 11×10^{-6} , $\text{Yb} = 1 \times 10^{-6}$ ~ 1.3×10^{-6}), 富集 LREE, 并有微弱的 Eu 正异常. I_{Sr} (0.70421~0.70487) 较低, 而 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (0.512896~0.512929) 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (+6.7~+7.3) 较高. 以上特征表明, 泽当英云闪长岩是由洋壳俯冲到一定深度后部分熔融而成, 熔融过程中可能卷入了少量大洋沉积物. 这套俯冲洋壳成因的埃达克岩的厘定, 指示中生代时特提斯洋开始发生洋内俯冲, 印证了前人所提出的洋内岛弧的存在.

关键词 埃达克岩 泽当英云闪长岩 俯冲 雅鲁藏布缝合带 西藏

埃达克岩是一类具有特殊地球化学特征的岩石, 表现为高 SiO_2 (>56%), Al_2O_3 (>15%), Sr (> 400×10^{-6}), Sr/Y (>20~40) 和 La/Yb >20, 富集 Na_2O ($\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$), LREE, 以及亏损 Y 和 HREE ($\text{Y} < 18 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} < 1.9 \times 10^{-6}$) 等特点. 最早认为, 埃达克岩是由年轻的、热的俯冲洋壳在 75~85 km 处 (相当于角闪岩-榴辉岩过渡带) 发生部分熔融而成 [1]. 近年来的研究发现, 底侵玄武岩和拆沉下地壳的部分熔融也能产生具埃达克岩地球化学特征的岩石 [2~5]. 无论是哪种成因, 埃达克岩都记录了板块运动中的深部过程信息 (如板块俯冲、玄武质岩浆的底侵、下地壳拆沉等), 具有重要的地球动力学意义.

青藏高原是特提斯洋俯冲消亡及印-亚板块碰撞隆升的结果, 一直是世界地学家关注的热点, 张旗等 [6] 较早提出青藏高原可能发育有新生代的埃达克

岩. 在藏北地区, 已有研究人员识别出埃达克岩, 并提出这些岩石为下地壳加厚熔融成因, 记录了青藏高原的增厚事件 [7~11]; 藏南冈底斯铜矿带中的中新世含矿斑岩也具有埃达克岩的成分特征, 其成因存在争议 [12], 但现有观点多倾向于加厚的冈底斯下地壳部分熔融成因 [13~16].

迄今为止, 在雅鲁藏布江缝合带中还没有埃达克岩的报道. 我们首次在雅鲁藏布江缝合带泽当段中识别出埃达克岩, 它的发现不仅对研究泽当段缝合带的形成演化过程十分重要, 同时也为重建特提斯构造格架提供了更多的资料.

1 地质背景及岩石学特征

研究区位于西藏南部乃东县泽当镇附近, 属雅鲁藏布江缝合带东段, 主要由一套岛弧岩石组合和

收稿日期: 2006-05-08; 接受日期: 2006-07-17

国家自然科学基金重点基金 (批准号: 40534019)、中国科学院边缘海重点实验室开放研究基金 (批准号: MSG1-04-13) 和中国科学院知识创新工程项目 (批准号: KZCXZ-SW-117) 资助

* 联系人, E-mail: xiabin@gig.ac.cn

蛇绿岩组成。其南侧为晚三叠统类复理石沉积相姐德秀组(T_3)粉砂质板岩夹细砂岩、灰岩透镜体,代表印度板块北部的被动大陆边缘沉积;北侧隔着雅鲁藏布江断裂还分布着晚侏罗世一早白垩世及晚白垩世的火山沉积建造。

泽当蛇绿岩东西向延展约 20 余公里,出露面积达 45 km²^[17,18](图 1),北面与一套岛弧火成岩组合呈断层接触。该蛇绿岩经历了复杂的构造运动,但出露层序基本完整,主要由地幔橄榄岩、镁铁-超镁铁堆积杂岩、辉长辉绿岩墙群及块状和枕状玄武岩组成。

对泽当段缝合带的构造演化,特别是该段蛇绿岩的形成环境,一直存在不同的认识:水下岛弧,岛弧或边缘海,边缘洋盆等^[19-21]。Aitchison 等^[22,23]和 McDermid 等^[24]将泽当蛇绿岩北侧的岛弧火成岩组合被称为“泽当地体”,提出该地体代表了中生代时特提斯洋内发育的一个洋内岛弧(泽当岛弧),年龄在 161~152 Ma 左右,位于其南面的泽当蛇绿岩则产于弧前环境。前人的研究指示泽当蛇绿岩可能发育于洋内俯冲带之上(SSZ),但目前还缺乏更多确切的证据证明该俯冲带的存在。本文拟通过对泽当岛弧中发现的埃达克质英云闪长岩的综合研究,探讨特提斯洋内部所发生的洋内俯冲事件。

泽当岛弧岩石组合以东西向分布在泽当镇周围,长约 12 km,面积约为 25 km²。其北面为第四纪沉积和雅鲁藏布江,南面与泽当蛇绿岩断层接触。该组合

的成分较为复杂,火成岩包括有玄武-流纹岩质的喷出岩和辉长-闪长岩质侵入岩;火山碎屑岩包括火山角砾岩,火山碎屑砂岩、粉砂岩、泥岩,带灰岩岩块的凝灰岩及不透明的凝灰岩^[25]。本文所报道的埃达克岩,岩性为英云闪长岩,以岩株状产出,围岩包括蛇纹石化的二辉橄榄岩、斜长角闪岩及角砾凝灰岩等岩块。根据薄片的镜下观察,样品的主要矿物包括斜长石、角闪石、黑云母和石英,副矿物有电气石、磷灰石和黝帘石。斜长石多呈葡萄石化-绿帘石化;黑云母可变为白云母或白云母+绿帘石;角闪石较多,呈针柱状,大角闪石斑晶有隐环带,中心呈淡黄色,边缘为深绿色;石英分布极不均匀,多充填在黑云母、角闪石和斜长石的空穴中,类似一种文象结构。

2 分析方法

选取 13 个新鲜样品进行主微量元素测试,实验在中国科学院地球化学研究所资源环境测试分析中心完成。主量元素采用湿化学法测定;稀土元素和微量元素在 Finnigan MAT ELEMENT 型高分辨率等离子体质谱仪(ICP-MS)上测定,大致过程为^[26]:准确称取 50 mg 样品粉末放于 PTFE 溶样器(bomb)中,每个样品中加入 1 mL 的 HF(38%)和 0.5 mL 的 HNO₃(68%),蒸干溶液以除掉大部分的硅。加入 1 mL 的 HF 和 0.5 mL 的 HNO₃,置于 190℃ 烘箱中加热 12 h。冷却后加入 1 mL 浓度为 0.5 μg/mL 的 Rh 内标溶液,

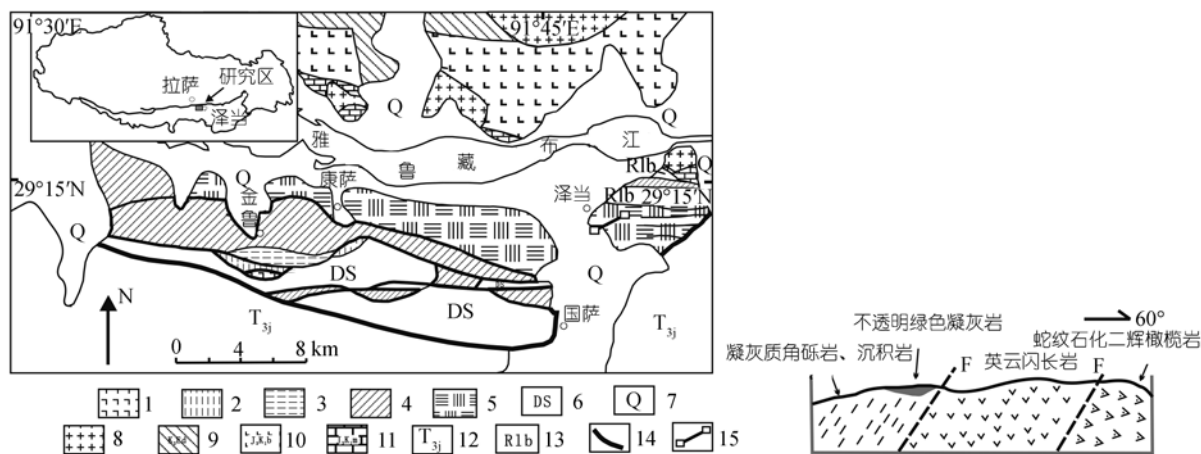


图 1 泽当地质略图

据 1:20 万泽当地质图修改,右图为样品剖面示意图。1. 枕状及块状熔岩;2. 岩墙群(辉绿岩,辉长岩);3. 堆积杂岩;4. 超基性岩;5. 岛弧火成岩组合;6. 复理石类彩色燧石岩;7. 第四系;8. 花岗岩;9. 旦师庭组(安山质火山岩);10. 比马组(灰岩、板岩和变安山质凝灰岩);11. 麻木下组(安山质-英安质火山岩);12. 姐德秀组(板岩、砂岩夹灰岩透镜体);13. 罗布莎群(砾岩、砂岩);14. 断层;15. 样品剖面

加热至约 150℃蒸干溶液. 加入 1 mL 的 HNO₃, 蒸干, 再加一次 HNO₃, 蒸干. 用 8 mL40%的 HNO₃ 提取最终的残留物, 重新密封溶样器, 将其放入 110℃烘箱中加热 3 h. 冷却之后, 加入去离子水将溶液稀释至 100 mL.

在主微量元素实验结果的基础上, 从中选出 5 个样品进行Sr-Nd同位素的测定, 测试在中国科学院地质与地球物理研究所固体放射性同位素测试实验室采用德国Finnigan公司MAT262 固体源质谱计完成. 实验流程如下 [27,28]: 取大约 100 mg全岩粉末样品, 加入 ⁸⁷Rb-⁸⁴Sr 和 ¹⁴⁹Sm-¹⁵⁰Nd混合稀释剂以及纯化的 HF-HClO₄ 酸混合试剂后, 在高温下完全溶解. 在装 5 mL体积AG50W-X12 交换树脂(200~400 目)的石英交换柱上进行Rb-Sr和REE的分离和纯化, Nd的分离和纯化在石英交换柱上用 1.7 mL Teflon粉末为交换介质完成. Sr同位素比值测定采用Ta金属带和Ta-HF 发射剂, 而 Rb, Nd 同位素比值测定采用双 Re

金属带形式. 分别采用 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0.7219 和 ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr =0.1194 校正测得 Nd 和 Sr 同位素比值. Nd 和 Sr 的全流程本底小于 300 和 100 pg (表 1, 2).

3 地球化学

3.1 主量元素

泽当英云闪长岩的主量元素表现为高 SiO₂(58%~63%), Al₂O₃(18.4%~22.4%), Na₂O(3.2%~4.12%); 低 MgO(0.69%~1.08%), TiO₂(0.25%~0.3%)等特征. Na₂O/K₂O 较高(1.6~2.8), 属强过铝质(A/CNK=0.98~1.35, A/NK=2.2~2.9). 根据 CIPW 标准矿物计算结果对岩石进行分类, 如图 2 所示, 样品全部落入英云闪长岩的区域.

3.2 稀土元素

所有样品的球粒陨石标准化稀土配分型式均呈右倾分布(图 3), LREE 强烈富集, La/Yb=11~15, 略低

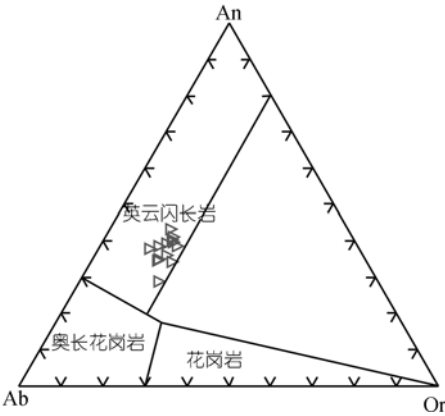
表 1 泽当英云闪长岩样品主量元素(%)和稀土元素(×10⁻⁶)分析结果

样品编号	ZD-130	ZD-131	ZD-132	ZD-133	ZD-135	ZD-136	ZD-137	ZD-138	ZD-139	ZD-140	ZD-141	ZD-142	ZD-143
SiO ₂	63.69	63.18	61.66	60.53	60.95	59.40	61.37	63.01	57.98	62.14	62.26	63.09	60.32
TiO ₂	0.28	0.27	0.26	0.27	0.29	0.28	0.27	0.25	0.26	0.25	0.30	0.29	0.28
Al ₂ O ₃	18.71	19.55	21.07	20.86	20.55	22.39	21.16	20.47	21.78	21.70	18.40	18.71	19.94
Fe ₂ O ₃	1.88	2.56	1.56	1.59	1.95	2.00	1.23	1.58	1.36	1.50	2.03	1.31	1.31
FeO	1.50	1.30	1.50	1.35	1.40	1.15	1.50	1.10	1.30	1.15	1.24	1.40	1.10
MnO	0.11	0.11	0.10	0.11	0.12	0.11	0.11	0.10	0.11	0.10	0.11	0.12	0.11
MgO	0.96	0.90	0.69	0.88	0.98	1.07	0.95	0.89	0.86	0.91	1.08	1.00	0.93
CaO	5.23	3.99	6.12	5.73	5.20	4.75	5.63	4.72	5.59	4.45	5.69	5.42	5.02
Na ₂ O	3.20	3.86	3.39	3.31	3.23	3.71	3.34	3.43	3.42	3.30	4.12	3.68	3.96
K ₂ O	1.99	2.01	1.70	1.83	1.64	1.72	1.81	1.82	1.95	1.98	1.48	1.58	1.86
P ₂ O ₅	0.25	0.30	0.16	0.20	0.30	0.28	0.27	0.18	0.19	0.27	0.32	0.27	0.20
LOI	2.00	1.50	1.61	2.77	3.05	2.58	2.03	1.94	4.35	1.70	2.40	2.50	4.31
总量	99.86	99.63	99.82	99.48	99.78	99.55	99.68	99.58	99.32	99.41	99.53	99.43	99.47
Na ₂ O/K ₂ O	1.6	1.9	2.0	1.8	2.0	2.2	1.8	1.9	1.8	1.7	2.8	2.3	2.1
La	15.73	13.68	15.69	15.23	16.08	15.97	21.65	14.77	15.16	13.54	14.26	15.62	14.02
Ce	24.56	21.24	22.62	23.49	25.08	24.59	32.73	22.80	23.46	20.68	22.37	24.09	22.07
Pr	2.59	2.26	2.48	2.36	2.61	2.55	3.21	2.39	2.49	2.23	2.36	2.54	2.33
Nd	9.42	8.50	8.99	8.41	9.76	9.61	11.21	8.84	9.20	8.43	9.31	9.19	8.55
Sm	1.86	1.57	1.69	1.78	1.94	1.89	1.91	1.70	1.82	1.75	1.85	1.92	1.81
Eu	0.68	0.69	0.66	0.64	0.66	0.70	0.67	0.63	0.66	0.68	0.65	0.61	0.61
Gd	1.63	1.60	1.58	1.44	1.80	1.76	1.68	1.47	1.63	1.47	1.67	1.67	1.51
Tb	0.25	0.25	0.27	0.24	0.29	0.28	0.27	0.24	0.26	0.24	0.30	0.26	0.25
Dy	1.51	1.53	1.51	1.40	1.65	1.69	1.60	1.44	1.44	1.39	1.71	1.58	1.51
Ho	0.32	0.31	0.30	0.30	0.36	0.35	0.33	0.30	0.32	0.28	0.36	0.33	0.32
Er	0.96	0.87	0.91	0.92	0.98	1.10	1.01	0.86	0.90	0.92	1.08	1.04	1.02
Tm	0.14	0.15	0.14	0.14	0.18	0.15	0.16	0.13	0.16	0.14	0.18	0.16	0.16
Yb	1.17	1.05	1.03	1.11	1.27	1.28	1.19	1.00	1.08	1.02	1.28	1.23	1.22
Lu	0.18	0.17	0.18	0.18	0.21	0.21	0.18	0.17	0.21	0.17	0.20	0.20	0.19
La/Yb	13.45	12.98	15.22	13.75	12.71	12.47	18.16	14.71	14.05	13.3	11.12	12.68	11.53
ΣREE	61.00	53.87	58.05	57.64	62.87	62.11	77.78	56.74	58.79	52.94	57.58	60.44	55.57

表 2 泽当英云闪长岩样品微量元素($\times 10^{-6}$)和 Sr-Nd 同位素分析结果

样品编号	ZD-130	ZD-131	ZD-132	ZD-133	ZD-135	ZD-136	ZD-137	ZD-138	ZD-139	ZD-140	ZD-141	ZD-142	ZD-143
Ba	1822.6	1841.5	1532.9	1512.2	848.28	809.88	1342	1517.8	1621.6	2049.3	1032.4	1051.2	1359
Rb	68.5	66.5	61.0	67.3	60.4	58.6	65.3	59.7	61.4	65.5	52.6	62.2	66.2
Sr	813.4	838.9	920.5	870.5	943.0	868.9	850.2	811.4	860.8	917.6	823.1	889.3	810.5
Cs	1.02	1.04	1.09	1.14	0.94	0.93	0.84	0.99	0.75	1.02	1.03	1.14	1.21
Li	5.0	5.9	3.0	6.1	8.0	6.4	5.9	5.5	8.7	4.6	10.2	4.6	8.3
Ga	16.8	17.0	17.5	16.6	17.5	16.5	17.0	16.5	16.8	16.8	16.7	17.3	17.7
Ta	0.18	0.15	0.14	0.16	0.24	0.22	0.17	0.16	0.16	0.16	0.25	0.21	0.22
Nb	3.35	3.23	2.96	3.26	3.36	3.37	3.30	3.04	3.28	3.06	3.29	3.71	3.62
Hf	2.28	2.12	1.99	2.44	2.09	2.35	2.33	2.14	2.41	2.14	2.14	2.37	2.40
Zr	79.16	73.53	71.44	88.35	73.21	81.56	81.65	74.83	83.71	75.31	75.26	80.39	79.92
Ti	1737.1	1677.2	1557.4	1677.2	1797	1737.1	1677.2	1557.4	1677.2	1557.4	1797	1797	1737.1
Y	9.24	8.98	9.22	8.94	10.43	10.93	9.87	8.67	9.26	8.60	10.69	10.34	9.42
Th	5.87	5.35	5.47	5.64	6.05	6.37	6.99	5.46	5.77	5.24	5.61	6.10	6.36
U	1.31	1.14	1.30	1.18	1.23	1.57	1.21	1.16	1.40	1.28	1.53	1.17	1.51
Cr	64.1	313.4	131.8	70.1	44.8	51.3	105.5	44.4	104.7	116.2	81.7	53.2	44.5
Ni	32.6	165.8	105.9	34.5	24.4	26.1	51.9	22.4	53.0	59.1	43.1	28.7	27.7
Co	5.7	7.0	6.1	5.3	6.1	6.1	5.8	5.5	5.5	6.0	6.7	5.9	5.9
Sc	5.1	5.1	5.1	4.5	4.5	5.5	5.1	3.7	4.8	3.8	5.5	4.5	5.1
V	66.8	65.2	69.5	64.9	74.7	74.1	65.1	63.9	64.5	63.9	79.9	67.1	64.7
Cu	6.4	17.3	39.1	6.1	8.8	13.1	6.6	7.5	4.2	6.5	7.3	6.7	11.0
Pb	21.3	22.9	23.0	26.0	23.9	22.5	24.1	22.6	24.5	21.6	21.6	21.2	24.7
Zn	40.4	43.9	33.2	48.9	55.0	41.8	43.6	37.3	39.6	46.6	44.1	41.9	43.7
Th/Ta	32.8	34.9	38.2	35.1	25.4	29.6	40.7	35.2	35.6	32.2	22.9	29.8	29.3
Sr/Y	88.1	93.5	99.9	97.4	90.4	79.5	86.2	93.7	93.0	106.7	77.0	86.0	86.0
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.1125	0.1146		0.1126	0.1204								0.1154
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512929	0.512906		0.512896	0.512916								0.512910
2σ	0.000009	0.000012		0.000014	0.000015								0.000009
$\varepsilon\text{Nd}(t)^{\text{a}}$	+7.3	+6.8		+6.7	+6.9								+6.9
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.067	0.231		0.231	0.216								0.255
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.705020	0.704970		0.704810	0.704787								0.704765
2σ	0.000018	0.000017		0.000020	0.000012								0.000011
I_{Sr}^{a}	0.70488	0.70447		0.70431	0.70432								0.70421

a)用于 I_{Sr} 和 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 计算的 $t=152\text{ Ma}$ [24]



于埃达克岩特征值; 有微弱的 Eu 正异常, $\delta\text{Eu}=+1.1\sim+1.3$. HREE 明显亏损($Y=9\times 10^{-6}\sim 11\times 10^{-6}$, $Yb=1\times 10^{-6}\sim 1.3\times 10^{-6}$), 与现代典型埃达克岩相符($Y<18\times 10^{-6}$, $Yb<1.9\times 10^{-6}$). 值得注意的是, 泽当英云

闪长岩的 MREE 表现为强烈的亏损, 甚至低于 Yb, Lu 等 HREE, $(\text{Ho}/\text{Yb})_{\text{N}}=0.77\sim 0.86$.

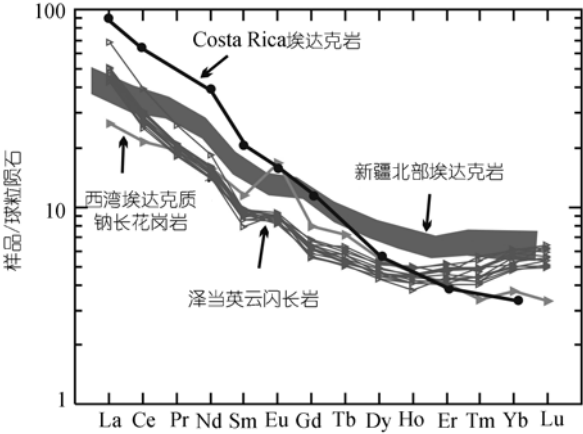


图 3 球粒陨石标准化 REE 配分图

3.3 微量元素

样品的微量元素蛛网图表现为统一的右倾“尖峰式”分布,与Costa Rica和新疆北部埃达克岩 [30,31] 非常相似,比西湾埃达克质钠长花岗岩 [32] 要更富集Cs, Rb和Ba等大离子亲石元素(图 4). Th, Sr和P具有明显的正异常, Nb, Ta和Ti则表现为负异常,显示出岛弧岩浆岩的特点,暗示源区可能存在含钛矿物相(金红石)或角闪石残留相. Y含量很低,表明源区可能含角闪石、石榴石和辉石残留物. Sr含量在 $810 \times 10^{-6} \sim 940 \times 10^{-6}$ 之间, $Sr/Y=77 \sim 106$, 与埃达克岩的特征值相符 ($Sr > 400 \times 10^{-6}$, $Sr/Y > 20 \sim 40$), 说明斜长石已经熔融进入熔体, 源区没有斜长石残留. 泽当英云闪长岩所表现出来的高Sr和低Y等微量元素特征, 与现代典型埃达克岩相一致. 在Sr/Y-Y图(图 5)和 $(La/Yb)_N$ -Yb_N图(图 6)中, 样品都落入埃达克岩区内.

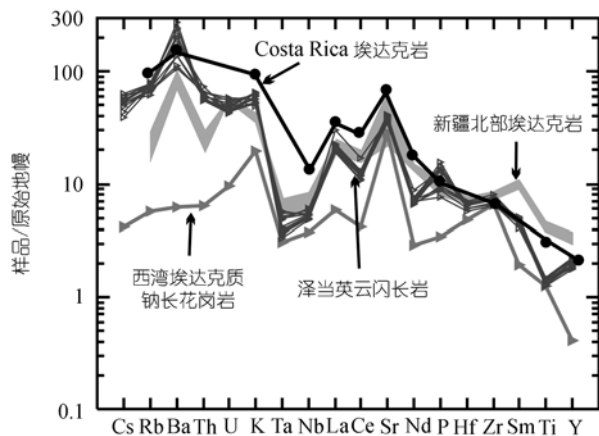


图 4 原始地幔标准化微量元素蛛网图

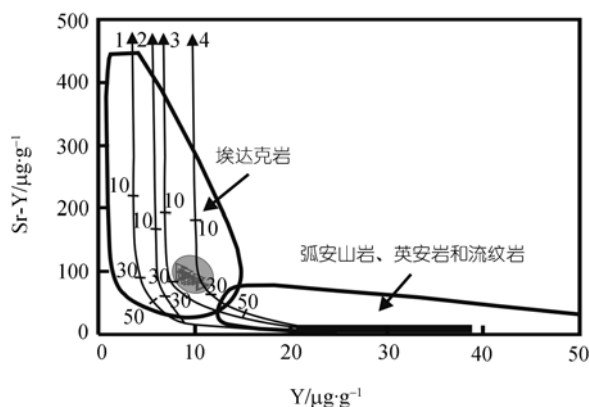


图 5 Sr/Y-Y图 [1,33]

1. 榴辉岩(石榴石/辉石=50/50); 2. 角闪石榴石岩(石榴石/角闪石=50/50); 3. 角闪榴辉岩(角闪石/石榴石/辉石=10/40/50); 4. 石榴石角闪岩(石榴石/角闪石=10/90)

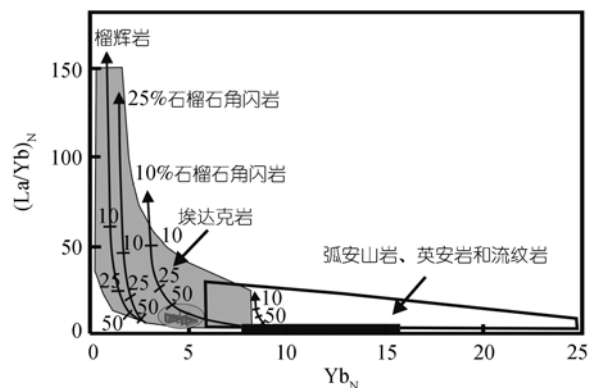


图 6 $(La/Yb)_N$ -Yb_N图 [33,34]

3.4 Sr-Nd 同位素

5 个样品的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值在 0.512896~0.512929 之间, 具有高且均一的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值(+6.7~+7.3). $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值则在 0.704765~0.705020 之间, 相对应的 $I_{\text{Sr}}=0.70421 \sim 0.70488$. 这些同位素数据表明, 泽当英云闪长岩应该来源于亏损较强的地幔或者具有地幔特征的洋壳, 而不可能是陆壳来源. 其 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值稍低于 MORB 而 I_{Sr} 稍高于 MORB, 可能是熔融时混入了少量沉积物所致. 如图 7 所示, 泽当英云闪长岩的 Sr-Nd 同位素组成远离底侵玄武岩/拆沉下地壳熔融成因的中国东部埃达克岩, 也不同于冈底斯斑岩铜矿带中的埃达克质侵入岩(该岩石被认为形成于增厚下地壳中基性物质的部分熔融, 并有富集地幔和/或上地壳组分的加入 [12,14], 而更接近于雅鲁藏布江 MORB 和俯冲板片熔融形成的埃达克岩.

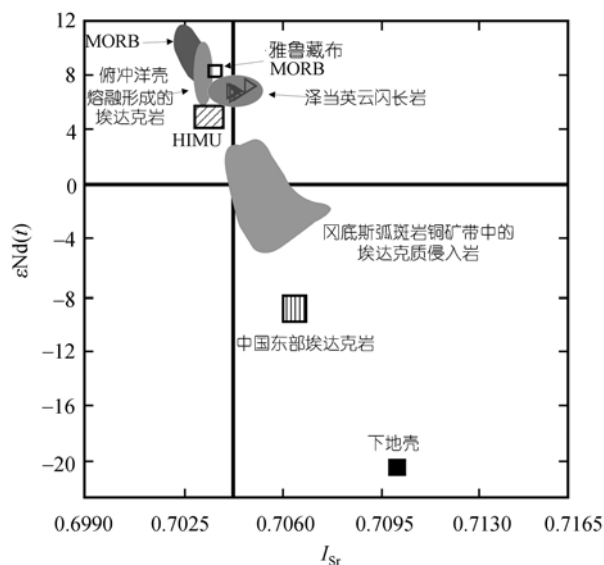


图 7 $\epsilon\text{Nd}(t)$ - I_{Sr} 图 [14]

4 讨论

4.1 岩石成因

近年来的研究表明, 埃达克岩主要有三种成因模式: ①玄武质岩浆的地壳混染与分离结晶过程(AFC过程)^[35]; ②俯冲洋壳的熔融^[1,36]; ③底侵玄武岩/拆沉下地壳的熔融^[2]. 根据泽当英云闪长岩表现出来的地球化学特征并结合地质分析, 我们认为其更有可能是俯冲洋壳熔融形成的, 主要证据如下:

(1) 研究区内没有大面积的基性岩浆岩出露, 而且泽当英云闪长岩在 Harker 图解中(图略)也没有表现出分离结晶的演化趋势, 表明该岩石不可能是由 AFC 过程形成.

(2) 底侵玄武岩/下地壳熔融成因的埃达克岩, 是陆壳垂向增生的产物. 在地壳加厚的环境下(>40 km), 下地壳玄武质岩石的部分熔融或者地壳拆沉而导致的熔融都有可能形成具有埃达克岩地球化学特征的岩石, 如安第斯^[37]、中国东部^[6,38-40]、藏北地区^[7-11]等地的埃达克岩都属这种情况. 因此, 下地壳熔融形成的埃达克岩在同位素上具有明显的壳源特征, 表现为高Sr低Nd. 通常下地壳来源的火山岩, 其 I_{Sr} 在0.706~0.710间^[9], $I_{\text{Nd}} < 0.5126$ ^[2]. 泽当英云闪长岩具有较低的 I_{Sr} (0.70421~0.70487), 较高的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (0.512896~0.512929)和 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值(+6.7~+7.3), 表明其源区更接近于亏损地幔, 不可能由大陆下地壳熔融产生. 另外, 泽当英云闪长岩出露于雅鲁藏布江缝合带中, 该缝合带代表了印度板块向亚欧板块俯冲汇聚的残余. 这与现代环太平洋地区俯冲型埃达克岩的产出环境相类似, 明显不同于中国东部或藏北地区等大陆板块内部的构造环境. 因此, 基本可以排除泽当英云闪长岩是由底侵玄武岩/拆沉下地壳熔融形成的.

(3) 俯冲洋壳熔融形成的埃达克岩, 其源岩为具MORB特征的洋壳, 因此其同位素必然带有MORB的印记($I_{\text{Nd}} > 0.5130$, $I_{\text{Sr}} < 0.7040$). 泽当英云闪长岩的同位素组成与MORB相差不大, 而更接近于包含部分大洋沉积物的俯冲洋壳熔融形成的埃达克质岩($I_{\text{Nd}} = 0.5125$, $I_{\text{Sr}} = 0.7050$)^[41]. 这些证据支持泽当英云闪长岩形成于具MORB特征的洋壳的部分熔融.

(4) 俯冲洋壳成因的埃达克岩浆在上升过程中通常都会与地幔楔发生相互作用, 导致MgO, Cr和Ni的增加. 泽当英云闪长岩的Cr和Ni表现出较高的含

量(平均分别为94和52 $\mu\text{g/g}$), 明显高于典型埃达克岩(分别为46和24 $\mu\text{g/g}$)^[42], 表明具有MORB特征的俯冲洋壳熔体穿过地幔楔并与之发生了相互作用. 但同时我们也注意到, 样品的MgO比较低, 这点与赣东北蛇绿岩中俯冲成因的西湾埃达克质钠长花岗岩相似^[32], 但要低于藏北下地壳熔融成因的新生代埃达克岩^[7]. 在 SiO_2 - K_2O 和 SiO_2 -Yb图(图8, 9)中, 泽当英云闪长岩都落入俯冲洋壳熔融形成的埃达克岩范围内, 而与玄武质下地壳熔融成因的埃达克岩有明显区别. 从Cr-Ni图(图10)可以看到, 样品呈线状地沿着榴辉岩部分熔融线分布于地幔组分和MORB熔浆的混合区域附近, 趋势完全一致.

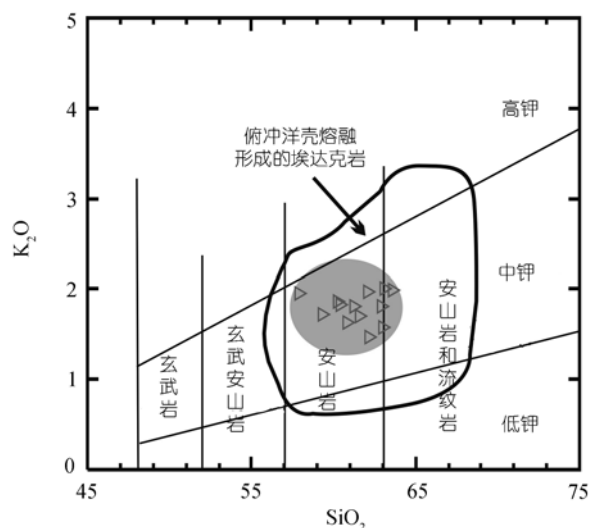


图8 SiO_2 - K_2O 图(数据范围据文献^[1,42])

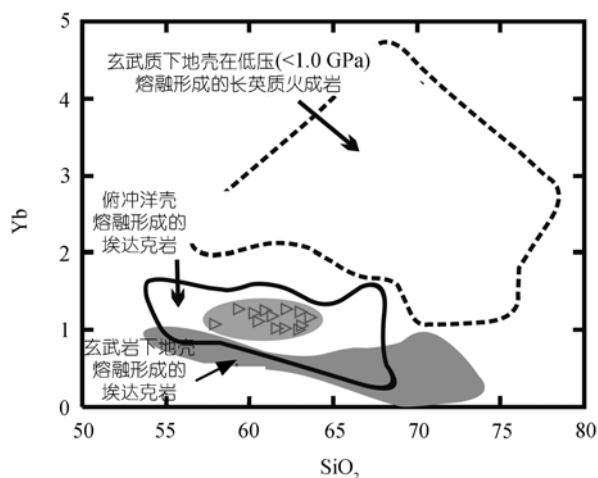


图9 SiO_2 -Yb图^[43]

(5) 俯冲洋壳成因的埃达克岩通常与岛弧、SSZ型蛇绿岩共生. 泽当埃达克质英云闪长岩属泽当岛

弧岩石组合, 作为雅鲁藏布江缝合带泽当段的一部分与 SSZ 型的泽当蛇绿岩相伴产出, 这些地质证据也支持其来源于俯冲洋壳的熔融。

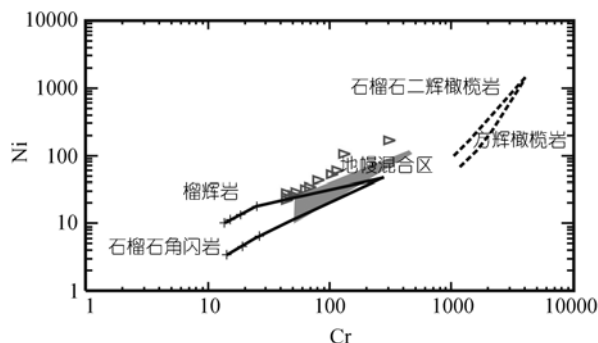


图 10 Cr-Ni图 [44]

实线为 MORB 部分熔融曲线, 耐熔残余为 10% 的榴闪岩和榴辉岩; 虚线为石榴石二辉橄榄岩和方辉橄榄岩部分熔融曲线。熔融曲线上的十字符号表示熔融百分比: 从左往右依次为 1%, 10%, 30%, 50%; 阴影区表示 1%~10% 地幔组分混入到 1%~50% MORB 熔浆中的区域

(6) 泽当英云闪长岩中富存电气石、磷灰石等矿物, 这些矿物都富含挥发分(包括 H_2O , B和P等)。Ishikawa和Nakamura^[45]指出, 在部分熔融过程中B-Be和B-Nb在矿物-熔体间不发生分异, 但在流体中发生强烈分异, B强烈集中于流体中。泽当英云闪长岩中普遍含有电气石, 说明岩石中富B, 暗示岩浆形成过程中有俯冲组分的加入。

(7) 泽当英云闪长岩表现出Nb, Ta和Ti的相对亏损, 而造成Nb, Ta和Ti亏损的几种过程可概括如下^[46]: ①地壳中Fe-Ti氧化物的结晶分离; ②地壳或地幔中富Ti含水的硅酸盐, 如金云母和角闪石的分异; ③上升熔体与亏损地幔之间广泛的色层分离式的相互作用; ④地幔楔中金红石、榍石相的存在; ⑤俯冲物质析出的流体中Nb和Ta相对于REE及其他元素的不活动性; ⑥从俯冲沉积物中继承了低的Ta/Th和Nb/Th比值; ⑦在俯冲物质部分熔融过程中金红石作为残留相。泽当英云闪长岩中普遍出现有角闪石、云母, 而没有辉石和钛铁氧化物。因此, 其亏损Nb, Ta和Ti的原因, 主要应与③~⑦, 即俯冲组分和亏损地幔的相互作用有关。

(8) 泽当英云闪长岩的HREE和Y亏损强烈, 表现为埃达克岩的特征, 表明石榴石是重要的残留矿物相。但其Sr/Y和La/Yb比值相对典型的埃达克岩并不是很高, 仅略高于岛弧火山岩, 而且MREE相比HREE更为亏损, 暗示石榴石并不是唯一控制泽当英

云闪长岩成分的残留矿物。

泽当英云闪长岩富集Sr和Al, 且具有微弱的Eu正异常, 表明斜长石在残留相中不稳定而进入熔体。当残留相主要为石榴石时, 熔体表现为HREE强烈亏损, 此时 $Y/Yb > 10$, $(Ho/Yb)_N > 1.2$; 而当残留相主体为角闪石时, HREE通常表现得比较平坦^[47]。泽当英云闪长岩的 $Y/Yb = 7.8 \sim 8.9$, 平均为 8.4, $(Ho/Yb)_N = 0.77 \sim 0.86$, 平均为 0.8, MREE较HREE更为亏损, 表明角闪石应当为主要残留相。在Sr/Y-Y图中, 泽当英云闪长岩落在石榴石角闪岩附近, 略微靠近角闪榴辉岩; 而在 $(La/Yb)_N$ - Yb_N 图中, 样品也都分布在 10% 石榴石角闪岩部分熔融演化线附近。根据上述特征, 我们推测泽当英云闪长岩的源区残留相主要由角闪石和石榴石组成, 另外可能还有少量辉石。角闪石在残留相中所占的比例要稍高于典型的埃达克岩, 石榴石的比例稍低。由于石榴石强烈富集HREE, 而角闪石相对更富集MREE, 这样的残留相组合也使得岩石中的MREE相对HREE更亏损, 与实验得出的REE分布相符, 另外也使得Y和Yb的含量变高, 从而降低了Sr/Y和La/Yb比值。实验岩石学结果表明^[36,48], 在一定的温压状况下, 俯冲洋壳流体的缺失熔融(角闪石部分熔融)可以形成埃达克岩熔体, 残余相组合为石榴石+单斜辉石+角闪石, 这也与本文所分析的情况相类似。

综合上面的分析, 我们认为, 泽当英云闪长岩是年轻的、热的洋壳俯冲到一定深度(角闪岩-榴辉岩过渡带)发生部分熔融形成的, 推测其残留相可能由角闪石+石榴石+辉石组成。在熔融过程中卷入了少量大洋沉积物, 略微改变了岩浆的成分。熔体在上升经过地幔楔的时候, 还与橄榄岩发生了小比例的相互作用。

4.2 地质意义

俯冲洋壳熔融形成的埃达克岩是反映年轻的(<25 Ma)、热的俯冲洋壳以小角度俯冲、并在深部发生板片部分深融作用的一种标志。其产生的深度约为 75~85 km(相当于角闪岩-榴辉岩过渡带), 明显小于正常的岛弧火山岩岩浆的形成深度(120~150 km)^[49]。这一类型的埃达克岩形成于俯冲作用初期, 比正常的岛弧火山岩更靠近海沟位置, 因此, 从埃达克岩到正常岛弧火山岩的方向, 代表了大洋板片的俯冲方向。此外, 该类型埃达克岩的出现还标志着大

洋板片俯冲消减的开始, 可能代表大洋开始萎缩消减 [50,51]。

雅鲁藏布江缝合带标志着印度板块与亚欧板块碰撞后消亡的特提斯洋残余。对印度板块-亚欧板块碰撞的构造模式, 目前较为广泛接受的是特提斯洋壳沿着拉萨地体南缘发生俯冲消亡, 并最终导致印-亚碰撞和青藏高原的隆升 [52,53]。但近年来的研究表明, 这一模式可能过于简单, 特提斯洋内部可能存在更为复杂的演化格局。Allegre等 [54]很早就提出, 特提斯内部可能存在一个岛弧, 但该岛弧已经完全消失了。Searle等 [52]也曾指出, 西藏与西喜马拉雅之间的一个重要差别在于, 没有证据证明西藏从前有洋内岛弧的存在。实际上在雅鲁藏布江缝合带向西延伸的 Kohistan 和 Ladakh 地区, 已经厘定出一套 Kohistan-Dras 洋内岛弧, 代表特提斯洋内部俯冲的产物 [55,56]。因此, 在雅鲁藏布江缝合带的东段是否存在洋内岛弧, 如果存在的话, 其与西面的 Kohistan-Dras 洋内岛弧有什么关系? 这些问题对研究特提斯的构造演化、印度板块与亚欧板块的碰撞过程都有重要的意义。Aithison等 [22,23]对雅鲁藏布江缝合带泽当段进行了详细的野外考察后, 认为该区在中生代时存在一个新特提斯洋内俯冲系统, 并从地层上厘定出了泽当地体、大竹区地体和白朗地体, 分别代表洋内岛弧、弧前蛇绿岩(即泽当蛇绿岩)和俯冲增生杂岩, 据此提出特提斯洋由此开始俯冲消亡。但其模式只是建立在野外地质及部分古生物证据上, 还缺少地球化学证据的支持。

我们从雅鲁藏布江缝合带泽当段中识别出俯冲洋壳成因的埃达克岩, 指示该区存在一个洋内俯冲带。位于泽当蛇绿岩北侧的岛弧火成岩组合, 代表了该俯冲带之上所形成的洋内岛弧(泽当岛弧), 是早期特提斯大洋岩石圈向北俯冲的产物。根据前人发表的泽当岛弧时代(152~161 Ma [24]), 可以大致将这次洋内俯冲事件的开始时间制约在中侏罗—晚侏罗世。

这些新的认识有助于我们进一步了解雅鲁藏布江缝合带泽当段的形成演化过程, 也从另一个角度印证了前人所提出的特提斯洋内岛弧的存在, 为深入探讨特提斯洋的构造演化以及恢复特提斯古洋构造格局提供了重要证据。

5 结论

(1) 雅鲁藏布江缝合带东段的泽当岛弧组合中

出露的一套英云闪长岩具有埃达克岩成分特征, 这套埃达克岩是俯冲洋壳部分熔融的产物。

(2) 该套俯冲成因埃达克岩的厘定, 指示特提斯洋内存在俯冲带和洋内岛弧, 根据前人资料, 推测这次俯冲开始于中侏罗—晚侏罗世。

致谢 两位匿名评审人及编委会对本文提出了宝贵的修改意见, 在此深表感谢。

参 考 文 献

- Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 1990, 347: 662—665 [DOI]
- Atherton M P, Petford N. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 1993, 362: 144—46 [DOI]
- Kay S M, Coira B, Viramonte J. Young mafic back-arc volcanic rocks as guides to lithospheric delamination beneath the Argentine Puna Plateau, Central Andes. *J Geophys Res*, 1994, 99: 14323—14339
- Kay S M, Ramos V A, Marquez Y M. Evidence in Cerro Pampa volcanic rocks for slab-melting prior to ridge-trench collision in southern South America. *J Geol*, 1993, 101: 703—714
- 张旗, 王焰, 钱青, 等. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义. *岩石学报*, 2001, 17(2): 236—244
- 张旗, 钱青, 王二七, 等. 燕山中晚期的中国东部高原: 埃达克岩的启示. *地质科学*, 2001, 36(2): 129—143
- 赖绍聪. 青藏高原新生代埃达克质岩的厘定及其意义. *地学前缘*, 2003, 10(4): 407—415
- 许继峰, 王强. Adakitic 火成岩对大陆地壳增厚过程的指示: 以青藏北部火山岩为例. *地学前缘*, 2003, 10(4): 401—406
- 魏君奇, 姚华舟, 牛志军, 等. 藏北赤布张错地区埃达克岩的厘定及其意义. *岩石矿物学杂志*, 2005, 24(3): 173—178
- Chung S L, Liu D Y, Ji J Q, et al. Adakites from continental collision zone: melting of thickened lower-crust beneath southern Tibet. *Geology*, 2003, 31: 1021—1024 [DOI]
- Wang Q, McDermott F, Xu J F, et al. Cenozoic K-rich adakitic volcanic rocks in the Hohxil area, northern Tibet: lower-crustal melting in an intracontinental setting. *Geology*, 2005, 33: 465—468 [DOI]
- 侯增谦, 孟祥金, 曲晓明, 等. 西藏冈底斯斑岩铜矿带埃达克质斑岩含矿性: 源岩相变及深部过程约束. *矿床地质*, 2004, 24(2): 108—121
- 高永丰, 侯增谦, 魏瑞华. 冈底斯第三纪斑岩的岩石学、地球化学及其地球动力学意义. *岩石学报*, 2003, 19(3): 418—428
- Hou Z Q, Gao Y F, Qu X M, et al. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east-west extension in South Tibet. *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 220: 139—155 [DOI]
- 侯增谦, 高永丰, 孟祥金, 等. 西藏冈底斯中新世斑岩铜矿带: 埃达克岩质斑岩成因与构造控制. *岩石学报*, 2004, 20(2): 239—248
- 曲晓明, 侯增谦, 国连杰, 等. 冈底斯铜矿带埃达克质含矿斑岩的源区组成与地壳混染: Nd、Sr、Pb、O 同位素约束. *地质学报*, 2004, 78(6): 813—821
- 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏岩浆活动和变质作用. 北京: 科学出版社, 1981. 1—50

- 18 西藏自治区地质矿产局. 西藏自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 1993. 170—300
- 19 夏斌, 郭令智, 施央申. 西藏泽当蛇绿岩及其板块构造环境. 南京大学学报(地球科学版), 1989, 3: 19—29
- 20 高洪学, 宋子季. 西藏泽当蛇绿混杂岩研究新进展. 中国区域地质, 1995, 4: 316—322
- 21 韦栋梁, 夏斌, 周国庆, 等. 西藏泽当蛇绿岩壳层熔岩组分的地球化学特征及其成因意义. 大地构造与成矿学, 2004, 28(3): 270—278
- 22 Aitchison J C, Badengzhu, Davis A M, et al. Remnants of a Cretaceous intra-oceanic subduction system within the Yarlung–Zangbo suture (southern Tibet). *Earth Planet Sci Lett*, 2000, 183: 231—244 [DOI]
- 23 Aitchison J C, Davis A M, Abrajevitch A V, et al. Stratigraphic and sedimentological constraints on the age and tectonic evolution of the Neotethyan ophiolites along the Yarlung Tsangpo suture zone, Tibet. In: Dilek Y, Robinson P T, eds. *Ophiolites in Earth History*. London: The Geological Society, 2003. 147—164
- 24 McDermid I R C, Aitchison J C, Davis A M, et al. The Zedong terrane: a Late Jurassic intra-oceanic magmatic arc within the Yarlung–Tsangpo suture zone, southeastern Tibet. *Chem Geol*, 2002, 187: 267—277 [DOI]
- 25 McDermid I R C. Zedong Terrane, South Tibet. Dissertation for the Doctoral Degree. Hongkong: Hongkong University, 2003. 19—20
- 26 Qi L, Hu J, Gregoire D C. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Talanta*, 2000, 51: 507—513 [DOI]
- 27 Chen F, Siebel W, Satir M, et al. Geochronology of the Karadere basement (NW Turkey) and implications for the geological evolution of the Istanbul zone. *Int J Earth Sci*, 2002, 91: 469—481 [DOI]
- 28 Chen F, Hegner E, Todt W. Zircon ages, Nd isotopic and chemical compositions of orthogneisses from the Black Forest, Germany: evidence for a Cambrian magmatic arc. *Int J Earth Sci*, 2000, 88: 791—802 [DOI]
- 29 Barker F. Trondhjemite: definition, environment and hypotheses of origin. In: Barker F, ed. *Trondhjemites, Dacites and Related Rocks*. Amsterdam: Elsevier, 1979. 1—12
- 30 Defant M J, Jackson T E, Drummond M S, et al. The geochemistry of young volcanism throughout western Panama and southeastern Costa Rica: an overview. *J Geol Soc London*, 1992, 149: 569—579
- 31 张海祥, 牛贺才, Sato H, 等. 新疆北部晚古生代埃达克岩、富铌玄武岩组合: 古亚洲洋板块南向俯冲的证据. 高校地质学报, 2004, 10(1): 106—113
- 32 Li W X, Li X H. Adakitic granites within the NE Jiangxi ophiolites, South China: geochemical and Nd isotopic evidence. *Precambrian Res*, 2003, 122: 29—44 [DOI]
- 33 Drummond M S, Defant M J. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: archaean to modern comparisons. *J Geophys Res*, 1990, 95: 21503—21521
- 34 Martin H. Effect of steeper Archaean geothermal gradient on geochemistry of subduction-zone magmas. *Geology*, 1986, 14: 753—756 [DOI]
- 35 Castillo R P, Janney P E, Solidum R S. Petrology and geochemistry of Camiguila Island, Southern Philippines: insight to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting. *Contrib Miner Petrol*, 1999, 134: 33—51 [DOI]
- 36 Peacock S M, Rushmer T, Thompson A B. Partial melting of subducting oceanic crust. *Earth Planet Sci Lett*, 1994, 121: 227—244 [DOI]
- 37 Kay R W, Kay S M. Creation and destruction of lower continental crust. *Geologische Rundschau*, 1991, 80: 259—278 [DOI]
- 38 王强, 赵振华, 熊小林, 等. 底侵玄武质下地壳的熔融: 来自安徽沙溪 adakitic 质富钠石英闪长玢岩的证据. 地球化学, 2001, 30(4): 353—362
- 39 许继峰, 王强, 徐义刚, 等. 宁镇地区中生代安基山中酸性侵入岩的地球化学: 亏损重稀土和钇的岩浆产生的限制. 岩石学报, 2001, 17(4): 576—584
- 40 Xu J F, Shinjo R, Defant M J, et al. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: partial melting of delaminated lower continental crust? *Geology*, 2002, 30: 1111—1114 [DOI]
- 41 Stern C R, Kilian R. Role of the subducter slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Austral Volcanic Zone. *Contrib Miner Petrol*, 1996, 123: 263—281 [DOI]
- 42 Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archean granitoids. *Lithos*, 1999, 46: 411—429 [DOI]
- 43 王强, 赵振华, 许继峰, 等. 扬子地块东部燕山期埃达克质(adakite-like)岩与成矿. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2002, 32(增刊): 127—136
- 44 罗照华, 柯珊, 谌宏伟. 埃达克岩的特征、成因及构造意义. 地质通报, 2002, 21(7): 430—440
- 45 Ishikawa T, Nakamura. Origin of the slab component in arc lavas from across-arc variation of B and Pb isotopes. *Nature*, 1994, 370: 205—208
- 46 Kelemen P B, Hanghøj K, Greene A R. One view of the geochemistry of subduction-related Magmatic Arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust. In: Rudnick R L, ed. *The Crust, Treatise on Geochem*. Amsterdam: Elsevier, 2003. 593—659
- 47 葛小月, 李献华, 陈志刚, 等. 中国东部燕山期高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩的地球化学特征及成因: 对中国东部地壳厚度的制约. 科学通报, 2002, 47(6): 474—480
- 48 续海金, 马昌前. 实验岩石学对埃达克岩成因的限定-兼论中国东部富钾高 Sr/Y 比值花岗岩类. 地学前缘, 2003, 10(4): 417—427
- 49 Crosson R S, Owens T J. Slab geometry of the Cascadia subduction zone beneath Washington from earth-quake hypocenters and teleseismic converted waves. *Geophys Res Lett*, 1987, 14: 824—827
- 50 Sajona F G, Mury R C, Bellon H, et al. Initiation of subduction and the generation of slab melts in western and eastern Mindanao, Philippines. *Geology*, 1993, 21: 1007—1010 [DOI]
- 51 朱弟成, 潘桂棠, 段丽萍, 等. 埃达克岩研究的几个问题. 西北地质, 2003, 36(2): 13—19
- 52 Searle M P, Windley B F, Coward M P, et al. The closing of Tethys and the tectonics of the Himalaya. *Geol Soc Am Bull*, 1987, 98: 678—701 [DOI]
- 53 Durr S B. Provenance of Xigaze fore-arc basin clastic rock(Cretaceous, South Tibet). *Geol Soc Am Bull*, 1996, 108: 669—684 [DOI]
- 54 Allegre C J, Courtillot V, Tapponnier P, et al. Structure and evolution of the Himalaya-Tibet orogenic belt. *Nature*, 1984, 307: 17—22 [DOI]
- 55 Robertson A H, Degnan P. The Dras arc complex: lithofacies and reconstruction of a Late Cretaceous oceanic volcanic arc in the Indus suture zone, Ladakh Himalaya. *Sediment Geol*, 1994, 92: 117—145 [DOI]
- 56 Searle M P, Khan M A, Fraser J E, et al. The tectonic evolution of the Kohistan-Karakoram collision belt along the Karakoram Highway transect, north Pakistan. *Tectonics*, 1999, 18: 929—949 [DOI]