

大别山造山带东南部天柱山花岗岩类侵入体的特征及其 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

薛怀民¹, 马芳², 赵逊³, 吴维平⁴

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;
3. 中国地质科学院, 北京 100037; 4. 安徽省地质调查院, 安徽合肥 230001)

摘要: 大别山造山带内广泛发育晚中生代的花岗岩类侵入体, 天柱山岩体是其中的一个典型代表, 位于分隔南大别超高压变质带与北大别杂岩之间的五河-水吼断裂带附近。该岩体是个由多期次侵位构成的复式岩体, 自早到晚依次为闪长岩→石英正长岩/花岗闪长岩→碱长花岗岩。整个杂岩体属高钾钙碱性系列, 但碱长花岗岩的地球化学性质与构成杂岩体的其他类型岩石之间存在着显著的差异, 拥有 A 型花岗岩的很多地球化学特征, 但大量存在的包裹体(围岩俘虏体及暗色细粒包体)和低的 Zr 饱和温度又明显不同于典型的 A 型花岗岩, 推测属高度演化的 I 型花岗岩。地球化学特征显示天柱山花岗岩类的成因与整个大别山造山带内晚中生代的花岗岩类似, 来自古老下地壳物质的部分熔融, 形成于晚中生代整个中国东部岩石圈减薄的构造背景下。测得该复式岩体中花岗闪长岩和碱长花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 127.8 ± 0.7 Ma 和 127.7 ± 1.0 Ma, 两者的侵位年龄几乎完全一致, 岩相特征也显示, 碱长花岗岩岩浆侵位时, 花岗闪长岩尚未完全固结。

关键词: 花岗岩类, 中生代, 锆石年龄, 天柱山, 大别山造山带

中图分类号: P588.12⁺1; P597⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)05-0935-16

Characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of the Tianzhushan granitoid intrusive body, southeastern Dabie orogen

XUE Huai-min¹, MA Fang², ZHAO Xun³ and WU Wei-ping⁴

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4. Anhui Academy of Geological Survey, Hefei 230001, China)

Abstract: The Tianzhushan intrusive body is one of the representative plutons in the Dabie orogen, where late Mesozoic granitoid intrusive bodies are widely distributed, locates near the Wuhe-Shuihou fault which separates the UHP metamorphic complex of South Dabie from the block of North Dabie. This intrusive body is a composite intrusion consisting of three generations of intrusions: diorite, quartz syenite/granodiorite, and alkali-feldspar granite respectively from early to late. All the complexes belong to high-K calc-alkaline series, but the geochemical characteristics of the alkali-feldspar granite are remarkably different from other types of rocks and similar to things of A-type granite to a considerable degree. The alkali-feldspar granite has abundant enclaves and lower Zr saturation temperature, showing great difference from typical A-type granite and probably belonging to a highly evolved I-type granite. The geochemical characteristics of the Tianzhushan intrusive body are similar to those of other late Mesozoic granitoid intrusive bodies in the Dabie orogen, derived from partial melting of "old" lower

收稿日期: 2011-05-24; 修订日期: 2011-06-07

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(1212010711814) 地质矿产调查评价专项(1212011121116) 天柱山国家地质公园资助项目

作者简介: 薛怀民(1962-), 男, 研究员, 岩石学专业, E-mail: huaiminx@sina.com

crust under the tectonic backdrop of all eastern China lithospheric thinning in late Mesozoic. The granodiorite and alkali-feldspar granite are similar to each other in the emplacement age, and their zircon LA-ICP-MS U-Pb ages are 127.8 ± 0.7 Ma and 127.7 ± 1.0 Ma respectively, corresponding to the lithofacies features. It is thus held that the granodiorite had not been entirely concretioned during the intrusion of the alkali-feldspar granitic magma.

Key words: granitoids; Mesozoic; zircon geochronology; Tianzhushan; Dabie orogen

大别-苏鲁造山带不仅是世界上规模最大的高压-超高压变质岩,而且晚中生代(燕山晚期)的岩浆活动也非常剧烈,形成了众多规模不等、类型较丰富的花岗岩类侵入体,出露面积占了整个造山带面积的1/3以上,它们的侵位对高压-超高压变质岩的剥露起着重要作用。对于这些花岗岩类侵入体的形成时代,目前已积累了大量的同位素年龄资料(Xue *et al.*, 1997; Hacker *et al.*, 1998; Ge *et al.*, 1998; Ma *et al.*, 1998; Bryant *et al.*, 2004; Xie *et al.*, 2006; Wu *et al.*, 2007; Zhao *et al.*, 2007; Huang *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2007; Xu *et al.*, 2007; 陈廷愚等, 1991; 陈江峰等, 1995; 魏春景等, 2000; 刘敦一等, 2002; 薛怀民等, 2002; 马昌前等, 2003; 谢智等, 2001, 2004; 赵新福, 2007; 赵子福等, 2004, 2009; 周红升等, 2009)。这些年龄资料显示,在大别山造山带内,晚中生代花岗岩类岩浆的侵位时间主要集中在约120~135 Ma之间,峰值在128 Ma左右(图1),时代均属早白垩世。与区内零星分布的基性-超基性侵入岩的锆石 U-Pb 年龄(李曙光等, 1999; 葛宁洁等, 1999; 王江海等, 2002; 侯振辉等, 2003; 赵子福等, 2003; Zhao *et al.*, 2005)非常一致,表明地幔来源的镁铁质-超镁铁质岩浆作用与花岗质岩浆作用之间具有成因联系。

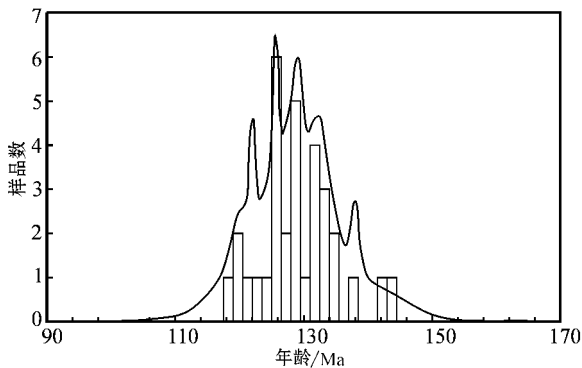


图1 大别山地区晚中生代花岗岩类的侵位年龄频率图

Fig. 1 Histogram showing age distribution of late-Mesozoic granitoids within the Dabie Shan orogenic belt

对于大别造山带内燕山期花岗岩类侵入体的成因,目前还有不同的认识。Chen等(2002)根据大别造山带内最大的岩体——主薄源岩体中成分和结构的不平衡及化学成分的变异情况,认为其形成不但与演化的镁铁质岩浆与花岗质岩浆之间的混合作用有关,还与分离结晶与岩浆混合作用及岩浆上升过程中受到上地壳的少量混染作用有关,认为其形成与演化过程大致如下:地幔来源的镁铁质/超镁铁质岩浆侵入到加厚的大陆地壳,导致中性成分的下地壳岩石脱水熔融,形成大量的花岗质岩浆,壳源和幔源熔体通过广泛混合相互作用所形成的岩浆在随后上升到地壳浅部过程中经历分离结晶,形成各种岩石类型。Yang等(2005)认为,造山带内的花岗质岩浆主要是由古老的下地壳在高压下部分熔融形成的。Huang等(2006)认为大别造山带内中生代花岗岩起源于俯冲-加厚的地壳脱水熔融。

天柱山岩体作为大别山造山带内少有的构成奇峰幽谷风景地貌的岩体,其岩相类型与造山带内其他花岗岩类侵入体相比有其独特性,但已有的研究工作还较少。本次研究是在对天柱山岩体进行详细野外考察的基础上,用LA-ICP-MS法对构成天柱山岩体主体的细粒花岗闪长岩和中粗粒碱长花岗岩进行了锆石U-Pb定年,并通过与大别造山带内其他晚中生代花岗岩的对比,探讨了它的成因及其在整个大别造山带晚中生代花岗岩中的位置。

1 岩体地质与岩石学

天柱山花岗岩体位于分隔南大别超高压变质带与北大别杂岩之间的五河-水吼断裂附近,它东起潜山县天柱山,西至岳西县中关一带,平面上呈北西-南东向延伸的不规则形态(图2b),面积约120 km²(彭亚鸣等, 1994)。该岩体是个由多期次侵位构成的杂岩体,主要的侵入活动有3次。早期为中-细粒的闪长岩-石英二长岩,主要分布在岩体的西北边缘,在岩体的中心也有少量出露。主体由细粒的花

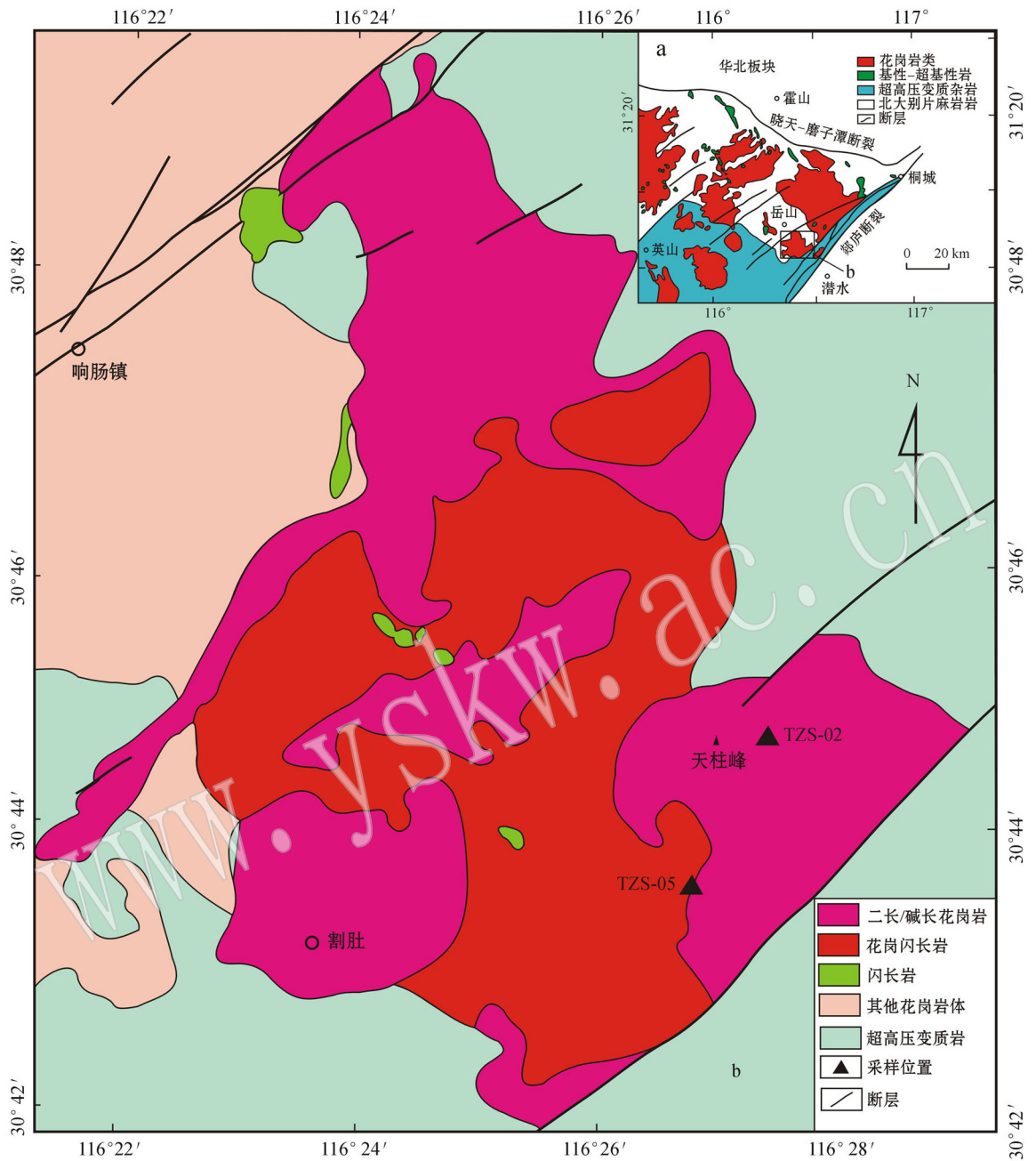


图 2 天柱山花岗岩体地质简图

Fig. 2 Simplified geological map of Tianzhusan intrusive body

岗闪长岩和中粗粒的碱长花岗岩组成，两者之间呈侵入接触关系，接触界限呈不规则的“火焰状”(图 3a)，表明碱长花岗岩侵位时，花岗闪长岩尚未完全固结，属涌动式侵位。接触带附近局部见有塑性的基性岩浆包体(图 3b)，指示镁铁质岩浆与花岗质岩浆之间的热力学或动力学联系，或意味着花岗闪长岩质岩浆(及石英二长质岩浆)可能是由基性岩浆与(碱长)花岗质岩浆混合形成。

花岗闪长岩(样品 TZS-05)，细粒等粒结构，局部似斑状结构，主要由斜长石(35%~40%)、钾长石(20%~25%)、石英(~15%)、角闪石(5%~10%)和少量黑云母组成，副矿物有榍石、磷灰石、锆石、磁铁矿、金红石等。岩体边部有大量的围岩捕虏体(图 3c、3d、3e、3f)以及一些暗色包体(图 3g)。这些捕虏体或包体多呈角砾状、透镜状、扁豆状、椭圆状、不规则状，排列多具有定向性，大致平行于接触面和岩浆

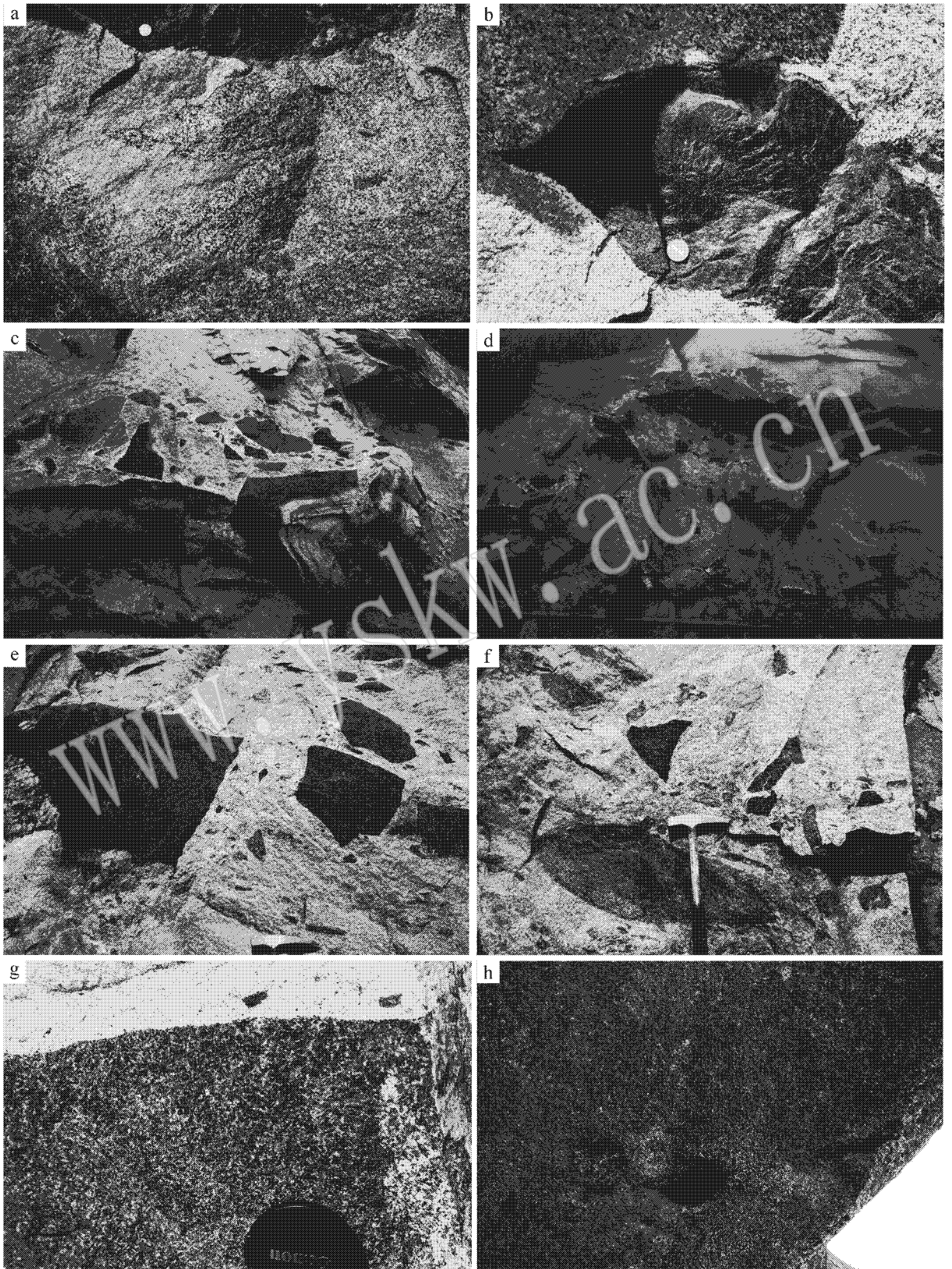


图 3 天柱山花岗岩体不同期次的接触关系及各种包体照片

Fig. 3 Photographs of the contact zone between different stages of intrusive bodies and various enclaves

流动的方向。

碱长花岗岩(样品 TZS-02),中粗粒花岗结构,边部中粒结构,局部见晶洞构造(图 3h)。岩石主要由钾长石(>50%)斜长石(~20%)和石英(~25%)组成,暗色矿物黑云母的含量很少,一般仅1%~2%。副矿物为褐帘石、磁铁矿、磷灰石和锆石。

2 地球化学性质

全岩化学成分是在核工业北京地质研究院分析测试研究中心分析的。其中主元素用 X 荧光光谱法(XRF)完成,误差<0.5%,微量元素和稀土元素用德国 Finnigan-MAT 公司生产的 ELEMENT I(离子体质谱仪)分析,误差一般为5%~10%。天柱山岩体代表性样品的主量和微量元素成分见表1,它们在 TAS 分类图上明显分为中性-中酸性和酸性两类,其中前者主要分布在花岗闪长岩和石英正长岩分界线附近,少数落在二长岩和正长岩区域(图 4a),后者基本为 SiO₂ 大于75%的高硅花岗岩。在 QAP 分类图上,天柱山岩体主要落在碱长花岗岩和正长花岗岩区域,少数为二长花岗岩、石英二长岩或石英正长岩,其中 SiO₂ 含量大于70%的花岗岩均位于碱长花岗岩区域(图 4b)。在 K₂O-SiO₂ 图解上,天柱山岩体除个别样品外,均分布在高钾钙碱性系列的区域(图 4c)。在 ANK-ACNK 图解上,中性岩都位于准铝质区域,而花岗岩类主要表现为准铝质或弱过铝质,部分落入过碱性区域(图 4d)。在天柱山岩体中,碱长花岗岩的许多地球化学性质与 A 型花岗岩类似,如高硅、低钙、贫镁、相对富碱和高 FeO*/MgO 比,微量元素地球化学性质上表现为强烈亏损 Ba、Sr、Eu,富集 Rb、Th 和 U,高场强元素 Zr、Nb、Y 和

Ga 的含量也较高,大多数样品在花岗岩的成因分类图上落在 A 型花岗岩区域(图 4e)。但基于:①天柱山岩体中含有大量的包体,明显不同于 A 型花岗岩普遍“干净”(Baker *et al.*, 1995; White *et al.*, 2005; Martin, 2006)的现象;②天柱山岩体中碱长花岗岩的 Zr 饱和温度仅约 760℃,而 A 型花岗岩浆的温度可达 900℃,有时甚至接近 1 000℃(White *et al.*, 2005);③天柱山岩体中的碱长花岗岩在图 4f 上大多数落入高度演化的 I 型花岗岩区域,推测属于高度演化的 I 型花岗岩,与花岗闪长岩之间可通过斜长石的分离结晶演化而来(比较图 5a 和 5c)。

天柱山岩体中两类岩石的稀土元素球粒陨石标准化曲线和不相容元素原始地幔标准化蛛网图的形态明显不同,其中花岗闪长岩(及石英二长岩)表现出强烈的轻、重稀土元素分馏程度,无明显的 Eu 异常,球粒陨石标准化曲线呈比较平滑的右倾型(图 5a)。在不相容元素原始地幔标准化蛛网图上,该岩类表现出明显富集 Rb、Th、U、K 等强不相容元素的特征, Ba 正异常, Sr 无异常到正异常(图 5b)。高场强元素的行为发生了分化,其中 Nb、Ta、Ti 显示出一定程度的亏损,而 Zr、Hf 则显示出一定程度的正异常, Y 无明显的异常(图 5b)。

与其形成显著对照的是碱长花岗岩,以强烈的负 Eu 异常、中等程度的稀土元素的分馏程度为特征,且这种分馏主要发生在轻稀土元素之间,而重稀土元素之间几乎无分馏。稀土元素球粒陨石标准化曲线呈左侧右倾、右侧平坦型(图 5c)。在不相容元素原始地幔标准化蛛网图上,该岩类表现出明显富集 Rb、Th、U、K 等强不相容元素、强烈亏损 Ba 和 Sr 的特征,高场强元素 Nb 和 Ta 的亏损程度微弱。

表 1 天柱山岩体代表性样品的主量 (w_B%) 和微量 (w_B/10⁻⁶) 元素成分

Table 1 Geochemical compositions of Tianzhushan intrusive body

样号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失量	总量	Rb
TZS-05	68.12	0.53	14.31	1.405	1.95	0.064	1.83	2.92	4.01	4.03	0.23	0.37	99.77	102
TZS-02	75.87	0.12	12.89	0.525	0.45	0.076	0.15	0.37	4.69	4.71	0.027	0.091	99.97	250
样号	Sr	Ba	Zr	Hf	U	Th	Nb	Ta	Y	Ga	La	Ce	Pr	Nd
TZS-5	543	1334	16.1	0.965	2.04	9.11	9.23	0.711	14.6	18.5	50.2	80.8	8.5	31.8
TZS-02	39	116	123	6.16	6.22	34.9	42.6	3.4	33.2	20.6	32.9	71.4	6.88	23.8
样号	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	REE (La/Yb) _N	Eu/Eu*	T _{Zr} /°C	
TZS-5	4.99	1.55	3.82	0.538	2.59	0.513	1.38	0.207	1.34	0.211	188.44	25.32	1.05	—
TZS-02	5.68	0.27	5.04	1.01	5.57	1.03	3.18	0.567	3.46	0.528	161.32	6.43	0.15	760

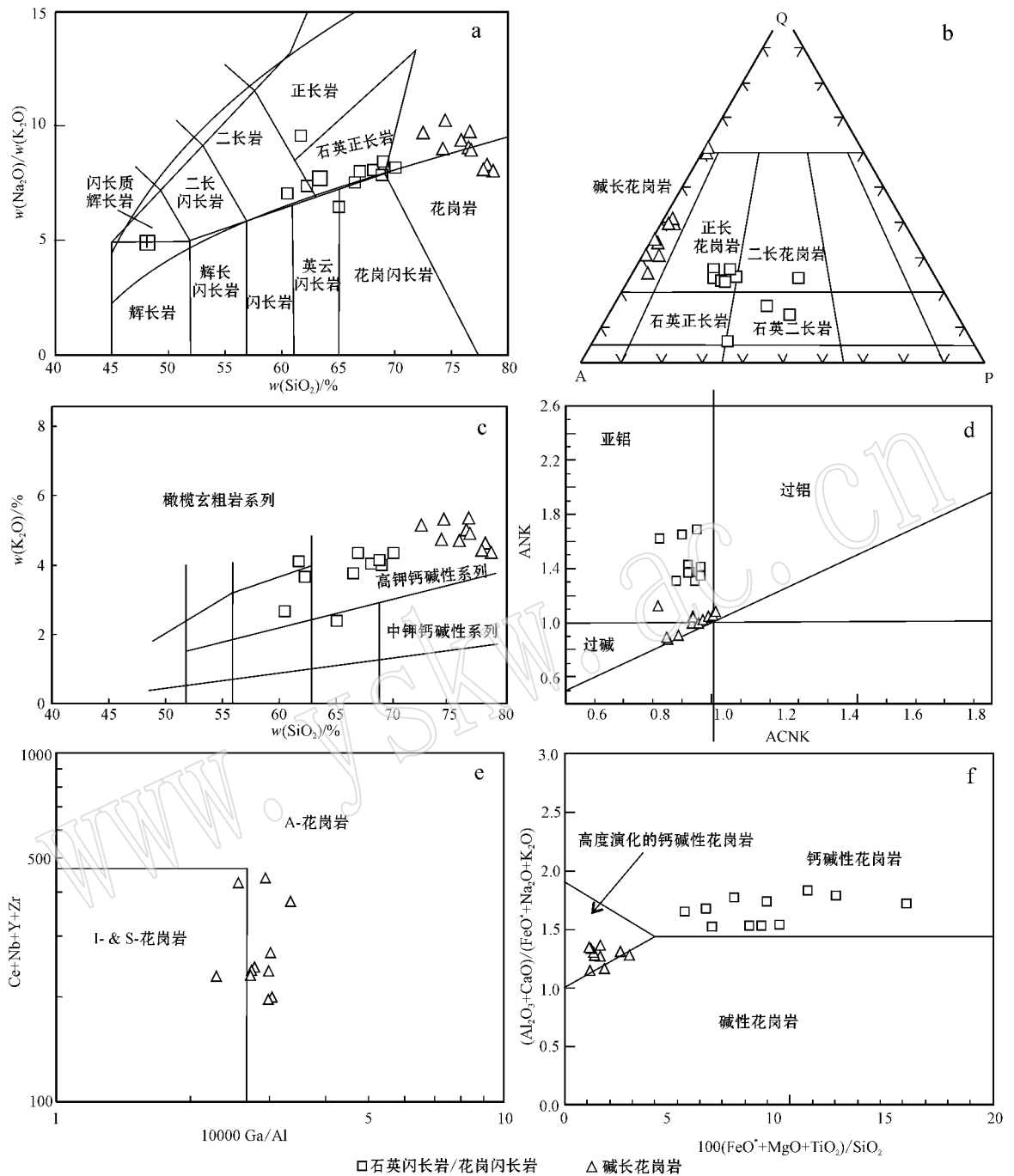


图 4 天柱山岩体的成分分类图

Fig. 4 Classification of Tianzhushan intrusive body

资料来源 本次研究;周承福等(2001);徐小军等(2005)

data sources : this study ; Zhou Chengfu *et al.* (2001) ; Xu Xiaojun *et al.* (2005)

3 岩体的侵位年龄

3.1 分析方法与锆石形貌

锆石是从约 10 kg 样品中用常规方法分选出后

在双目镜下仔细挑纯得到的。将挑纯后的锆石置于环氧树脂中,然后磨至约一半,使锆石内部暴露。分析点的选择首先根据已磨至一半的锆石反射和透射照片进行初选,再与阴极发光照片反复对比,力求避开内部矿物包裹体。测试是在北京大学地球与空间

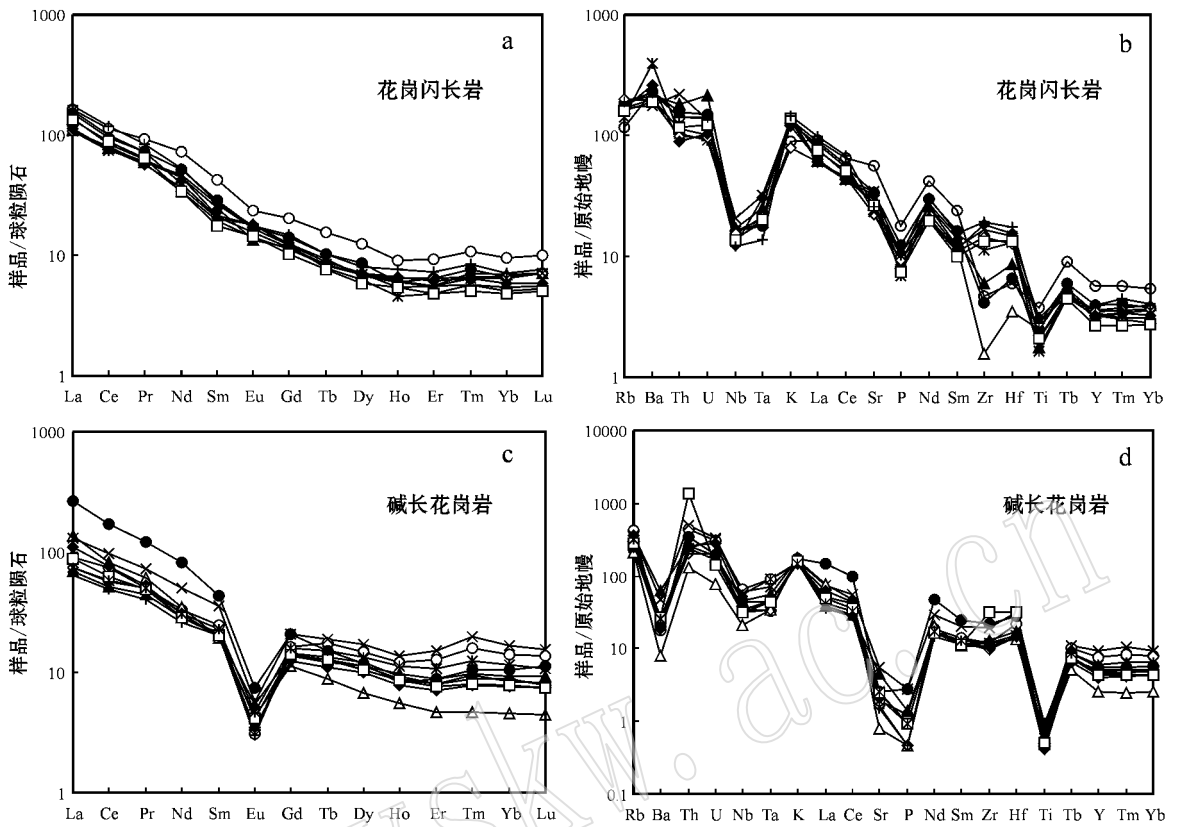


图 5 天柱山岩体的稀土元素球粒陨石标准化曲线和不相容元素原始地幔标准化蛛网图

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle normalized incompatible element patterns of Tianzhushan intrusive body
资料来源同图 4
data sources as for Fig. 4

科学院造山带与地壳演化教育部重点实验室进行。激光剥蚀使用的是德国相干公司(Coherent)准分子激光器 COMPex Pro102, 激光条件为: 激光束斑 32 μm , 激光能量密度 20 J/cm^2 , 频率 5 Hz, 使用纯度为 99.999% 的 He 作为载气将激光剥蚀出来的物质带入等离子体质谱。质谱分析采用美国安捷伦科技有限公司电感耦合等离子体质谱仪 Agilent ICP-MS 7500ce, 功率 1500 W, 冷却气 15 L/min, 辅助气 1 L/min, 载气 0.96 L/min, 积分时间 ^{49}Ti 、 ^{207}Pb 为 50 ms, ^{204}Pb 、 ^{206}Pb 、 ^{208}Pb 、 ^{232}Th 、 ^{238}U 为 20 ms, 其余同位素为 10 ms。信号采集时间共 75 s, 采集信号前先用激光剥蚀 3 s 以去除样品表面可能存在的污染, 在进行 15 s 的空白信号采集后开始触发激光采集样品信号。每 4 个未知样测试 1 个 TEMORA 锆石标样, 每 8 个未知样测试 1 个 NIST 610 玻璃标样。数据处理先应用西澳大学的 Glitter 软件获得微量元素含量及 U-Pb 同位素比值, 微量元素的含量以 Si 元素为内标, 以 NIST 610 为外标, U-Pb 同位素比值的确

定采用 TEMORA 锆石标样 (417 Ma) 进行元素间的分馏校正, 由于锆石中 ^{204}Pb 的含量极低, 因此未进行普通铅的校正。U-Pb 谐和年龄是根据同位素比值应用 Ludwig (2001) 的 Isoplot 程序得到的。

花岗闪长岩 (TZS-05) 中的锆石如同大多数花岗岩岩石中常见到的锆石那样呈自形柱状, 长/宽比一般 1/2 到 1/3。锆石晶体内部发育有密集的震荡生长环带, 大多数锆石晶体的内部还见有较多的矿物包裹体 (图 6)。

碱长花岗岩 (TZS-02) 中的锆石大多具有较高的 U 含量。由于高放射性, 许多锆石颗粒受到较强的放射性损伤, 主要表现为裂隙普遍发育。图 6 显示, 天柱山花岗岩中的锆石形态为短柱状, 长/宽比一般 1/1~2/1。与柱面相比, 锥面总体不发育。这些锆石晶体的内部普遍发育有生长环带, 显示其岩浆成因的特点。大多数锆石内部含有细小的矿物包裹体, 其成分与岩石中的主要矿物一致, 主要为黑云母和钾长石等。

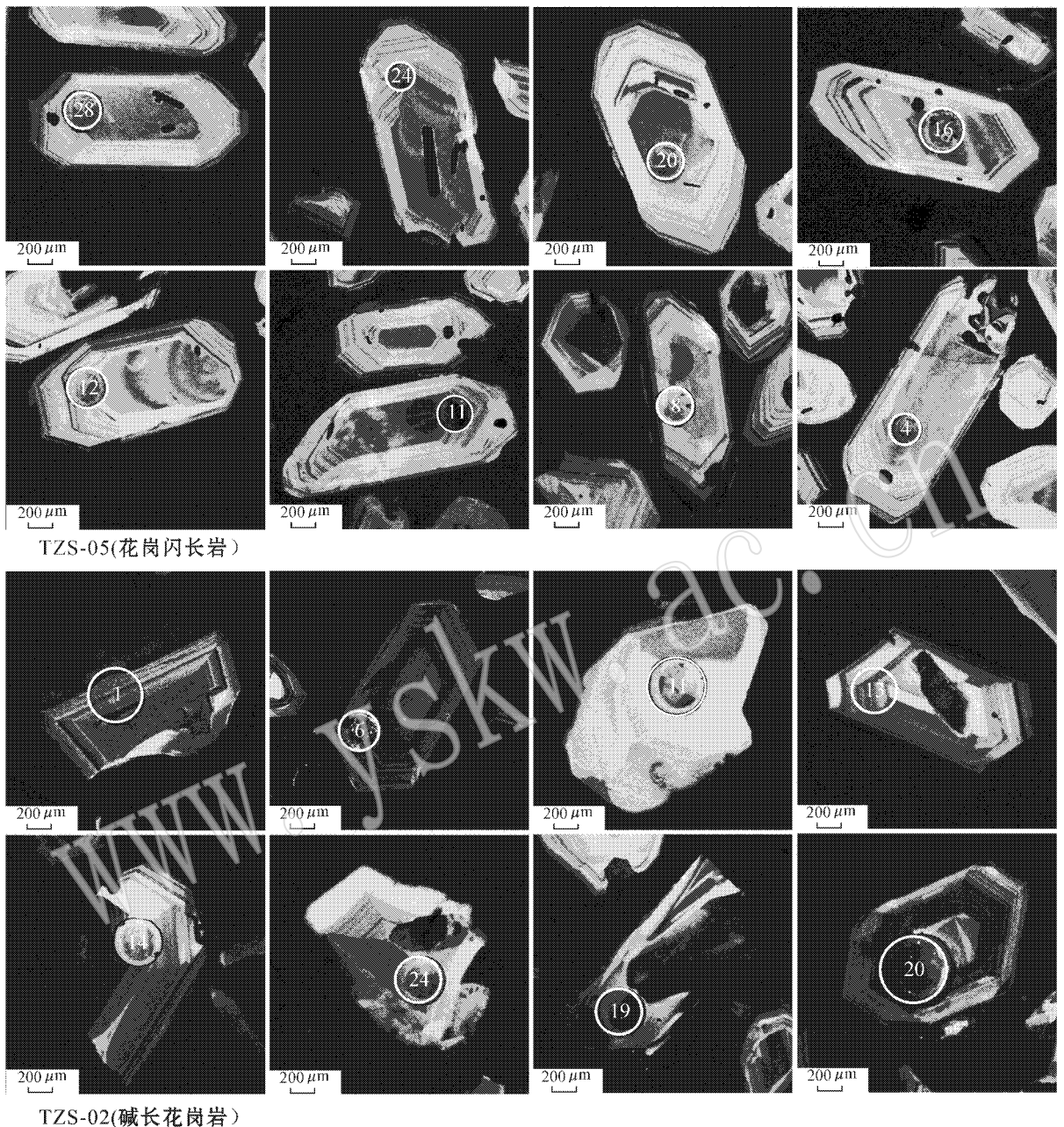


图 6 天柱山岩体中部分锆石的阴极发光 (CL) 照片

Fig. 6 CL images of zircons from Tianzhushan intrusive body

3.2 分析结果

表 2 为天柱山岩体中锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果。这两个样品中锆石分析点的 Th/U 比值均大于 0.5 (绝大多数颗粒的 Th/U 比值大于 1.0), 结合这些锆石晶体的形貌和内部结构, 可以确定它们均为岩浆成因。

本次研究共对花岗闪长岩(样品 TZS-05)中的

34 颗锆石进行了年龄分析, 其中分析点 3 和分析点 33 为继承锆石, 分析点 13 和分析点 19 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄分别为 $141 \pm 3 \text{ Ma}$ 和 $137 \pm 2 \text{ Ma}$, 明显高于其他分析点的年龄。剩余 30 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄差别不大, 它们的加权平均年龄为 $127.8 \pm 0.7 \text{ Ma}$ 。该年龄可代表天柱山岩体早期花岗闪长岩的侵位时间(图 7)。

表 2 天柱山岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果

Table 2 LA-ICP-MS analytical results of zircons from Tianzhushan intrusive body

花岗岩长岩(TZS-05)	$\alpha_{\text{Pb}}/10^{-6}$				比值				年龄							
	Th	U	Pb	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		
TZS05-01	136.65	122.07	3.55	1.12	0.063 51	0.03 78	0.176 31	0.010 07	0.020 15	0.000 36	0.007 04	0.000 25	725.2 ± 121.36	128.6 ± 2.25	164.9 ± 8.69	141.8 ± 5.09
TZS05-02	340.53	162.51	5.67	2.10	0.072 44	0.02 89	0.201 58	0.007 66	0.020 19	0.000 27	0.006 5	0.000 15	998.2 ± 79.12	128.9 ± 1.73	186.5 ± 6.47	131.0 ± 3.02
TZS05-03	81.18	99.62	15.50	0.81	0.065 81	0.001 82	1.063 59	0.027 98	0.117 23	0.001 29	0.038 78	0.000 96	800.4 ± 57.03	714.9 ± 7.44	735.6 ± 13.77	769.0 ± 18.71
TZS05-04	152.65	118.05	3.41	1.29	0.049 11	0.002 8	0.135 5	0.007 52	0.020 02	0.000 28	0.006 25	0.000 18	153.1 ± 128.16	127.8 ± 1.76	129.0 ± 6.72	126.0 ± 3.58
TZS05-05	198.33	140.32	4.14	1.41	0.057 68	0.02 77	0.158 39	0.007 35	0.019 93	0.000 27	0.006 11	0.000 17	517.4 ± 102.30	127.2 ± 1.69	149.3 ± 6.44	123.1 ± 3.32
TZS05-06	141.66	110.31	3.39	1.28	0.073 35	0.003 19	0.204 86	0.008 54	0.020 27	0.000 28	0.007 16	0.000 19	1 023.6 ± 85.63	129.3 ± 1.74	189.2 ± 7.20	144.1 ± 3.88
TZS05-07	178.74	112.02	3.65	1.60	0.078 83	0.003 41	0.217 54	0.008 97	0.020 02	0.000 28	0.007 04	0.000 18	1 167.9 ± 83.33	127.8 ± 1.80	193.9 ± 7.48	141.9 ± 3.71
TZS05-08	96.26	89.99	2.60	1.07	0.069 52	0.003 63	0.191 49	0.009 63	0.019 99	0.000 31	0.007 17	0.000 23	914.1 ± 104.03	127.6 ± 1.94	177.9 ± 8.21	144.3 ± 4.68
TZS05-09	145.66	126.30	3.73	1.15	0.064 43	0.003 15	0.177 9	0.008 38	0.020 04	0.000 28	0.007 29	0.000 21	755.9 ± 99.95	127.9 ± 1.80	166.2 ± 7.23	146.8 ± 4.23
TZS05-10	326.48	142.66	4.83	2.29	0.050 65	0.003 1	0.135 75	0.008 11	0.019 45	0.000 28	0.006	0.000 15	225.1 ± 135.55	124.2 ± 1.77	129.2 ± 7.25	121.0 ± 2.99
TZS05-11	123.30	122.61	3.48	1.01	0.051 4	0.02 76	0.142 42	0.007 43	0.020 11	0.000 27	0.007 36	0.000 22	258.6 ± 118.59	128.3 ± 1.71	135.2 ± 6.61	148.1 ± 4.36
TZS05-12	131.57	112.31	3.28	1.17	0.072 28	0.003 42	0.197 86	0.008 99	0.019 86	0.000 29	0.006 88	0.000 21	993.8 ± 93.43	126.8 ± 1.82	183.3 ± 7.62	138.6 ± 4.13
TZS05-13	56.89	61.34	2.38	0.93	0.185 42	0.007 84	0.564 22	0.021 29	0.022 08	0.000 45	0.013 88	0.000 49	2 702.0 ± 68.12	140.8 ± 2.81	454.3 ± 13.82	278.6 ± 9.80
TZS05-14	145.54	133.49	3.77	1.09	0.058 92	0.003 05	0.159 95	0.007 97	0.019 7	0.000 29	0.006 9	0.000 22	564.1 ± 108.78	125.8 ± 1.85	150.7 ± 6.98	139.0 ± 4.41
TZS05-15	114.82	92.12	2.94	1.25	0.094 58	0.004 57	0.262 21	0.011 95	0.020 12	0.000 34	0.008 02	0.000 26	1 519.7 ± 88.40	128.4 ± 2.16	236.4 ± 9.61	161.5 ± 5.21
TZS05-16	532.20	224.77	8.68	2.37	0.106 52	0.003 77	0.293 27	0.009 58	0.019 98	0.000 29	0.007 09	0.000 17	1 740.7 ± 63.48	127.5 ± 1.86	261.1 ± 7.52	142.7 ± 3.43
TZS05-17	116.52	121.15	3.50	0.96	0.073 23	0.003 45	0.200 65	0.009 05	0.019 88	0.000 3	0.007 95	0.000 26	1 020.4 ± 92.68	126.9 ± 1.87	185.7 ± 7.66	160.1 ± 5.15
TZS05-18	152.65	127.41	3.86	1.20	0.077 21	0.003 1	0.211 48	0.008 12	0.019 88	0.000 26	0.007 5	0.000 2	1 126.7 ± 78.00	126.9 ± 1.62	194.8 ± 6.81	151.1 ± 4.05
TZS05-19	144.79	125.99	4.13	1.15	0.088 42	0.004 15	0.258 91	0.011 48	0.021 25	0.000 35	0.008 5	0.000 28	1 391.5 ± 87.33	135.6 ± 2.21	233.8 ± 9.26	171.1 ± 5.52
TZS05-20	190.43	143.34	4.23	1.33	0.058 34	0.02 63	0.159 56	0.006 93	0.019 85	0.000 26	0.006 44	0.000 18	542.7 ± 95.65	126.7 ± 1.67	150.3 ± 6.07	129.7 ± 3.61
TZS05-21	147.48	109.98	3.73	1.34	0.105 48	0.003 95	0.298 97	0.010 43	0.020 57	0.000 3	0.008 42	0.000 24	1 722.6 ± 67.21	131.3 ± 1.92	265.6 ± 8.15	169.4 ± 4.73
TZS05-22	140.11	107.95	3.45	1.30	0.100 05	0.005 33	0.282 73	0.014 12	0.020 51	0.000 4	0.007 29	0.000 28	1 624.9 ± 95.98	130.9 ± 2.55	252.8 ± 11.18	146.7 ± 5.60
TZS05-23	189.65	137.19	4.26	1.38	0.069 25	0.02 94	0.191 4	0.007 8	0.020 06	0.000 27	0.006 98	0.000 19	906.2 ± 85.22	128.0 ± 1.68	177.8 ± 6.65	140.7 ± 3.81
TZS05-24	121.88	117.80	3.58	1.03	0.085 24	0.003 74	0.236 26	0.009 79	0.020 11	0.000 31	0.008 31	0.000 27	1 320.9 ± 82.73	128.4 ± 1.97	215.4 ± 8.04	167.3 ± 5.33
TZS05-25	246.81	157.11	5.00	1.57	0.069 27	0.02 99	0.191 31	0.007 9	0.020 04	0.000 28	0.006 65	0.000 18	906.9 ± 86.58	127.9 ± 1.76	177.7 ± 6.73	134.1 ± 3.67
TZS05-26	123.34	109.95	3.13	1.12	0.053 03	0.02 79	0.146 82	0.007 5	0.020 09	0.000 27	0.006 5	0.000 2	330.0 ± 114.83	128.2 ± 1.72	139.1 ± 6.64	130.9 ± 4.03
TZS05-27	114.19	113.74	3.28	1.00	0.065 24	0.003 81	0.180 85	0.010 1	0.020 12	0.000 36	0.007 39	0.000 29	782.2 ± 118.04	128.4 ± 2.28	168.8 ± 8.69	148.9 ± 5.74
TZS05-28	141.46	119.07	3.52	1.19	0.072 28	0.003 26	0.196 67	0.008 52	0.019 74	0.000 27	0.007 01	0.000 21	993.9 ± 89.15	126.0 ± 1.73	182.3 ± 7.23	141.3 ± 4.23
TZS05-29	115.30	96.59	3.04	1.19	0.088 53	0.004 54	0.244 88	0.011 95	0.020 07	0.000 34	0.008 06	0.000 27	1 394.1 ± 95.39	128.1 ± 2.15	222.4 ± 9.75	162.3 ± 5.43
TZS05-30	114.31	105.34	3.24	1.09	0.078 86	0.003 37	0.221 27	0.009 02	0.020 36	0.000 28	0.008 08	0.000 24	1 168.6 ± 82.34	129.9 ± 1.79	203.0 ± 7.50	162.8 ± 4.85

续表 2
Continued Table 2

	$w_B/10^{-6}$				年龄																
	Th		Pb		Th/U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		比值		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		
	Th	U	Th	Pb	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$\pm 1\sigma$		
花岗岩类岩(TZS-05)																					
TZS05-31	202.20	139.97	4.26	1.44	0.058 88	0.003 1	0.161 54	0.008 2	0.019 91	0.000 3	0.006 45	0.000 2	0.000 2	127.1±1.91	152.0±7.17	129.9±4.04					
TZS05-32	266.29	163.05	5.76	1.63	0.118 89	0.004 29	0.329 15	0.010 92	0.020 09	0.000 31	0.007 81	0.000 23	0.000 23	128.2±1.96	288.9±8.34	157.2±4.52					
TZS05-33	110.00	69.91	11.71	1.57	0.067 49	0.002 16	0.990 83	0.030 25	0.106 53	0.001 28	0.033 95	0.000 87	0.000 87	652.6±7.47	699.1±15.43	674.9±16.94					
TZS05-34	111.62	105.27	3.16	1.06	0.081 66	0.003 47	0.226 08	0.009 15	0.020 09	0.000 29	0.007 75	0.000 25	0.000 25	128.2±1.81	207.0±7.58	156.1±4.92					
碱长花岗岩(TZS-02)																					
TZS02-01	172.68	122.45	3.87	1.41	0.057 61	0.003 2	0.163 9	0.008 8	0.020 64	0.000 32	0.007 39	0.000 21	0.000 21	131.7±2.01	154.1±7.68	148.7±4.15					
TZS02-02	711.17	1218.28	30.84	0.58	0.052 88	0.000 76	0.149 59	0.001 97	0.020 53	0.000 15	0.006 92	0.000 11	0.000 11	131.0±0.96	141.6±1.74	139.3±2.25					
TZS02-03	845.09	999.11	27.06	0.85	0.060 11	0.000 99	0.167 9	0.002 55	0.020 27	0.000 16	0.007 11	0.000 12	0.000 12	129.4±1.01	157.6±2.22	143.1±2.34					
TZS02-04	946.66	433.77	14.39	2.18	0.052 5	0.001 66	0.141 16	0.004 27	0.019 51	0.000 21	0.006 12	0.000 11	0.000 11	124.6±1.32	134.1±3.80	123.2±2.23					
TZS02-05	648.67	744.13	19.81	0.87	0.053 68	0.001 17	0.148 31	0.003 05	0.020 05	0.000 18	0.006 75	0.000 13	0.000 13	128.0±1.11	140.4±2.70	136.0±2.53					
TZS02-06	1852.38	2555.25	65.38	0.73	0.049	0.000 59	0.156 32	0.001 47	0.020 19	0.000 14	0.006 54	0.000 1	0.000 1	128.8±0.90	129.8±1.31	131.7±1.93					
TZS02-07	532.56	613.23	15.66	0.87	0.051 75	0.001 39	0.137 88	0.003 53	0.019 33	0.000 19	0.006 41	0.000 14	0.000 14	123.4±1.18	131.2±3.15	129.1±2.71					
TZS02-08	1001.75	1684.75	40.39	0.59	0.049 4	0.000 75	0.133 64	0.001 87	0.019 63	0.000 15	0.006 14	0.000 1	0.000 1	125.3±0.93	127.4±1.68	123.6±2.07					
TZS02-09	1785.64	2748.06	66.89	0.65	0.049 67	0.000 6	0.133 55	0.001 45	0.019 51	0.000 14	0.006 37	0.000 1	0.000 1	124.6±0.87	127.3±1.30	128.3±1.92					
TZS02-10	105.93	90.30	2.67	1.17	0.050 12	0.005 58	0.139 17	0.015 11	0.020 15	0.000 52	0.007 58	0.000 37	0.000 37	128.6±3.28	132.3±13.46	152.7±7.50					
TZS02-11	114.77	56.44	2.14	2.03	0.117 38	0.007 91	0.327 73	0.020 69	0.020 26	0.000 5	0.007 89	0.000 28	0.000 28	129.3±3.16	287.8±15.82	158.9±5.66					
TZS02-12	287.22	145.14	5.14	1.98	0.084 47	0.002 99	0.235 4	0.007 88	0.020 22	0.000 26	0.007 16	0.000 15	0.000 15	129.1±1.61	214.6±6.48	144.1±3.00					
TZS02-13	254.65	337.71	8.63	0.75	0.052 28	0.001 43	0.143 27	0.003 75	0.019 89	0.000 19	0.006 51	0.000 14	0.000 14	126.9±1.19	136.0±3.33	131.2±2.89					
TZS02-14	140.36	64.63	2.48	2.17	0.095 43	0.006 01	0.268 74	0.016 12	0.020 44	0.000 41	0.007 65	0.000 23	0.000 23	130.4±2.61	241.7±12.90	154.0±4.54					
TZS02-15	1366.70	2051.34	51.81	0.67	0.049 65	0.000 6	0.138 1	0.001 5	0.020 18	0.000 14	0.006 48	0.000 1	0.000 1	128.8±0.90	131.4±1.33	130.5±1.97					
TZS02-16	1359.91	411.87	24.77	3.30	0.212 6	0.005 94	0.733 37	0.017 53	0.025 03	0.000 39	0.009 37	0.000 19	0.000 19	159.4±2.46	558.5±10.27	188.5±3.85					
TZS02-17	833.90	937.19	27.56	0.89	0.092 15	0.001 43	0.255 9	0.003 57	0.020 15	0.000 17	0.008 68	0.000 15	0.000 15	128.6±1.05	231.4±2.88	174.8±2.94					
TZS02-18	487.21	289.62	8.75	1.68	0.062 07	0.001 83	0.159 86	0.004 48	0.018 69	0.000 19	0.006 42	0.000 12	0.000 12	119.4±1.21	150.6±3.93	129.3±2.43					
TZS02-19	1709.98	786.84	27.74	2.17	0.055 88	0.001 2	0.154 49	0.003 11	0.020 06	0.000 18	0.006 73	0.000 11	0.000 11	128.0±1.11	145.9±2.74	135.5±2.18					
TZS02-20	2008.05	756.61	29.11	2.65	0.054 61	0.001 25	0.151 77	0.003 27	0.020 17	0.000 18	0.006 72	0.000 11	0.000 11	128.7±1.14	143.5±2.88	135.5±2.16					
TZS02-21	111.07	54.43	2.17	2.04	0.149 79	0.007 61	0.422 34	0.019 65	0.020 46	0.000 44	0.008 27	0.000 26	0.000 26	130.6±2.77	357.7±14.03	166.4±5.21					
TZS02-22	139.76	71.01	2.70	1.97	0.112 31	0.006 73	0.323 3	0.018 15	0.020 89	0.000 46	0.007 81	0.000 27	0.000 27	133.3±2.92	284.4±13.93	157.2±5.38					
TZS02-23	399.41	205.04	7.15	1.95	0.081 77	0.002 48	0.222 68	0.006 34	0.019 76	0.000 23	0.007 16	0.000 14	0.000 14	126.1±1.47	204.1±5.27	144.2±2.9					
TZS02-24	181.00	80.19	3.01	2.26	0.086 4	0.004 82	0.240 46	0.012 77	0.020 2	0.000 37	0.007 12	0.000 2	0.000 2	128.9±2.33	218.8±10.45	143.4±3.99					
TZS02-25	511.76	157.44	6.67	3.25	0.077 08	0.002 99	0.212 89	0.007 82	0.020 04	0.000 27	0.006 6	0.000 13	0.000 13	127.9±1.74	196.0±6.54	132.9±2.68					
TZS02-26	355.25	151.95	6.21	2.34	0.108 25	0.003 94	0.326 47	0.011 01	0.021 88	0.000 33	0.007 06	0.000 19	0.000 19	139.6±2.06	286.9±8.43	142.1±3.89					

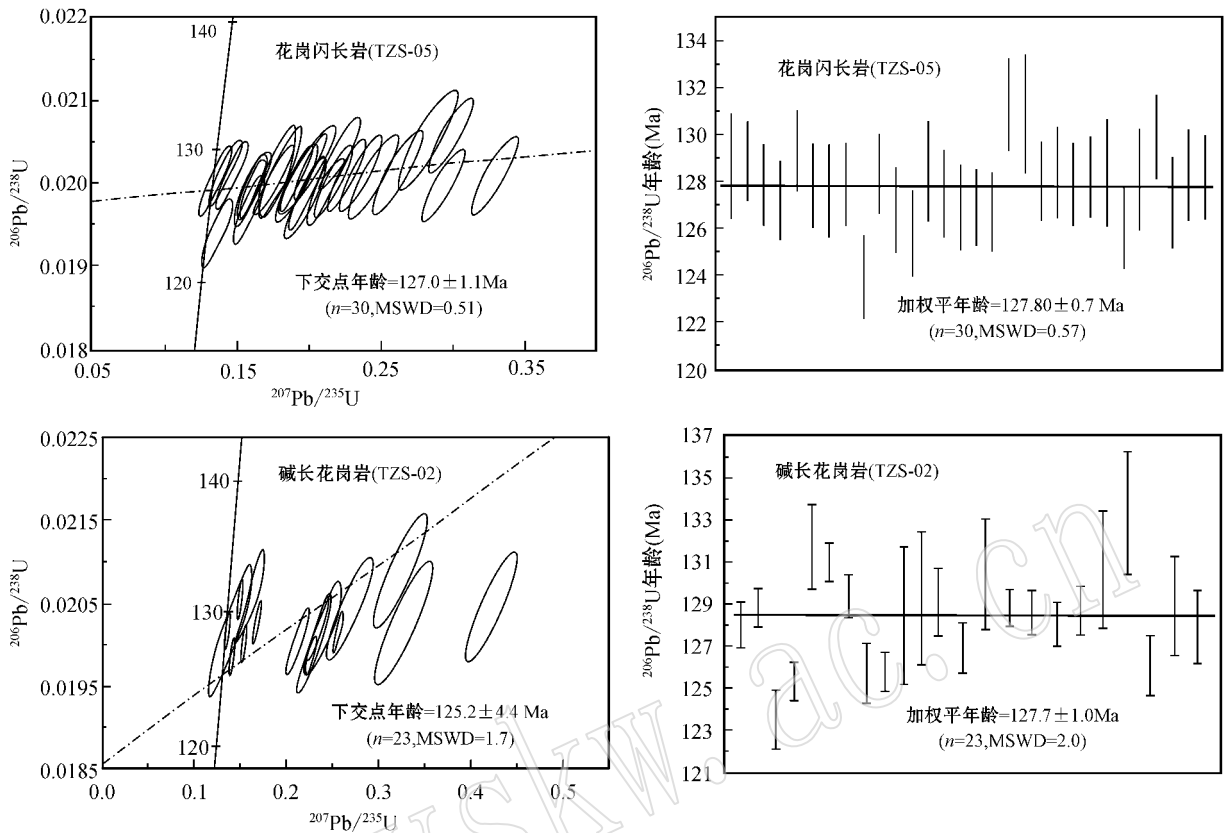


图7 天柱山岩体的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 柱状图

Fig. 7 Concordia diagrams showing LA-ICP-MS analytical points for zircons from Tianzhusan intrusive body

对碱长花岗岩(样品 TZS-02)中的 26 颗锆石进行了年龄分析,其中分析点 16 和 26 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄分别为 159 ± 2 Ma 和 140 ± 2 Ma,明显高于其他分析点的年龄。分析点 18 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 118 ± 1 Ma,明显低于其他分析点的年龄。剩余 23 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄差别不大,它们的加权平均年龄为 127.7 ± 1.0 Ma(图 7)。该年龄与花岗闪长岩的年龄几乎完全一致,这与图 3a 所反映的后期岩浆侵位时,先期侵位的岩浆还没有完全固结的现象是吻合的,表明整个天柱山岩体是在很短的时间内侵位的。该年龄也与赵子福等(2004)获得的 132 ± 2 Ma(SHRIMP 锆石 U-Pb 法)和 Ge 等(1998)获得的 127 ± 8 Ma(TIMs 锆石 U-Pb 法)年龄值在误差范围内近似。

4 讨论

广泛分布于大别造山带内的晚中生代(燕山期)花岗岩类侵入体,它们的成分变化范围总体与天柱山岩体类似,普遍具有高钾和相对富碱的特征。在

$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 分类图上,这些岩体主要落在石英正长岩和花岗岩区域,其次为二长岩和正长岩,少数为英云闪长岩(图 8a)。它们在 QAP 分类图上主要落在正长花岗岩区域,其次为二长花岗岩、碱长花岗岩以及石英正长岩和石英二长岩(图 8b)。在微量元素地球化学性质上,大别造山带内的燕山期花岗岩类可分为两类:一部分岩石表现出高 Sr、Ba,亏损重稀土元素和 Y 的地球化学特征,类似于埃达克质岩石。但大多数岩体的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值大于 1,仅少部分岩体的 Na_2O 丰度大于 K_2O ,表现出与由年轻俯冲板片部分熔融形成的典型埃达克岩的差别。另一类则属于正常的 I 型花岗岩类(图 8c、8d)。部分学者根据这些花岗岩类岩石的变形与否分为早(~ 132 Ma)、晚两期(~ 128 Ma),前者以变形的石英二长岩和二长花岗岩为主,类似于埃达克质岩石,形成于加厚地壳(< 50 km)的部分熔融;后者主要为未变形的二长花岗岩、钾长花岗岩,形成时地壳已减薄到约 35 km(如 Xu *et al.*, 2007; 续海金等 2008)。但从图 1 可以看出,发育在大别造山带内的晚中生代岩浆活动并没有明显的分期性,不同部位(或不同复式岩体)

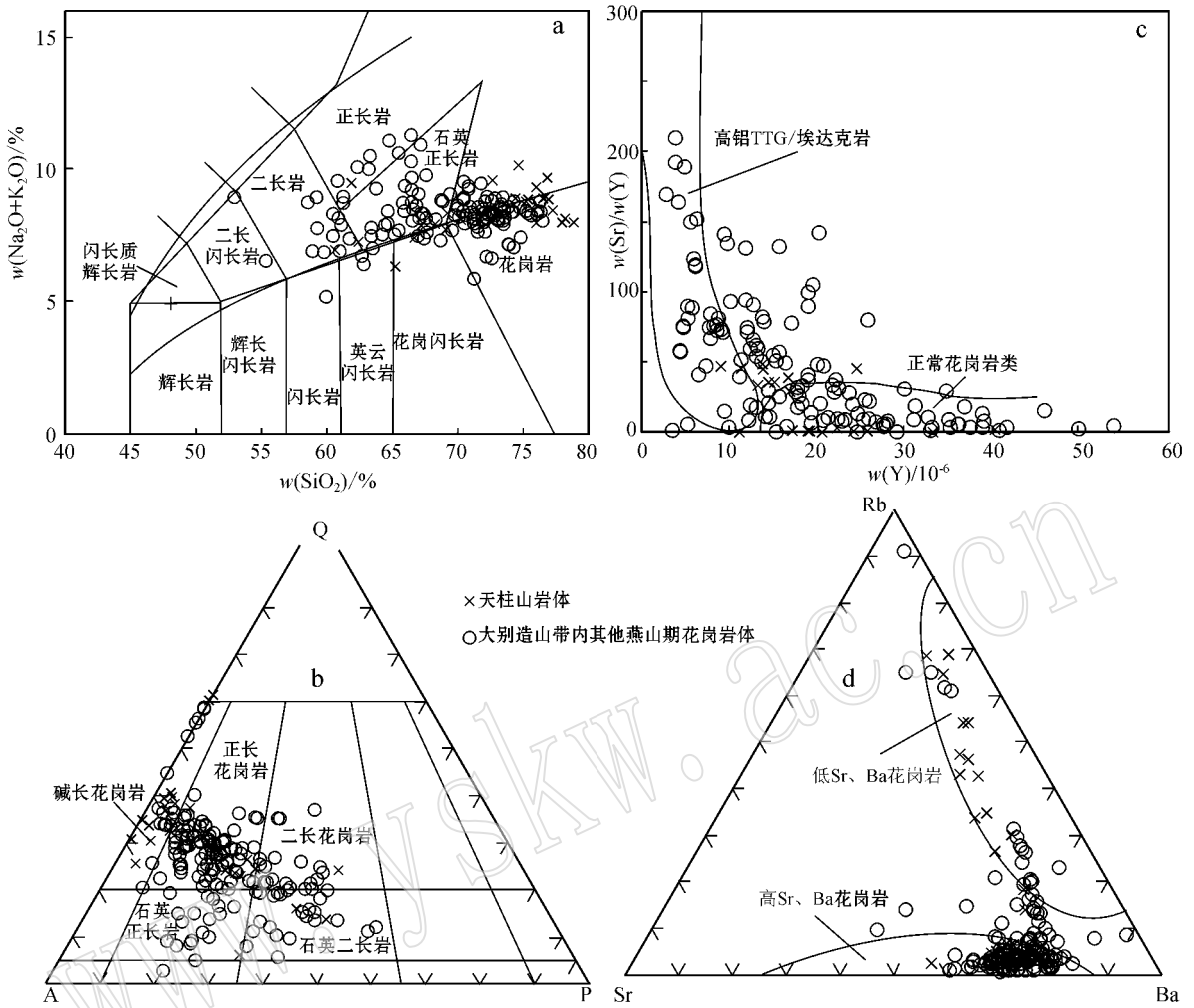


图 8 大别造山带燕山期花岗岩类侵入体的成分分类图

Fig. 8 Classification for the late Mesozoic granitoids in the Dabie orogen

资料来源:李石等,1991;周泰禧等,1995;金成伟等,1998;路玉林等,1999;马昌前等,1999,2003;魏春景等,2000;潘国强等,2001;王强等,2001;周承福等,2001;赵新福等,2007;钱存超等,2004;徐小军等,2005;王超等,2010;熊富浩等,2010;Ma et al., 1998; Chen et al., 2002;Huang et al., 2006;Xu et al., 2007;Wang et al., 2007;Zhao et al., 2007

Sources of data: Li Shi et al., 1991; Zhou Taixi et al., 1995; Jin Chengwei et al., 1998; Lu Yulin et al., 1999; Ma Changqian et al., 1999, 2003; Wei Chunjing et al., 2000; Pan Guoqiang et al., 2001; Wang Qiang et al., 2001; Zhou Chengfu et al., 2001; Zhao Xinfu et al., 2007; Qian Cunchao et al., 2004; Xu Xiaojun et al., 2005; Wang Chao et al., 2010; Xiong Fuhao et al., 2010; Ma et al., 1998; Chen et al., 2002; Huang et al., 2006; Xu et al., 2007; Wang et al., 2007; Zhao et al., 2007

两种类型的岩浆作用可能具有穿时性。

至于大别造山带内燕山期花岗岩形成的构造环境,部分学者认为属于后碰撞环境(如 Chen et al., 2002; Huang et al., 2007; Xu et al., 2007),它们形成于造山带加厚岩石圈构造垮塌所引起的部分熔融(如夏群科等,2003;郑永飞,2008;Xu et al., 2007)。另一部分学者认为晚中生代的岩浆作用与晚三叠世的造山作用之间没有关系,而是与太平洋板块与亚洲大陆相互作用(如桑隆康等,2000)或拉

张环境下的壳-幔相互作用有关,最可能与早白垩世中国东部广泛存在的岩石圈减薄有关(如戴圣潜等,2003;Yang et al., 2005)。

但与大别造山带内其他燕山期花岗岩类侵入体以高 Sr-Ba 占绝对优势不同,天柱山岩体除个别样品外,主要属低 Sr-Ba 花岗岩,地球化学特征也显示其岩浆与富钙斜长石、角闪石、钛铁矿/榍石、贫石榴石的残留相处于平衡状态,指示其形成可能与广泛存在于中国东部的晚中生代岩石圈减薄事件有关。

图 9a 可以看出,天柱山岩体与大别山造山带内的其他燕山期花岗岩类侵入体一样,具有非常类似的 Sr 和 Nd 同位素组成,表现为较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值(主要介于 0.706~0.710 之间)和低的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值(一般介于 -15~-25 之间),它们的 Nd 同位素模式年龄主要介于 2.0~2.6 Ga 之间,指示它们可

能主要为古老的下地壳物质再循环的产物。不同类型的岩石的岩浆源区类似,它们之间地球化学性质的差异主要是部分熔融过程中残留相的不同以及后期分异演化程度的不同。部分岩浆的形成过程中可能有地幔组分加入。

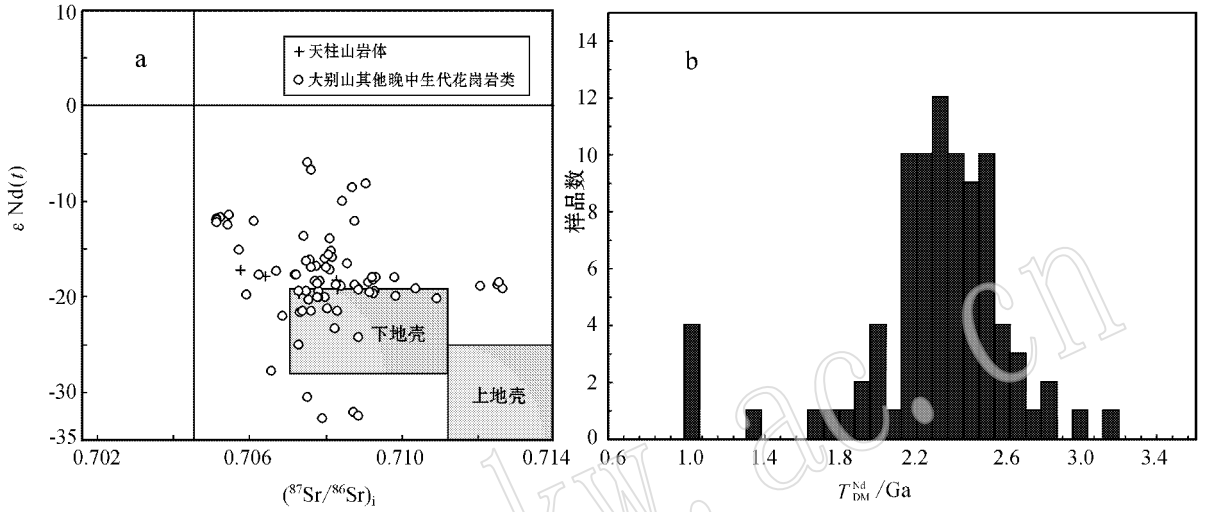


图 9 大别造山带燕山期花岗岩类侵入体的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ -($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 关系图 (a) 和 Nd 同位素模式年龄直方图 (b)
 Fig. 9 Diagram of $\epsilon\text{Nd}(t)$ -($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) and frequencies of Nd isotopic model ages for late Mesozoic granitoids in the Dabie orogen

资料来源: 谢智等, 1996; 王强等, 2000; 魏春景等, 2000; 葛宁洁等, 2001; 徐晓军等, 2005; 赵新福等, 2007; 周红升等, 2009; 熊富浩等, 2010; Ma et al., 1998; Chen et al., 2002; Zhang et al., 2002
 Sources of data: Xie Zhi et al., 1996; Wang Qiang et al., 2000; Wei Chunjing et al., 2000; Ge Ningjie et al., 2001; Xu Xiaojun et al., 2005; Zhao Xinfu et al., 2007; Zhou Hongsheng et al., 2009; Xiong Fuhao et al., 2010; Ma et al., 1998; Chen et al., 2002; Zhang et al., 2002

5 结论

天柱山岩体是个由多期次侵位构成的复式岩体,主体为花岗闪长岩和碱长花岗岩,两者的侵位时间相近,分别为 $127.8 \pm 0.7 \text{ Ma}$ 和 $127.7 \pm 1.0 \text{ Ma}$;

天柱山岩体中的碱长花岗岩属高度演化的 I 型花岗岩,可由石英闪长质/花岗闪长质岩浆通过以斜长石为主的矿物分离结晶演化而来;

天柱山花岗岩类的成因与整个大别山造山带内晚中生代的花岗岩类似,主要是由古老的下地壳物质部分熔融形成,可能有少量地幔组分的加入,由石英二长质/花岗闪长质岩浆通过高度分异形成碱长花岗岩岩浆。

References

Baker D R and Vaillancourt J. 1995. The low viscosities of F + H₂O

bearing granitic melts and implications for melt extraction and transport [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 132: 199~211.
 Bryant D L, Ayers J C, Gao S, et al. 2004. Geochemical, age, and isotopic constraints on the location of the Sino-Korean/Yangtze Suture and evolution of the Northern Dabie Complex, east central China [J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 116: 698~717.
 Chen B, Jahn B M and Wei C J. 2002. Petrogenesis of Mesozoic granitoids in the Dabie UHP complex, Central China: trace element and Nd-Sr isotope evidence [J]. *Lithos*, 60: 67~88.
 Chen Jiangfeng, Xie zhi, Liu Shunsheng, et al. 1995. Cooling age of Dabie orogen, China, determined by ⁴⁰Ar-³⁹Ar and fission track technique [J]. *Science in China (Series B)*, 25(10): 1 086 ~ 1 092.
 Chen Tingyu, Niu Baogui, Liu Zhigang, et al. 1991. Geochronology of Yanshanian magmatism and metamorphism in the hinterland of the Dabie Mountains and their geological significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 64(4): 329~336 (in Chinese with English abstract).
 Dai Shengqian, Deng jinfu, Wu Zongxu, et al. 2003. Evidence of magmatic petrology for the Yanshanian orogeny in the Dabie orogen [J]. *Geology in China*, 30(2): 159~165 (in Chinese with English abstract).
 Ge N, Wu W, Liu B, et al. 1998. U-Pb zircon ages of Tianzhushan

- granites in the eastern Dabie orogen and their geological implications [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 7(4): 521~525.
- Ge Ningjie, Hou Zhenhui, Li Huimin, *et al.* 1999. Zircon U2Pb age of the Shacun gabbro body, Yuexi, Dabie orogen and its geological implications [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 45(1): 74~79 (in Chinese).
- Ge Ningjie, Li Huiyu, Hou Zhenhui, *et al.* 2001. Nd-Sr isotope geochemistry of the baimajian granite in the Dabie orogen [J]. *Geological Review*, 47(2): 184~187 (in Chinese with English abstract).
- Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, *et al.* 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China [J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 161: 215~230.
- Hou Zhenhui and Li Shuguang. 2003. Comparisons of TIMS and SIMS zircon U-Pb ages of the ultrahigh pressure metamorphic and mafic igneous rocks in the Dabie mountains [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(3): 490~496 (in Chinese with English abstract).
- Huang Fang, Li Shuguang, Dong Feng, *et al.* 2007. Recycling of deeply subducted continental crust in the Dabie Mountains, central China [J]. *Lithos*, 96: 151~169.
- Huang Jie, Zheng Yongfei, Zhao Zifu, *et al.* 2006. Melting of subducted continent: Element and isotopic evidence for a genetic relationship between Neoproterozoic and Mesozoic granitoids in the Sulu orogen [J]. *Chemical Geology*, 229: 227~256.
- Jin Chengwei and Zheng Xiangshen. 1998. Petrology and Genesis of Yuexi Granitoids in eastern Dabie, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14(4): 493~502 (in Chinese with English abstract).
- Li Shi and Wang Tong. 1991. Geochemistry of Granitoid from Tongbai-Dabie Mountain [M]. Wuhan: China University of Geoscience Press (in Chinese with English abstract).
- Li Shuguang, Hong Ji'an, Li Huimin, *et al.* 1999. U-Pb zircon ages of the pyroxenite-gabbro intrusions in Dabie mountains and their geological implications [J]. *Geological Journal of China Universities*, 5(3): 351~355 (in Chinese with English abstract).
- Liu Dunyi, Tang Jiafu, Zhou Cunting, *et al.* 2002. U-Pb zircon dating and its geological significance of the Taoyuanzhai volcanic rock, central Dabie orogenic belt [J]. *Acta Geologica Sinica*, 76(2): 217~221 (in Chinese with English abstract).
- Lu Yulin, Qian Cunchao and Jia Shijun. 1999. The petrologica features and genesis of the Tuanling granite intrusive in the Dabie mountains, Anhui [J]. *Geology of Anhui*, 9(3): 172~177 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2001. Users Manual for Isoplot/Ex (rev. 2.49): A Geochronologica Toolkit for Microsoft Excel [A]. Special Publication [C]. Berkeley Geochronology Center, la: 1~55.
- Ma C Q, Li Z C, Ehlers C, *et al.* 1998. A post-collisional magmatic plumbing system: Mesozoic granitoid plutons from the Dabieshan high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic zone, east-central China [J]. *Lithos*, 45: 431~456.
- Ma Changqian, Yang Kunguang, Xu Changhai, *et al.* 1999. Mesozoic potassic magmatism in the Dabie Mountains: Implication for exhumation mechanism of ultrahigh-pressure metamorphic terranes [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(3): 379~395 (in Chinese with English abstract).
- Martin R F. 2006. A-type granites of crustal origin ultimately result from open-system fenitization-type reactions in an extensional environment [J]. *Lithos*, 91: 125~136.
- Pan Guoqiang, Lu Xiancai and Yu Hangbo. 2001. Petrological and geochemical characteristics of Mesozoic adakite from northern Huaiyang and discussion on its genesis [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 541~550 (in Chinese with English abstract).
- Peng Yaming, Pan Guoqiang and Ye Youqing. 1994. A research on the Tianzhushan granites in Dabieshan orogenic belt [J]. *Journal of Nanjing University*, 6(4): 326~333 (in Chinese with English abstract).
- Qian Cunchao, Lu Yulin and Liu Lili. 2004. Geochemical characteristics and genesis of Yanshanian granite in the dabie ultrahigh-pressure (UHP) metamorphic belt [J]. *Geology in China*, 31(2): 147~154 (in Chinese with English abstract).
- Sang Longkang, Wang Renjing, Zhang Zeming, *et al.* 2000. Late Yanshanian granite in the Jiuzihe-Tiantangzhai area and uplift of the core of the Dabie orogenic belt [J]. *Acta Geologica Sinica*, 74(3): 234~246 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chao, Zhao Zhan, Jiao Ruohong, *et al.* 2010. Late-orogenic granitoids (174~161 Ma) in the Dabie orogenic belt [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 4(4): 8~15 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jianghai and Deng Shangxian. 2002. Emplacement age for the mafic-ultramafic plutons in the northern Dabie mountains, Hubei: zircon U-Pb, Sm-Nd and ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating [J]. *Science in China (Series D)*, 45(1): 1~12.
- Wang Qiang, Wang Renjing, Qiu Jiaxiang, *et al.* 2000. Petrogenesis of Jiuzihe granites in the core of Dabie Mountains [J]. *Geochimica*, 29(2): 120~131 (in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Wyman D A, Xu J F, *et al.* 2007. Early Cretaceous adakitic granites in the Northern Dabie Complex, central China: Implications for partial melting and delamination of thickened lower crust [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 71: 2609~2636.
- Wang Qiang, Xu Jifeng, Zhao Zhenhua, *et al.* 2001. The petrogenesis and geodynamic significances of HREE depleted granitoids during Yanshan period in the Dabie mountains [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 551~564 (in Chinese with English abstract).
- Wei Chunjing, Zhang Lifei and Wang Shiguang. 2000. Mesozoic high-K granitic rocks and its geological implication of Dabie mountains, Anhui province [J]. *Science in China (Ser. D)*, 30(4): 355~363 (in Chinese).
- White J C, Ren M and Parker D F. 2005. Variation in mineralogy, temperature, and oxygen fugacity in a suite of strongly peralkaline lavas and tuffs, Pantelleria, Italy [J]. *Can. Mineral.*, 43: 1331~1347.
- Wu Y B, Zheng Y F, Zhang S B, *et al.* 2007. Zircon U-Pb ages and Hf isotope compositions of migmatite from the North Dabie terrane in China: Constraints on partial melting [J]. *J. Metamorph Geol.*, 25: 991~1009.

- Xie Zhi, Chen Jiangfeng, Zhou Taixi, *et al.* 1996. Nd isotopic compositions metamorphic and granitic rocks from Dabie orogen and their geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 12(3): 401 ~ 408(in Chinese with English abstract).
- Xie Zhi, Wang Zhengrong, Zheng Yongfei, *et al.* 2001. The mineral O isotopic equilibrium of Zhubuyuan granite and gneiss in the North Dabie Mountains and the Rb-Sr geochronologic affection[J]. *Geochimica*, 30(1): 95 ~ 101(in Chinese with English abstract).
- Xie Z, Zheng Y F, Zhao Z F, *et al.* 2006. Mineral isotope evidence for the contemporaneous process of Mesozoic granite emplacement and gneiss metamorphism in the Dabie orogen[J]. *Chem. Geol.*, 231 : 214 ~ 235.
- Xue Huaimin, Dong Shuwen and Liu Xiaochun. 2003. Zircon U/Pb dating of Cretaceous adakitic volcanic rocks in the eastern part of north Dabie mountain[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 22(3): 222 ~ 230.
- Xia Qunke, Zheng Yongfei and Deloule Etienne. 2003. U-Pb ages and Oxygen isotope compositions of zircons from post-collisional volcanic rocks of Dabieshan[J]. *Geological Journal of China Universities*, 9(2): 163 ~ 171(in Chinese with English abstract).
- Xiong Fuhao, Ma Changqian, Chen Ling, *et al.* 2010. Petrogenesis of mafic microgranular enclaves from Baiyashan A-type granites in Dabie orogenic belt and its geological implications[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 1 : 33 ~ 42(in Chinese with English abstract).
- Xu Haijin, Ma Changqian and Ye Kai. 2007. Early cretaceous granitoids and their implications for the collapse of the Dabie orogen, eastern China: SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemistry[J]. *Chem. Geol.*, 240 : 238 ~ 259.
- Xu Haijin, Ye Kai and Ma Changqian. 2008. Early Cretaceous granitoids in the North dabie and their tectonic implications: Sr-Nd and zircon Hf isotopic evidences[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(1): 83 ~ 103(in Chinese with English abstract).
- Xu Xiaojun, Zhao Zifu, Zheng Yongfei, *et al.* 2005. Element and isotope geochemistry of Mesozoic intermediate-felsic rocks at Tianzhusan in the Dabie orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 607 ~ 622(in Chinese with English abstract).
- Xue F, Rowley D B, Tucker R D, *et al.* 1997. U-Pb zircon ages of granitoid rocks in the north Dabie complex, eastern Dabie Shan, China[J]. *J. Geol.*, 105 : 744 ~ 753.
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Chung Sunlin, *et al.* 2005. Petrogenesis of Early Cretaceous intrusions in the Sulu ultrahigh-pressure orogenic belt, east China and their relationship to lithospheric thinning[J]. *Chemical Geology*, 222 : 200 ~ 231.
- Zhang H F, Gao S, Zhong Z Q, *et al.* 2002. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of Cretaceous granitoids: Constraints on tectonic framework and crustal structure of the Dabieshan ultrahigh-pressure metamorphic belt, China[J]. *Chem. Geol.*, 186 : 281 ~ 299.
- Zhao Xinfu, Li Jianwei, Ma Changqian, *et al.* 2007. geochronology and geochemistry of the Gubei granodiorite, north Huaiyang: Implications for Mesozoic transition of the Dabie orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 : 1392 ~ 1402(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zifu, Zheng Yongfei, Wei Chunsheng, *et al.* 2003. Zircon U-Pb age, element and isotope geochemistry of Mesozoic mafic-Ultramafic rocks at Shacun and Jiaoziyan in North Dabi[J]. *Geological Journal of China Universities*, 9(2): 139 ~ 162(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zifu, Zheng Yongfei, Wei Chunsheng, *et al.* 2004. Zircon U-Pb age, element and oxygen isotope geochemistry of Mesozoic intermediate-felsic rocks in the Dabie mountain[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1151 ~ 1174(in Chinese with English abstract).
- Zhao Z F, Zheng Y F, Wei C S, *et al.* 2005. Zircon U-Pb age, element and C-O isotope geochemistry of post-collisional mafic-ultramafic rocks from the Dabie orogen in east-central China[J]. *Lithos*, 83 : 1 ~ 28.
- Zhao Z F, Zheng Y F, Wei C S, *et al.* 2007. Post-collisional granitoids from the Dabie orogen in China: Zircon U-Pb age, element and O isotope evidence for recycling of subducted continental crust[J]. *Lithos*, 93 : 248 ~ 272.
- Zhou C F, Hua R M, Ma D S, *et al.* 2001. Geochemistry and genetic implication of three granitic intrusives in Dabieshan area[J]. *Forum Geol. Ore Explor.*, 16(2): 81 ~ 88.
- Zhou Hongsheng, Ma Changqian and Chen Ling. 2009. Petrogenesis and tectonic implication of Yanzigang alkali pluton in the Dabie orogenic belt: Constraints from the zircon U-Pb ages and geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5): 1079 ~ 1091(in Chinese with English abstract).
- Zhou Taixi, Chen Jiangfeng, Zhang Xue, *et al.* 1995. Geochemistry of the North Huaiyang granite-syenite zone and its tectonic implication[J]. *Geological Review*, 41(2): 144 ~ 151(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈江峰, 谢智, 刘顺生, 等. 1995. 大别造山带冷却年龄的⁴⁰Ar-³⁹Ar和裂变径迹年龄测定[J]. *中国科学, B辑*, 25(10): 1086 ~ 1092.
- 陈廷愚, 牛宝贵, 刘志刚, 等. 1991. 大别山腹地燕山期岩浆作用和变质作用同位素年代学研究及其地质意义[J]. *地质学报*, 64(4): 329 ~ 336.
- 戴圣潜, 邓晋福, 吴宗絮, 等. 2003. 大别造山带燕山期造山作用的岩体岩石学证据[J]. *中国地质*, 30(2): 159 ~ 165.
- 葛宁洁, 侯振辉, 李惠民, 等. 1999. 大别造山带岳西沙村镁铁-超镁铁岩体的锆石 U-Pb 年龄[J]. *科学通报*, 44(19): 2110 ~ 2114.
- 葛宁洁, 李惠玉, 侯振辉, 等. 2001. 大别造山带白马尖花岗岩体的铀同位素地球化学研究[J]. *地质论评*, 47(2): 184 ~ 187.
- 侯振辉, 李曙光. 2003. 大别造山带超高压变质岩和镁铁质岩浆岩锆石 U-Pb 年代学的 TIMS 和 SIMS 法定年结果比较[J]. *岩石学报*, 19(3): 490 ~ 496.
- 金成伟, 郑祥身. 1998. 大别岳西地区花岗岩类岩石学及其成因[J]. *岩石学报*, 14(4): 493 ~ 502.

- 李石,王彤. 1991. 桐柏山-大别山花岗岩类地球化学[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1~208.
- 李曙光,洪吉安,李惠民,等. 1999. 大别山辉石岩-辉长岩体锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 高校地质学报,5(3):351~355.
- 刘敦一,汤加富,周存亭,等. 2002. 大别造山带核部桃源寨火山岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地质学报,76(2):217~221.
- 路玉林,钱存超,贾十军. 1999. 安徽大别山团岭花岗岩体岩石学特征及其成因[J]. 安徽地质,9(3):172~177.
- 马昌前,杨坤光,明厚利,等. 2003. 大别山中生代地壳从挤压转向伸展的时间:花岗岩的证据[J]. 中国科学,33(9):817~827.
- 马昌前,杨坤光,许长海,等. 1999. 大别山中生代钾质岩浆作用与超高压变质地体的剥露机理[J]. 岩石学报,15(3):379~395.
- 彭亚鸣,潘国强,叶友清. 1994. 大别造山带天柱山花岗岩研究[J]. 南京大学学报(地球科学),4(4):326~333.
- 潘国强,陆现彩,于航波. 2001. 北淮阳中生代 adakite 岩石地球化学特征及成因讨论[J]. 岩石学报,17(4):541~550.
- 钱存超,路玉林,刘丽利. 2004. 大别山超高压变质带燕山期花岗岩地球化学特征及成因探讨[J]. 中国地质,31(2):147~154.
- 桑隆康,王人镜,张泽明,等. 2000. 九资河-天堂寨地区燕山晚期花岗岩与大别造山带核部隆升[J]. 地质学报,74(3):234~246.
- 王超,赵展,焦若鸿,等. 2010. 大别造山带晚造山期花岗岩类[J]. 华南地质与矿产,(4):8~15.
- 王江海,邓尚贤. 2002. 湖北大别镁铁-超镁铁质侵入体的时代:锆石 U-Pb、Sm-Nd 和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年结果[J]. 中国科学,32(1):1~9.
- 王强,王人镜,邱家骥,等. 2000. 大别山核部九资河花岗岩体成因[J]. 地球化学,29(2):120~131.
- 王强,许继锋,赵振华,等. 2001. 大别山燕山期亏损重稀土元素花岗岩类的成因及动力学意义[J]. 岩石学报,17(4):551~564.
- 魏春景,张立飞,王式泮. 2000. 安徽省大别山东段中生代高钾花岗岩岩石及其地质意义[J]. 中国科学,30(4):355~363.
- 谢智,陈江峰,周泰禧,等. 1996. 大别造山带变质岩和花岗岩的 Nd 同位素组成及其地质意义[J]. 岩石学报,12(3):401~408.
- 谢智,高天山,陈江峰. 2004. 北大别片麻岩的多阶段演化:锆石 U-Pb 年代学证据[J]. 科学通报,49(16):1653~1659.
- 谢智,王峥嵘,郑永飞,等. 2001. 北大别主簿源花岗岩和片麻岩矿物的氧同位素平衡及其 Rb-Sr 年代学效应[J]. 地球化学,30(1):95~101.
- 熊富浩,马昌前,陈玲,等. 2010. 大别造山带白鸭山 A 型花岗岩中镁铁质微粒包体成因及其地质意义[J]. 矿物岩石,1:33~42.
- 薛怀民,董树文,刘晓春. 2002. 北大别东部白垩纪埃达克质火山岩及其锆石 U-Pb 年代学[J]. 地球化学,31(5):455~463.
- 夏群科,郑永飞,Deloule E. 2003. 大别山碰撞后火山岩的锆石 U-Pb 年龄和氧同位素组成[J]. 高校地质学报,9(2):163~171.
- 续海金,叶凯,马昌前. 2008. 北大别早白至纪花岗岩类的 Sm-Nd 和锆石 Hf 同位素及其构造意义[J]. 岩石学报,24(1):83~103.
- 徐小军,赵子福,郑永飞,等. 2005. 大别造山带天柱山燕山期中酸性岩浆岩元素和同位素地球化学研究[J]. 岩石学报,21(3):607~622.
- 郑永飞. 2008. 超高压变质与大陆碰撞研究进展:以大别苏鲁造山带为例[J]. 科学通报,53(18):2129~2152.
- 赵新福,李建威,马昌前,等. 2007. 北淮阳古碑花岗闪长岩侵入时代及地球化学特征:对大别山中生代构造体制转换的启示[J]. 岩石学报,23:1392~1402.
- 赵子福,郑永飞,魏春生,等. 2003. 大别山沙村和椒子岩基性-超基性岩锆石 U-Pb 定年、元素和碳氧同位素地球化学研究[J]. 高校地质学报,9(2):139~162.
- 赵子福,郑永飞,魏春生,等. 2004. 大别山中生代中酸性岩浆岩锆石 U-Pb 定年、元素和氧同位素地球化学研究[J]. 岩石学报,20(5):1151~1174.
- 赵子福,郑永飞. 2009. 俯冲大陆岩石圈重熔:大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩成因[J]. 中国科学(D辑:地球科学),39(7):888~909.
- 周承福,华仁民,马东升,等. 2001. 大别山地区三个花岗岩体的地球化学特征及其成因学意义[J]. 地质找矿论丛,16(2):81~88.
- 周红升,马昌前,陈玲. 2009. 大别造山带研子岗碱性岩体成因及其构造意义:锆石 U-Pb 年龄和地球化学制约[J]. 岩石学报,25(5):1079~1091.
- 周泰禧,陈江峰,张巽,等. 1995. 北淮阳花岗岩-正长岩带地球化学特征及其大地构造意义[J]. 地质论评,41(2):144~151.