

基底岩系和花岗岩类 Pb-Nd 同位素组成 限制祁连山带的构造属性

张宏飞¹, 靳兰兰¹, 张利¹, 袁洪林², 周炼¹, 张本仁¹

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 西北大学大陆动力学实验室, 陕西西安 710069

摘要: 对扬子陆块的西北部边界至今尚未得到有效的限定. 中央山系西段祁连山带基底岩系和花岗岩类的 Pb-Nd 同位素组成为限定扬子陆块的西北边界提供限制. 祁连山带前寒武纪基底岩系的 Nd 同位素亏损地幔模式年龄(T_{DM})主要分布于 0.75~2.5 Ga 之间, 峰值为 2.1 Ga 左右; 该带古生代花岗岩类的 T_{DM} 变化于 1.07~2.14 Ga 之间. 由此表明, 祁连山带地壳增长主要发生于元古宙, 缺乏太古宙地壳增长的信息. 祁连山带前寒武纪基底和花岗岩类全岩均以高放射成因的铅同位素组成为特征, 绝大多数样品的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 18.0$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 15.5$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 38.0$. 因此, 祁连山带地壳增长特征和铅同位素组成特征与华北陆块存在明显的差异, 而与扬子陆块一致, 从而表明祁连山带具有扬子型陆块的构造属性. 因此, 扬子陆块的西北部边界扩大至祁连山带的北侧. 自新元古代以来, 祁连山带经历了岩石圈裂解作用, 并有洋盆形成, 但这些构造事件均发生在扬子型陆块内部的地质背景.

关键词: 祁连山; 基底岩系; 花岗岩类; Pb-Nd 同位素; 构造属性.

中图分类号: P59

文章编号: 1000-2383(2006)01-0057-09

收稿日期: 2005-09-23

Pb and Nd Isotopic Compositions of Basement and Granitoid in the Qilianshan: Constraints on Tectonic Affinity

ZHANG Hong-fei¹, JIN Lan-lan¹, ZHANG Li¹, YUAN Hong-lin², ZHOU Lian¹, ZHANG Ben-ren¹

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China

Abstract: The northwestern boundary of the Yangtze (South China) block has not been efficiently constrained yet. Pb and Nd isotopic compositions of the Qilianshan Precambrian basements and granitoids in the western segment of the Central Orogenic System (COS) of China provide constraints on the northwestern boundary of the Yangtze block. Most samples from the Qilianshan Precambrian basement have mantle-depleted Nd isotopic model ages (T_{DM}) ranging from 0.75 to 2.5 Ga, with a peak value of ~2.1 Ga. The Qilianshan Paleozoic granitoids have T_{DM} values ranging from 1.07 to 2.14 Ga. They show that crustal growth of the Qilianshan mainly occurred in the Proterozoic, without significant Archean information. The Precambrian basement rocks and the Paleozoic granitoids are characterized by high radiogenic Pb isotopic composition. Most samples have $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 18.0$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 15.5$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 38.0$. The T_{DM} values and Pb isotopic compositions of the Qilianshan basement and granitoids are similar to those of the Yangtze block but distinct from those of the North China block, indicating that the crustal basement of Qilianshan has an affinity with the Yangtze block. It is suggested that the northwestern boundary of the Yangtze block is located along the north side of the Qilianshan belt. Since the Proterozoic, the Qilianshan belt had experienced lithospheric rifting and subsequent Qilian ocean opening. These tectonic events had thus happened within the Yangtze block.

Key words: Qilianshan; basement; granitoid; Pb-Nd isotope; tectonic affinity.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 40234052).

作者简介: 张宏飞 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事造山带地球化学研究. E-mail: hfzhang@cug.edu.cn

在东亚陆块群中,华北陆块和扬子陆块是 2 个在地壳演化历史和壳幔地球化学特征上存在明显差异的陆块(Zhu, 1994; 张理刚, 1995; 朱炳泉, 1998; 张本仁等, 2002), 其间被横贯于中央山系(昆仑—祁连—秦岭—大别造山带)所分隔. 该中央山系中包含众多的构造块体, 具有复杂的地质演化, 经历了多次的裂离与拼合, 在印支期完成了它们主体的拼合过程(张国伟等, 2004). 在中央山系中, 这些构造块体在构造属性上是属于华北陆块还是属于扬子陆块一直受到人们的关注(Zhu, 1994; 张理刚, 1995; Chen and Jahn, 1998; Hacker *et al.*, 1998; 朱炳泉, 1998; Sun *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2002; 张本仁等, 2002). 在现有研究中, 中央山系的东段具有较高的地质研究程度. 在大别山地区, 扬子陆块的北界应位于大别山北淮阳构造单元的北侧已取得基本共识, 大别山主体应属于扬子陆块(Chen and Jahn, 1998; Hacker *et al.*, 1998; Sun *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2002). 在东秦岭地区, 张本仁等(2002)证明了东秦岭主体属于扬子陆块, 并确定了该区扬子陆块的北部边界应位于北秦岭构造单元北侧的洛南—栾川断裂一线, 该断裂向东延至于大别山北淮阳构造单元的北侧. 在西秦岭地区, 作者近期根据该区花岗岩类地球化学的研究, 建议将扬子陆块的西北边界推至西秦岭带北侧(张宏飞等, 2005b). 在祁连造山带(简称祁连山带), 已通过早古生代基性火山岩类的 Pb 同位素研究, 初步认为该区具有扬子型块体的构造属性(侯青叶等, 2005). 然而, 这一研究尚缺乏其他证据的进一步证实. 祁连山带构造属性的确定对全面了解中央山系各区段构造块体的发展与演化具有重要的科学意义. 本文开展了对祁连山带有关基底岩系和花岗岩类的 Nd 同位素模式年龄和 Pb 同位素组成研究, 据此为祁连山带的构造属性提供新的制约.

1 地质背景

祁连山带位于中国中央山系西段, 南以武山—临夏—贵德—青海湖南山断裂为界, 与西秦岭造山带相邻, 北以河西走廊断裂为界, 与华北陆块相邻(图 1). 祁连山带西端被北东东的左行走滑的阿尔金断裂截切.

祁连山带出露有前寒武纪的变质基底, 如湟源群、化隆群、马衔山群等, 这些变质岩群由主要片岩、

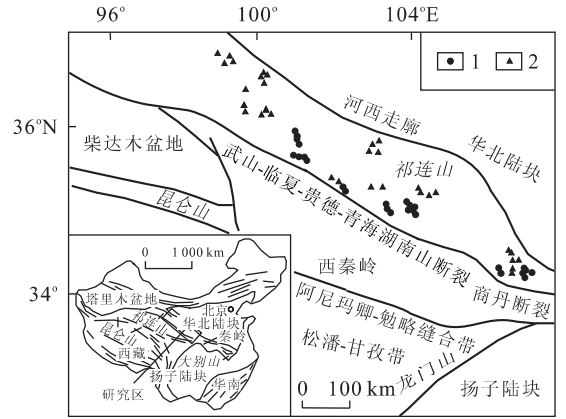


图 1 祁连山带构造简图

Fig. 1 Simplified tectonic map of Qilianshan belt
1. 前寒武基底岩系采样位置; 2. 花岗岩类采样位置; 内插图示研究区在中国的大地构造位置

负片麻岩类、正片麻岩类、斜长角闪岩和大理岩等岩类组成, 经历了高角闪岩相以下的中/低级变质作用, 岩石具有强烈的构造变形特征, 斜长角闪岩通常呈团块状或似层状产于片麻岩中. 祁连山带在新元古代晚期岩石圈裂陷作用的基础上, 于早古生代发育具有现代板块体制的沟—弧—盆体系, 在北祁连形成多条蛇绿岩带(夏林圻等, 2001). 在早奥陶世, 祁连洋盆闭合. 在晚奥陶世到早志留世, 祁连山发育大规模的花岗质岩浆侵入作用, 形成花岗岩类的同位素年龄主要集中于 400~450 Ma 之间(甘肃省地矿局, 1989; 夏林圻等, 2001), 岩石类型主要为花岗闪长岩、二长花岗岩等. 在中生代, 祁连山的花岗质岩浆侵入活动较弱, 主要在祁连山的东部形成少量三叠纪花岗岩.

2 样品及其分析方法

本次研究的样品分布见图 1. 全岩样品无污染加工处理在湖北地质实验研究所完成, 样品粉碎至 200 目以下. 全岩样品 Nd 同位素比值测定在英国 Open 大学地球科学系 Finnigan Triton 质谱仪上完成, Nd 同位素的分馏校正分别采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$. 在分析期间, J&M 标准给出 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.511825 \pm 6(2\sigma)$, BCR-2 标准给出 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512644 \pm 6(2\sigma)$, 全程 Nd 空白 $<1\text{ ng}$. 详细测定方法见 Zhang *et al.* (2004a). 样品 Sm、Nd 含量在中国地质大学利用 ICP-MS 方法测定获得, 其准确度优于 5%. 根据测定的 Sm、Nd 含量计算样品的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值.

利用 HCl-Br 交换柱进行全岩铅分离. 铅同位素

表 1 祁连山带前寒武纪变质岩系 Nd 同位素资料

Table 1 Whole-rock Nd isotope data of Precambrian basement from Qilianshan belt

样品	岩石类型	Nd($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	Sm($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	$T_{\text{DM}}(\text{Ga})$
陇山群								
LS1 *	黑云斜长片麻岩	18.20	3.64	0.120 9	0.511 334	5	-25.4	2.97
LS2 *	黑云斜长片麻岩	21.79	2.92	0.081 1	0.510 975	5	-32.4	2.49
LS3/1 *	黑云斜长片麻岩	19.72	4.87	0.149 4	0.511 606	5	-20.1	3.63
LS3/2 *	黑云斜长片麻岩	18.41	2.78	0.091 2	0.5112 03	9	-28.0	2.41
LS4 *	斜长角闪岩	22.29	4.75	0.128 8	0.511 849	5	-15.4	2.33
LS7 *	斜长角闪岩	9.52	2.56	0.162 7	0.512 723	6	1.7	1.28
马街山群								
WQ141	斜长角闪岩	16.05	4.35	0.163 8	0.512 913	4	5.4	0.73
WQ142	斜长角闪岩	30.97	5.72	0.111 7	0.512 212	7	-8.3	1.40
WQ144	斜长角闪岩	29.55	4.94	0.101 1	0.512 230	5	-8.0	1.25
WQ148	黑云斜长片麻岩	20.25	4.42	0.131 9	0.512 183	7	-8.9	1.80
WQ151	黑云斜长片麻岩	18.44	4.04	0.132 4	0.512 203	8	-8.5	1.77
WQ183	黑云斜长片麻岩	43.84	8.56	0.118 1	0.511 861	5	-15.2	2.05
WQ184	黑云斜长片麻岩	32.86	6.29	0.115 7	0.511 791	5	-16.5	2.11
WQ186	斜长角闪岩	11.69	3.17	0.163 7	0.512 784	4	2.8	1.12
WQ187	斜长角闪岩	13.24	3.25	0.148 4	0.512 613	16	-0.5	1.25
Q98109 **	黑云斜长片麻岩			0.118 9	0.512 170	7	-9.13	1.57
Q9739 **	黑云斜长片麻岩			0.100 1	0.511 749	9	-17.3	1.87
Q9745 **	云母石英片岩			0.117 6	0.511 787	7	-16.6	2.15
Q9753 **	花岗质片麻岩			0.109 6	0.511 859	7	-15.2	1.88
湟源群								
WQ274	花岗质片麻岩	30.43	5.46	0.108 5	0.512 483	5	-3.0	0.97
WQ275	变质正长岩脉	34.84	6.12	0.106 2	0.512 401	6	-4.6	1.06
WQ277	变质正长岩脉	37.14	6.50	0.105 8	0.512 446	6	-3.7	1.00
WQ278	变基性岩	6.90	1.96	0.172 1	0.512 671	5	0.6	1.76
WQ279	变基性岩	6.12	1.89	0.186 4	0.512 756	6	2.3	2.20
WQ281	云母石英片岩	37.80	6.99	0.111 7	0.511 926	6	-13.9	1.83
WQ282	云母石英片岩	34.71	6.76	0.117 8	0.511 832	5	-15.7	2.09
WQ286	变基性岩	8.98	2.76	0.185 7	0.512 953	6	6.1	1.08
WQ287	花岗质片麻岩	27.05	5.31	0.118 6	0.511 968	4	-13.1	1.89
WQ288	花岗质片麻岩	52.37	10.54	0.121 7	0.511 907	5	-14.3	2.05
WQ293	云母石英片岩	42.64	7.66	0.108 7	0.511 781	5	-16.7	1.98
WQ303	花岗质片麻岩	18.32	3.16	0.104 2	0.511 950	4	-13.4	1.67
WQ304	花岗质片麻岩	31.69	5.99	0.114 2	0.512 008	5	-12.3	1.75
WQ310	云母石英片岩	35.42	6.54	0.111 6	0.511 751	5	-17.3	2.08
WQ311	云母石英片岩	23.75	5.39	0.137 2	0.512 084	5	-10.8	2.12
WQ324	花岗质片麻岩	27.43	5.61	0.123 5	0.512 045	5	-11.6	1.87
WQ325	花岗质片麻岩	32.25	6.06	0.113 5	0.512 068	4	-11.1	1.64
Q9885 **	黑云斜长片麻岩			0.113 6	0.511 683	7	-18.6	2.22
Q9887 **	黑云斜长片麻岩			0.117 1	0.511 719	8	-17.9	2.25
Q9894 **	云母石英片岩			0.117 9	0.511 755	7	-17.2	2.21
Q9864 **	黑云斜长片麻岩			0.113 3	0.511 658	5	-19.1	2.26
Q9869 **	云母石英片岩			0.111 5	0.511 727	6	-17.7	2.11
化隆群								
Q98100 **	花岗质片麻岩			0.112 1	0.512 169	9	-9.15	1.47

* 据 Zhang *et al.* (2005a); ** 据 Wan *et al.* (2001). T_{DM} 计算采用 ($^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$) $_{\text{DM}}=0.213\ 57$, ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) $_{\text{DM}}=0.513\ 15$.

比值在西北大学大陆动力学开放实验室利用 Nu Plasma ICP-MS 仪器测量获得, 铅同位素分馏校正采用 $^{205}\text{Tl}/^{203}\text{Tl}=2.387\ 5$. 在测试期间, NBS981 标准给出 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=16.937\pm1\ (2\sigma)$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.491\pm1$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=36.696\pm1$. BCR-2 标准给出 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.742\pm1\ (2\sigma)$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.500\pm1$.

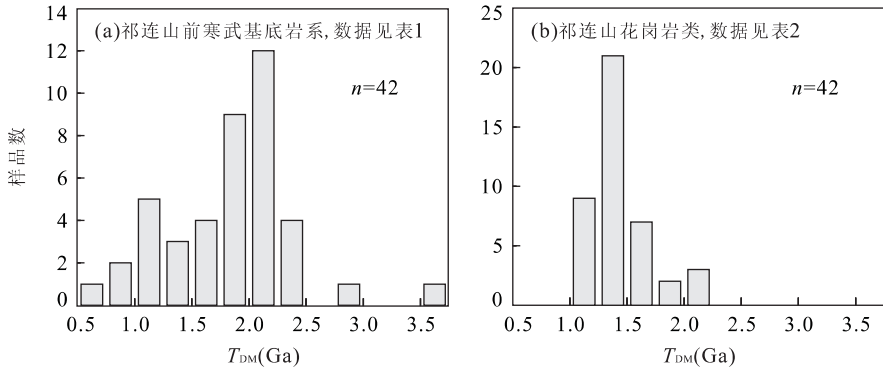


图 2 Nd 同位素模式年龄(T_{DM})分布直方图

Fig. 2 Histogram of Nd isotope model age (T_{DM}) distribution

15.620 ± 1 , $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.705 \pm 1$. 全程铅空白在 0.1~0.3 之间。

3 结果

3.1 Nd 同位素

祁连山带前寒武基底各岩类的 Nd 同位素组成见表 1。由表 1 可见,祁连山带前寒武基底各岩类的 Nd 同位素组成呈现出较大的变化。计算的 Nd 同位素亏损地幔模式年龄(T_{DM}),除了少数样品大于 2.5 Ga 外,其余样品的 T_{DM} 在 0.75~2.5 Ga 之间。变基性岩类的 T_{DM} 值总体上低于变碎屑岩类和花岗质片麻岩类的 T_{DM} 值。将所有样品进行统计,其峰值在 2.1 Ga 左右(图 2a)。由于 T_{DM} 反映地壳物质或其源岩从亏损地幔分离的时间(Arndt and Goldstein, 1987; Milisenda *et al.*, 1994),因此, T_{DM} 反映了区域性地壳的增长特征。尽管壳内高级变质作用可能导致陆壳岩石 Sm/Nd 比值发生分馏,但祁连山带基底岩系主要经历了高角闪岩相以下的中/低级变质作用,这样的变质作用一般会导致 Sm/Nd 比值发生明显的分馏作用(Taylor and McLennan, 1985)。由此表明,祁连山带基底各岩类的 T_{DM} 值分布反映地壳增长时代主要在古元古代以后,缺乏明显的太古宙地壳增长信息。

祁连山带花岗岩类的 Nd 同位素组成列于表 2。在祁连山带,关山岩体形成于早中生代($(229 \pm 7)\text{Ma}$, U-Pb 锆石 SHRIMP, MSWD = 4.1, Zhang *et al.*, 2005a),其他岩体主要形成于早古生代(400~450 Ma)。关山花岗岩以 $t=229\text{Ma}$ 计算, $\epsilon_{Nd}(t)$ 在 -7.1~-11.0 之间;祁连山带早古生代花岗岩类 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值以 $t=420\text{Ma}$ 作统一计算,其结果变化于 -0.5~-11.8 之间,反映该花岗岩类具有较为复杂的岩浆源区组成,但

大部分样品的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值 < -3 。因此,总体上祁连山带古生代花岗岩类的岩浆源区主要来自于地壳物质的部分熔融。花岗岩类的 T_{DM} 值反映花岗岩源区物质在陆壳中的平均存留年龄(Arndt and Goldstein, 1987)。祁连山带所有花岗岩类样品的 T_{DM} 值变化于 1.07~2.14 Ga 之间,并主要集中于 1.25~1.50 Ga 之间(图 2b),这反映祁连山带地壳平均存留年龄在中元古代,同样缺乏太古宙地壳物质的年龄信息。

3.2 Pb 同位素

祁连山带前寒武纪基底岩系全岩以高放射成因铅同位素组成为特征(表 3),变基性岩类与变碎屑岩类和花岗质片麻岩类之间没有明显的铅同位素组成的差异,所有样品的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.927 \sim 19.376$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.446 \sim 15.704$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37.922 \sim 41.351$,但大部分样品的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 18.1$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 15.57$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 37.92$ 。它们具有较低的 U 含量,变化于 0.21~5.06 $\mu\text{g/g}$ 之间,但大部分样品的 U 含量 $< 2.5\mu\text{g/g}$ 。Th 含量显示有较大的变化,其变化范围为 0.97~37.24 $\mu\text{g/g}$ 。

祁连带花岗岩类同样具有高放射成因的铅同位素组成(表 4),除样品 LS-12 外,其余样品的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.116 \sim 21.695$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.537 \sim 15.857$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.308 \sim 41.378$ 。它们的铅同位素组成与上述前寒武基底岩系的铅同位素组成相类似。根据全岩 U、Th、Pb 含量和铅同位素比值,以花岗岩类的形成时代进行初始铅同位素比值的计算(表 4)。结果表明,形成于早中生代的花岗岩(关山岩体)初始铅同位素比值(以 $t=229\text{Ma}$ 校正)为: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.798 \sim 18.131$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.515 \sim 15.558$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37.795 \sim 38.054$;形成于早古生代的花岗岩类的初始铅同位素比值(以 $t=420\text{Ma}$ 校

表 2 祁连山带古生代和中生代花岗岩类 Nd 同位素资料

Table 2 Whole-rock Nd isotope data of Paleozoic and Mesozoic granitoid from Qilianshan belt

样品	岩石类型	Nd($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	Sm($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$T_{\text{DM}}(\text{Ga})$
关山岩体((229±7)Ma, U-Pb 锆石 SHRIMP, Zhang <i>et al.</i> , 2005a)								
LS-9	二长花岗岩	20.01	2.90	0.088	0.511 915	16	−11.0	1.49
LS-11	二长花岗岩	22.98	3.51	0.092	0.512 023	4	−9.1	1.42
LS-12	二长花岗岩	23.35	3.81	0.099	0.512 132	7	−7.1	1.35
LS-13	二长花岗岩	33.52	4.75	0.086	0.512 068	8	−8.0	1.29
闰家店岩体((441±10)Ma, U-Pb 锆石 SHRIMP, Zhang <i>et al.</i> , 2005a)								
LS-14	石英闪长岩	30.02	5.70	0.115	0.512 255	11	−3.1	1.38
LS-16	石英闪长岩	34.91	6.69	0.116	0.512 220	8	−3.8	1.45
LS-17	石英闪长岩	29.72	5.91	0.120	0.512 243	8	−3.6	1.48
草川铺岩体((434±10)Ma, U-Pb 锆石 SHRIMP, Zhang <i>et al.</i> , 2005a)								
WQ-10	黑云母花岗岩	22.19	3.47	0.094	0.512 290	5	−1.3	1.10
WQ-11	黑云母花岗岩	17.16	2.80	0.099	0.512 344	7	−0.5	1.07
WQ-39	黑云母花岗岩	13.98	2.38	0.103	0.512 206	8	−3.4	1.30
WQ-40	黑云母花岗岩	16.41	2.61	0.096	0.512 227	9	−2.6	1.20
马尼寺岩体(早古生代, 甘肃省地矿局, 1989)								
WQ-122	花岗闪长岩	16.87	2.50	0.090	0.512 103	4	−4.7	1.28
WQ-125	花岗闪长岩	44.15	7.72	0.106	0.512 076	7	−6.1	1.52
永清岩体(早古生代, 甘肃省地矿局, 1989)								
WQ-152	黑云母花岗岩	37.04	4.84	0.079	0.512 025	3	−5.7	1.27
WQ-154	黑云母花岗岩	8.81	1.89	0.130	0.512 045	4	−8.0	2.00
什川岩体((426±1)Ma, U-Pb 锆石 TIMS, 作者未发表资料)								
WQ-190	二长花岗岩	29.30	4.43	0.092	0.512 161	5	−3.7	1.23
WQ-191	二长花岗岩	28.62	4.35	0.092	0.512 148	7	−3.9	1.25
WQ-193	二长花岗岩	16.01	2.60	0.098	0.512 239	6	−2.5	1.20
WQ-195	二长花岗岩	33.74	5.49	0.098	0.512 211	5	−3.1	1.24
皇城岩体(早古生代, 甘肃省地矿局, 1989)								
WQ-214	黑云母花岗岩	26.54	4.91	0.112	0.511 798	5	−11.8	2.02
WQ-215	黑云母花岗岩	37.48	7.12	0.115	0.511 828	6	−11.4	2.03
WQ-218	黑云母花岗岩	34.13	6.41	0.114	0.511 832	5	−11.3	2.00
WQ-220	黑云母花岗岩	86.51	14.53	0.102	0.512 136	5	−4.7	1.38
WQ-221	黑云母花岗岩	49.68	8.26	0.101	0.512 129	4	−4.8	1.37
金佛寺岩体(早古生代, 甘肃省地矿局, 1989)								
WQ-223	二长花岗岩	20.92	4.36	0.126	0.512 199	7	−4.8	1.65
WQ-224	二长花岗岩	27.98	5.52	0.119	0.512 220	5	−4.0	1.50
WQ-227	二长花岗岩	16.19	2.86	0.107	0.512 225	6	−3.2	1.32
WQ-228	二长花岗岩	18.53	3.39	0.110	0.512 215	5	−3.6	1.38
WQ-229	花岗闪长岩	25.81	5.37	0.126	0.512 218	4	−4.4	1.61
柴达诺岩体(早古生代, 甘肃省地矿局, 1989)								
WQ-248	石英闪长岩	55.63	8.54	0.093	0.511 886	6	−9.1	1.59
WQ-250	花岗闪长岩	76.42	10.51	0.083	0.511 898	3	−8.4	1.46
WQ-252	石英闪长岩	39.73	8.01	0.122	0.511 968	5	−9.1	1.96
WQ-253	花岗岩闪长岩	47.48	8.63	0.110	0.512 033	7	−7.2	1.64
牛心山岩体(早古生代, 甘肃省地矿局, 1989)								
WQ-268	二长花岗岩	36.72	5.02	0.083	0.512 135	6	−3.7	1.18
WQ-269	二长花岗岩	60.65	8.08	0.081	0.512 205	3	−2.2	1.08
WQ-271	二长花岗岩	42.86	5.71	0.081	0.511 972	6	−6.8	1.35
WQ-273	二长花岗岩	71.75	10.21	0.086	0.512 056	5	−5.4	1.31
民和岩体(早古生代, 甘肃省地矿局, 1989)								
32516	二长花岗岩	45.76	7.59	0.100	0.512 116	6	−5.0	1.39
32517	二长花岗岩	39.97	6.78	0.103	0.512 062	4	−6.2	1.49
32518	二长花岗岩	13.19	2.69	0.123	0.512 153	4	−5.5	1.68
32519	二长花岗岩	41.19	7.19	0.106	0.512 124	3	−5.1	1.44
32520	二长花岗岩	21.63	4.97	0.139	0.512 098	5	−7.4	2.14

$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 的计算采用 $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=0.196\,7$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=0.512\,638$, 早古生代花岗岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 以 $t=420\,\text{Ma}$ 作统一计算;
 T_{DM} 计算采用 $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}=0.213\,57$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}=0.513\,15$.

表 3 祁连山带前寒武纪变质岩系全岩 Pb 同位素资料

Table 3 Whole-rock Pb isotope data of Precambrian basement from Qilianshan belt

样品	岩石类型	Pb($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	U($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	Th($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
陇山群							
LS1*	黑云斜长片麻岩	10.37	10.32	1.11	18.006	15.492	41.097
LS2*	黑云斜长片麻岩	13.51	13.65	0.62	17.927	15.446	41.351
LS3/1*	黑云斜长片麻岩	9.13	6.85	1.04	18.693	15.660	39.300
LS4*	斜长角闪岩	9.01	5.49	0.98	18.732	15.725	39.570
LS7*	斜长角闪岩	2.91	0.94	0.24	18.185	15.579	38.625
马衔山群等							
WQ141	斜长角闪岩	5.44	1.31	0.37	18.505	15.710	38.610
WQ142	斜长角闪岩	4.27	3.03	1.08	19.165	15.691	38.675
WQ144	斜长角闪岩	8.31	3.36	0.94	18.783	15.661	38.711
WQ186	斜长角闪岩	12.95	0.97	0.29	18.118	15.633	38.552
WQ187	斜长角闪岩	7.56	2.26	1.84	18.174	15.640	38.561
湟源群							
WQ275	变质正长岩脉	13.91	13.72	2.35	19.029	15.633	39.199
WQ277	变质正长岩脉	21.41	12.82	2.77	18.915	15.619	38.809
WQ278	变基性岩	6.23	1.20	0.21	18.169	15.587	37.922
WQ279	变基性岩	6.50	1.45	0.30	18.243	15.589	37.963
WQ286	变基性岩	17.20	1.07	0.25	18.332	15.635	38.130
WQ287	花岗质片麻岩	31.47	12.38	1.86	19.144	15.696	38.350
WQ288	花岗质片麻岩	46.93	37.29	4.91	18.999	15.686	38.906
WQ303	花岗质片麻岩	24.71	11.46	1.82	18.612	15.648	38.295
WQ304	花岗质片麻岩	30.97	14.23	1.78	18.480	15.645	38.575
WQ310	云母石英片岩	20.21	10.15	1.52	18.523	15.672	38.946
WQ311	变基性岩	10.67	6.76	1.20	18.994	15.681	38.794
WQ324	花岗质片麻岩	45.37	30.71	5.06	19.100	15.694	39.039
WQ325	花岗质片麻岩	43.60	31.91	2.28	19.376	15.704	39.169
化隆群							
HL2	斜长角闪岩				18.321	15.553	38.334
HL6	斜长角闪岩				18.374	15.466	38.499
HL8	花岗质片麻岩				19.005	15.686	38.742
HL9	斜长角闪岩				19.420	15.765	38.896
HL12	花岗质片麻岩				18.993	15.707	39.116
HL13	黑云斜长片麻岩				18.700	15.733	38.974
HL14	黑云斜长片麻岩				20.781	15.782	38.554
HL16	黑云斜长片麻岩				19.794	15.731	39.991

* 据 Zhang *et al.* (2005a). Pb、U 和 Th 含量由 ICP-MS 测定.

正)为: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.143\sim19.158$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.630\sim15.829$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=37.715\sim38.870$.

4 讨论

根据华北陆块和扬子陆块基底岩系和花岗岩的 Nd 同位素模式年龄的研究,华北陆块地壳主体形成于太古宙,并以 2.8~2.6 Ga 为最强烈的地壳增生期,其次为 1.8~2.2 Ga 的地壳增生期,中元古宙后华北块体主要为壳内物质的再循环(Zhu, 1994; 张本仁等, 2002). 而扬子陆块地壳主体形成于 0.8 Ga 前的元古宙,少量地壳物质形成于太古宙(Zhu, 1994; Chen and Jahn, 1998; 张本仁等,

2002). 从祁连山带前寒武纪基底岩系、花岗岩类 T_{DM} 分布特征看(图 2),祁连山带地壳增长主要在元古宙,缺乏太古宙地壳增长的信息. Nd 同位素模式年龄揭示的祁连山带地壳增长历史一致于祁连山带基底和显生宙沉积岩系中碎屑锆石 U-Pb 年代学研究结果(Gehrels *et al.*, 2003; Yue *et al.*, 2005). 由此表明,祁连山带的地壳增长历史类似于扬子陆块,而与华北陆块存在明显的差别.

在铅同位素组成上,祁连山前寒武纪基底岩系以放射成因的铅同位素组成,明显不同于华北陆基底岩系具有低放射成因的铅同位素组成(张理刚, 1995; 张本仁等, 2002). 在中生代花岗岩类 Pb 同位素组成上,中国主要陆块存在明显的铅同位素块体

表 4 祁连山带古生代和中生代花岗岩类全岩 Pb 同位素资料
Table 4 Whole-rock Pb isotope data of graniroid from Qilianshan belt

样品	Pb	U	Th	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²³⁸ U/ ²⁰⁴ Pb	²³² Th/ ²⁰⁴ Pb	(²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _i	(²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _i	(²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _i
中生代花岗岩类											
LS9*	38.51	27.72	7.52	18.453	15.567	38.484	12.40	47.26	18.023	15.545	37.967
LS11*	43.16	31.02	4.10	18.116	15.537	38.308	5.99	46.85	17.909	15.527	37.795
LS12*	52.89	11.02	2.23	17.890	15.520	37.989	2.64	13.47	17.798	15.515	37.842
LS13*	32.43	31.82	4.32	18.426	15.573	38.762	8.50	64.65	18.131	15.558	38.054
早古生代花岗岩类											
LS14*	37.47	4.14	1.24	18.393	15.651	38.456	2.11	7.25	18.251	15.643	38.303
LS16*	27.45	2.56	0.73	18.256	15.640	38.269	1.68	6.09	18.143	15.634	38.141
LS17*	13.89	4.46	1.40	18.603	15.665	38.741	6.45	21.25	18.169	15.641	38.294
WQ10	28.87	23.79	2.82	18.789	15.669	39.083	6.29	54.87	18.365	15.646	37.931
WQ11	32.14	26.76	2.00	18.985	15.680	39.184	4.02	55.66	18.715	15.665	38.015
WQ190	33.16	22.85	2.77	19.269	15.688	38.679	5.39	45.93	18.906	15.668	37.715
WQ191	36.44	22.34	2.52	19.255	15.688	38.630	4.45	40.83	18.956	15.671	37.773
WQ193	27.18	15.09	2.44	19.053	15.683	38.521	5.76	36.82	18.666	15.662	37.748
WQ214	23.60	19.45	2.10	19.156	15.845	40.046	5.85	55.99	18.762	15.823	38.870
WQ218	19.09	24.35	2.21	18.638	15.857	40.540	7.60	86.65	18.126	15.829	38.720
WQ220	36.04	44.81	11.52	19.491	15.813	40.054	21.11	84.82	18.070	15.734	38.273
WQ221	26.91	24.49	2.83	18.959	15.784	39.913	6.89	61.49	18.495	15.759	38.622
WQ223	47.26	18.29	2.49	18.851	15.716	38.751	3.39	25.69	18.623	15.704	38.211
WQ227	28.59	13.21	2.42	19.433	15.731	38.727	5.48	30.90	19.065	15.711	38.078
WQ228	27.15	16.78	2.18	19.213	15.712	38.800	5.19	41.25	18.864	15.693	37.934
WQ248	47.95	36.29	9.83	20.067	15.715	39.366	13.50	51.47	19.158	15.665	38.285
WQ250	49.06	54.56	5.27	19.477	15.678	39.758	7.05	75.41	19.003	15.652	38.175
WQ253	39.55	68.89	13.75	20.998	15.765	40.868	23.63	122.34	19.407	15.678	38.299
WQ268	18.99	43.16	7.54	21.695	15.810	41.378	27.41	162.14	19.849	15.708	37.974
WQ269	16.32	23.07	4.53	20.130	15.718	40.277	18.51	97.40	18.884	15.650	38.232
WQ273	18.77	34.85	5.97	20.022	15.711	40.977	21.35	128.88	18.585	15.632	38.271
32516	23.33	17.93	1.88	18.723	15.649	39.054	5.19	51.08	18.373	15.630	37.982
32517	33.21	16.63	2.18	18.724	15.649	38.706	4.20	33.13	18.442	15.634	38.011
32518	41.53	30.25	4.72	19.085	15.670	39.012	7.35	48.66	18.591	15.643	37.991
32519	20.23	13.04	2.22	19.448	15.686	39.048	7.14	43.30	18.968	15.659	38.139
32520	40.65	14.36	2.98	19.111	15.671	38.583	4.71	23.46	18.794	15.654	38.090

* 据 Zhang *et al.* (2005a), Pb、U 和 Th 含量由 ICP-MS 测定, (²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb)_i、(²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb)_i 和 (²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb)_i 为计算的全岩初始 Pb 同位素比值, 计算时, 中生代和早古生代花岗岩类的岩浆侵位年龄分别采用 *t*=229 Ma 和 *t*=420 Ma, Pb、U、Th 的单位为 μg/g.

特征(张理刚, 1995), 华北陆块中生代花岗岩类以低放射成因铅同位素组成为特征, ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 比值通常小于 17.8; 而扬子陆块中生代花岗岩类主要以高放射成因的铅同位素组成, ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 比值通常大于 17.8. 但扬子陆块同时存在含低放射成因铅同位素组成的花岗岩类, 如主体属于扬子陆块的大别山超高压变质带(Hacker, 1998; Sun *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2002), 产出的中生代花岗岩具有较低的放射成因铅同位素组成(张理刚, 1995; Zhang *et al.*, 2002, 2004b), 反映扬子陆块存在较为复杂的铅同位素组成特征. 综合扬子陆块和华北陆块的 Pb 同位素资料, 具有高放射成因铅同位素组成的花岗岩类是扬子陆块独有的特征, 据此可作为鉴别块体构造属性的有效准则. 祁连山带花岗岩类均以高放射成因的铅同位素组成与扬子陆块中生代花岗岩

类长石铅同位素组成相一致. 考虑到本文的铅同位素资料均为全岩铅同位素比值, 并且祁连山带花岗岩主要形成于早古生代. 为了进行不同时代及不同铅同位素测定对象的比较, 本文选择²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 比值作为一个对比参数, 其优点在于现今的全岩²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 比值与长石²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 比值具有较好的可比性, 时间校正对²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 比值变化不显著. 以本文研究的祁连山带早古生代花岗岩为例, 全岩²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 比值在 450 Ma 内的时间校正, 其比值变化一般小于 0.04. ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 比值直方图(图 3)显示, 祁连山带花岗岩类全岩和基底岩系现今的²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 比值分布及其峰值与扬子陆块中生代花岗岩类长石基本一致, 而明显不同于华北陆块中生代花岗岩类长石. 这表明祁连山带基底具有扬子型陆块的构造属性, 一致于 Nd 同位素模式年龄所得

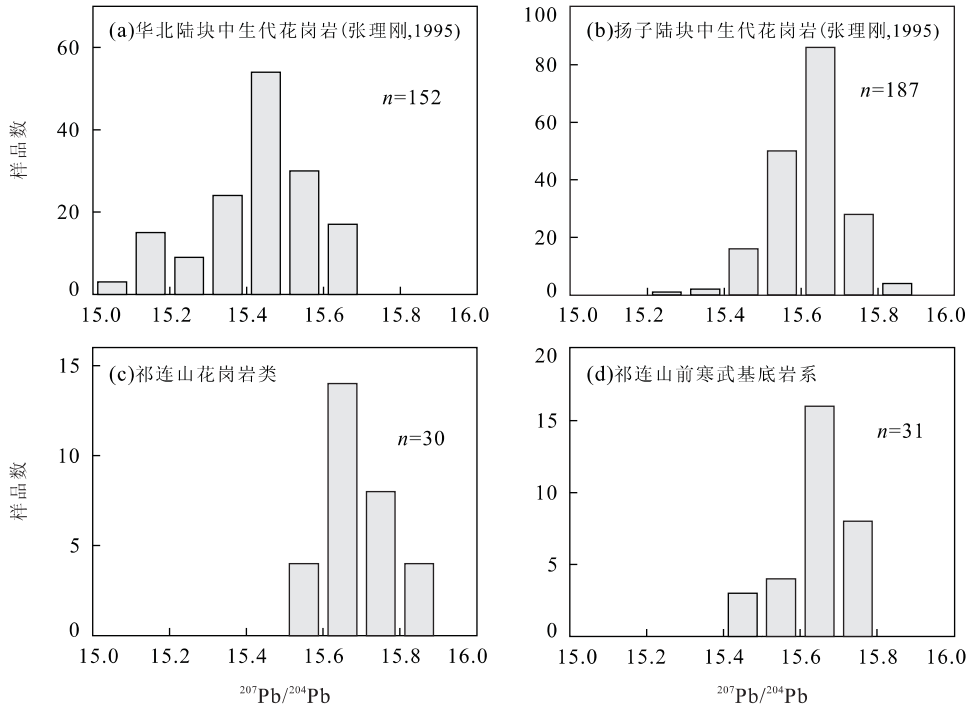


图 3 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分布直方图

Fig. 3 Histogram of $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ distribution

a. 华北陆块中生代花岗岩(张理刚, 1995); b. 扬子陆块中生代花岗岩(张理刚, 1995); c. 祁连山花岗岩类(数据见表 4); d. 祁连山前寒武基底(数据见表 3)

出的认识,并一致于祁连山早古生代基性火山岩 Pb 同位素研究结果(侯青叶等, 2005)及该区 MORB 型玄武岩所揭示的古洋域地幔具有特提斯型的构造属性(Hou *et al.* , 2005).

上述祁连山带基底具有扬子型陆块的构造属性意味着扬子陆块的西北部边界应在祁连山带的北侧. 由于祁连山北侧的河西走廊(被白垩纪—第四纪覆盖)和阿拉善块体(地质上属于华北陆块)南缘缺乏 Pb-Nd 同位素资料,因此,扬子陆块与华北陆块西北部的精确边界位置仍需要进一步研究. 然而,本文研究结果显示了扬子型陆块具有较大的空间分布范围.

5 结论

祁连山带前寒武纪基底岩系和花岗岩类均以高放射成因铅同位素组成为特征,它们的 Nd 同位素亏损地幔模式年龄反映祁连山带地壳的增长主要在元古宙,缺乏太古宙地壳增长的信息. 根据祁连山带与华北陆块和扬子陆块地壳增长特征和 Pb 同位素组成的对比,祁连山带具有扬子型陆块的构造属性,因而将扬子陆块的西北部边界扩大到祁连山带的北

侧. 因此,早古生代北祁连洋盆的出现与闭合应发生在扬子型陆块内部的构造背景.

致谢:感谢 Nigel Harris, Mabs Kunka、Louise Thomas 和 Peter van Calsteren 在 Nd 同位素测定工作中所给予的帮助.

References

Arndt, N. T. , Goldstein, S. L. , 1987. Use and abuse of crust-formation ages. *Geology*, 15: 893—895.

Bureau of Geology and Mineral Resources of Gansu Province, 1989. Regional geology of Gansu Province. Geological Publishing House, Beijing, 752 (in Chinese with English abstract).

Chen, J. F. , Jahn, B. M. , 1998. Crustal evolution of south-eastern China: Nd and Sr isotopic evidence. *Tectonophysics*, 284: 101—133.

Gehrels, G. E. , Yin, A. , Wang, X. F. , 2003. Detrital-zircon geochronology of the northeastern Tibetan plateau. *GSA Bulletin*, 115: 881—896.

Hacker, B. R. , Ratschbacher, L. , Webb, L. E. , et al. , 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultra-high-pressure Qinling-Dabie orogen, China. *Earth Planetary Science Letters*, 161: 215—230.

- Hou, Q. Y., Zhang, H. F., Zhang, B. R., et al., 2005. Characteristics and tectonic affinity of Lajishan paleo-mantle in Qilian orogenic belt; A geochemical study of basalts. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(1): 61—70 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Q. Y., Zhao, Z. D., Zhang, H. F., et al., 2005. Indian Ocean-type isotopic characteristics of Yushigou ophiolite in north Qilian orogenic belt and its geological significance. *Science in China (Series D)*, 35: 710—719.
- Milisenda, C. C., Liew, T. C., Hofmann, A. W., et al., 1994. Nd isotopic mapping of the Sri Lanka basement; Update and additional constraints from Sr isotopes. *Precambrian Research*, 66: 95—110.
- Sun, W. D., Williams, I. S., Li, S. G., 2002. Carboniferous and Triassic eclogites in the western Dabie Mountains, east-central China; Evidence for protracted convergence of the North and South China blocks. *Journal of Metamorphic Geology*, 20: 873—886.
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The continental crust; Its composition and evolution. Blackwell Scientific Publication, Oxford, 312.
- Wan, Y. S., Xu, Z. Q., Yang, J. S., et al., 2001. Ages and compositions of the Precambrian high-grade basement of Qilian terrane and its adjacent areas. *Acta Geologica Sinica*, 75: 375—384.
- Xia, L. Q., Xia, Z. C., Ren, Y. X., et al., 2001. Tectonics, volcanic magma and metallogensis dynamics in Qilian shan. China University of Geosciences Press, Wuhan, 296 (in Chinese).
- Yue, Y., Graham, S. A., Ritts, B. D., et al., 2005. Detrital zircon provenance evidence for large-scale extrusion along the Altyn Tagh fault. *Tectonophysics*, 406: 165—178.
- Zhang, B. R., Gao, S., Zhang, H. F., et al., 2002. Geochemistry of Qinling orogenic belt. Science Press, Beijing, 187 (in Chinese).
- Zhang, G. W., Guo, A. L., Yao, A. P., 2004. Western Qinling-Songpan continental tectonic node in China's continental tectonics. *Earth Science Frontiers*, 11: 23—32 (in Chinese with English abstract).
- 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. *Chemical Geology*, 186: 281—299.
- Zhang, H. F., Harris, N., Parrish, R., et al., 2004a. Cause and consequences of protracted melting of the mid-crust exposed in the North Himalayan antiform. *Earth and Planetary Science Letters*, 228: 195—212.
- Zhang, H. F., Zhong, Z. Q., Gao, S., et al., 2004b. Pb and Nd isotopic composition of the Jigongshan granite; Constraints on crustal structure of Tongbaishan in the middle part of the Qinling-Tongbai-Dabie orogenic belt, Central China. *Lithos*, 73: 215—227.
- Zhang, H. F., Zhang, B. R., Harris, N., et al., 2005a. U-Pb zircon SHRIMP ages, geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of intrusive rocks from the Longshan-Tianshui area in the southeast corner of the Qilian orogenic belt, China; Constraints on petrogenesis and tectonic affinity. *Journal of Asia Earth Science* (in press).
- Zhang, H. F., Jin, L. L., Zhang, L., 2005b. Geochemical and Pb-Sr-Nd isotopic compositions of granitoids from western Qinling belt; Constrains on basement nature and tectonic affinity. *Science in China (Series D)*, 35: 914—926 (in Chinese).
- Zhang, L. G., 1995. Block-geology of eastern Asia lithosphere. Science Press, Beijing, 252 (in Chinese).
- Zhu, B. Q., 1994. Geochemical evidence for the southern China block being a part of Gondwana. *Journal of South-east Asia Earth Science*, 9: 319—329.
- Zhu, B. Q., 1998. Study on chemical heterogeneities of mantle-crustal sysyems and geochemical boundaries of blocks. *Earth Science Frontiers*, 5: 72—82 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 侯青叶, 张宏飞, 张本仁, 等, 2005. 祁连造山带中部拉脊山古地幔特征及其归属: 来自基性火山岩的地球化学证据. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(1): 61—70.
- 甘肃省地矿局, 1989. 甘肃省区域地质志. 北京: 地质出版社, 752.
- 夏林圻, 夏祖春, 任有祥, 等, 2001. 北祁连山构造、火山岩浆、成矿动力学. 武汉: 中国地质大学出版社, 296.
- 张本仁, 高山, 张宏飞, 等, 2002. 秦岭造山带地球化学. 北京: 科学出版社, 187.
- 张国伟, 郭安林, 姚安平, 2004. 中国大陆构造中的西秦岭—松潘大陆构造结重要意义. *地学前缘*, 11: 23—32.
- 张宏飞, 靳兰兰, 张利, 等, 2005b. 西秦岭花岗岩类地球化学和 Pb-Sr-Nd 同位素组成对基底性质及其构造属性的限制. *中国科学(D辑)*, 35: 914—926.
- 张理刚, 1995. 东亚岩石圈块体地质. 北京: 科学出版社, 252.
- 朱炳泉, 1998. 壳幔化学不均一性与块体地球化学边界研究. *地学前缘*, 5: 72—82.