

中国花岗岩与大陆地壳生长方式初步研究

肖庆辉^{1,8} 邱瑞照^{2,3} 邓晋福⁴ 李廷栋^{3,5} 莫宣学⁴ 洪大卫³
卢欣详⁶ 王涛³ 吴福元^{5,7} 谢才富⁸

(1. 国土资源部信息中心, 北京 100812; 2. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;
3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 4. 中国地质大学, 北京 100083;
5. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061; 6. 河南省地质研究所, 河南 郑州 450053;
7. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 8. 宜昌地质矿产研究所, 湖北 宜昌 443003)

摘要: 中国大陆造山带花岗岩可分为东西两个区, 西区的中亚造山带、秦祁昆造山带和青藏高原冈底斯造山带为与大洋发育有关的造山带花岗岩, 东区主体的东北、华北和华南是形成于中国大陆拼合之后的燕山期造山带花岗岩。根据不同造山带花岗岩的形成背景、地质地球化学特征差异, 以阿尔泰、东昆仑、华北燕山、东北和南岭造山带花岗岩为例讨论花岗岩与大陆地壳生长的关系, 区分出中国大陆的 5 种大陆地壳生长方式: 阿尔泰式是古亚洲洋背景上形成的古生代对流地幔物质、热输入和上地壳混合为主的方式; 东昆仑式是元古代造山带 TTG 陆壳背景基础上古生代—早中生代对流地幔物质和热输入, 改造元古宙造山带基底的方式; 东北式是燕山期中亚造山带背景上对流地幔物质和热输入改造显生宙陆壳的生长方式; 燕山式是燕山期对流地幔物质和热输入改造太古宙基底的方式; 南岭式燕山期对流地幔输入大陆的是以热为主、物质为辅, 大陆地壳生长是以陆壳物质再循环为主(零增长)的生长方式。它们构成中国大陆显生宙地壳生长的基本方式。

关键词: 造山带花岗岩; 大陆地壳生长; 显生宙; 中国大陆

中图分类号: P588.12^{†1} **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2005)03-0343-10

20 世纪 90 年代以来, 地质学家们认识到花岗岩、成矿作用实际上是对流地幔物质热输入的产物, 壳幔相互作用, 特别是下地壳、岩石圈地幔/软流圈系统相互作用和变迁对花岗岩、成矿作用有重要的控制作用^[1,2]①, 因此把花岗岩的形成与大陆形成演化、大陆地壳生长联系起来, 从新视角研究花岗岩形成过程与大陆地壳生长关系已成为重要方向^[2,3]。花岗质岩石是构成大陆地壳的主体, 同时也是大陆地表分布最广的岩石, 这些低密度岩石基本上都是由火成岩浆作用产生的, 其形成与壳幔相互作用密切相关, 因此花岗岩是大陆地壳生长的重要标志, 也是探讨大陆地壳生长的最佳窗口和研究对象。

本文是在对中国大陆内秦岭、东昆仑、兴蒙造山带及中国东部的东北、华北和华南等地花岗岩进行综合研究的基础上,

根据区域地质学、岩石学和地球化学对比研究, 初步总结的中国大陆 5 种大陆地壳生长方式。

1 中国大陆主要造山带花岗岩的时空分布特点

中国大陆是由中朝、扬子与塔里木等几个比较小的克拉通与其间的造山带拼合而成, 根据中国大陆形成、演化阶段划分^[3-6]: (1) 拼合前(震旦纪前)是塔里木、扬子、中朝克拉通块体等几个克拉通块体独自形成的过程; (2) 主体拼合时期(震旦纪—三叠纪)包含两个阶段: 古生代时期, 中朝和塔里木及其周边造山带拼合形成北方拼合大陆, 形成主体呈 EW 向展布的中亚(兴蒙)造山带; 南方以扬子克拉通为主体与周边造山带拼合形成华南拼合大陆。三叠纪时期, 以中轴大陆为核心的北方拼合大陆和以扬子克拉通为主体的南方大陆拼合, 形

收稿日期: 2004-12-21; 改回日期: 2005-02-22

基金项目: 中国地质调查局重大基础研究项目(200113900018)、国土资源部科技计划专项(20001010202, 200010103)和中国地质大学“岩石圈构造、深部过程及探测技术”教育部重点实验室开放课题(2003010)共同资助。

作者简介: 肖庆辉, 男, 1939 年生, 博士生导师, 研究员, 构造地质学专业, 现从事花岗岩大地构造学与中国岩石圈三维结构研究;

E-mail: qhxiao@infomail.mlr.gov.cn.

① 李晓波, 肖庆辉, 白星碧, 等(译校). 美国大陆动力学研究的国家计划. 中国地质矿产信息研究院, 1993. 1~73.

成中国主体大陆和主体呈现 NW 向展布的秦祁昆造山带。(3)拼合后(三叠纪至今),伴随中国大陆边界条件发生的巨大变化,动力学机制也由以南北向为主转变为以东西向为主,在中国东部,中生代挤压造山、新生代拉张形成裂谷系,形成总体 NE、NNE 走向的滨西太平洋构造域,中国西部则中生代张开形成特提斯洋、新生代挤压造山,形成青藏高原新生代造山系^[6,7]。

根据成因,造山带一般可以分为两类^[8]:一类是与大洋发育、消亡有关的(包括大大小小的洋)造山带,另外一类是与洋无关的陆内或板内造山带。从中国大陆造山带花岗岩的形成时代与形成环境来看,中亚造山带形成于古生代,秦祁昆造山带花岗岩主要形成于古生代,延续到早中生代,青藏高原冈底斯造山带形成于新生代。这些造山带在形成环境上都属于与大洋发育相关的造山带,在空间上分布于中国大陆西部(属于中亚造山带东段的东北在中生代已被改造^[9]);而中国东部的东北、华北、华南燕山期造山带花岗岩,形成于中国大陆拼合之后,大地构造环境可能为靠近大陆一侧的岩浆弧^[9],其中燕山期花岗岩的最重要特点是形成面状分布的花岗岩带。因此,中国大陆造山带花岗岩在空间上可分为中国东部和西部两类造山带。

在同一大类中,由于各个地区地质历史不同、造山带发育背景差异等,这些差异都会反映在花岗岩的地质、地球化学特征中,其中中亚造山带形成于古亚洲洋背景^[9],秦祁昆造山带^[9-10]和青藏高原冈底斯造山带^[11-12]形成于元古宙造山带基底基础上发育的特提斯背景;而中国东部是形成于中国大陆拼合之后的大陆背景,东北、华北和华南花岗岩形成于软流圈上涌系统与东侧太平洋板块共同作用的动力学背景^[13],虽然它们形成于大致相同的动力学背景,但由于其改造前的基底属性、岩石圈深部物质组成差异(如华北是太古宙克拉通陆壳(>1800 Ma)、东北是显生宙陆壳(>350 Ma)、华南是元古宙造山基底(>700 Ma),各区形成的花岗岩和矿产组合各不相同,反映了深部物质组成(源区)对火成岩组合、矿产组合的约束^[9]。因此,中国大陆主要造山带花岗岩大致可以分为两区5类。限于资料,以下以阿尔泰、东昆仑、华北燕山、东北和南岭造山带花岗岩为例,探讨中国花岗岩与大陆地壳生长的方式。

2 造山带花岗岩的岩石学特征

2.1 岩石组合

花岗岩岩石组合是构造演化、壳幔相互作用和大陆地壳生长的记录(图1)。

阿尔泰造山带包含加里东期和华力西期两个造山旋回,这两个造山旋回的岩石组合中都出现花岗闪长岩,但在数量上前者以花岗闪长岩为主体,后者花岗岩较多(图1-a)。

东昆仑造山带包含早—中泥盆世的加里东期旋回和晚华力西—印支期旋回,花岗岩以正长花岗岩和二长花岗岩为主,其次是石英二长闪长岩、花岗闪长岩和二长闪长岩等,个别点落入石英正长岩、钾长正长岩等区域。在两个造山旋回岩石组

合中花岗闪长岩都是作为岩石组合的主要组分出现(图1-b)。

阿尔泰、东昆仑造山带花岗岩在形成环境上都属于与大洋发育相关的花岗岩。而花岗闪长岩在大陆生长中属于 TTG 组合中的 G,地壳的成熟度较高。

中国东部的东北、华北、南岭燕山期花岗岩,形成于中国大陆拼合之后,大地构造环境可能为靠近大陆一侧的岩浆弧^[9],岩石组合以花岗岩为主体,其中东北、华南有少量花岗闪长岩(图1-c, d, e)。

从整体上看,西部两个造山带的岩石组合具有较大的相似性,而东部可能由于对流地幔输入(东部的碱度(K_2O+Na_2O)高于西部),导致花岗闪长岩含量减少(如东北、南岭)乃至无花岗闪长岩(如华北燕山)。这是东部造山带与西部造山带的区别之一。

2.2 岩石化学成分特征

从岩石化学成分(表1)看,阿尔泰、东昆仑、燕山、东北和南岭区造山带花岗岩,虽然其形成时代、背景各不相同,但从岩石系列上看,在 FAM 图、 $SiO_2-\log[(CaO)/(K_2O+Na_2O)]$ 图上所反映的主体都是钙碱性花岗岩;在 SiO_2-K_2O 图上都程度不同地出现了钾玄岩系列岩石。

阿尔泰造山带花岗岩中,总体上由加里东期造山旋回到华力西期造山旋回,花岗岩的 SiO_2 、 K_2O 、含碱量(Na_2O+K_2O)升高,前者 Na_2O/K_2O 为 0.60~3.75,平均 1.66,主要为钙碱性和高钾钙碱性系列;后者 Na_2O/K_2O 比值为 0.70~14.11,平均 2.81,以高钾钙碱性系列为主,个别属于钾玄岩系列,总体显示了钠质花岗岩的特点。铝饱和指数 $[A/CNK=Al_2O_3/(CaO+K_2O+Na_2O)$ 摩尔比值]显示,加里东期造山旋回花岗岩主体以准铝和弱过铝为特征,而华力西期造山旋回花岗岩以弱过铝为主,少数属于强过铝(如出现二云母花岗岩)。

在东昆仑造山带,岩石的 SiO_2 含量在 49.21%~78.51%之间,变化范围较宽;里特曼指数变化于 0.58 和 9.28 之间,主要以钙碱性为主;铝质指数从 0.53 变化到 1.63,由偏铝质到过铝质,绝大多数为弱过铝质。多数样品落在钙质系列和高钾钙碱性区域,个别落在钾玄岩系列。加里东期岩石的 Na_2O/K_2O 比值平均为 0.89,华力西—印支期岩石平均值为 1.29,从时间上来看,有时代越新越富碱、富钠的趋势;在空间上,对晚古生代岩体而言,昆南比昆北更富碱和富钾。

从上述特征看,西部两个造山带花岗岩的特征类似,以准铝质、富碱、富钠为特征。

中国东部燕山期花岗岩不同区域的岩石类型、岩石系列各具特点(表1):

(1)东北地区燕山期花岗岩组合中以 I 型和 A 型为主而几乎没有 S 型^[14-15],岩石化学成分以富 Na 为特征(Na_2O/K_2O 比值的平均值为 1.46),绝大多数为偏铝质(A/CNK 为 0.75~1.11,平均为 0.97);矿产组合以 Cu、Au 为主,含矿岩石、花岗岩的 Sr、Nd 同位素与西部的同位素组成一致^[9],绝大多数铈同位素初始值都小于 0.706,钕同位素 ϵ_{Nd} 值绝大多数为正值,暗示东北地区中生代除了有大量新的地幔物质注入



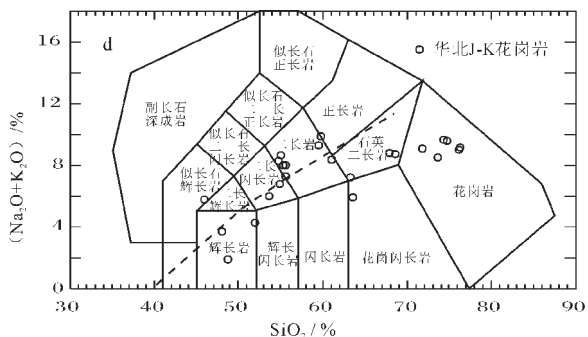
a—阿尔泰加里东期—华力西期花岗岩
a—Caledonian and Hercynian granitoids in Altay



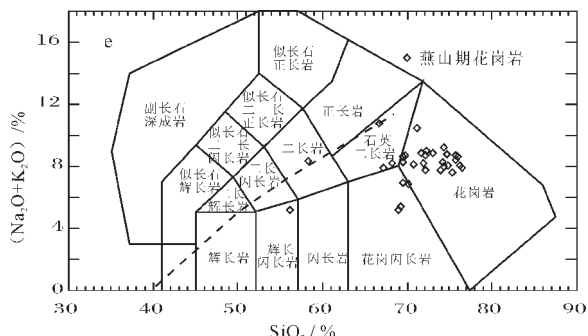
b—东昆仑加里东期、华力西—印支期花岗岩
b—Caledonian and Hercynian—Indosinian granitoids in the East Kunlun



c—东北燕山期花岗岩
c—Yanshanian granitoids in Northeast China



d—华北燕山期花岗岩
d—Yanshanian granitoids in North China



e—华南燕山期花岗岩
e—Yanshanian granitoids in South China

图 1 中国主要造山带花岗岩区 TAS 图

Fig. 1 TAS diagram of granitic rocks from main orogenic belts in China

陆壳外,还继承了西部深部物质的特点^[6]。

(2)华北燕山期广泛发育 HKCA 火成岩不同于东北岩石富 Na 的特点,岩石类型主要是 I 型、A 型和非典型 S 型;岩石绝大多数为偏铝质(A/CNK 平均值为 0.89);成矿作用以 Au、Cu、Mo、Pb、Zn、Ag 为主^[14-22],火成岩证据表明侏罗纪—白垩纪形成的新陆壳既有从地幔中分出的新生陆壳的贡献,也有原有古老陆壳再熔融产生的再生陆壳的贡献^[13]。

(3)南岭燕山期花岗岩岩石类型主要是 S 型,岩石化学成分以富碱、高钾为特征 (Na_2O/K_2O 比值的平均值为 0.68),多数属于过铝、强过铝花岗岩(A/CNK 为 0.72~1.53,平均值为 1.07),过铝花岗岩主要由钾长花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长(斑)岩和花岗质碎斑熔岩组成,其中钾长花岗岩和二长花岗岩占主导优势^[24-25]。矿产组合以 W、Sn、Bi、Mo、Nb、Ta 等为主,与燕山期花岗岩以陆壳物质再循环为主的特点相符。

3 Sr、Nd 同位素特征

在对花岗岩类成因多样性与演化复杂性的研究中,同位素示踪是其重要方法之一,尤其是采用多元同位素示踪(Sr-Nd-Pb)共同约束已成为一种重要的发展趋势。近年来以 Sr-Nd 同位素为主体的同位素示踪是花岗岩成因分类、物质来源与演化等研究中必不可少内容,以时代演化为依据的同位素示踪方法,使花岗岩研究从一维向二维、三维示踪发展,也使动态演化研究成为可能,并成为追踪大陆地壳生长作用过程的重要方法。

根据同位素原理,Nd 同位素参数中 t_{CHUR} 、 t_{DM} 或 t_{2DM} 是依据不同参数模式计算的模式年龄,揭示壳幔分异作用时间,即原始地壳形成时间或地壳居留时间;而 $\epsilon_{Nd}(t)$ 则代表它们刚从岩浆中结晶分离出来时的 Nd 同位素初始比值($^{143}Nd/^{144}Nd$)_i,代表了源区 Nd 同位素组成特征。统计资料表

表 1 中国大陆主要造山带花岗岩岩石化学成分特征值
Table 1 Petrochemical characteristic values of granitic rocks from main orogenic belts in the China continent

地区	阿 尔 泰			东 昆 仑			华 北			华 南			东 北								
	加里东期(N=24)	华力西期(N=19)	加里东期(N=35)	华力西—印支期 (N=237)			燕山期 (N=23)			燕山期 (N=31)			燕山期 (N=110)								
特征值/%	平均	最小	最大	平均	最小	最大	平均	最小	最大	平均	最小	最大	平均	最小	最大	平均	最小	最大			
SiO ₂	64.46	39.46	75.26	68.92	45.96	77.92	71.56	64.05	79.08	67.61	44.77	80.86	60.42	45.19	75.98	71.16	55.53	76.62	68.75	50.64	78.53
K ₂ O+Na ₂ O	5.48	1.27	7.68	6.99	2.05	9.78	7.29	4.69	9.44	6.78	2.40	10.31	7.40	1.81	9.66	8.04	5.12	10.71	7.82	4.12	10.01
Na ₂ O/K ₂ O	1.66	0.60	3.75	2.81	0.70	14.11	0.89	0.43	2.33	1.29	0.26	8.58	2.65	0.73	21.48	0.68	0.29	1.23	1.46	0.58	6.52
K ₂ O	2.49	0.28	4.55	3.43	0.17	5.70	3.97	1.68	5.45	3.30	0.42	5.88	2.96	0.29	4.80	4.61	0.20	6.71	3.50	0.67	6.30
DI	65.52	10.06	90.13	77.43	17.61	96.06	82.16	60.51	94.20	72.77	18.31	96.92	67.39	14.06	97.83	83.74	48.94	93.23	65.35	28.99	83.42
A/CNK	1.02	0.65	1.21	1.00	0.62	1.17	1.03	0.80	1.34	0.98	0.53	1.63	0.89	0.34	1.29	1.07	0.72	1.53	0.97	0.75	1.11
σ ₄₃	1.34	-1.15	2.12	2.00	0.96	3.28	1.89	0.89	2.96	1.97	0.46	4.57	3.75	0.60	11.31	2.40	1.02	4.88	0.54	0.10	1.48
AR	2.05	1.08	3.44	3.03	1.17	5.13	2.85	1.63	4.71	2.52	1.18	5.43	2.61	1.25	5.51	3.33	1.76	4.94	1.50	1.08	1.99

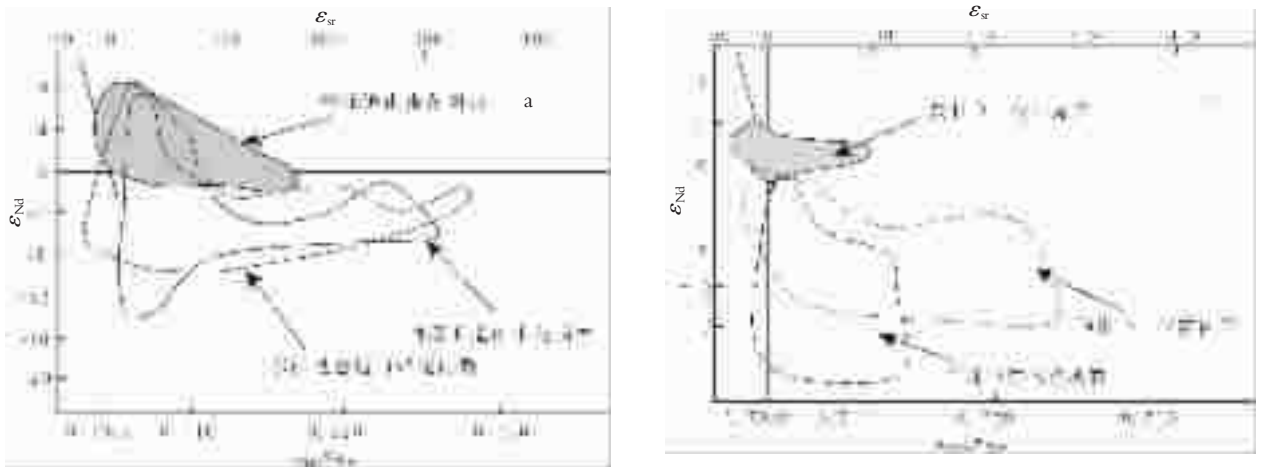


图 2 中国主要造山带花岗岩 Sr-Nd 同位素组成

a—中国西部造山带(冈底斯;参见参考文献[38]及其中文文献;东西昆仑;参见脚注①和②;中亚;参见参考文献[8, 29]及脚注③);

b—中国东部造山带(华南;参见参考文献[24, 31, 32, 34, 35, 36];华北;参见参考文献[18, 22, 27, 28]及脚注④;

东北;参见参考文献[13, 14, 29, 30]及脚注⑤)

Fig. 2 Sr and Nd isotopic compositions of granitic rocks from main orogenic belts in China

a—Orogenic belts in western China; b—Orogenic belts in eastern China

① Qiu Ruizhao, Zhou Su, Xiao Qinghui, et al. Discussion on the basement of Qinghai-Tibetan Plateau, China, evidence from the Nd Isotope of igneous rocks. 20 HKT Workshop (abstract) held in Aussois (France). 2005.3.29-4.1.

② 莫宣学, 等. 东昆仑造山带岩浆混合花岗岩及其填图方法基础研究. 见:肖庆辉等.中国花岗岩重大地质问题研究报告第五章(未刊), 2004.

③ 洪大卫, 等. 兴蒙造山带花岗岩及大陆地壳生长. 见:肖庆辉等.中国花岗岩重大地质问题研究报告第三章(未刊), 2004.

④ 邓晋福, 等. 燕山造山带花岗岩与大陆地壳改造和生长. 见:肖庆辉等.中国花岗岩重大地质问题研究报告第四章(未刊), 2004.

明,地壳中古老花岗岩类(>20 亿年)的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值多在 0 附近变化,年轻花岗岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值绝大多数都小于 0。不同源区的花岗岩中,幔源花岗岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 一般为正值,岩石的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 负值通常被理解为成岩物质来自地壳,偏离零值的程度愈大,岩石中地壳物质组分愈多。据全球 500 个花岗岩资料统计,不同源区的花岗岩 Sr 同位素的初始比值 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 不同,地幔源区的低 (≤ 0.706),而地壳源区的高 (≥ 0.720),通常变化在 0.700~0.737 之间。一般幔源花岗岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 最大,同时 $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 最小;大陆边缘壳幔混合型花岗岩类一般 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ — $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 值构成了一条狭窄的相关带,它的一头指向地幔排列,一头指向地壳源区,这是最常见的显生宙花岗岩的特征。南美秘鲁—智利安第斯花岗岩、不列颠晚加里东期花岗岩、澳大利亚东南部古生代花岗岩、法国华力西期花岗岩、马来西亚半岛东海岸区花岗岩等,都具有类似的 Nd、Sr 同位素组成变化。壳源花岗岩(S 型花岗岩,也有人称为壳型花岗岩),其物源特征是无幔源组分加入,近些年来对这类花岗岩研究发现壳型花岗岩显著特点是它们的水平相关趋向不指向地幔源区, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 一般变化在 -5~-10 之间,其中大多数集中在 -6~-8 之间, $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 主要变化在 +50~+20 之间;中国华南加里东期花岗岩类、拉萨地体白垩纪—古近纪和昆仑地体中晚二叠世—早三叠世的壳型花岗岩均显示出水平演化趋向,不同的是它们的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值较高, $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 值变化较小,在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ — $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 图上的左右展布 ($\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 值变化大小取决于源岩岩性,源岩物质成分越复杂和包含了陆源沉积物越多时展布的范围越大,上下位置取决于源岩年龄,当壳型花岗岩的源岩比较年轻时,相关带位置偏上,而源岩为元古宙的壳型花岗岩位置居下。因此,同位素示踪能够为花岗岩的源区及组成提供有效指示。

中国主要造山带花岗岩 Sr—Nd 同位素组成,图 2 显示出区域花岗岩 Sr—Nd 同位素组成的差异。

3.1 阿尔泰造山带

阿尔泰造山花岗岩都有较高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,绝大多数样品的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值高 (>0),大大高于一般造山带中的花岗岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (<0)。在 $I_{\text{Sr}}-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解中,多数样品位于第 1 和 2 象限,反映了中亚造山带正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值花岗岩的普遍特点,即年轻幔源对花岗岩的形成提供了重要的物质来源^[8]。在加里东期造山旋回和华力西期造山旋回中,就岩石类型而言,基性岩、后造山晚期中酸性岩脉 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为正值,且数值最高,英云闪长岩、花岗闪长岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值较高(多大于 0),二云母花岗岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值较低(接近 0 和小于 0)。对比加里东期造山旋回和华力西期造山旋回花岗岩来看,加里东旋回造山花岗岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值较低,多变化于 -3~+4,平均 +0.5 左右;模式年龄 T_{DM} (单阶段)较老(0.8~1.4 Ga);而华力西期旋回造山花岗岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值较高,如喇嘛昭二云母花岗岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 +1.3~+2.8,平均 2.05,富蕴 220 Ma 的花岗闪长岩

$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值高达 5.5,晚期中酸性岩脉更高(+8.6),平均模式年龄 T_{DM} 变化大(0.6~1.7 Ga)。

该带花岗岩普遍具正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值的特点,说明对流地幔物质对花岗岩形成有重要贡献,而 $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 变化很大(+55~+146),并显示出水平方向的变化趋势,反映该区可能是对流地幔输入与上地壳混合的特点。

3.2 东昆仑造山带

东昆仑花岗岩质岩石样品的 I_{Sr} 值变化于 0.701 31 和 0.714 13 之间,但多数小于 0.71,显示下地壳低 I_{Sr} 值(0.702~0.705)的特征; $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值只有两个早古生代花岗岩样品值大于 0,其余为负值并变化于 -9.2~-3.6 之间,显示多数花岗岩质岩石主要应起源于地壳, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 正值说明确实具有对流地幔物质输入,并且未与地壳物质充分地进行混合而保留了幔源区的同位素组成。Pb 同位素组成说明岩石中只有少部分放射成因铅的存在,在 Zartman & Doe^[20]Pb 同位素构造模式图上,几乎所有投影点均落入造山带 Pb 演化线附近,只有少量在地幔增长线和造山带之间;在 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 对 $^{206}\text{Pb}/^{234}\text{Pb}$ 同位素相关图解上,多数样品的投影点落入 EM II 区,即多数岩石具有来自富集地幔 II 源区的性质^①。

上述特点说明东昆仑造山带花岗岩质岩石的物质来源主要是壳源,但有对流地幔物质输入,岩石的可能成因模式是对流地幔物质输入并与地壳的长英质岩浆发生混合作用,从而使花岗岩与闪长质包体的同位素组成趋于一致。

3.3 燕山造山带

燕山地区中生代各时代火成岩样品的 Sr—Nd—Pb 同位素表明,总体上火成岩样品具低的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值,一般都在 0.511 6~0.512 1 之间;而 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值一般都大于 0.705;中基性岩体比值一般均集中在 0.705~0.706 之间;而酸性岩体如中侏罗世的四干顶岩体 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 0.708 369,晚侏罗世的碓臼峪石榴花岗岩为 0.732 679;早白垩世早期的黑熊山花岗岩为 0.895 478,早白垩世早期的柏查品洞花岗岩为 0.897 727;早白垩世晚期的苦梨树沟石榴花岗岩 0.728 387。燕山地区中生代火成岩 $^{206}\text{Pb}/^{234}\text{Pb}$ 值一般为 15.80~17.06 之间,在 $^{206}\text{Pb}/^{234}\text{Pb}$ — $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 图解中分布于 EM I 左下侧。在 $^{206}\text{Pb}/^{234}\text{Pb}$ — $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图解中分布于 EM 右上侧^②。

从以上 Sr—Nd—Pb 同位素的这些特征来看,燕山地区中生代火成岩源区与 EM I 源区最相近。在 $^{207}\text{Pb}/^{234}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{234}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{234}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{234}\text{Pb}$ 图中,燕山地区中生代火成岩落入下地壳和亏损地幔区域。因此,燕山地区中生代火成岩源区可能为地幔物质与地壳物质混合成因。在 $^{207}\text{Pb}/^{234}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{234}\text{Pb}$ 图解中显示燕山地区中生代火成岩铅同位素组成均分布于下地壳和地幔之间,更证实了燕山地区中生代火成岩为地幔底侵作用,导致地幔物质与地壳物质混合而成。

① 莫宣学,等. 东昆仑造山带岩浆混合花岗岩及其填图方法基础研究. 见:肖庆辉等.中国花岗岩重大地质问题研究报告第五章(未刊),2004.

② 邓晋福,等. 燕山造山带花岗岩与大陆地壳改造和生长. 见:肖庆辉等.中国花岗岩重大地质问题研究报告第四章(未刊),2004.

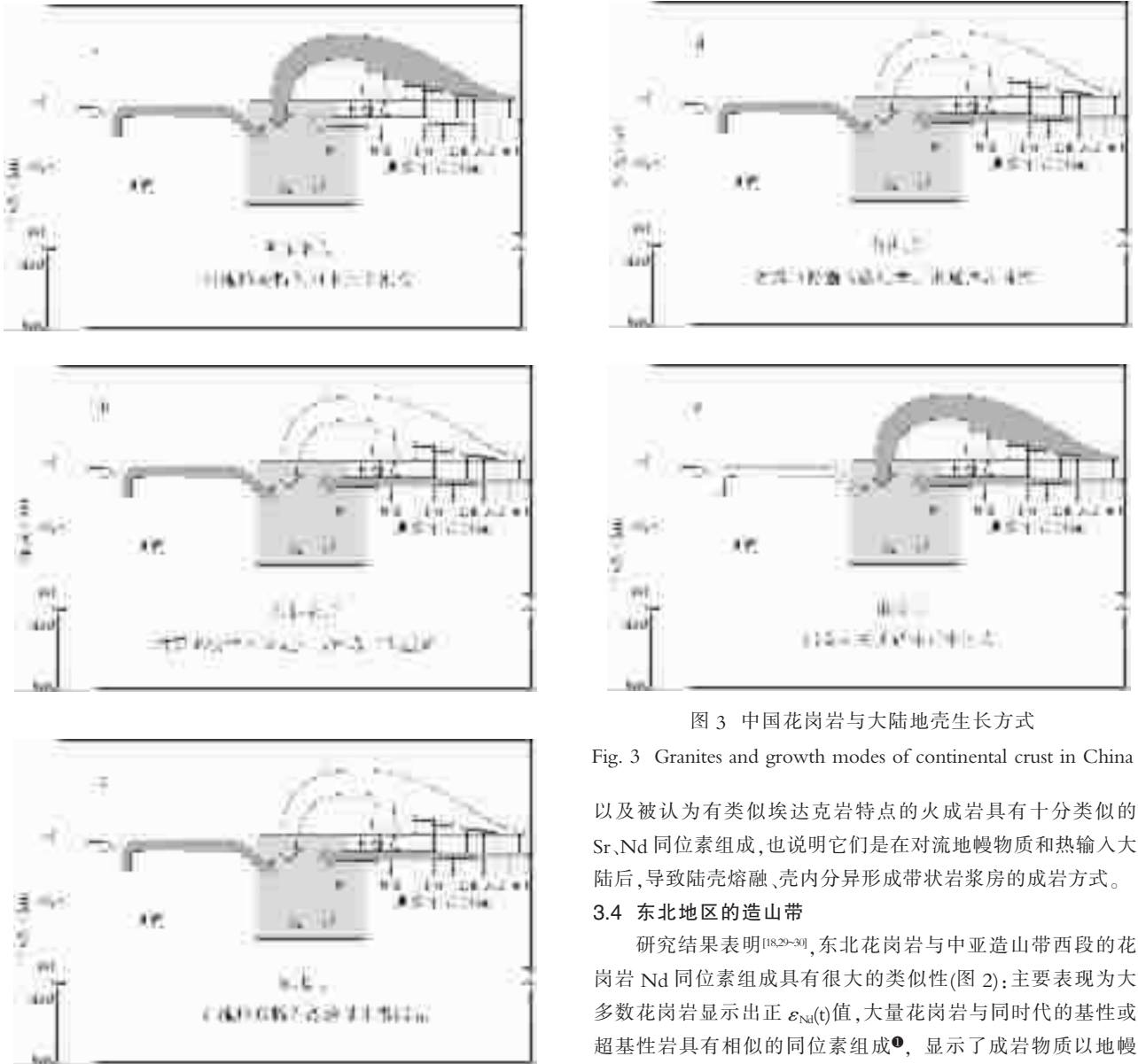


图 3 中国花岗岩与大陆地壳生长方式

Fig. 3 Granites and growth modes of continental crust in China

以及被认为有类似埃达克岩特点的火成岩具有十分类似的 Sr、Nd 同位素组成,也说明它们是在对流地幔物质和热输入大陆后,导致陆壳熔融、壳内分异形成带状岩浆房的成岩方式。

3.4 东北地区的造山带

研究表明^[18,29-30],东北花岗岩与中亚造山带西段的花岗岩 Nd 同位素组成具有很大的类似性(图 2):主要表现为大多数花岗岩显示出正 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值,大量花岗岩与同时代的基性或超基性岩具有相似的同位素组成^①,显示了成岩物质以地幔源区为主的特点。

东北晚二叠世—早白垩世火成岩,其 Nd 模式年龄主要在 600~1 200 Ma 之间,位于长春—磐石一线以南地区花岗岩的 Nd 模式年龄较老,为 1 300~2 400 Ma,可能与其间夹微古陆或靠近华北地台有关,且有太古宙残留锆石可以得到证实。而如果从统计的角度,总体上东北花岗岩的 T_{DM} 年龄相对较年轻和 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值较低,在 Sr—Nd 图上,东北花岗岩的 Sr 同位素有两种趋势,即低 Sr 和 Sr 同位素水平漂移(图 2),可能说明地幔物质输入和改造地壳;在岩石组合上,东北只有少量花岗闪长岩,明显少于西段阿尔泰,可能与新的地幔物质输入大陆有关,因此,可以认为东北地区的大陆生长方式与华北一样是

从华北地区来看^[18,22,27],燕山期花岗岩与同时代的镁铁质—超镁铁质岩、煌斑岩、辉长岩、闪长岩以及被认为有类似埃达克岩的地球化学性质的中生代火山岩(124~119 Ma)的 Sr、Nd 同位素性质十分类似^[18,23],一致显示了 EMI 型富集地幔的源区特征^[18,22,27-28];花岗岩和中酸性火山岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值以燕辽、辽西的最高,太行山、燕山的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值较高,华北地台南缘较低,胶东的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值最低^[18,23],暗示不同区域的火成岩源区虽受地壳混染程度或地幔物质输入数量有所差异,但都属壳幔混合源区。花岗岩与同时代的镁铁质—超镁铁质岩、煌斑岩、辉长岩、闪长岩,

① 洪大卫,等. 兴蒙造山带花岗岩及大陆地壳生长,见:肖庆辉等,中国花岗岩重大地质问题研究报告第三章(未刊),2004.

对流地幔输入改造地壳,而不同于华北的是东北地区改造的是显生宙地壳。

3.5 南岭造山带

南岭是华南最重要的花岗岩分布区。用二阶段模式计算的 240 个花岗岩体的 Nd 模式年龄 T_{DM} , T_{DM} 集中在 1.0~2.0 Ga 范围内,平均为 1.5 Ga^[31],与本区出露的前寒武纪基底岩石的年龄以及火山岩、变质岩及花岗岩中继承性锆石的平均年龄^[32-33]一致,说明南岭大陆地壳主要是在元古宙形成的^[34-27]。在华南地区除在浙闽粤沿海带、皖南—苏南(123~137 Ma)、长江中下游沿江带、赣东北—浙西等少数地区中生代以 I 型闪长岩和花岗闪长岩为主, Sr、Nd 同位素反映出有地幔物质参与外,在南岭(如湘桂)内陆的花岗岩浆活动基本上没有地幔物质参与,花岗岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值主要集中在 -5~-10 范围内^[31]。Sr 同位素为“水平漂移”的壳源花岗岩特征(图 2),因此,南岭花岗岩的物质来源应该主要是古老的、重循环的地壳岩石。

4 中国大陆生长方式

大陆地壳生长是指地幔物质通过各种作用进入地壳,导致地壳物质数量增加和体积增大。从花岗岩的物质构成来看,花岗岩的物质来源可能包括地幔、下地壳和上地壳。借助花岗岩物质组成研究可以探讨地幔物质输入地壳的多少及其过程,因此大陆地壳是否生长,可以通过是否具有地幔物质输入地壳、输入多少、输入过程等进行判断。

图 3 为借用造山带铅同位素储库结构图等^[29], 概略表述上述 5 个地区造山带中地幔、上地壳、下地壳物质参与程度以及大陆地壳生长方式。

(1) 阿尔泰式(图 3-a): 对流地幔输入和中上地壳混合

阿尔泰造山带形成背景是古亚亚洲洋,花岗岩总体显示富钠、准铝和弱过铝为主的特点,从加里东期造山旋回到华力西期造山旋回,岩石化学成分中 SiO_2 、 K_2O 、含碱量(Na_2O+K_2O) 升高,岩石系列由钙碱性和高钾钙碱性系列到以高钾钙碱性系列,甚至出现个别钾玄岩系列岩石。从加里东期造山旋回的岩石组合中出现花岗闪长岩来看,这一时期的大陆地壳生长可能是由不成熟的洋内弧发展到具陆壳的显生宙地壳;华力西期造山旋回可能是在显生宙地壳基础上形成的大陆边缘环境;加里东期和华力西期花岗岩都以正 ϵ_{Nd} 为鲜明特色,反映了对流地幔物质输入的特征;而从华力西期花岗岩 Sr 同位素“水平漂移”来看(图 2),华力西期造山旋回可能为对流地幔输入与中上地壳混合的过程,因此其大陆地壳生长可能为对流地幔物质和热输入及其与中上地壳混合为主的方式。

(2) 东昆仑式(图 3-b): 对流地幔输入和元古宙基底混合

背景是元古宙造山带 TTG 陆壳。野外发现花岗岩中的大量镁铁质岩浆团块是对流地幔物质输入的具体标志,而只在加里东期造山旋回早期(480~490 Ma)出现正 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值花岗岩,其余多数为 $\epsilon_{Nd}(t)$ 负值,这一特点与秦岭—大别^[18]、青藏高

原冈底斯^[28]等经历了大洋俯冲形成的造山带花岗岩类似;岩石组合中出现花岗闪长岩说明这一时期由俯冲洋壳形成的岛弧为具陆壳基底的成熟岛弧。印支造山旋回除大量岩浆混合花岗岩外,还有辉长岩—辉石岩—橄辉岩杂岩体侵入,以及岩石组合中出现花岗闪长岩,说明该区域对流地幔物质输入大陆是对元古宙 TTG 陆壳和早古生代具有陆壳基底岛弧的改造;晚中生代—新生代该区卷入了青藏大陆碰撞造山系统并有造山带山根形成,说明这一时期是属于陆内物质循环。因此,其大陆生长方式可以概括为对流地幔物质和热输入,改造元古宙造山带基底。

(3) 东北式(图 3-c): 对流地幔输入改造显生宙陆壳

东北属于西伯利亚和中朝—塔里木地台之间的中亚造山带东段,花岗岩以 I 型、A 型为主,几乎没有 S 型,岩石化学成分以高钾、富钠为特征, Nd 同位素多数显示为 $\epsilon_{Nd}(t)$ 正值。与中亚造山带西段比较,东北花岗岩的 T_{DM} 较年轻和 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值较低并形成峰值,可以认为东北花岗岩除了中生代新输入大陆的地幔物质外,还有改造显生宙陆壳形成的花岗岩,属于对流地幔输入改造显生宙陆壳的生长方式。

(4) 燕山式(图 3-d): 对流地幔输入改造太古宙基底

华北燕山造山带背景是晚太古宙—古元古宙形成的克拉通性质的大陆,在燕山期(侏罗纪—白垩纪)大量对流地幔的物质与热注入,使华北克拉通“活化”,形成分布广泛的高钾钙碱性火成岩组合(HKCA),不同于东北花岗岩岩石富 Na 的特点,该区岩石组合为 I 型+A 型+非典型 S 型,它们是从地幔中分出的新生物质(辉长岩和闪长质)与太古宙—古元古宙陆壳再熔融产生的再生花岗岩岩浆混合的产物,大陆地壳生长方式是对流地幔输入改造古老陆壳(克拉通)与新生陆壳生长。

(5) 南岭式(图 3-e): 陆壳物质再循环

南岭燕山期花岗岩形成背景是元古宙造山带基底,花岗岩以 S 型、富碱、高钾为特征,多数属于过铝、强过铝花岗岩, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值绝大多数为负值, Sr 同位素呈水平漂移,表明花岗岩形成以陆壳物质再循环为主,反映燕山期对流地幔输入大陆的是以热为主、物质为辅,大陆地壳生长是以陆壳物质再循环为主(零增长)的生长方式。

参考文献(References):

- [1] 邓晋福,莫宣学,赵海玲,等. 中国岩石圈—软流圈系统大灾害与成矿环境[J]. 矿床地质, 1999, 18(4):309~315.
Deng Jinfu, Mo Xuanxue, Zhao Hailing, et al. The Yanshanian lithosphere—asthenosphere catastrophe and metallogenic environment in East China[J]. Mineral Deposits, 1999, 18(4):309~315 (in Chinese with English abstract).
- [2] 肖庆辉,邢作云,张昱,等. 当代花岗岩研究的几个重要前沿[J]. 地质前缘, 2003, 10(3):221~229.
Xiao Qinghui, Xing Zuoyun, Zhang Yu, et al. The major frontiers of the recent studies of granite[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(3):221~229 (in Chinese with English Abstract).

- [3] 任纪舜,牛宝贵,刘志刚. 软碰撞、叠覆造山和多旋回缝合作用[J]. 地质学前沿, 1999, 6(3):85~93.
Ren Jishun, Niu Baogui, Liu Zhigang. Soft collision, superposition orogeny and polycyclic suturing[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(3):85~93(in Chinese with English abstract).
- [4] Wang Hongzhen, Mo Xuanxue. An outline of the tectonic evolution of China[J]. Episodes, 1995, 18(1~2):6~16.
- [5] 邓晋福,赵海玲,莫宣学,等. 中国大陆根-柱构造——大陆动力学的钥匙[M]. 北京:地质出版社, 1996.
Deng Jinfu., Zhao Hailing., Mo Xuanxue, et al. Continental Root-Plume Tectonics of China—Key to the Continental Dynamics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996. 1~96(in Chinese with English abstract).
- [6] 邱瑞照, 邓晋福, 李廷栋, 等. 岩石圈不连续与大陆成矿作用[J]. 矿床地质, 2004, 23(增刊):32~40.
Qiu Ruizhao, Deng Jinfu, Li Tingdong, et al. Lithospheric discontinuity and continental metallogenesis[J]. Mineral Deposits, 2004, 23(supp):32~40 (in Chinese with English abstract).
- [7] 肖序常, 李廷栋. 青藏高原的构造演化与隆升机制[M]. 广州:广东科技出版社, 2000.
Xiao Xuchang, Li Tingdong. Tectonic Evolution and Uplift Mechanism of Qinghai-Tibet Plateau[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 2000(in Chinese with English abstract).
- [8] 洪大卫, 王式光, 谢锡林, 等. 试析地幔来源物质成矿域——以中亚造山带为例[J]. 矿床地质, 2003, 22(1):41~55.
Hong Dawei, Wang Shiguang, Xie Xilin, et al. Metallogenic province derived from mantle sources: a case study of Central Asian Orogenic Belt[J]. Mineral Deposits, 2003, 22(1):41~55(in Chinese with English abstract).
- [9] 杨经绥, 王希斌, 史仁灯, 等. 青藏高原北部东昆仑南缘德尔尼蛇绿岩: 一个被肢解了的古特提斯洋壳[J]. 中国地质, 2004, 31(3): 225~239.
Yang Jingsui, Wang Xibin, Shi Rendeng, et al. The Dur'ngoi ophiolite in East Kunlun, northern Qinghai-Tibet Plateau: a fragment of paleo-Tethyan oceanic crust [J]. Geology in China, 2004, 31(3):225~239(in Chinese with English abstract).
- [10] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 北祁连山奥陶纪弧后盆地火山岩成因[J]. 中国地质, 2003, 30(1): 48~60.
Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi. Magmagenesis of Ordovician back-arc basins in the Northern Qilian Mountains [J]. Geology in China, 2003, 30(1): 48~60(in Chinese with English abstract).
- [11] 邱瑞照, 周 肃, 邓晋福, 等. 西藏班公湖—怒江西段舍马拉沟蛇绿岩中辉长岩年龄测定——兼论班公湖—怒江蛇绿岩带形成时代[J]. 中国地质, 2004, 31(3):262~268.
Qiu Ruizhao, Zhou Su, Deng Jinfu, et al. Dating of gabbro in the Shemalagou ophiolite in the western segment of the Bangong Co-Nujiang ophiolite belt, Tibet—with a discussion of the age of the Bangong Co-Nujiang ophiolite belt[J]. Geology in China, 2004, 31(3):262~268(in Chinese with English abstract).
- [12] 曹圣华, 罗小川, 唐峰林, 等. 班公湖—怒江结合带南侧弧—盆系时空结构与演化特征[J]. 中国地质, 2004, 31(1):51~56.
Cao Shenghua, Luo Xiaochuan, Tang Fenglin, et al. Time-space structure and evolution of the arc-basin system on the southern side of the Bangong Co-Nujiang junction zone [J]. Geology in China, 2004, 31(1):51~56(in Chinese with English abstract).
- [13] 邱瑞照, 邓晋福, 周肃, 等. 华北地区岩石圈类型: 地质与地球物理证据[J]. 中国科学(D 辑), 2004, 34(8):689~711.
Qiu Ruizhao, Deng Jinfu, Zhou Su, et al. Lithosphere types in North China: evidence from geology and geophysics [J]. Science in China (Ser.D), 2004, 34(8):689~711(in Chinese).
- [14] Shao Ji'an, Liu Futian, Chen Hui, et al. Relationship between Mesozoic magmatism and subduction in the Da Hinggan-Yanshan Area[J]. Acta Geologica Sinica(English Edition), 2001, 75(1):1~8.
- [15] 王季亮, 李丙泽, 周德星, 等. 河北省中酸性岩体地质特征及其与成矿关系[M]. 北京:地质出版社, 1994.
Wang Jiliang, Li Bingze, Zhou Dexing, et al. Geology of Intermediate-Acidic Intrusions and Their Relations to Metallogeny, Hebei Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994. 1~213 (in Chinese).
- [16] 杨德彬, 许文良, 王冬艳, 等. 河南三门峡市曲里石英闪长斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 中国地质, 2004, 31(3):379~383.
Yang Debin, Xu Wenliang, Wang Dongyan, et al. SHRIMP zircon U-Pb dating of the Quli quartz diorite porphyry, Sanmenxia City, Henan, and its geological significance[J]. Geology in China, 2004, 31(3):379~383(in Chinese with English abstract).
- [17] 张西平, 万渝生, 杨崇辉. 河北阜平平阳片麻状奥长花岗岩的地质和岩相学特征[J]. 中国地质, 2003, 30(1):61~72.
Zhang Xiping, Wan Yusheng, Yang Chonghui. Geology and petrography of the Pingyang gneissic trondhjemite, Fuping, Hebei[J]. Geology in China, 2003, 30(1):61~72(in Chinese with English abstract).
- [18] 洪大卫, 王 涛, 童 英, 等. 华北地台和秦岭—大别—苏鲁造山带的中生代花岗岩与深部地球动力学过程[J]. 地质学前沿, 2003, 10(3):231~256.
Hong Dawei, Wang Tao, Tong Ying, et al., Mesozoic granitoids from North China block and Qinling-Dabie-Sulu orogenic belt and their deep dynamic process[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(3):231~256(in Chinese with English abstract).
- [19] 钱存超, 路玉林, 刘丽利. 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, 2004, 31(2):147~154.
Qian Cunchao, Lu Yulin, Liu Lili. Geochemical characteristics and genesis of Yanshanian granite in the Dabie ultrahigh-pressure (UHP) metamorphic belt[J]. Geology in China, 2004, 31(2):147~154(in Chinese with English abstract).
- [20] 戴圣潜, 邓晋福, 吴宗絮, 等. 大别造山带燕山期造山作用的岩浆岩石学证据[J]. 中国地质, 2003, 30(2):159~165.
Dai Shengqian, Deng Jinfu, Wu Zongxu, et al. Evidence of magmatic petrology for the Yanshanian orogeny in the Dabie orogen[J]. Geology in China, 2003, 30(2):159~165(in Chinese with English abstract).

- [21] 王彦斌, 刘敦一, 蒙义峰, 等. 安徽铜陵新桥铜-硫-铁-金矿床中石英闪长岩和辉绿岩锆石 SHRIMP 年代学及其意义[J]. 中国地质, 2004, 31(2):169~173.
Wang Yanbin, Liu Dunyi, Meng Yifeng, et al. SHRIMP U-Pb geochronology of the Xinqiao Cu-S-Fe-Au deposit in the Tongling ore district, Anhui[J]. *Geology in China*, 2004, 31(2): 169~173(in Chinese with English abstract).
- [22] 周新华, 杨进辉, 张连昌. 胶东超大型金矿的形成与中生代华北大陆岩石圈深部过程[J]. 中国科学(D辑), 2002, 32(增刊): 11~20.
Zhou Xinhua, Yang Jinhui, Zhang Lianchang. Metallogeny of superlarge gold deposits in Jiaodong region and deep processes of subcontinental lithosphere beneath North China Craton in Mesozoic[J]. *Science in China*, (Ser. D), 2003, 46(Supp.):14~25(in Chinese).
- [23] 毛景文, 张作衡, 余金杰, 等. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景:从金属矿床年龄精确得到启示[J]. 中国科学, (D辑), 2003, 33(4):289~299.
Mao Jingwen, Zhang Zuoheng, Yu Jinjie, et al. Geodynamic settings of Mesozoic large-scale mineralization in North China and adjacent areas—implication from the highly precise and accurate ages of metal deposits[J]. *Science in China*(Ser. D), 2003, 46(8): 838~851(in Chinese).
- [24] 地矿部南岭项目花岗岩专题组. 南岭花岗岩地质及其成因或成矿作用[M]. 地质出版社, 1989.
The Granitoid Research Group of the Nanling Project, Ministry of Geology and Mineral Resources. *Geology of Granitoids of Nanling Region and Their Petrogenesis and Mineralization* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989(in Chinese).
- [25] 付建明, 马昌前, 谢才富, 等. 湖南骑田岭岩体东缘菜岭岩体的锆石 SHRIMP 定年及其意义[J]. 中国地质, 2004, 31(1):96~100.
Fu Jianming, Ma Changqian, Xie Caifu, et al. SHRIMP dating of the Cailing granite on the eastern margin of the Qitianling granite, Hunan, South China, and its significance [J]. *Geology in China*, 2004, 31(1):96~100(in Chinese with English abstract).
- [26] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics—the model [J]. *Tectonophysics*, 1981, 75: 135~162.
- [27] Zhou Xinhua, Sun Min. Major transformation of subcontinental lithosphere mantle beneath the Sino-Korean Craton in Late Mesozoic: a possible global link [A]. *Goldschmidt Conference Abstracts*[C]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(18):584.
- [28] 刘建明, 张宏福, 孙景贵, 等. 山东幔源岩浆岩的碳-氧和铈-钕同位素地球化学研究[J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(10):981~987.
Liu Jianming, Zhang Hongfu, Sun Jinggui, et al. The study of C-O and Sr-Nd isotopic geochemistry of mantle-derived magma in Shandong province[J]. *Science in China* (Ser. D), 2003, 33(10): 981~987(in Chinese).
- [29] 洪大卫, 王式光, 谢锡林, 等. 兴蒙造山带正 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长[J]. 地学前缘, 2000, 7(2):441~456.
Hong Dawa, Wang Shiguang, Xie Xilin, et al. Genesis of positive ϵ_{Nd} granitoids in the Da Hinggar Mts-Mongolia orogenic belt and continental crustal growth[J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(2):441~456 (in Chinese with English abstract).
- [30] 吴福元, 孙德有, 林强. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生[J]. 岩石学报, 1999, 15(2):181~189.
Wu Fuyuan, Sun Deyou, Lin Qiang. Petrogenesis of the Phanerozoic granites and crustal growth in Northeast China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1999, 15(2):181~189(in Chinese with English abstract).
- [31] Hong D W, Xie X L, Zhang J S. Isotope geochemistry of granitoids in south China and their metallogeny[J]. *Res. Geol.* 1998, 48:251~263.
- [32] 黄萱, DePaolo D J. 华南中生代花岗岩 Nd-Sr 同位素研究及华南基底[J]. 岩石学报, 1989, 5(1): 28~36
Huang Xuan, DePaolo D J. Study of sources of Paleozoic granitoids and the basement of south China by means of Nd-Sr isotopes [J]. *Acta Petrologica*, 1989, 5(1): 28~36 (in Chinese with English abstract)
- [33] 金文山, 孙大中. 华南大陆深部地壳结构及演化[M]. 北京:地质出版社, 1997. 1~175.
Jin Wenshan, Sun Dazhong. *Deep Crustal-structure and Evolution of South China Continent* [M]. Beijing: Geological Publishing House. 1997. 1~175(in Chinese).
- [34] 刘昌实, 朱金初, 沈渭洲, 等. 华南陆壳改造系列花岗岩类型划分和成岩物质来源[J]. 地质学报, 1990, 64(1):43~52.
Liu Changshi, Zhu Jinchu, Shen Weizhou, et al. Classification and source materials of continental crust transformation series granitoids in south China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1990, 64(1):43~52 (in Chinese with English abstract).
- [35] Chen J F, Jahn B M. Crustal evolution of southeastern China: evidence from Nd and Sr isotopic compositions of rocks [J]. *Tectonophysics*, 1998, 284: 101~133.
- [36] 陈江峰, 江博明. Nd, Sr, Pb 同位素示踪和中国东南大陆地壳演化[A]. 见:郑永飞主编. 化学地球动力学[C]. 北京:科学出版社, 1999. 262~287.
Chen Jiangfeng, Jahn Borming. Nd, Sr and Pb isotopic evidence and continental crust evolution of southeastern China [A]. In: Zheng Yongfei (ed.). *Chemical Geodynamics* [C]. Beijing: Science Press, 1999. 262~287 (in Chinese).
- [37] 李献华, McCulloch M T. 扬子南缘沉积岩的 Nd 同位素演化及其大地构造意义[J]. 岩石学报, 1996, 12(3):359~369.
Li Xianhua, McCulloch M T. Nd isotopic evolution of sediments from the southern margin of the Yangtze block and its tectonic significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1996, 12(3):359~369 (in Chinese with English abstract).
- [38] 邱瑞照, 周肃, 邓晋福, 等. 青藏高原中新代花岗岩 Sr, Nd 同位素研究[J]. 地球学报, 2003, 24(6):611~617.
Qiu Ruizhao, Zhou Su, Deng Jinfu, et al. Study on Sr-Nd Isotopes of Mesozoic-Cenozoic Granites in Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2003, 24(6):611~617(in Chinese with English abstract).

Granitoids and continental crustal growth modes in China

XIAO Qing-hui^{1,8}, QIU Rui-zhao^{2,3}, DENG Jin-fu⁴, LI Ting-dong^{3,5}, MO Xuan-xue⁴,
HONG Da-wei³, WANG Tao³, LU Xin-xiang⁶, WU Fu-yuan^{5,7}, XIE Cai-fu⁸

(1. Information Center of Ministry of Land and Resources, Beijing 1000812, China;

2. Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037;

3. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

4. China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

5. College of Earth Science, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China;

6. Henan Institute of Geology, Zhengzhou 450053, China;

7. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Science Beijing 100029, China;

8. Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, Yichang 443003, Hubei, China)

Abstract: Orogenic granitoids in the continent of China may fall into the east and west regions. The orogenic granitoids in the west region include the Central Asian orogenic belt, Qinling-Qilian-Kunlun orogenic belt and Gangdise orogenic belt in the Qinghai-Tibet Plateau, which are associated with the development of the ocean, and the orogenic granitoids in the east region, including Northeast China, North China and South China, are Yanshanian orogenic granitoids formed after the assembly of the continent of China. Based on the settings and geological and geochemical characteristics of granitoids of different orogenic belts (exemplified by orogenic granitoids in Altay, East Kunlun, Yanshan in North China, Northeast China and Nanling in South China), the relationships between granitoids and continental crustal growth are discussed, and five modes of continental crustal growth in the continent of China are proposed; they are as follows: (1) the Altay mode of continental growth is that the material and heat of the Paleozoic convective mantle formed on the background of the Paleo-Asian Ocean were input into the Paleozoic continent and mixed with the materials of the upper crust; (2) the East Kunlun mode is that the basement of the Proterozoic orogenic belt was reworked by the heat input and materials of the Paleozoic-early Mesozoic convective mantle formed on the background of TTG continental crust of the Proterozoic orogenic belt; (3) the Northeast China style is that the Phanerozoic continental crust was reworked by the heat input and materials from the convective mantle formed on the background of the Yanshanian Central Asian orogenic belt; (4) the Yanshan mode is that the Archean basement was reworked by the heat input and materials from the Yanshanian convective mantle; and (5) the Nanling mode is that in South China what was input by the Yanshanian convective mantle into the continent was mainly heat and subordinately materials and the crustal material recycle was the dominant mode for the continental growth (showing zero continental growth). These modes are the basic modes for the Phanerozoic continental growth of the continent of China.

Key words: orogenic granitoids; continental crustal growth; Phanerozoic; continent of China

About the first author: XIAO Qing-hui, male, born in 1939, director of doctors and senior researcher, engages in studies of granite tectonics and 3D lithospheric structure of China; E-mail: qhxiao@infomailmlr.gov.cn.