

# 新疆阿尔泰古生代变质沉积岩的 Nd 同位素特征及其对地壳演化的制约\*

陈 斌<sup>①</sup> Bor-ming Jahn<sup>②</sup> 王式洸<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>北京大学地质系, 北京 100871; <sup>②</sup> Geosciences Rennes, Universite de Rennes 1, 35042 Rennes Cedex, France)

**摘要** 系统地研究了阿尔泰地区古生代变质沉积岩和部分花岗岩的 Nd 同位素特征, 得出如下主要结论: (1) 早古生代碎屑沉积物的  $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$  值(-3.4~-4.9)相对较低, Nd 模式年龄较大( $T_{\text{DM}} = 1.44 \sim 1.77 \text{ Ga}$ ), 反映剥蚀源区主要是中元古的老地壳; 中、晚古生代沉积建造则显示变化很大而且高得多的  $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$  值(-6.1~+6.3)和年轻得多的  $T_{\text{DM}}$  (0.6~1.56 Ga), 反映其源区有大量年轻物质加入. (2) 阿尔泰地区早古生代可能是被动陆缘的环境, 而从早泥盆开始则因准噶尔大洋板块的俯冲消减而转化成活动陆缘, 并发育弧后盆地火山-沉积建造. (3) 阿尔泰造山带花岗岩的主体不是由中深变质的围岩(早、中古生代沉积)重熔而来, 而是来源于更深处地壳, 但围岩可能对花岗岩有一定的混染.

**关键词** 变质沉积岩 花岗岩 Nd 同位素 Nd 模式年龄 阿尔泰

阿尔泰造山带的地壳(包括基底)性质和演化是多年来学者们激烈争论但始终没有达成共识的基础地质问题之一. 一些学者把它解释成弧体系不断拼贴于西伯利亚板块南缘和陆壳逐步向南增生的结果<sup>[1,2]</sup>; 而另一些学者则认为“小洋盆”的频繁开合和随后的陆-陆碰撞是该区地壳演化的主要特征<sup>[3]</sup>. 此外, 阿尔泰花岗岩的成因也是近年来经常讨论的问题之一<sup>[4-8]</sup>. 多数学者认为阿尔泰花岗岩的主体与阿尔泰造山带深变质岩的重熔有关<sup>[5-8]</sup>.

许多研究已经证明, 细碎屑沉积物可以代表相当大区域内大陆地壳的平均成分<sup>[9-12]</sup>. 由于稀土元素(REE)在水中的溶解度很小以及沉积过程中几乎可以忽略不计的 Sm/Nd 分异, 碎屑沉积岩的 Nd 模式年龄被认为可反映沉积物源区的平均地壳存留年龄<sup>[9,13]</sup>; 碎屑沉积物本身也可反映物源供给区的化学成分和同位素成分的特征. 因此, 在一个地区选择具有不同沉积年代的细碎屑沉积物, 有可能反演出该区在不同地质历史时期内大陆地壳平均成分特别是同位素成分的变化以及大陆地壳生长的特点<sup>[14]</sup>. 本文系统报道了阿尔泰造山带在整个古生代期间细碎屑沉积和部分花岗岩的 Sm-Nd 同位素数据, 目的在于: (1) 探讨阿尔泰地区基底性质和显生宙年轻地壳生长问题, (2) 验证此前提出的有关阿尔泰花岗岩成因的模式和变质沉积岩对花岗岩成因的贡献, (3) 对阿尔泰古生代大陆地壳生长模式给出更多的限制.

## 1 区域地质背景

阿尔泰造山带的区域地质背景已有许多文献报道<sup>[3,5-7]</sup>. 简言之, 它主要由古生代火山-沉

积建造和花岗质岩石组成. 其中火山-沉积建造在加里东运动和海西运动期间遭受不同程度的变质和变形<sup>[5]</sup>, 主要的岩石建造单元有:

(1) 早古生代(奥陶-志留)变质沉积岩, 主要是陆源碎屑和火山碎屑沉积, 火山岩夹层很有限, 反映一种陆坡沉积环境. Chang 等人<sup>[15]</sup>把它解释成被动陆缘沉积.

(2) 中古生代(下、中泥盆)变质沉积建造, 代表一套巨厚海相复理石沉积. 下泥盆下部发育厚层陆源碎屑建造, 向上发育越来越多的火山岩夹层. 中泥盆主要由双峰式火山岩(海底喷发的酸性和基性岩)和陆源碎屑夹层组成. 多金属(Cu-Pb-Zn-Au)矿化在该层很发育.

(3) 石炭纪火山-沉积建造, 只是轻微变质, 逆冲到泥盆系褶皱系之上.

花岗岩主要是同造山的, 少量后造山的 A 型花岗岩(如将军山岩体). 同造山花岗岩的侵位年代有争论<sup>[4-8]</sup>, 但海西期的花岗岩(~330 Ma)可能是主要的, 虽然加里东花岗岩也有报道.

阿尔泰造山带向南以额尔齐斯带与准噶尔地块分界, 向北是萨颜-蒙古早加里东褶皱带(图 1). 额尔齐斯带从早泥盆到石炭期间发育大规模钙碱性火山岩和同期侵入岩, 代表一个中、晚古生代的弧岩浆岩带<sup>[16,17]</sup>. 该带向西与哈萨克斯坦的 Chenghiz-Tarbatay 弧火山岩带相连<sup>[1]</sup>.

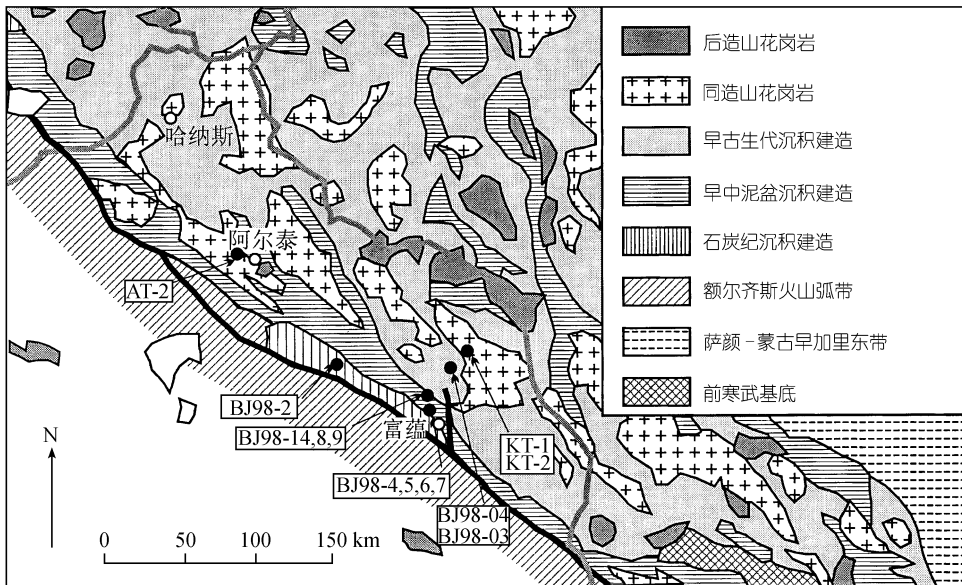


图 1 阿尔泰及邻区地质简图<sup>[15]</sup>

实心圆代表采样位置

## 2 分析方法和取样

所有的 Sm-Nd 同位素分析都在法国 Rennes 大学完成. 粉末样品先在  $\text{HNO}_3 + \text{HF}$  混合酸中加热(80℃) 3 个星期(先加稀释剂), 以保证全溶. Sm 和 Nd 的分离和纯化是依照 Rennes 的标准程序进行(详见文献[18]). 质谱分析是在带有 7 个接收器的 Finnigan MAT-262 质谱仪上进行,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  比值用  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$  进行标准化. Sm 和 Nd 分析精度为  $\pm 0.2\% \sim 0.5\%$ (取决于浓度大小), Nd 全流程本底为 60 pg. Nd 同位素分析结果调整到 La Jolla 标准的  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511865$ .

变质沉积岩样品全是细碎屑岩, 主要取自阿尔泰至可可托海(富蕴北)一线. 3 个花岗岩样品中有 2 个(KT-1, KT-2)取自可可托海, 另 1 个(AT-2)取自阿尔泰镇附近.

### 3 结果

13 个样品的 Sm-Nd 同位素数据给出于表 1, 并被进一步表示于图 2 中. 奥陶-志留(早古生代)的沉积建造显示负的和相对稳定的初始 Nd 同位素值( $\epsilon_{Nd}(T) = -3.4 \sim -4.9$ ). 如图 2a 所示, 数据点很靠近中元古的地壳 Nd 同位素演化线, 表明早古生代沉积物主要是再循环的(recycled)老地壳物质. 它们所显示的比沉积年代(0.46 ~ 0.42 Ga)大得多的 Nd 模式年龄( $T_{DM} = 1.44 \sim 1.77$  Ga; 图 2(b))支持这一结论.

表 1 阿尔泰古生代变质沉积岩和花岗岩的 Nd 同位素分析<sup>a)</sup>

样品号	年代 / Ma	岩石类型	Sm ( $\times 10^{-6}$ )	Nd ( $\times 10^{-6}$ )	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2 $\sigma$	$\epsilon_{Nd}(0)$	$f_{Sm/Nd}$	$\epsilon_{Nd}(T)$	$T_{DM}$ /Ga
BJ98-02	奥陶(460)	云母石英片岩	6.96	33.74	0.1247	0.512221	4	-8.1	-0.37	-3.9	1.59
BJ98-03	奥陶(460)	云母石英片岩	4.36	20.15	0.1307	0.512186	4	-8.8	-0.34	-4.9	1.77
81528	志留(425)	云母石英片岩	9.78	50.07	0.1181	0.512245	7	-7.7	-0.40	-3.4	1.44
BJ98-14	早泥盆(400)	千枚岩	4.36	20.60	0.1281	0.512436	4	-3.9	-0.35	-0.4	1.27
BJ98-08	早泥盆(400)	片岩	3.81	17.65	0.1304	0.512465	4	-3.4	-0.34	0	1.25
BJ98-09	早泥盆(400)	片岩	4.75	23.83	0.1205	0.512284	4	-6.9	-0.39	-3.0	1.41
BJ98-04	中泥盆(385)	石英片岩	5.26	27.45	0.1159	0.512145	3	-9.6	-0.41	-5.6	1.56
BJ98-05	中泥盆(385)	石英片岩	2.10	11.65	0.1090	0.512115	4	-10.2	-0.45	-5.9	1.50
BJ98-06	中泥盆(385)	片岩	2.87	16.15	0.1073	0.512098	4	-10.5	-0.45	-6.1	1.50
BJ98-07	中泥盆(385)	片岩	5.75	28.42	0.1223	0.512260	4	-7.4	-0.38	-3.7	1.48
BJ98-12	早石炭(340)	板岩	5.23	24.64	0.1283	0.512810	4	3.4	-0.35	6.3	0.61
KT-1	390	花岗岩	6.21	28.06	0.1338	0.512346	3	-5.7	-0.32	-2.6	1.53
KT-2	390	花岗岩	5.62	29.98	0.1133	0.512398	5	-4.7	-0.42	-0.6	1.14
AT-2	330	花岗岩	3.42	14.00	0.1476	0.512428	4	-4.1	-0.25	-2.0	1.66

a)  $\epsilon_{Nd} = ((^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_s / (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} - 1) \times 10000$ ,  $f_{Sm/Nd} = (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_s / (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} - 1$ , 这里  $s$ =样品,  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.512638$ ,  $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.1967$ .  
 $T_{DM} = 1/\lambda \times \ln(1 + ((^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_s - 0.51315) / ((^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_s - 0.2137))$ . 样品 81528 引自文献[19]

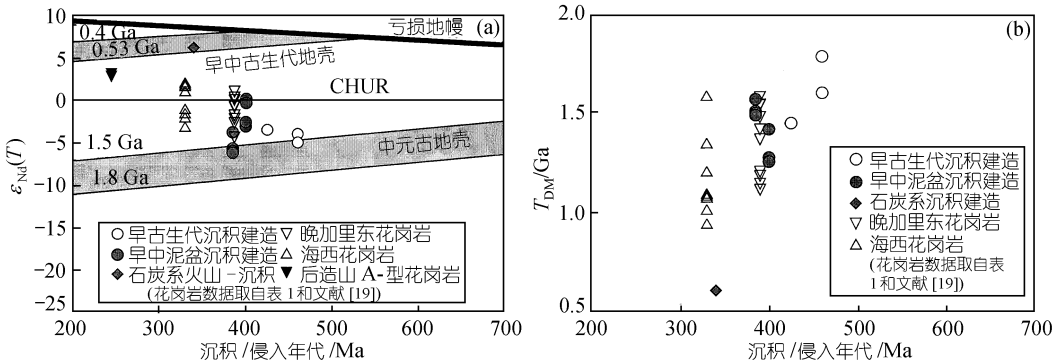


图 2 沉积 / 侵入年代- $\epsilon_{Nd}(T)$ 关系图与沉积 / 侵入年代- $T_{DM}$ 关系图

(a) 沉积 / 侵入年代- $\epsilon_{Nd}(T)$ 关系图. 图中所表示的早古生代和中元古代地壳的 Nd 同位素演化线都是推算的, 假设的前提是它们都来自亏损地幔, 并在各种地壳演化过程(如沉积分异和岩浆过程)中 Sm/Nd 不发生分异( $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} \sim 0.12$ );

(b) 沉积 / 侵入年代- $T_{DM}$ 关系图. 部分花岗岩数据来自文献[19]

相比之下, 泥盆纪的碎屑沉积则显示较高的和变化较大的  $\epsilon_{Nd}(T)$  值 ( $0 \sim -6.1$ ), 暗示它的源区一定不同于早古生代沉积物. 如图 2(a) 所示, 一些样品落在中元古地壳附近, 而另一些样品 (如 BJ98-08 和 BJ98-14) 则落在 CHUR 线附近, 表明其源区有相当数量的年轻地壳组分 (如弧物质) 加入. 相应地, 泥盆纪碎屑沉积物的 Nd 模式年龄 ( $1.25 \sim 1.56$  Ga; 图 2(b)) 也比早古生代沉积物年轻, 但仍然比自身的沉积年代老  $\sim 1.0$  Ga, 暗示其源区仍有相当比例的老地壳物质.

石炭纪沉积建造具有比前石炭沉积建造高得多的  $\epsilon_{Nd}(T)$  值 ( $+6.3$ ) 和年轻得多的  $T_{DM}$  值 ( $0.61$  Ga), 表明其源区是以年轻地壳物质占主导, 而再循环的老地壳物质非常有限, 这一结论为文献 [19] 所报道的、很低的初始 Sr 同位素值 ( $I_{Sr} = 0.7046$ ) 所证实. 如图 2(a) 所示, 石炭纪沉积碎屑的数据点非常接近早古生代新生地壳的 Nd 同位素演化线. 花岗岩显示比较高的  $\epsilon_{Nd}(T)$  值 ( $-0.6 \sim -2.6$ ), 反映其源区的成熟特性 (成因讨论见下面).

## 4 讨论与结论

### 4.1 阿尔泰造山带基底的性质

在沉积/侵入年代 (Ma) -  $\epsilon_{Nd}(T)$  的关系图 (图 2) 上, 所有古生代沉积碎屑岩都落在中元古地壳和早古生代新生地壳的 Nd 同位素演化线之间. 这表明阿尔泰古生代沉积盆地的物源区可能主要有两个, 即中元古的老地壳和早古生代的新生地壳 (如弧物质). 这些碎屑沉积物可能代表这两个端元组分以不同比例混合的产物. 因此, 阿尔泰地区的基底可能是中元古代从地幔分异出来的地壳. 碎屑沉积物的 Nd 模式年龄 ( $T_{DM}$ ) 分布在  $0.6 \sim 1.77$  Ga 之间, 支持这一结论. 其中比较年轻的模式年龄 (如石炭纪碎屑沉积岩的  $T_{DM} = 0.6$  Ga) 显然是由于大量年轻物质的加入而造成. 从表 1 可以注意到, 绝大部分样品的  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  值介于  $0.11 \sim 0.13$  之间, 表明在沉积和岩浆作用过程中 Sm/Nd 并没有明显的分异, 因而这些以亏损地幔线性演化为假设前提而计算的 Nd 模式年龄是有意义的. 另外, 来自深部地壳的花岗岩同样可以反映基底的信息. 本文所测 3 个花岗岩的  $T_{DM} = 1.14 \sim 1.66$  Ga, 支持阿尔泰地区存在一个中元古的基底. 胡嵩琴等人 [20] 和赵振华等人 [19] 曾对阿尔泰花岗岩的 Nd 同位素做过详细的研究, 得出花岗岩的 Nd 模式年龄主要分布在  $1.0 \sim 1.6$  Ga 之间, 也与这一结论一致. 当然, 阿尔泰中元古基底的最终证实仍需要今后相应锆石年龄的发现 [21].

### 4.2 阿尔泰花岗岩的成因

阿尔泰花岗岩的主体被许多学者认为是由阿尔泰造山带中深变质的围岩经过部分熔融作用而形成, 属于典型的“S 型”花岗岩 [5-8]. 这一模式的提出主要是根据: (a) 有相当一部分花岗岩的围岩是中高级 (角闪岩相) 变质岩和混合岩, 远离花岗岩体则变质程度逐渐降低; (b) 花岗岩体的成分主要是二云母花岗岩, 岩体中有时可见富含云母的“残影体”, 其分布方向大致与围岩的片麻理一致. 然而, 本文报道的 Nd 同位素资料并不支持这一模式.

图 3 被用来分析花岗岩和其围岩的成因

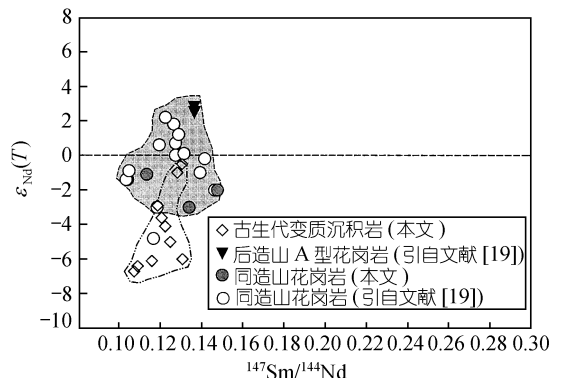


图 3  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  -  $\epsilon_{Nd}(T)$  关系图

后造山花岗岩和部分同造山花岗岩数据来自文献 [19]

联系. 石炭纪样品(BJ98-12)没有包括在其中, 因为大部分花岗岩侵位于石炭纪碎屑沉积岩形成的同时或之前. 图中除了本文新的 Nd 同位素数据外, 还包括了几乎所有已经发表的花岗岩的 Nd 同位素数据<sup>[19]</sup>. 为了便于对比, 本文取  $T = 330 \text{ Ma}$  计算所有样品(包括变质沉积岩和花岗岩)的 Nd 同位素成分, 并投到  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}-\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 图上(图 3). 可以发现, 花岗岩具有比变质围岩明显高的  $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 值, 虽然两者的数据点有部分重叠, 这清楚地表明, 阿尔泰造山带变质沉积岩不可能是花岗岩的主要源岩, 但在岩体上升侵位过程中可能对岩体有一定的混染. 花岗岩的源区应该是在更深的地壳部位, 那里除了部分中元古老地壳之外, 年轻的地壳物质应占有相当大的比例. 这与大部分欧洲海西带花岗岩的成因不同, 后者主要由前海西高级变质的老基底重熔而成<sup>[22,23]</sup>. 阿尔泰造山带下面这种年轻地壳的性质尚不清楚, 但很可能以板块俯冲阶段形成的、被深埋的大量弧物质或弧后洋壳为主. 另一种可能性是幔源底垫基性岩, 但阿尔泰花岗岩体中很少见到基性包体和伴生的基性岩脉这一事实似乎表明, 底垫物质即使存在, 所占比例也很有限. 赵振华等人<sup>[19]</sup>曾报道将军山 A 型花岗岩的  $\epsilon_{\text{Nd}}(T) = +2.5 \sim +3.0$ . 这种后造山贫水的花岗岩可反映深部地壳的同位素信息, 它比较高的正  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值显然支持本文的结论, 即阿尔泰造山带之下的确存在大量年轻地壳. Sengor 等人<sup>[2]</sup>曾经预测包括阿尔泰在内的整个中亚造山带在显生宙期间有大量年轻陆壳增生, 并得到越来越多的同位素和地球化学证据的支持<sup>[24-26]</sup>. 本文的研究显然也支持这一结论.

### 4.3 地壳演化

根据本文获得的阿尔泰古生代变质沉积岩的 Nd 同位素数据, 作者对该区古生代地壳演化简单总结如下:

(1) 阿尔泰早古生代碎屑沉积物较高的 Nd 模式年龄(1.44 ~ 1.77 Ga)和较低的  $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 值(-3.4 ~ -4.9)表明老地壳(中元古)可能是早古生代沉积盆地的主要源区, 虽然来自其北侧新崛起的萨颜-蒙古早加里东褶皱带的“年轻”组分(目前尚未见同位素资料, 但由弧物质拼贴-碰撞形成的褶皱带通常含有相当比例的年轻物质<sup>[2,13,14]</sup>)也是不能忽略的. 这有力支持一些作者已经提出的模式——阿尔泰地区早古生代期间可能是被动陆缘环境<sup>[15]</sup>. 早古生代沉积建造以成熟度较高的陆源碎屑为主, 而很少发育火山岩的地质事实与此吻合<sup>[5]</sup>.

(2) 泥盆纪碎屑沉积物的  $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 值(-6.1 ~ 0)变化很大, 有的  $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 值接近零(图 2), 模式年龄也比早古生代沉积物年轻许多(1.25 ~ 1.56 Ga), 表明泥盆纪沉积盆地中有相当数量的年轻地壳物质加入. 这些年轻地壳物质可能是早古生代弧物质(指萨颜-蒙古早加里东褶皱带)和/或泥盆纪弧后洋壳. 后者的 Nd 同位素初始值在+5.5 ~ +6.5 之间<sup>[27]</sup>, 显然来自亏损地幔. 据此, 作者认为阿尔泰地区从早泥盆纪开始由早古生代的被动陆缘环境转变成了活动陆缘环境. 当然, 活动陆缘的具体性质仍不清楚. 韩宝福等人<sup>[28]</sup>认为泥盆纪建造代表陆壳基础上的拉伸环境. 作者认为阿尔泰地区从早泥盆早期开始的活动陆缘环境可能与准噶尔洋壳向阿尔泰地块之下俯冲消减直接有关, 俯冲带就是额尔齐斯火山弧带. 该带也是从早泥盆纪早期开始发育大规模弧岩浆岩, 包括安山岩和玄武-安山岩以及相应的深成岩<sup>[16,17]</sup>. 对该火山弧带的同位素研究很有限, 但李华芹等人<sup>[27]</sup>最近报道该带两个安山岩样品的  $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 分别是+5.4 和+5.9, 表明它们主要来自亏损地幔. 阿尔泰泥盆纪建造可能代表一个由拉伸体制引起的弧后盆地或边缘海环境. 其中普遍发育的双峰式火山岩(海底喷发)<sup>[5,28]</sup>, 特别是枕状熔岩和少量超基性岩支持这一模式. 早、中泥盆纪建造在晚泥盆期间被强烈变质变形(变质年代 ~ 360 Ma)<sup>[5]</sup>, 并被向北拼贴在阿尔

泰山南缘,同时有大规模花岗质岩浆作用伴随.

(3) 石炭纪沉积建造具有比泥盆纪碎屑沉积高得多的 $\epsilon_{Nd}(T)$ 值,达到+6.3,反映新生地壳物质成为石炭纪沉积盆地的最主要的剥蚀源区,而再循环的老地壳物质只占很少的比例.这一点也为它们的很年轻的Nd模式年龄( $T_{DM} = 0.6$  Ga)所证实(图2(b)).石炭纪沉积盆地中这些年轻的地壳组分可能主要来自两个源区,即盆地北侧褶皱升起的泥盆纪褶皱带(Nd同位素特征见本文表1和文献[27])和盆地南侧的额尔齐斯弧岩浆岩带.大量弧物质的加入显然是导致其 $\epsilon_{Nd}(T)$ 值升高和模式年龄年轻化的原因.因此,早、中石炭时期,阿尔泰地区仍是属于活动陆缘环境.中石炭纪后期这一套沉积建造被抬起并拼贴于阿尔泰山南缘.

**致谢** 对 IGCP420 中方负责人洪大卫研究员在野外工作中的安排和部署,以及法国 Rennes 大学地球化学与年代学实验室 Odile Henin, Joel Mace, Martine Le Coz-Bouhnik 和 Nicole Morin 等在实验过程中给予的热情帮助,深表谢意.

## 参 考 文 献

- 1 Coleman R G. Continental growth of Northwest China. *Tectonics*, 1989, 8: 621~635
- 2 Sengor A M C, Natal'in B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 1993, 364: 299~307
- 3 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 等. 新疆北部及其邻区大地构造. 北京: 地质出版社, 1992
- 4 刘 伟. 构造-岩浆岩带特征及其成因和演化. 见: 张湘炳等编. 额尔齐斯构造带构造演化与成矿系列. 北京: 科学出版社, 1996. 85~130
- 5 庄育勋. 中国阿尔泰造山带热动力时空演化和造山过程. 长春: 吉林科学技术出版社, 1993. 10~60
- 6 邹天人, 曹惠志, 吴柏青. 新疆阿尔泰造山花岗岩和非造山花岗岩及其判别标志. *地质学报*, 1988, 62: 228~243
- 7 芮行健, 吴王金. 中国阿尔泰花岗岩的成因. 见: 徐克勤主编. 花岗岩地质和成矿关系国际学术会议论文集. 南京: 江苏科学技术出版社, 1984. 14~21
- 8 康 旭, 王淑珍, 师 波. 新疆可可托海地区花岗岩成因的研究. *新疆地质*, 1992, 10: 261~270
- 9 Allegre C J, Rousseau D. The growth of the continent through geological time studied by Nd isotope analysis of shales. *Earth Planet Sci Lett*, 1984, 67: 19~34
- 10 Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford: Geoscience Texts, 1985
- 11 Goldstein, Jacobsen. Nd and Sr isotopic systematics of river suspended material: implications for crustal evolution. *Earth Planet Sci Lett*, 1988, 87: 249~265
- 12 Jahn B.-m, Condie K C. Evolution of the Kaapvaal craton as viewed from geochemical and Sm-Nd isotopic analyses of intracratonic pelites. *Geochim Cosmochim Acta*, 1995, 59: 2239~2258
- 13 McCulloch M T, Wasserburg G J. Sm-Nd and Rb-Sr chronology of continental crust formation. *Science*, 1978, 200: 1003
- 14 Miller J F, Harris N B W. Evolution of continental crust in the central Andes: constraints from Nd isotope system. *Geology*, 1989, 17: 615~617
- 15 Chang E Z, Coleman R G, Ying D X. *Tectonic Transect Map across Russia-Mongolia-China*. Stanford: Stanford University Press, 1995
- 16 梅厚均, 杨学昌, 王俊达, 等. 额尔齐斯河南侧晚古生代火山岩的微量元素地球化学与构造环境的变迁史. 见: 涂光炽主编. 新疆北部固体地球科学新进展. 北京: 科学出版社, 1993. 199~216
- 17 于学元, 梅厚钧, 姜福芝, 等. 额尔齐斯火山岩和成矿作用. 北京: 科学出版社, 1995. 145~153
- 18 Jahn B M, Cornichet J, Cong B L, et al. Ultrahigh- $\epsilon_{Nd}(T)$  eclogites from an ultrahigh pressure metamorphic terrane of China.

Chem Geol, 1996, 127: 61~79

- 19 赵振华, 王中刚, 邹天人, 等. 阿尔泰花岗岩类 REE 及 O, Pb, Sr, Nd 同位素组成及成岩模型. 见: 涂光炽主编. 新疆北部固体地球科学新进展. 北京: 科学出版社, 1993. 239~266
- 20 胡嵩琴, 张国新, 李启新, 等. 新疆北部同位素地球化学与地壳演化. 见: 涂光炽主编. 新疆北部固体地球科学新进展. 北京: 科学出版社, 1993. 27~38
- 21 Arndt N T, Goldstein S L. Use and abuse of crust-formation ages. *Geology*, 1987, 15: 893~895
- 22 Bernard-Griffith J, Peucat J J, Sheppard S, et al. Petrogenesis of Hercynian leucogranites from the southern Armorican Massif: contribution of REE and isotopic (Sr, Nd, Pb and O) geochemical data to the study of source rock characteristics and ages. *Earth Planet Sci Lett*, 1985, 74: 235~250
- 23 Liew T C, Hofmann A W. Precambrian crustal components, plutonic associations, plate environment of the Hercynian Fold Belt of central Europe: indications from a Nd and Sr isotopic study. *Contrib Mineral Petrol*, 1998, 98: 129~138
- 24 吴福元, 孙得有, 林 强. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生. *岩石学报*, 1999, 15: 181~189
- 25 洪大卫, 王式洸, 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. *地学前缘*, 2000, 7(2): 441~456
- 26 Jahn B M, Wu F Y, Chen B. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic. *Episodes*, 2000, 23: 82~92
- 27 李华芹, 谢才富, 常海亮, 等. 新疆北部有色贵金属矿床成矿作用年代学. 北京: 地质出版社, 1998. 146~148, 189~195
- 28 韩宝福, 何国琦. 中国阿尔泰山南缘泥盆纪火山岩带的大地构造性质. *新疆地质科学*, 1991, (3): 89~100