

新疆中天山东段元古代变质沉积岩的Nd同位素特征及其对物源区的制约*

李秋根 刘树文** 韩宝福 张健

北京大学地球与空间科学学院, 造山带和地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871

储著银

中国科学院地质和地球物理研究所, 北京 100029

摘要 中天山东段元古代变质沉积岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-4.00 \sim +6.36$, 比塔里木太古代克拉通高, 而 Nd 模式年龄 (T_{DM} 为 $1.29 \sim 2.29$ Ga) 比塔里木克拉通小. 尾亚地区样品的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 的平均值为 -2.46 , 模式年龄介于 $1.86 \sim 2.29$ Ga 之间, 而迪坎尔南和库米什地区 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 的平均值分别为 $+1.37$ 和 $+2.06$, 模式年龄 T_{DM} 值主要集中在 $1.6 \sim 1.9$ Ga, 最年轻的 Nd 模式年龄 (T_{DM}) 为 1.29 Ga. 这些特征表明变质沉积岩的物源区主要为古元古代地壳, 而不是塔里木克拉通, 并有较年轻的弧物质的加入, 古元古代源区和较年轻的源区在古地理位置上是分离的. 库米什和迪坎尔南地区的变质沉积岩在古地理位置上主要形成于弧后盆地靠近岛弧一侧, 而尾亚地区的变质沉积岩主要产生于弧后盆地靠近古元古代大陆一侧.

关键词 中天山东段 元古代变质沉积岩 Nd同位素 物源区 弧后盆地

近年来, 沉积岩的 Sm-Nd 同位素已广泛应用于示踪沉积岩的物源区, 并且可以为地壳增长、演化和区域构造单元的划分等提供重要依据^[1~7]. 由于沉积岩的 Nd 同位素组成可指示沉积物源区的性质, 细碎屑沉积岩 Nd 模式年龄可以反映沉积物源区的平均地壳存留年龄, 因而研究沉积岩的 Nd 同位素组成就显得特别的重要^[7~9]. 尽管沉积岩的 Nd 模式年龄不能作为一个特定的地质事件的年龄, 但是它可以反映沉积物源区的基本特征, 例如沉积岩记录了物源区化学和同位素变化^[3, 6, 8, 10, 11], 因为地壳岩石和矿物中的 Nd 同位素组成和 Sm/Nd 比值在风化、沉积物的搬运和成岩作用过程中基本不受影响^[7, 10, 11]. 尽管有一些学者报道了在风化、沉积分选和成岩作用过程中 Sm-Nd 体系会受到不同程度的扰动^[12~15], 但是基本的同位素体系没有明显的变化. 正如 Goldschmidt^[16]所指出的, 在风化和沉积过程中稀土元素主要存在于粘土矿物中, 在水中的溶解度很小. 因此, 母岩的稀土元素特征几乎都

转移到细碎屑沉积岩当中, 在沉积过程中 Sm-Nd 的分异几乎可以忽略不计^[7, 10, 11]. Gleason 等^[17]认为 Nd 同位素是一种理想的区分沉积岩物源区的方法, 因为(i) Nd 同位素能很好地用来区分地壳年龄的差异; (ii) 在搬运过程中, 碎屑沉积物的稀土元素 (REEs) 保留了母岩的固有性质^[10]和 (iii) 在成岩和变质过程中 REEs 几乎不发生迁移. 因此, 选择细碎屑沉积岩的 Nd 同位素特征来追溯沉积物源区、探讨地壳的增长和演化是可行的^[4, 7].

变质沉积岩在中天山东段元古代星星峡群中广泛出露, 是星星峡群的主要组成. 本文系统地分析了星星峡群变质沉积岩 Sm-Nd 同位素特征, 旨在确定变质沉积岩物源区性质和它们的大地构造意义.

1 区域构造背景

中天山东段隆起带由许多前寒武纪变质地块组成, 上覆有未变质的古生代和中生代沉积盖层. 其中前寒武纪变质地块主要由星星峡群和天湖群组

2003-03-26 收稿, 2003-04-11 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 40072065)

** E-mail: swliu@pku.edu.cn

成, 广泛遭受了绿片岩相到角闪岩相的变形和变质作用, 局部达到麻粒岩相^[18]. 星星峡群的主要岩性组合为斜长角闪岩和各种副变质片岩, 并被中-新元古代和古生代花岗质岩石侵入^[19, 20]. 副变质岩的岩石组合主要包括石榴石黑云母片岩、蓝晶石黑云母片岩、蓝晶石云母片岩、云母石英片岩、十字石云母片岩、堇青石黑云母片岩、片麻岩和大理岩等. 郭召杰等¹⁾在尾亚星星峡群采集的云母片岩变质锆石 U-Pb 年龄为(1216 ± 74)Ma, 侵入其中的花岗质岩石的锆石 U-Pb 年龄(1218 ± 17)Ma 为岩

浆结晶年龄; 库米什地区蓝晶石黑云母片岩中碎屑锆石 U-Pb 不一致线上交点年龄为(1750 ± 25)Ma, 反映了原岩的形成时代.

2 分析方法和分析结果

所有细碎屑变质沉积岩样品的 Sm-Nd 同位素分析都在中国科学院地质和地球物理所完成, 质谱分析在 VG354 热离子质谱仪上进行. 这些样品分别取自于库米什、迪坎尔南和尾亚地区(图 1 和表 1). 详细的分析技术以及分析流程见文献[21, 22].

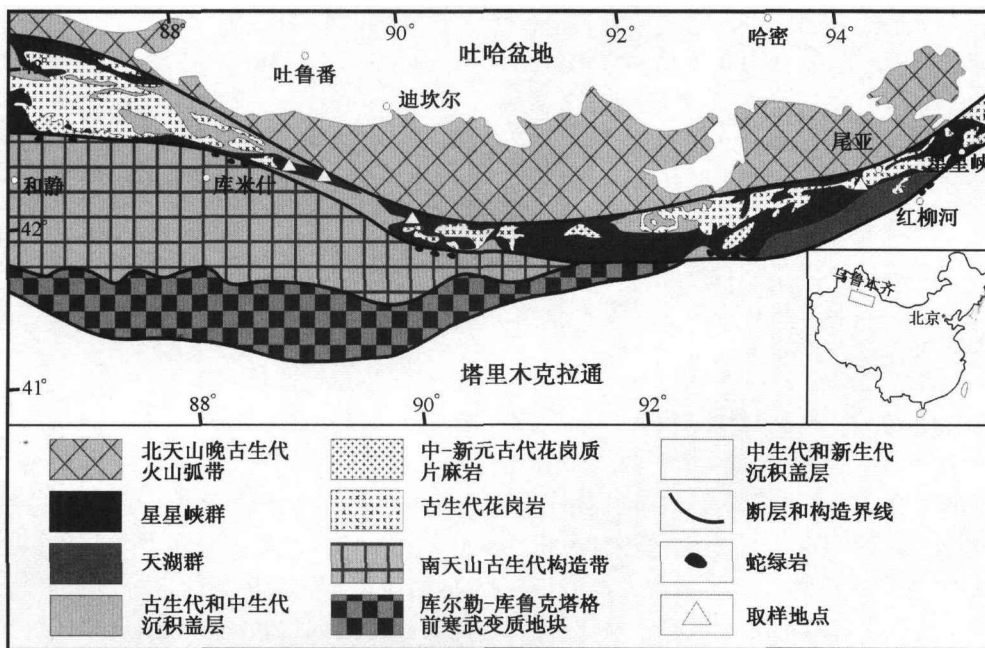


图 1 东天山造山带地质简图及取样位置(据郭召杰等¹⁾修改)

表 1 简要地样品描述和取样位置

样品号	纬度	经度	岩石类型	矿物组合 ^{a)}
库米什地区				
KM2105-2	42°19'42"	88°24'00"	石榴石黑云母片岩	Grt + Bt + Mus + Kfs + Qtz
KM2106-1	42°19'33"	88°24'45"	含蓝晶石的黑云母片岩	Ky + Bt + Pl + Qtz + / - Mus + / - Grt
KM2106-2	42°19'34"	88°24'46"	含十字石的黑云母片岩	Stau + Ky + Pl + Qtz + / - Mus + / - Grt
KM2107-1	42°19'27"	88°24'35"	含蓝晶石的黑云母片岩	Ky + Bt + Pl + Qtz + / - Mus + / - Grt
KM2107-2	42°19'27"	88°24'35"	黑云母片岩	Bt + Mus + Kfs + Qtz
KM2112-2	42°14'11"	88°48'32"	十字石石榴石黑云母片岩	Stau + Grt + Pl + Qtz + / - Mus
KM2113-1	42°13'23"	88°48'06"	石榴石黑云母片岩	Grt + Bt + Mus + Kfs + Qtz
KM2114-2	42°12'33"	88°47'26"	石榴石云母片岩	Kfs + Pl + Bt + Grt + Stau + Qtz
KM2127-2	42°19'12"	88°25'56"	十字石黑云母石英片岩	Stau + Grt + Pl + Qtz + / - Mus
KM2127-3	42°19'12"	88°25'56"	蓝晶石黑云母石英片岩	Ky + Bt + Pl + Qtz + / - Mus + / - Grt
KM2127-5	42°19'12"	88°25'56"	石榴石十字石蓝晶石黑云母片岩	Grt + Stau + Ky + Qtz + Bt + Kfs

1) 郭召杰, 等. 东天山隆起带基底特征、隆升过程及早前寒武纪杂岩成矿远景分析. "305" 项目报告, 2001

续表

样品号	纬度	经度	岩石类型	矿物组合 ^{a)}
迪坎尔南地区				
DK2101-2	41°47'47"	89°59'19"	角闪斜长片麻岩	Hbl + Pl + Qtz + Bt + / - Kfs
DK2102-2	41°48'20"	90°00'08"	角闪斜长片麻岩	Hbl + Pl + Qtz + Bt + / - Kfs
DK2103-1	41°48'36"	90°00'21"	云母石英片岩	Bt + Mus + Kfs + Qtz
DK2104-1	41°48'54"	90°00'44"	黑云母片岩	Bt + Mus + Kfs + Qtz
DK2106-1	41°49'15"	90°00'56"	云母石英片岩	Bt + Mus + Kfs + Qtz
DK2107-1	41°50'00"	90°01'44"	蓝晶石云母片岩	Ky + Bt + Pl + Qtz + / - Mus + / - Grt
DK2107-2	41°50'00"	90°01'44"	蓝晶石堇青石黑云母片岩	Pl + Bt + Cord + Qtz + Ky
DK2108-1	41°51'01"	90°02'33"	黑云母斜长片麻岩	Bt + Pl + Kfs + Qtz + / - Mus
尾亚地区				
WY2103-2	41°41'35"	94°12'10"	十字石云母片岩	Stau + Pl + Qtz + Mus
WY2103-4	41°41'35"	94°12'10"	石榴石云母片岩	Grt + Pl + Qtz + Mus
WY2104-1B	41°41'15"	94°12'19"	十字石云母片岩	Stau + Pl + Qtz + Mus
WY2104-1C	41°41'15"	94°12'19"	十字石云母片岩	Stau + Pl + Qtz + Mus
WY2104-2	41°41'15"	94°12'19"	石榴石堇青石黑云母片岩	Cord + Grt + Qtz + Bt + Kfs

a) 矿物代号: Grt—石榴石, Bt—黑云母, Mus—白云母, Kfs—钾长石; Qtz—石英; Ky—蓝晶石; Pl—斜长石; Stau—十字石, Cord—堇青石, Hbl—角闪石

24个变质细碎屑沉积岩样品的 Sm-Nd 同位素数据列于表2, 并表示于图2和图3. 所有变质沉积岩样品的 Nd 模式年龄 T_{DM} 为 1.29~2.30 Ga(表2), 其中尾亚地区的样品的 T_{DM} 值处于 1.86~2.29 Ga 间, 平均值为 2.05 Ga, 表明其源区可能有古元古代或更老的地壳存在. 然而, 取自迪坎尔南和库米什地区的样品的 T_{DM} 值主要集中在 1.6~1.9 Ga 间, 平均值为 1.66 Ga, 而且最年轻的 T_{DM} 值为

1.29 Ga(表2), 接近于岛弧岩浆作用的年代(1.2 Ga 左右)¹⁾. 因为沉积岩的沉积年龄应等于或年轻于样品中最年轻的亏损地幔模式年龄, 又因为侵入其中的花岗质岩石具有(1218 ± 17)Ma 的岩浆结晶年龄, 所以星星峡群变质沉积岩的沉积时代应该在 1.2~1.3 Ga 之间, 即相当于华北克拉通的蓟县系. 因此, 我们采用 $\epsilon_{Nd}(t) = \epsilon_{Nd}(1.2 \text{ Ga})$ 来讨论其物源区的特征.

表2 中天山东段星星峡群变质沉积岩样品 Sm-Nd 同位素数据^{a)}

样品号	质量分数 $w/10^{-6}$		$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ	$\epsilon_{Nd}(0)$	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	$\epsilon_{Nd}(t)$	$T_{DM}(\text{Ga})$
	Sm	Nd							
KM2105-2	4.58	23.69	0.1168	0.512308	11	-6.4	-0.41	5.86	1.32
KM2106-1	8.11	41.51	0.1182	0.512112	9	-10.3	-0.40	1.81	1.65
KM2106-2	15.05	79.53	0.1144	0.512071	10	-11.1	-0.42	1.59	1.65
KM2107-1	4.87	23.91	0.1231	0.512042	10	-11.6	-0.37	-0.32	1.86
KM2107-2	4.85	24.70	0.1187	0.512054	11	-11.4	-0.40	0.60	1.75
KM2112-2	3.25	15.87	0.1239	0.512295	11	-6.7	-0.37	4.51	1.45
KM2113-1	9.61	48.59	0.1196	0.512009	10	-12.3	-0.39	-0.42	1.84
KM2114-2	4.47	23.24	0.1163	0.512121	9	-10.1	-0.41	2.28	1.61
KM2127-2	6.48	32.49	0.1205	0.512073	9	-11.0	-0.39	0.69	1.76
KM2127-3	6.47	32.14	0.1218	0.512047	12	-11.5	-0.38	-0.02	1.82
KM2127-5	7.02	35.35	0.1201	0.512345	8	-5.7	-0.39	6.08	1.31
DK2101-2	5.23	26.15	0.1209	0.512201	14	-8.5	-0.39	3.13	1.56
DK2102-2	4.35	21.34	0.1232	0.512384	8	-5.0	-0.37	6.36	1.29
DK2103-1	5.95	30.15	0.1193	0.511998	10	-12.5	-0.39	-0.59	1.85
DK2104-1	6.88	36.06	0.1154	0.512150	11	-9.5	-0.41	2.98	1.55

1) Liu S W, et al. Neoproterozoic granitic gneisses at Gangou-Chumishi, Eastern Tianshan, northwestern China: Its petrogenesis and tectonic implications. (submitted)

续表

样品号	质量分数 $\omega/10^{-6}$		$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$T_{\text{DM}}(\text{Ga})$
	Sm	Nd							
DK2106-1	5.91	32.02	0.1116	0.512053	9	-11.4	-0.43	1.67	1.63
DK2107-1	10.49	53.19	0.1193	0.511879	10	-14.8	-0.39	-2.92	2.04
DK2107-2	6.87	34.00	0.1221	0.512060	12	-11.3	-0.38	0.19	1.81
DK2108-1	7.77	40.51	0.1160	0.512009	9	-12.3	-0.41	0.13	1.78
WY2103-2	8.37	45.85	0.1104	0.511885	9	-14.7	-0.44	-1.43	1.86
WY2103-4	7.95	34.32	0.1402	0.512040	11	-11.7	-0.29	-2.99	2.29
WY2104-1B	6.98	35.27	0.1196	0.511826	10	-15.8	-0.39	-4.00	2.14
WY2104-1C	4.07	21.18	0.1161	0.511904	11	-14.3	-0.41	-1.94	1.94
WY2104-2	8.45	40.79	0.1252	0.511976	8	-12.9	-0.36	-1.93	2.02

a) $\epsilon_{\text{Nd}} = [({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_s / ({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} - 1] \cdot 10000$; $f_{\text{Sm}/\text{Nd}} = [({}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Nd})_s / ({}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}] - 1$; $({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.512638$ 和 $({}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.1967$; $T_{\text{DM}} = 1/\lambda \cdot \ln\{1 + [({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_s - 0.51315] / [({}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Nd})_s - 0.2137]\}$; S 为样品, $t = 1.2 \text{ Ga}$

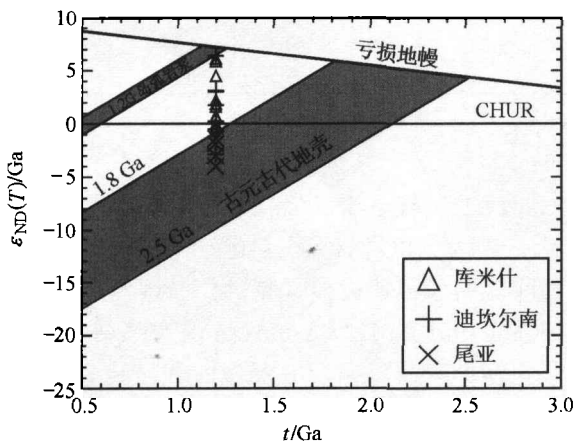


图2 变质沉积岩的 $t-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 关系图

Epsilon Nd 值计算到参考年龄 1.2 Ga

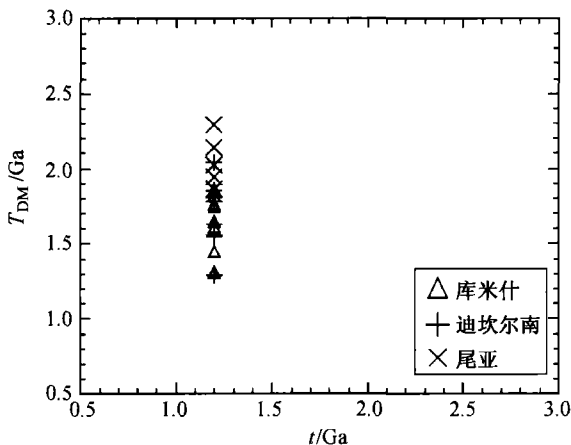


图3 $t-T_{\text{DM}}$ 关系图

所有变质沉积岩样品的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值的分布范围为 $-4.0 \sim +6.4$, 主要集中在 $-2.0 \sim +3.2$ 之间, 其中尾亚地区的 5 个样品的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值都小于 -1.4 , 平均值为 -2.46 , 迪坎尔南的样品的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值介于

$-2.92 \sim +6.36$ 间, 平均值为 1.37 , 库米什地区的样品的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值的变化范围是 $-0.42 \sim +6.08$, 平均值为 2.06 , 迪坎尔南和库米什地区的所有样品的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值的平均值为 1.77 . 如表 2 所示, 除样品 DK2107-1 外, 库米什和迪坎尔南样品的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 均大于 -1 , 而尾亚的样品都小于 -1.4 . 尽管库米什的 3 个样品 (KM2105-2, KM2112-2 和 KM2127-5) 和迪坎尔的一个样品 (DK2102-2) 与其他样品具有相似 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值 ($0.111 \sim 0.141$, 见表 2), 但却呈现较高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (> 4.5).

3 讨论

3.1 物源区

一般认为沉积岩的 ϵ_{Nd} 为较低的负值时, 其物源为老克拉通 (如太古代克拉通地壳的 $\epsilon_{\text{Nd}} < -20$); 而 ϵ_{Nd} 为较高的负值, 甚至为正值时, 通常认为来源于年轻的地壳 (如现代的岛弧火山岩的 $\epsilon_{\text{Nd}} > 2$)^[4, 23]. 根据 Hu 等^[20] 对塔里木太古代灰色片麻岩、片岩和混合岩以及元古代花岗岩的研究结果, 最年轻的 Nd 模式年龄 T_{DM} 老于 2.7 Ga , 我们重新计算的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值范围主要集中在 $-23 \sim -8.0$ 之间. 而中天山东段元古代星星峡群变质沉积岩样品 Nd 模式年龄 T_{DM} 为 $1.29 \sim 2.30 \text{ Ga}$, 表现较高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (> -3.0), 与塔里木克拉通区的 ϵ_{Nd} 有明显差别. 到目前为止, 中天山东段前寒武纪变质地块既没有太古代年龄的报道, 也没有太古代 T_{DM} 值出现, 因此太古代塔里木克拉通区可能不是这些变质沉积岩的主要源区. 中天山东段元古代星星峡群变质沉积岩主要源区可能是增生地体, 其增生时代及构造背景有待于进一步的研究. 从表 2 中可以注意到, 这些样品呈现狭窄的 Sm/Nd 比值变化范围

(0.111~0.141), 却表现较宽广的 ϵ_{Nd} 变化范围, 因而这些沉积岩样品的源区可能不只一个^[5]. 库米什的3个样品(KM2105-2, KM2112-2和KM2127-5)和迪坎尔的一个样品(DK2102-2)的 ϵ_{Nd} 显示较高的正值, 很可能来源于年轻的岛弧. 在 $t-\epsilon_{Nd}(t)$ 的关系图(图2)上, 所有星星峡群变质沉积岩都落在古元古地壳演化线附近及其与1.2 Ga 岛弧岩浆演化线之间. 这表明这些沉积岩的物源区可能有两个, 一个是大于1.8 Ga 的老地壳, 另一个是中元古代的新物质, 即这些沉积物是这两个端元组分以不同比例混合的产物. 尾亚样品的数据基本上已进入到古元古的地壳 Nd 同位素演化区内, 其 Nd 模式年龄的均值为2.05 Ga(图2), 与之相对照, 迪坎尔南和库米什地区的样品, 除 DK2107-1 落于古元古代地壳演化区域, 大多数分布于古元古代地壳演化线和1.2 Ga 岛弧演化线之间, Nd 模式年龄的均值分别为1.69和1.64 Ga(图2). 因此, 从尾亚经迪坎尔南到库米什, 星星峡群变质沉积岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值增加, 而 T_{DM} 值则减少(图2, 图3), 表明加入的年轻物质比例递增.

星星峡群变质沉积岩的 Nd 模式年龄和库米什变质沉积岩碎屑锆石 U-Pb 不一致线上交点年龄(1750±25)Ma, 表明侵蚀源区主要为古元古代老地壳, 同时有不同比例的年轻物质加入. 库米什的3个样品(KM2105-2, KM2112-2和KM2127-5)和迪坎尔南的一个样品(DK2102-2)显示较高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值, 具有相对年轻的 Nd 模式年龄. 除样品 WY2103-4 外, 其他样品的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值介于0.11~0.13之间, 表明在沉积和岩浆过程中 Sm/Nd 比值并没有发生明显的分异^[3, 6], 因而扰动的可能性很小, 即使有扰动, 其对 Sm/Nd 比值的影响也很微弱. 因此, Nd 模式年龄也支持库米什和迪坎尔南部地区的样品中包含有较年轻的碎屑组分. 根据 Farmer 等^[5]的研究, 这种情况可能导源于(i)具有高 ϵ_{Nd} 的弧物质和(ii)具有高 ϵ_{Nd} 的组分的较年轻前寒武纪地壳. 样品 KM2105-2, KM2112-2, KM2127-5 和 DK2102-2 的 ϵ_{Nd} 值介于4.5~6.4之间, 它们的 Nd 模式年龄的范围为1.3~1.5 Ga, 与 Grenville 造山带的岩石的模式年龄范围一致^[17, 24]. 另外, 中天山东段, 发生在中元古代晚期~1.2 Ga 的主要构造-岩浆事件可能与 Rodinia 的聚合相吻合¹⁾, 较年轻的碎屑组分可能来源于 Rodinia

聚合时的岩浆物质(弧物质). 因此, 中天山东段星星峡群变质沉积岩的物源区主要来源于古元古代的老地壳, 同时具有较年轻的弧物质的加入.

3.2 大地构造意义

Nd 同位素不仅可以用来确定沉积岩的物源区特征, 而且还能用来确定它们的大地构造环境^[7, 25]. 样品的 Nd 同位素组成($\epsilon_{Nd}(t)$ 为-4.0~+6.4)和 Nd 模式年龄(T_{DM} 为1.29~2.30 Ga)表明这些变质沉积岩样品的主要源区为古元古代老地壳, 同时有一些年轻的弧物质加入. 整个星星峡群都发生了绿片岩相-角闪岩相, 甚至麻粒岩相的变形和变质作用, 很可能是 Grenville 造山时期的增生地体, 是 Rodinia 聚合时的产物, 副变质岩(1216±74)Ma 的变质锆石 U-Pb 年龄和侵入副变质岩中的花岗质岩石(1218±17)Ma 岩浆结晶年龄有力地支持这一认识. 库米什和迪坎尔南样品表现较低的 Nd 模式年龄(T_{DM} 为1.29~2.04 Ga)值和较高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ (> -1), 而尾亚地区的样品表现明显高的 Nd 模式年龄(T_{DM} 为1.86~2.29 Ga)值和低的 $\epsilon_{Nd}(t)$ (为-4.00~-1.43)值, 表明古元古代源区和较年轻的源区在古地理位置上是分离的. 库米什和迪坎尔南地区样品可能沉积在弧后盆地更靠近岛弧一侧, 而尾亚地区的变质沉积岩在主要产于弧后盆地更靠近古元古代大陆一侧.

4 结论

综上所述, 中天山东段星星峡群变质沉积岩的 Nd 同位素特征表明:

- (1) 星星峡群变质沉积岩的沉积时代应该在1.2~1.3 Ga 间, 即相当于蓟县系;
- (2) 这些沉积物的物源与塔里木克拉通没有明显的亲缘关系, 可能主要来源于古元古代地壳, 同时有较年轻的弧物质的加入;
- (3) 这些变质沉积岩形成于弧后盆地构造环境, 库米什和迪坎尔南地区的变质沉积岩主要形成于弧后盆地更靠近弧一侧, 而尾亚地区的变质沉积岩主要产生于弧后盆地更靠近大陆一侧.

致谢 感谢中国科学院地质与地球物理所乔广生研究员在样品测试上所提供的帮助和北京大学地球与空间科学学院陈斌博士的指导以及审稿人提出的宝贵意见.

1) 见 p763 脚注 1)

参 考 文 献

- 1 McLennan S M, et al. Geochemical and Nd-Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: Crustal evolution and plate tectonic associations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54: 2015
- 2 McLennan S M, et al. Early Proterozoic crustal evolution: Geochemical and Nd-Pb isotopic evidence from metasedimentary rocks, southwestern North America. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59: 1153
- 3 Jahn B M, et al. Evolution of the Kaapvaal Craton as viewed from geochemical and Sm-Nd isotopic analyses of intracratonic pelites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59: 2239
- 4 Patchett P J, et al. Continental drainage in North America during the Phanerozoic from Nd isotopes. *Science*, 1999, 283: 671
- 5 Farmer G L, et al. Nd isotope constraints on sources of Neoproterozoic to Early Cambrian siliciclastic sedimentary rocks in northern Sonora. *Journal of South American Earth Science*, 2001, 14: 437
- 6 陈 斌, 等. 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. *中国科学, D 辑*, 2001, 31(3): 226
- 7 Chen B, et al. Geochemical and isotopic studies of the sedimentary and granitic rocks of the Altai orogen of northwest China and their tectonic implications. *Geological Magazine*, 2002, 139: 1
- 8 McCulloch M T, et al. Sm-Nd and Rb-Sr chronology of continental crust formation. *Science*, 1978, 200: 1003
- 9 Miller J F, et al. Evolution of continental crust in the Central Andes: Constraints from Nd isotope system. *Geology*, 1989, 17: 615
- 10 Taylor S R, et al. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell, 1985
- 11 McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks; Influence of provenance and sedimentary processes. *Reviews in Mineralogy*, 1989, 21: 169
- 12 Nesbitt H W. Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite. *Nature*, 1979, 279: 206
- 13 Zhao J X, et al. Sm-Nd and U-Pb Zircon isotopic constraints on the provenance of sediments from the Amadeus Basin, central Australia: Evidence for REE fractionation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56: 921
- 14 McDaniel D K, et al. Resetting of neodymium isotopes and redistribution of REEs during sedimentary processes: The Early Proterozoic Chelmsford Formation, Sudbury Basin, Ontario, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58: 931
- 15 Morey G B, et al. Rare earth elements in weathering profiles and sediments of Minnesota: Implications for provenance studies. *Journal of Sedimentary Research*, 1997, 67: 105
- 16 Goldschmidt V M. *Geochemistry*. Oxford: Oxford Univ Press, 1954
- 17 Gleason J D, et al. Nd isotopes link Ouachita turbidites to Appalachian sources. *Geology*, 1994, 22: 347
- 18 陈义兵, 等. 天山东段尾亚麻粒岩 REE 和 Sm-Nd 同位素特征. *地球化学*, 1997, 26(4): 70
- 19 顾连兴, 等. 中天山东段花岗岩类铷-锶年代学及构造演化. *桂林冶金地质学院学报*, 1990, 10(1): 49
- 20 Hu A Q, et al. Crustal evolution and Phanerozoic crust growth in northern Xinjiang; Nd isotopic evidence; Part I, Isotopic characterization of basement rocks. *Tectonophysics*, 2000, 328: 15
- 21 Qiao G S. Normalization of isotopic dilution analysis. *Science in China(Series A)*, 1988, 31: 1263
- 22 Liu S W, et al. Geological and isotopic geochemical constraints on the evolution of the Fuping Complex, north China Craton. *Pre-cambrian Research*, 2002, 117: 41
- 23 Michard A, et al. Nd isotopes in French Phanerozoic shale; External vs. internal aspects of crustal evolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1985, 49: 601
- 24 Boghossian N D, et al. Nd isotopes and the source of sediments in the miogeocline of the Canadian Cordillera. *Journal of Geology*, 1996, 104: 259
- 25 Hemming S R, et al. Geochemical and Nd/Pb isotopic evidence for the provenance of the Early Proterozoic Virginia Formation, Minnesota. Implication for the tectonic setting of the Animikie basin. *Journal of Geology*, 1995, 103: 147