

# 中天山东段星星峡群变质泥质岩的地球化学特征 及其对物源区和古风化作用的制约\*

李秋根 刘树文\*\* 韩宝福 王月然 党青宁

(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)

**摘要** 中天山东段中元古代星星峡群变质泥质岩的常量元素、微量元素和稀土元素特征表明, 它们的Sr, Hf和Zr比后太古代页岩相对富集, 其他元素与NASC和PAAS特征相似. 星星峡群变质泥质岩 $Al_2O_3/TiO_2$ , Cr/Zr, Cr/Th和Th/Sc的比值和高Zr含量等表明源区物质以长英质岩石为主, 同时有少量铁镁质岩石的加入. REE配分模式表现轻、重稀土高度分馏特征,  $(La/Yb)_n$ 的均值为18.6. 一些样品表现较小的负Eu异常( $Eu/Eu^* = 0.7\sim 0.84$ ), 表明物源中有不成熟的年轻弧物质的加入. 星星峡群变质泥质岩样品具有低的 $K_2O/Al_2O_3$ 的比值, 表明源区物质中的碱性长石含量较低, 物源中斜长石和钾长石的比值为5:1, 在成分上相当于英云闪长岩和花岗闪长岩. 低CIA值和高ICV值特征指示星星峡群变质泥质岩的物源区古风化程度较低, 沉积物的成分成熟度低. 地球化学特征也表明样品沉积在大陆岛弧体系下的弧后盆地构造背景.

**关键词** 中天山东段 星星峡群副变质岩 地球化学 物源区 古风化作用 构造背景

碎屑沉积岩记录了源岩成分特征、物源区古化学风化条件和大地构造背景等方面的信息<sup>[1-6]</sup>. 传统岩石学方法通常采用硅质碎屑岩中的主要组分(石英、长石和岩屑)来估计源区成分和判别构造背景<sup>[7]</sup>. 然而, 传统岩石学方法不足之处主要在于母岩的铁镁质组分在成岩过程中会蚀变为绿泥石、粘土、铁的氧化物等. 母岩中铁镁质组分的地球化学特征在风化和成岩作用过程中一般都会保存下来<sup>[8]</sup>. Fedo等<sup>[9]</sup>指出传统岩石学方法不适合用来判别物源区性质, 因

为 1) 源区的岩石成分不能完全有效地在QFL(石英-长石-岩屑)三角图中表示出来; 2) 在泥质岩石中, 通常不能精确地进行组分统计. 因此, 对细碎屑沉积岩进行常量元素、微量元素和稀土元素分析可以揭示在薄片上辨别不出的细节. 研究表明, 由于泥/页岩具有粒度上的均一性、沉积期后的不透水性和较高的微量元素丰度等优点, 因而其化学成分最适合用来追溯物源区性质和判别构造背景<sup>[10-12]</sup>. 从全球的尺度来看, 泥/页岩的化学成分反映的是大陆地壳的平均

2004-03-16 收稿, 2004-10-20 收修改稿

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 40072065)

\*\* 联系人, E-mail: [swliu@pku.edu.cn](mailto:swliu@pku.edu.cn)

成分<sup>[4]</sup>。然而,形成于特定构造背景下的盆地中的泥/页通常反映的是源区岩石的成分<sup>[13]</sup>。微量元素,特别是稀土元素(REE)、高场强元素(HFSE)、Cr和Co等,在海水中的溶解度低,而且在沉积作用过程中很少分异。尽管一些研究表明物源区岩石的特征可能会受到风化、分选、成岩以及变质作用的影响<sup>[14-16]</sup>,但是,这些微量元素的相对稳定性表明它们仍然能够指示物源区性质<sup>[4,17]</sup>。本文系统地分析了星星峡群中大量分布的变质泥质岩的地球化学特征,旨在确定变质沉积岩物源区性质、评估物源区的古气候条件和重建沉积盆地的大地构造背景。

## 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<sup>[18]</sup>。刘树文等<sup>[19]</sup>依据地质年代学和Sm-Nd同位素资料,认为这些前寒武纪变质地块曾经是一个统一的变质地块,其形成与Rodinia超大陆的聚合密切相关,被后期地质作用(地质体)所分离,经历了多期强烈的变形变质作用的改造<sup>[20,21]</sup>。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,被中-新元古代和古生代花岗质岩石侵入<sup>[22,23]</sup>。胡霏琴等<sup>[24]</sup>对星星峡群花岗质片麻岩和斜长角闪岩样品进行化学分析,认为其原岩是中、酸性至基性火山岩,或是相应的深成侵入岩。刘树文等<sup>[19]</sup>在库米什地区星星峡群蓝晶石黑云母片岩中获得碎屑锆石U-Pb不一致线上交点年龄为 $1750 \pm 25$  Ma,反映了原岩的形成时代。刘树文等<sup>[19]</sup>在尾亚星星峡群采集的云母片岩变质锆石的U-Pb年龄为 $1216 \pm 74$  Ma,侵入其中的花岗质岩石的锆石U-Pb年龄( $1218 \pm 17$  Ma)为岩浆结晶年龄;而且刘树文等<sup>[19]</sup>在库米什-干沟的眼球状花岗片麻岩中获得全岩Sm-Nd同位素等时线年龄 $1142 \pm 120$  Ma。修群业等<sup>[25]</sup>在卡瓦布拉克泉以北的花岗闪长岩中获得锆石U-Pb同位素年龄 $1141 \pm 60$  Ma。这些年代学数据表明,中天山东段前寒武纪变质地块主要形成于 $1140 \sim 1220$  Ma,并伴有近同期的变质作用,可能存在古元古代晚期古老的陆壳<sup>[19]</sup>。

星星峡群副变质岩石包括石榴石黑云母片岩、蓝晶石石榴石黑云母片岩、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。Li等<sup>[26]</sup>根据这些副变质岩中的片岩的Nd同位素特征,认为它们形成于弧后盆地构造背。这些作者依据Nd模式年龄和侵入其中的花岗质岩石的U-Pb锆石年龄,确定这些副变质岩的沉积时代应该在 $1.2 \sim 1.3$  Ga。

## 2 分析方法

分析样品分别取自中天山东段库米什、迪坎尔南和尾亚地区(图 1)的星星峡群副变质岩。岩石类型包括各类黑云母片岩、黑云母石英片岩和片麻岩。总体岩石结构为斑状细粒鳞片变晶结构和斑状细粒鳞片粒状变晶结构,变斑晶常为筛状结构或残缕结构,片状构造,局部为片麻状构造。主要的特征变质矿物有蓝晶石、十字石、石榴石,局部岩石中出现堇青石(迪坎尔南)和红柱石(尾亚等地)。基质部分主要为黑云母、石英、斜长石,有时出现钾长石,还有白云母沿着晚期片理、片麻理分布,局部存在明显的变形后生长。沿着早期片理和片麻理可见退化变质形成的绿泥石。在库米什地区的样品中可见石榴石、蓝晶石和十字石相互接触表现平衡共生关系,构成早期面理。迪坎尔南、尾亚等地的黑云母片岩中可见蓝晶石和十字石在堇青石中定向排列形成早期面理。中天山东段副变质岩石的结构、构造和不同世代的矿物组合特征说明这些岩石至少经历了两个主要变质阶段(或者变质期),早期为含石榴石、蓝晶石、十字石矿物组合,代表了相对较高的变质压力;晚期这些岩石经历了高温低压变质作用,形成含堇青石和红柱石矿物组合。

在岩石学研究的基础上,我们选择了 15 个具有代表性的各类片岩进行了常量元素、微量和稀土元素的地球化学分析。样品的化学分析在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完成。样品首先分割成两半,一半用于磨成薄片进行镜下分析,另一半用于化学分析。用于化学分析的样品制备成两种粒级,一种为小于 80 目,用于测定FeO;另一种为小于 200 目,用于其他元素分析。常量元素和 Sc, Cr, Ni 以及 V 等微量元素是粉末样品经

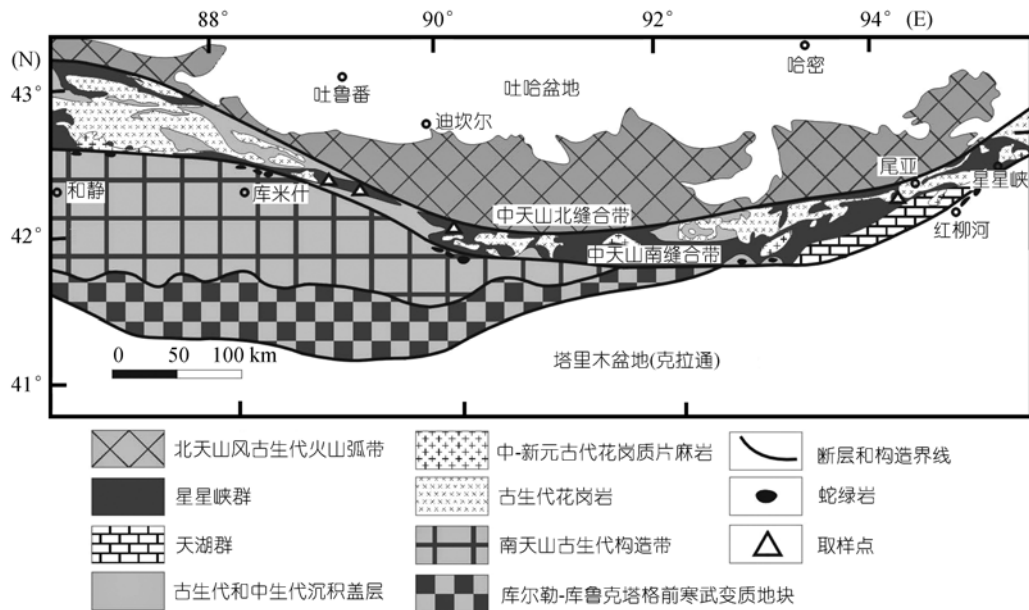


图1 东天山东段造山带地质简图及取样位置(据文献[26])

过碱熔后,在ICAP-9000SP上进行测定。FeO采用重铬酸钾滴定法测定,烧失量(LOI)用重量法测定。其他微量元素则是粉末样品经酸溶后,用VG Axiom MC-HR-ICP-MS方法测定。分析过程中采用的标样为GSD-1, GSD-6和GSR-1。常量元素的分析精度,除 $P_2O_5$ 为1%~5%之间外,其余在1%以内;微量元素(包括14个稀土元素)的分析精度处于5%~10%之间。

### 3 分析结果

常量元素和微量元素分析结果和相关比值分别列于表1和表2,为了便于比较,将北美页岩成分(NASC)<sup>[27]</sup>和后太古代澳大利亚平均页岩(PAAS)<sup>[4]</sup>也列入到表1和表2。分析表明,这些样品的二氧化硅含量集中在54%~69%之间,相当于闪长岩~花岗闪长岩类。在Herron<sup>[28]</sup>的分类图中,这些变质泥质岩样品落于页岩范围(图2),与NASC和PAAS相似。

Condie<sup>[11]</sup>指出,与太古代的泥质岩石相比,后太古代泥质岩石中的镁铁质元素的含量,特别是Ni和Cr含量较低,其主要原因是太古代的泥质岩石的物源区存在较多超镁铁质-镁铁质组分,而在后太古代长英质岩石含量增加,据此可以标记太古-元古代(A/P)的界线。星星峡群变质泥质岩的微量元素含量

呈现变化的特征。与NASC和PAAS相比较,星星峡群变质泥质岩样品具有Sr, Hf和Zr相对富集,而其他元素与NASC和PAAS具有相似的特征。在图3中,样品几乎都集聚在NASC和PAAS的周围,所有样品表现了相似的Ni和Cr含量。这更进一步证明星星峡群变质泥质岩石的物源区以长英质岩石为主。

图4是星星峡群变质泥质岩样品的稀土配分图。尽管样品的稀土元素的绝对含量有变化,但是球粒陨石标准化后的稀土配分模式均呈现轻稀土富集、重稀土亏损的特点,轻、重稀土分馏较强。球粒陨石标准化后样品La为67~187, Yb为3~20(图3)。所有样品均表现较明显的负Eu异常, Eu/Eu\*值的变化范围为0.49~0.84,平均值为0.67,与NASC和PAAS的Eu/Eu\*值相近(分别为0.68和0.65)。从稀土元素的含量上看,绝大多数样品的轻稀土含量略高于NASC和PAAS的轻稀土含量,但重稀土含量则略低于NASC和PAAS的含量。

## 4 讨论

### 4.1 源区的风化作用

McLennan等<sup>[29]</sup>的研究表明细碎屑沉积岩比共生的砂岩更能反映源区风化状况。Nesbitt等<sup>[3]</sup>指出,可

表 1 新疆中天山东段星星峡群变质泥质岩地球化学分析数据<sup>a)</sup>

样品号	KM2106-1	KM2106-2	KM2107-1	KM2112-2	KM2113-1	KM2127-2	KM2127-3	KM2127-5	DK2101-2
岩性	蓝晶石 黑云母 片岩	十字石 黑云母 片岩	蓝晶石 黑云母 片岩	石榴石 黑云母 片岩	石榴石 黑云母 片岩	十字石 黑云母 石英片岩	蓝晶石 黑云母 石英片岩	蓝晶石 黑云母 片岩	角闪 斜长 片麻岩
SiO <sub>2</sub>	62.4	54.9	64.6	69.0	56.0	66.0	60.6	63.7	65.9
TiO <sub>2</sub>	0.80	0.93	0.77	0.73	0.85	0.83	0.89	0.84	0.75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.2	17.3	14.8	14.4	16.7	15.4	15.7	15.4	14.4
FeO	4.3	5.7	5.0	3.1	5.6	4.0	3.6	4.5	2.9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.1	2.1	1.1	1.3	1.8	1.7	3.7	1.2	2.4
MgO	3.51	5.94	3.17	1.75	6.16	3.00	4.19	3.09	2.97
MnO	0.15	0.38	0.12	0.10	0.43	0.15	0.24	0.16	0.09
CaO	3.15	3.11	3.42	3.48	2.54	2.65	3.60	3.81	3.89
Na <sub>2</sub> O	2.69	2.33	2.06	3.09	1.39	2.05	1.54	2.62	2.79
K <sub>2</sub> O	2.48	3.76	2.36	1.78	3.54	1.66	3.00	1.98	2.42
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.28	0.33	0.21	0.29	0.20	0.27	0.30	0.25	0.18
LOI	1.92	2.58	2.20	1.08	4.18	1.71	2.10	1.95	1.38
总量	100.0	99.3	99.8	100.1	99.3	99.5	99.5	99.5	100.0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	6.86	8.44	6.68	4.77	8.04	6.14	7.74	6.19	5.62
Rb	116	161	115	86	238	182	124	183	192
Sr	275	250	109	167	264	242	182	259	173
Ba	228	477	214	238	785	210	393	668	304
Th	11.3	14.4	10.1	12.2	18	8.89	11.4	9.76	13.6
U	2.4	3.1	1.7	2.8	3.2	1.8	2.1	1.8	2.5
Co	13.0	19	23	18	18	24	12.8	19	21
Ni	54	34	76	46	45	67	37	58	61
V	77	145	134	85	115	72	84	115	106
Cr	104	122	143	68	139	104	76	114	147
Sc	12.3	22	17	13.7	15.1	11.3	8.7	12.3	15.1
Zr	289	226	227	336	221	266	224	231	229
Hf	6.86	5.65	5.55	7.66	5.48	6.79	5.52	5.81	6.30
Nb	13.5	17	12.5	14.2	20	11.9	18.7	13.9	10.9
Ta	1.04	1.33	1.01	1.33	1.47	1.11	1.69	1.05	0.92
La	52	69	30	47	68	41	44	38	36
Ce	104	136	64	96	147	84	89	77	73
Pr	12.0	15.9	7.18	10.9	16	10.2	10.4	9.06	9.12
Nd	48	55	26	41	59	36	40	33	34
Sm	10.6	11.7	5.31	8.11	11.8	7.07	7.89	6.75	6.14
Eu	1.61	2.13	1.17	1.78	2.36	1.60	1.98	1.80	1.32
Gd	7.87	10.5	4.69	7.50	10.5	6.59	7.22	6.34	5.46
Tb	0.99	1.32	0.68	1.12	1.54	0.89	0.98	0.85	0.88
Dy	4.36	5.99	3.71	5.41	8.29	4.24	4.53	3.93	5.12
Ho	0.60	0.85	0.68	0.89	1.45	0.72	0.68	0.62	0.99
Er	1.26	2.32	1.96	2.29	4.06	1.93	1.67	1.48	2.86
Tm	0.12	0.28	0.27	0.28	0.55	0.27	0.22	0.17	0.42
Yb	0.75	1.77	1.83	1.56	3.74	1.93	1.41	1.08	2.69
Lu	0.11	0.27	0.28	0.21	0.57	0.3	0.21	0.15	0.39

续表 1

样品号	DK2102-2	DK2104-1	DK2107-1	DK2107-2	WY2103-4	WY2104-2	NASC	PAAS
岩性	角闪 斜长 片麻岩	黑云母 片岩	蓝晶石 黑云母 片岩	蓝晶石堇青 石黑云母 片岩	堇青石十字 石黑云母 片岩	石榴石堇青 石黑云母 片岩		
SiO <sub>2</sub>	64.4	58.1	67.2	59.0	58.8	64.7	64.8	62.4
TiO <sub>2</sub>	0.83	0.81	0.78	0.86	0.89	0.85	0.70	0.99
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.2	17.5	15.7	16.5	15.8	16.0	16.9	18.8
FeO	3.5	2.6	2.7	4.8	3.8	3.0		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.9	4.1	1.1	1.7	4.5	2.6		
MgO	3.45	3.94	5.07	6.04	5.49	2.19	2.86	2.19
MnO	0.11	0.21	0.11	0.19	0.31	0.17	0.06	0.11
CaO	2.13	2.43	1.49	1.29	4.51	1.61	3.63	1.29
Na <sub>2</sub> O	1.85	1.74	1.86	1.24	1.15	1.08	1.14	1.19
K <sub>2</sub> O	2.31	4.30	1.40	3.92	2.50	3.09	3.97	3.68
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.27	0.28	0.27	0.27	0.17	0.18		0.16
LOI	1.90	3.38	1.67	3.83	1.78	3.82		
总量	99.9	99.5	99.3	99.6	99.7	99.3		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	6.79	6.98	4.08	6.99	8.71	5.91	5.67	7.18
Rb	161	143	139	114	154	168	125	160
Sr	269	202	280	205	238	243	142	200
Ba	224	580	192	543	861	579	636	650
Th	9.94	9.10	9.66	8.17	12.4	10.5	12.3	14.6
U	1.9	1.8	2.3	1.2	2.4	2.5	3.0	3.1
Co	22	18	17	18	16	14.1	26	23
Ni	65	26	39	45	61	51	58	55
V	130	98	145	118	112	92	130	96
Cr	143	86	134	92	96	79	125	110
Sc	22	15.1	17	8.7	15.1	11.6	15	16
Zr	244	312	304	228	291	340	200	210
Hf	6.59	7.06	6.96	5.66	7.22	7.87	6.3	5
Nb	10.4	19	10.3	19	15.7	17	13	1.9
Ta	0.88	1.28	0.96	1.57	1.18	1.36	1.1	
La	25	45	63	31	36	47	31	38
Ce	52	84	127	63	85	105	67	80
Pr	7.23	10.2	14.5	7.97	10.6	12.6		8.83
Nd	27	37	49	31	41	47	27	33.9
Sm	5.20	6.91	10.1	6.12	9.01	11.1	5.6	5.55
Eu	1.25	1.38	1.77	0.94	1.88	2.04	1.2	1.08
Gd	5.15	5.91	9.09	5.59	8.97	8.56	5.2	4.66
Tb	0.80	0.74	1.16	0.77	1.43	1.16	0.85	0.77
Dy	4.61	3.25	5.17	3.65	8.11	5.73		4.68
Ho	0.82	0.52	0.76	0.55	1.57	0.97		0.99
Er	2.24	1.56	1.93	1.43	4.63	2.80		2.85
Tm	0.29	0.21	0.22	0.17	0.72	0.40		0.40
Yb	1.79	1.47	1.46	1.10	4.89	3.00	3.10	2.82
Lu	0.25	0.22	0.22	0.17	0.75	0.50	0.46	0.43

a) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\* 为全Fe, 常量元素的单位为%, 微量元素单位为μg/g

表 2 分析样品的元素比值以及CIA和ICV值<sup>a)</sup>

样品号	KM2106-1	KM2106-2	KM2107-1	KM2112-2	KM2113-1	KM2127-2	KM2127-3	KM2127-5
岩性	蓝晶石 黑云母 片岩	十字石 黑云母 片岩	蓝晶石 黑云母 片岩	石榴石 黑云母 片岩	石榴石 黑云母 片岩	十字石 黑云母 石英片岩	蓝晶石 黑云母 石英片岩	蓝晶石 黑云母 片岩
CIA	56	56	55	52	61	61	56	54
ICV	1.20	1.42	1.25	1.08	1.35	1.06	1.34	1.20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	0.9	1.6	1.2	0.6	2.6	0.8	2.0	0.8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub>	20	19	19	20	20	19	18	18
K <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1
Cr/Th	9.2	8.5	14.3	5.6	7.8	11.7	6.6	11.6
La/Sc	4.2	3.1	1.8	3.5	4.5	3.6	5.1	3.1
Th/Sc	0.92	0.65	0.61	0.89	1.19	0.79	1.31	0.79
Cr/Zr	0.4	0.5	0.6	0.2	0.6	0.4	0.3	0.5
Eu/Eu*	0.54	0.59	0.72	0.70	0.65	0.72	0.80	0.84
(La/Yb) <sub>n</sub>	46.5	26.2	11.0	20.5	12.3	14.2	21.3	23.7

样品号	DK2101-2	DK2102-2	DK2104-1	DK2107-1	DK2107-2	WY2103-4	WY2104-2	NASC	PAAS
岩性	角闪 斜长 片麻岩	角闪 斜长 片麻岩	黑云母 片岩	蓝晶石 黑云母 片岩	蓝晶石 堇青石 黑云母 片岩	堇青石 十字石 黑云母 片岩	石榴石 堇青石 黑云母 片岩		
CIA	50	63	59	68	66	55	67	57	69
ICV	1.29	1.07	1.15	0.94	1.24	1.47	0.92	1.06	0.88
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	0.9	1.3	2.5	0.8	3.2	2.2	2.9	3.5	3.1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub>	19	19	22	20	19	18	19	24	19
K <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.2	0.1	0.3	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Cr/Th	10.8	14.4	9.5	13.8	11.3	7.7	7.5	10.2	7.5
La/Sc	2.4	1.2	3.0	3.7	3.6	2.4	4.0	2.1	2.4
Th/Sc	0.90	0.46	0.60	0.56	0.94	0.82	0.91	0.82	0.91
Cr/Zr	0.6	0.6	0.3	0.4	0.4	0.3	0.2	0.6	0.5
Eu/Eu*	0.70	0.74	0.66	0.56	0.49	0.64	0.64	0.68	0.65
(La/Yb) <sub>n</sub>	8.9	9.3	20.6	29.3	19.1	5.0	10.6	6.8	9.2

a) CIA =  $[Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \times 100$ , 采用摩尔数进行计算, CaO\*指的是岩石当中硅酸盐所含的CaO的摩尔数 (据文献[31]); ICV =  $[(Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO + MgO + TiO_2) / Al_2O_3] \times 100$ , 据文献[32]; 球粒陨石标准化值据文献[4]

以用CIA指数(CIA =  $[Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \times 100$ , 其中CaO\*指岩石中硅酸盐所含的CaO的摩尔数)来确定沉积物源区的化学风化程度。按照 McLennan [30] 和 Panahi 等 [31] 的方法, 我们进行了CaO\*的计算和校正。也就是先用P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>校正磷酸盐中的CaO(CaO\* = CaO -  $[10/3 \times P_2O_5]$ ), 如果校正后的

CaO摩尔数小于Na<sub>2</sub>O摩尔数, 则采用校正后的CaO摩尔数作为CaO\*摩尔数, 如果校正后的CaO摩尔数大于Na<sub>2</sub>O摩尔数, 则采用Na<sub>2</sub>O摩尔数作为CaO\*摩尔数。星星峡群变质泥质岩样品的CIA值处于 50~67 间(表 2), 平均值为 59, 表明源区为中-低风化程度, 揭示物源区可能处于寒冷或者干旱的气候条件抑或



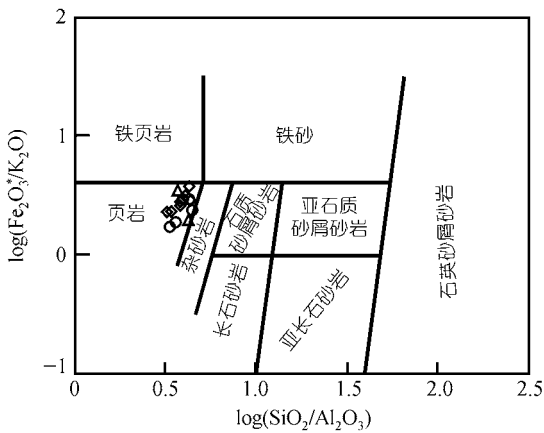


图 2 Herraon 砂岩和页岩分类图(据文献[28])

图中菱形为库米什变质泥质岩样品, 圆为迪坎尔南变质泥质岩样品, 三角形为尾亚变质泥质岩样品

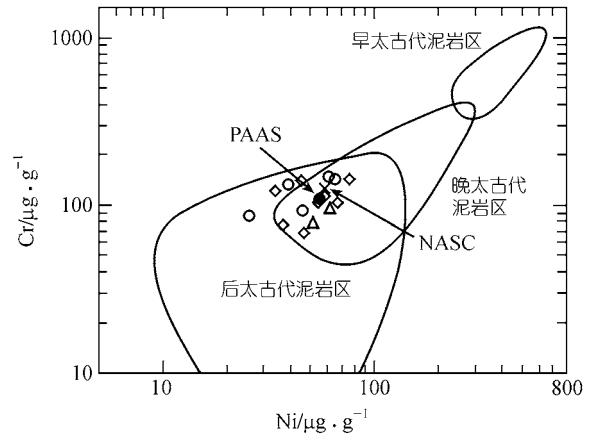


图 3 星星峡群变质泥质岩 Ni-Cr 区分图 (据文献[4])

PAAS, 后太古代澳大利亚页岩[4]; NASC, 北美平均页岩成分[27]. 样品符号说明见图 2

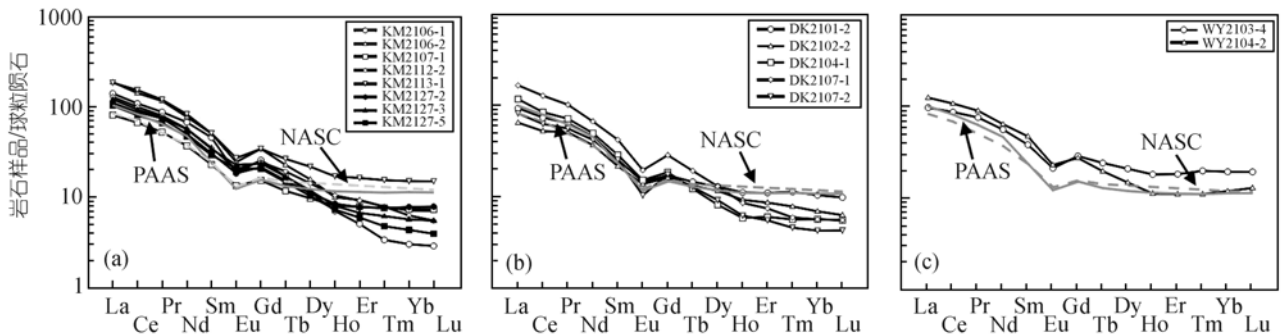


图 4 星星峡群变质泥质岩球粒陨石标准化 REE 配分图

(a) 库米什地区的变质泥质岩, (b) 迪坎尔南的变质泥质岩, (c) 尾亚地区变质泥质岩. 球粒陨石标准化值和 PAAS 据文献[4], NASC 据文献[27]

为构造活动区. 通常认为, 成分成熟度与沉积物形成时的气候背景和构造背景有关. ICV 指数则可以用来确定沉积物的成分成熟度[32]. 星星峡群变质泥质岩样品的 ICV 值表明它们的成分成熟度低, 说明这些变质泥质岩的原岩形成于构造活动区[8].

在  $Al_2O_3-(CaO+Na_2O)-K_2O$  (A-CN-K) 三角图中 (图 5), 样品点落在接近钾长石和斜长石的连线位置, 样品的 CIA 值为 50~67, 表明物源区的风化作用仅仅只是处在斜长石的分解阶段. 细屑岩沉积期后经常发生钾交代现象[5,11], 碎屑岩沉积期的风化作用和沉积期后的成岩作用和交代作用情况可以用 CIA 值和 A-CN-K 三角图相组合来判别(图 5)[5,9,16]. 在沉积期后发生钾交代作用的情况下, 沉积岩样品趋于向  $K_2O$  顶点方向偏移. 钾交代前或修正后的 CIA' 值可以从

$K_2O$  顶点向单个样品点作连线, 并与理想风化趋势线相交, 交点在 CIA 尺度上的读数中获得(图 5). 同时也可以利用钾交代前的 CIA' 值和计算的 CIA 值来定量估计岩石在钾交代时钾获得的程度[5]. 在 A-CN-K 三角图中, 一些样品发生了不同程度的钾交代, 但是就总体而言, 星星峡群变质沉积岩钾交代的程度都较低, 因为交代前遭受到的风化作用比较低(钾交代前的  $CIA' = 50\sim 71$ )[5].

### 4.2 物源区性质

4.2.1 物源区成分特征——常量元素 Nesbitt 等[33,34]和 Fedo 等[5,9]的研究表明, A-CN-K 三角图不仅可以用来确定碎屑沉积岩物源区的古风化程度, 而且可以用来确定物源区成分. 由于化学风化的趋势

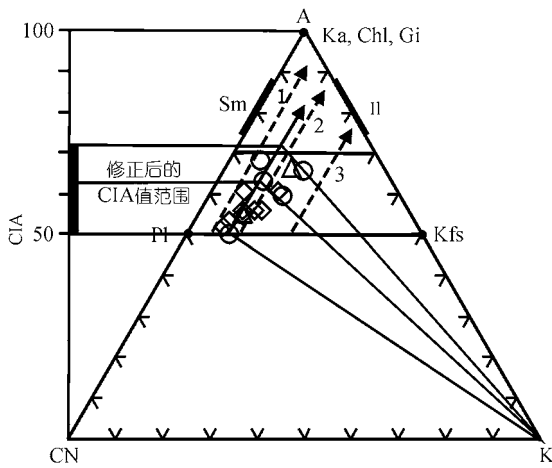


图 5 星星峡群变质泥质岩 A-CN-K 三角图

箭头实线为星星峡群变质泥质岩样品的理想风化趋势线, 箭头点虚线为英云闪长岩(1)、花岗闪长岩(2)和花岗岩(3)的理想风化趋势。Ka, 高岭石; Chl, 绿泥石; Gi, 水铝矿; Sm, 蒙脱石; Il, 伊利石; Pl, 斜长石; Kfs, 钾长石; 样品符号见图 2

在 A-CN-K 三角图中通常平行于 A-CN 边<sup>[5,33,34]</sup>, 因此可以用沉积样品表现的风化趋势反向投影到长石连线上推断源区成分<sup>[5]</sup>。星星峡群变质泥质岩样品在 A-CN-K 三角图中的 A-K 边上的某点和长石连线的某点间形成一个线性排列(图 5), 长石连线上的点近似于物源区组分中的斜长石和钾长石的比值。从图 5 中, 可以估计物源区组分的斜长石和钾长石的比值大致为 5:1, 这种情况下, 物源区成分相当于 Fedo 等<sup>[5]</sup>所指出的花岗闪长岩和英云闪长岩范围。

另一个可以用来确定细碎屑岩物源区成分的指数为  $K_2O/Al_2O_3$ , 因为粘土矿物和长石的  $K_2O/Al_2O_3$  值存在明显的差别, 在碱性长石中  $K_2O/Al_2O_3$  值为 0.4~1, 在伊利石中大约为 0.3, 在其他粘土矿物中则接近于 0<sup>[32]</sup>。Cox 等<sup>[32]</sup>指出, 当泥质岩石中  $K_2O/Al_2O_3$  值大于 0.5 时, 说明母岩中具有相当数量的碱性长石;  $K_2O/Al_2O_3$  值小于 0.4 时, 说明母岩中只含少量的碱性长石。星星峡群变质泥质岩样品  $K_2O/Al_2O_3$  的范围为 0.09~0.24(表 2), 平均值为 0.17, 表明母岩中碱性长石的含量较低。Girty 等<sup>[35]</sup>认为, 沉积物中的  $Al_2O_3/TiO_2$  值小于 14 时, 可能来源于铁镁质岩石; 而  $Al_2O_3/TiO_2$  值处于 19~28 之间时, 可能来源于由安山质和流纹英安质(或者花岗闪长质和英云闪长质)岩石。

星星峡群变质泥质岩样品的  $Al_2O_3/TiO_2$  范围为 17.6~21.7(表 2), 均值为 19.2, 表明其主要来源于长英质岩石, 而非镁铁质岩石。

**4.2.2 物源区成分特征——微量元素** 泥质岩石的微量元素地球化学已经被广泛地应用于物源区性质的判定<sup>[4,32,36]</sup>。因为 Cr 和 Zr 元素主要反映铬铁矿和锆石的含量, 所以其比值可以反映镁铁质与长英质对沉积物的相对贡献<sup>[10]</sup>。星星峡群变质泥质岩的 Cr/Zr 比值都小于 1(范围为 0.20~0.64, 表 2), 说明源区物质以长英质为主。Taylor 等<sup>[4]</sup>以及 Fedo 等<sup>[9]</sup>研究表明 Th/Sc 比值是最为适合于用来判别物源区性质的。星星峡群变质泥质岩样品的 Th/Sc 比值呈现大的变化(0.46~1.31), 均值为 0.82, 略低于上地壳的 Th/Sc 值(1.0)<sup>[4]</sup>, 表明源区物质以长英质为主。另外, 星星峡群变质泥质岩样品的 Cr/Th 比值范围为 5.6~14.4, 位于 Cullers<sup>[17]</sup>所指出的长英质源区的范围。

轻稀土和重稀土分馏的程度是判别沉积岩物源区长英质和镁铁质成分比例的一个尺度, Eu 异常提供了有关物源区性质的信息。星星峡群变质泥质岩样品的  $(La/Yb)_n$  值的范围为 5.0~46.5(表 2), 平均值为 18.6, 表明样品的分馏程度较高(图 4)。HREE 分馏的特征表明在原岩形成过程中石榴石可能作为残余相, 或者在风化过程中具有锆石残留。一些样品呈现较小的负 Eu 异常( $Eu/Eu^* = 0.7\sim 0.84$ ), 说明具有年轻岛弧物质加入<sup>[4]</sup>, 其与星星峡群变质沉积岩 Sm-Nd 同位素研究的结果一致<sup>[26]</sup>。

## 5 构造背景

Li 等<sup>[26]</sup>依据星星峡群变质沉积岩的 Nd 同位素特征, 认为它们沉积在弧后盆地构造背景。如前所述, 样品呈现高 CIV 和低 CIA 的特征, 同样说明沉积物的物源区和沉积盆地处于构造活动区, 而且古气候条件对源区的风化作用影响较小。在  $K_2O/Na_2O-SiO_2/Al_2O_3$  图中<sup>[37]</sup>(图 6), 样品点落在活动大陆边缘(ACM)和岛弧区(A2); 在 La/Sc-Ti/Zr 图中<sup>[2]</sup>(图 7(a)), 大部分样品点落在活动大陆边缘区域, 少数点落在大陆岛弧区; 在 Th-Co-Zr/10 和 Th-Sc-Zr/10 图<sup>[2]</sup>中(图 7(b)和(c)), 样品点落在大陆岛弧区内。样品的稀土元素配分模式呈现轻稀土富集( $(La/Yb)_n$  均值为 18.6)和



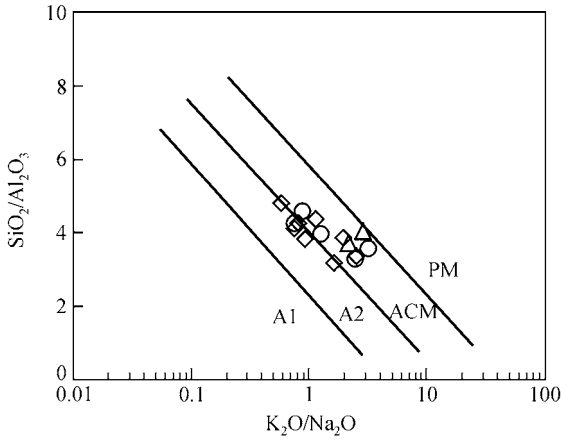


图 6  $K_2O/Na_2O-SiO_2/Al_2O_3$ 构造背景区分图解<sup>[38]</sup>  
A1 为岛弧构造背景, A2 为演化岛弧背景, ACM 为活动大陆边缘, PM 为被动大陆边缘; 样品符号见图 2

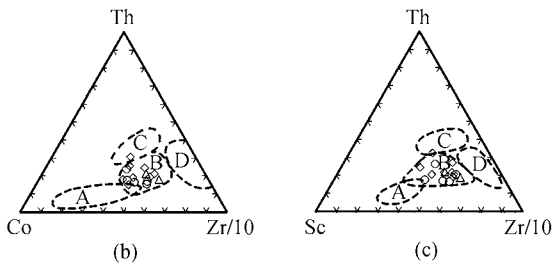
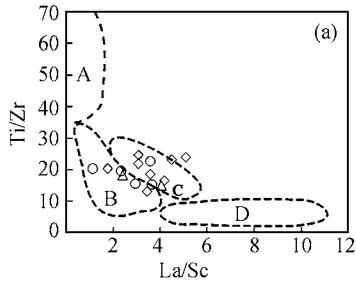


图 7  $La/Sc-Ti/Zr$ (a),  $Th-Co-Zr/10$ (b)和 $Th-Sc-Zr/10$ (c)构造背景区分图解<sup>[2]</sup>  
A 为大洋岛弧, B 为大陆岛弧, C 为活动大陆边缘, D 被动大陆边缘. 样品符号见图 2

具有负Eu异常的特征, 表明大陆地壳可能为主要的沉积物物源, 沉积物中的弧物质可能来源于大陆岩浆弧. McLennan等<sup>[6, 29, 38]</sup>的研究表明, 形成于弧后和大陆弧背景下的沉积岩通常沿着岛弧安山岩和上地壳之间的混合线分布, 而形成于弧前背景下的沉积岩通常落在岛弧安山岩和MORB间. 星星峡群变质

泥质岩样品介于岛弧安山岩和上地壳之间(图 8)<sup>[6,29]</sup>, 表明它们沉积在大陆岛弧体系下的弧后盆地构造背景.

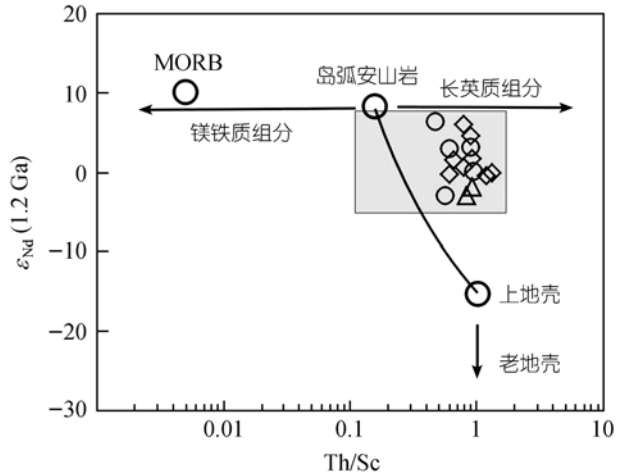


图 8  $Th/Sc-\epsilon_{Nd}$ 构造背景区分图<sup>[29]</sup>  
MORB, 岛弧安山岩和上地壳成分据文献<sup>[4]</sup>,  $\epsilon_{Nd}$ 数据据文献<sup>[26]</sup>. 样品符号见图 2

### 6 结论

中天山东段星星峡群变质泥质岩的地球化学特征表明: (1) 它们的源区物质以长英质岩石为主, 中-低化学风化程度; (2) 这些副变质岩石的原岩沉积于大陆岛弧体系下的弧后盆地构造背景.

### 参 考 文 献

- 1 Bhatia M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. *Journal of Geology*, 1983, 91: 611-627
- 2 Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986, 92: 181-193[DOI]
- 3 Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 1982, 299: 715-717[DOI]
- 4 Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell, 1985. 1-312
- 5 Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 1995, 23: 921-924[DOI]
- 6 McLennan S M, Hemming S R, Taylor S R, et al. Early Proterozoic crustal evolution: Geochemical and Nd-Pb isotopic evidence from metasedimentary rocks, southwestern North America. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59: 1153-1177[DOI]

- 7 Dickinson W R, Beard L S, Brakenridge G R, et al. Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting. *Geological Society of America Bulletin*, 1983, 94: 222~235[DOI]
- 8 Van de Kamp P C, Leake B E. Petrography and geochemistry of feldspathic and mafic sediments of the northeastern Pacific margin. *Transactions of Royal Society of Edinburgh, Earth. Science*, 1985, 76: 411~499
- 9 Fedo C M, Young G M, Nesbitt H W. Paleoclimatic control on the composition of the Paleoproterozoic Serpent Formation, Huronian Supergroup, Canada: a greenhouse to icehouse transition. *Precambrian Research*, 1997, 86: 210~223
- 10 Wronkiewicz D J, Condie K C. Geochemistry and provenance of sediments from the Pongola Supergroup, South Africa: Evidence for a 3.0-Ga-old continental craton. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53: 1537~1549[DOI]
- 11 Condie K C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales. *Chemical Geology*, 1993, 104: 1~37[DOI]
- 12 Chen B, Jahn B M. 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: 1~13[DOI]
- 13 Cox R, Lowe D R. Controls on sediment composition on a regional scale: a conceptual review. *Journal of Sedimentary Research*, 1995, A65: 1~12
- 14 Fralick P W, Kronberg B I. Geochemical discrimination of clastic sedimentary rock source. *Sedimentary Geology*, 1997, 113: 111~124[DOI]
- 15 Condie K C, Dengate J, Cullers R L. Behavior of rare earth elements in a paleoweathering profile on granodiorite in the front range, Colorado, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59: 279~294[DOI]
- 16 Nesbitt H W, Fedo C M, Young G M. Quartz and feldspar stability, steady and non-steady-state weathering and petrogenesis of siliciclastic sands and muds. *Journal of Geology*, 1997, 105: 173~191
- 17 Cullers R L. The controls on the major and trace element variation of shale, siltstones, and sandstones of Pennsylvanian-Permian age from uplifted continental blocks in Colorado to platform sediment in Kansas, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58: 4955~4972[DOI]
- 18 陈义兵, 胡霏琴, 张国新, 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: 70~77
- 19 刘树文, 郭召杰, 张志诚, 等. 中天山东段前寒武纪变质地壳的性质: 地质年代学和钕同位素地球化学的约束. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(5): 395~403[摘要][PDF]
- 20 车自成, 刘洪福, 刘良, 等. 中天山造山带的形成和演化. 北京: 地质出版社, 1994. 1~135
- 21 马瑞士, 舒良树, 孙家齐. 东天山构造演化与成矿. 北京: 地质出版社, 1997. 1~175
- 22 顾连兴, 杨浩, 陶仙聪, 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: 49~55
- 23 Hu A Q, Jahn B M, Zhang G X, et al. Crustal evolution and Phanerozoic crust growth in northern Xinjiang; Nd isotopic evidence; Part I, Isotopic characterization of basement rocks. *Tectonophysics*, 2000, 328: 15~51[DOI]
- 24 胡霏琴, 王中刚, 涂光焱, 等. 新疆北部地质演化及成岩成矿规律. 北京: 科学出版社, 1997. 1~242
- 25 修群业, 于海峰, 李铨. 卡瓦布拉克岩群花岗岩长岩单颗粒锆石 U-Pb 年龄. *新疆地质*, 2002, 20: 335~337
- 26 Li Q G, Liu S W, Han B F, et al. Nd isotopic characteristics of Proterozoic metasedimentary rocks and constraints on their provenance in the eastern segment of Central Tianshan Belt, Xinjiang. *Progress in Natural Science*, 2003, 13: 908~913
- 27 Gromet L P, Dymek R F, Haskin L A, et al. The North American Shale Composite: Its composition, major and trace element characteristics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48: 2469~2482[DOI]
- 28 Herron M M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1988, 58 (5): 820~829
- 29 McLennan S M, Taylor S R, McCulloch M T, et al. Geochemical and Nd-Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: crustal evolution and plate tectonic associations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54: 2015~2050[DOI]
- 30 McLennan S M. Weathering and global denudation. *The Journal of Geology*, 1993, 101: 295~303
- 31 Panahi A, Young G M, Rainbird R H. Behavior of major and trace elements (including REE) during Paleoproterozoic pedogenesis and diagenetic alteration of an Archean granite near Ville Marie, Québec, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2000, 64: 2199~2220[DOI]
- 32 Cox R, Lowe D R, Cullers R L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59: 2919~2940[DOI]
- 33 Nesbitt H W, Young G M. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48: 1523~1534[DOI]
- 34 Nesbitt H W, Young G M. Formation and diagenesis of weathering profiles. *Journal of Geology*, 1989, 97: 129~147
- 35 Girty G H, Ridge D L, Knaack C, et al. Provenance and depositional setting of Paleozoic chert and argillite, Sierra Nevada, California. *Journal of Sedimentary Research*. 1996, 66 (1): 107~118
- 36 McLennan S M, Hemming S. Samarium/Neodymium elemental and isotopic systematics in sedimentary rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56: 887~898[DOI]
- 37 Maynard J B, Valloni R, Yu H. Composition of modern deep-sea sands from arc-related basins. *Geological Society of London, Special Publication*. 1982, 10: 551~561
- 38 McLennan S M, Hemming S R, Taylor S R, et al. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. In: Johnsson M J, Basu A, eds. *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments*. Geological Society of America, Special Paper. 1993, 284: 21~40