

金沙江河流悬浮物的元素地球化学特征及其地质意义

刘 文^{1,2}, 徐士进¹, 陆现彩¹, 杨杰东¹, 吴卫华¹, 尹宏伟¹

1. 南京大学 地球科学系, 南京 210093; 2. 江苏地质调查研究院, 南京 210049

摘 要: 系统测定了金沙江和岷江 16 个采样点的河流悬浮物的稀土元素和微量元素含量。结果表明, 金沙江悬浮物的稀土元素地球化学特征与世界其他河流基本相同, 而 $(LREE/HREE)_N$ 值较低, 其主河道悬浮物的 $(Eu/Eu^*)_N$ 略高于北美页岩; 支流悬浮物的 $(La/Yb)_N$ 和 $(Eu/Eu^*)_N$ 差别较大, 亦与主河道有较大差别。受流域内矿化带和采矿影响, 悬浮物中 Cs、Cu、Pb、Bi、Sn、Ti、V、Cu、Cr、Co 相对富集。岷江悬浮物的地球化学特征与金沙江主河道相似。综合研究表明, 悬浮物的元素地球化学特征主要受控于流域内出露岩性, 金沙江支流、通天河(直门达)到树地桥段、攀枝花到水富段的物源有所不同, 悬浮物的地球化学特征有所差异。金沙江段是长江中下游重要物质来源, 对中下游物源及元素地球化学特征分析也有一定的借鉴价值。

关 键 词: 悬浮物; 微量元素; 稀土元素; 风化作用; 金沙江

中图分类号: P595 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2009)03-0278-08

Geochemistry Characteristic and Geological Significance of Suspended Particle Matters in Jinsha River

LIU Wen^{1,2}, XU Shi-jin¹, LU Xian-cai¹, YANG Jie-dong¹, WU Wei-hua¹, YIN Hong-wei¹

1. Department of Earth science, Nanjing University, 210093; 2. Geological Survey of Jiangsu Province, 210049

Abstract: The content of rare earth element (REE) and trace elements of 16 Suspended Particulate Matters (SPM) of Jinsha River and Min River was measured in this thesis. REE Chondrite-normalized curves of the samples are similar to the other important rivers in the world, except $(LREE/HREE)_N$ is relatively low. $(Eu/Eu^*)_N$ values of the main channel of Jinsha River are slightly higher than North America Shale. The values $(La/Yb)_N$ and $(Eu/Eu^*)_N$ are clearly different in different branches, and different from the main channel. Influenced by the mineralizing-zone and mining activities, Cs, Cu, Pb, Bi, Sn, Ti, V, Cu, Cr, Co are enriched in SPM. The geochemical characteristic of Min River are similar to the main channel of Jinsha River. The study shows that the geochemical characteristics of SPM element are mostly controlled by source rock of the area. The SPM resources of the branches, the main channel between Tongtianhe (Zhimenda) and Shudiqiao, and the main channel from Panzhihua to Shuifu are different; therefore geochemical characteristic of the samples are variance. Jinsha River is important resource of the middle and low parts of Yangzi River. This thesis is valuable for the research of the middle and low parts of Yangze River.

Key words: suspended particulate matters (SPM); trace element; rare earth element; weathering; Jingsha river

金沙江从亚寒带高原区经气候多变的横断山区, 流入温暖湿润的四川盆地, 长达 3364 km, 流域面积达 47.32 万 km^2 , 雅砻江是其最大的支流, 流域面积占 40%^[1]。金沙江流域地形变化大, 江水悬浮物浓度大, 是长江河流悬浮物的重要输入河段。流

域内出露岩性复杂多变, 以三叠系碳酸盐岩、碎屑沉积岩为主, 大部分地层已发生不同程度的变质作用; 在金沙江构造带附近火成岩较发育, 攀枝花地区元古界变质岩广泛出露。扬子地台西缘的四川盆地, 地表主要出露侏罗系-白垩系的紫红色砂岩、页岩,

收稿日期: 2009-02-11 收到, 05-11 改回

基金项目: 教育部重点科技研究项目(104089); 国家自然科学基金资助项目(40473009)

第一作者简介: 刘文(1981—), 女, 硕士, 专业方向: 岩石学、矿床学。

通讯作者: 徐士进(1952—), 教授. E-mail: xusj@nju.edu.cn.

夹有碳酸岩、膏盐层、盐岩和泥煤等。

河流悬浮物、颗粒物是流域内岩石物理、化学风化作用的混合物。许多学者进行过风化作用、物质运移规律和物源的判别分析等方面的研究。长江、黄河^[2~6]及世界上很多其他温、热带流域^[7~12]的悬浮物、沉积物元素地球化学特征已有了较为系统的研究成果。金沙江作为长江的重要河段,其河流悬浮物的对长江中下游物质组成有较大影响,而研究程度则相对较低。本文通过系统取样,研究了悬浮物微量元素组成特征,探索总结了金沙江河流悬浮物的组成、物质来源和流域内风化特征。

1 样品采集与实验方法

2005年6月自玉树沿金沙江13个点分别采取河水 and 沉积物样品。其中主河道采样点8个,5条支流各1个。此外,还采集了流域地质和环境与金沙江类似的岷江3个点的样品。为避免人为因素的影响,采样过程中尽量远离城市、乡村等人类活动频繁的地段,采样时用2.5 L的塑料桶将江水密封保存。

将水样通过0.22 μm的滤膜分离,碎屑物风干

后即为供研究用的悬浮物样品。悬浮物微量元素和稀土元素含量用南京大学内生金属矿床成矿机制国家重点实验室的ELEMENT-7型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测定。仪器的检出限Li、Sr、Ba>0.01 (ng/g)之外,其他微量元素的检出限均小于0.01(ng/g)。ICP-MS工作状态、仪器测定限及测试方法参见文献[13]。之前对该地区悬浮物和沉积物的矿物进行过分析^[14],此次是对采样点样品进行地球化学元素分析研究,具体采样地点位置编号同文献[14]中表1。

2 稀土元素地球化学特征

分析数据见表1,所有悬浮物的稀土元素总量为 $101.24 \times 10^{-6} \sim 229.01 \times 10^{-6}$,LREE/HREE最小值是巴塘河(6.885),最大为雅砻江(9.407),变异系数均大于15%。金沙江主河道悬浮物球粒陨石标准化见图1。金沙江主河道悬浮物REE含量为 $136.93 \times 10^{-6} \sim 189.74 \times 10^{-6}$,从上游到下游呈增加趋势,(La/Yb)_N算术平均值为6.18,略高于世界河流值(5.94),略低于北美页岩(6.92)。雅砻江和

表1 河流悬浮物稀土元素含量及特征参数

Table 1 REE contents and parameters of SPM

× 10⁻⁶

样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	δEu	(La/Yb) _N
2	29.35	59.35	6.22	21.57	4.50	1.02	4.55	0.73	3.81	0.80	2.22	0.76	6.38
4	30.87	60.63	6.07	25.06	4.46	1.01	4.58	0.70	3.91	0.79	2.24	0.75	6.14
6	32.79	65.38	6.85	22.15	4.99	1.11	4.85	0.81	4.61	0.97	2.72	0.76	5.81
7	32.63	65.74	6.77	24.00	4.77	1.10	4.76	0.73	4.30	0.83	2.60	0.77	6.03
8*	31.79	67.23	6.98	23.23	5.19	1.14	5.101	0.81	4.75	0.95	2.81	0.74	5.65
10	37.68	77.28	7.86	28.12	6.09	1.49	6.10	0.97	5.27	1.09	3.03	0.82	6.25
12	39.16	78.17	8.18	28.04	6.36	1.56	6.05	0.97	5.41	1.05	3.01	0.84	6.36
13	40.74	82.14	9.01	28.96	6.67	1.69	6.42	0.98	5.29	1.09	3.11	0.86	6.84
1	32.49	62.27	6.91	23.90	5.30	1.24	5.39	0.87	4.98	1.03	2.95	0.78	4.98
3	46.87	91.35	10.40	34.55	7.58	1.49	7.00	1.06	5.69	1.14	3.34	0.68	6.93
5	22.67	42.38	4.37	17.34	3.19	0.62	3.25	0.51	2.80	0.56	1.57	0.65	7.04
9	45.36	89.54	9.17	33.41	6.97	1.76	6.72	1.01	5.02	1.04	2.81	0.86	8.72
11	47.04	100.04	9.84	35.41	7.18	1.52	6.49	1.05	5.83	1.13	3.21	0.73	7.53
14	33.23	59.96	6.78	23.49	4.96	1.11	4.64	0.78	4.41	0.87	2.53	0.77	5.81
15	35.26	70.02	7.23	25.90	5.49	1.24	5.53	0.91	4.85	0.99	2.80	0.75	5.71
16	32.93	62.02	6.61	22.78	4.96	1.09	4.85	0.77	4.53	0.89	2.47	0.74	6.51
AM	35.00	72.90		32.60	5.93	1.10	4.18		2.64		1.23	0.70	15.83
Mp	43.70	92.50		39.80	7.52	1.52	5.93		5.05		2.44	0.74	9.65
UG ^[19]	34.5	70.4	8.09	30.1	6.1	0.99	5.3	0.82	5	0.95	2.71	0.57	5.81
CJ* ^[6]	44.00	88.00		43.00	6.20	1.38		1.10				0.70	
CJ ^[17]	40.4	81.5	9.5	36.5	7.01	1.55	5.86	0.87	4.82	0.95	2.67	0.74	7.67
HH ^[17]	34.3	69.6	8.2	30.8	6.06	1.22	4.95	0.76	4.26	0.86	2.34	0.73	7.1
WR ^[18]	45	95	8	35	7	1.5	5	1		1	1	0.81	5.94
NASC ^[15]	30	64	7.1	26	4.5	0.88	3.8	0.64	2.5	0.8	2.3	0.7	6.92
UCC	32	73	7.9	33	5.7	1.24	5.21	0.85	5.8	1.04	3.4	0.75	4.76
JSJ	34.38	69.49	7.24	25.14	5.38	1.23	5.30	0.84	4.67	0.946	2.72	0.79	6.18

注: JSJ、UCC、Mp、AM、CJ、HH、NASC 分别为金沙江主河道采样点平均、上地壳平均值、密西西比河、亚马逊河、长江下游、黄河下游、北美页岩

黑水河(La/Yb)_N 分别为 8.72 和 7.53, 分异程度较强。巴塘河分异程度较弱, (La/Yb)_N 值略小于 5。夕河和定曲河(La/Yb)_N 为 7 左右。

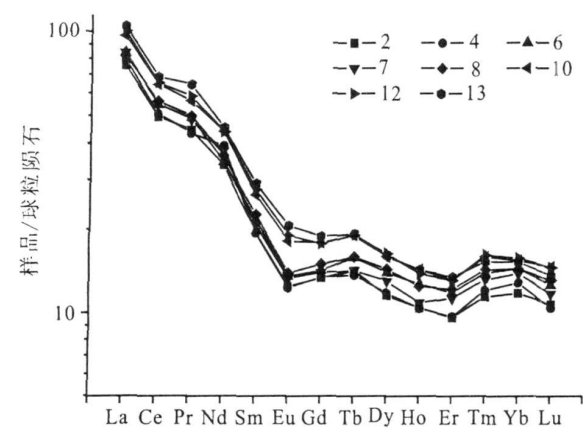


图 1 金沙江主河道悬浮物 REE 球粒陨石标准化图
Fig. 1 Chondrite-normalized curves of REE in SPM of the main channel

所有样品的球粒陨石标准化^[15]后的稀土配分曲线均呈右倾型(图 2、图 3), 轻稀土分异程度远大于重稀土, 呈不同程度的 Ce、Eu 亏损。主河道悬浮物(Ce/Ce^*)_N 为 0.81~ 0.85, 算术平均值为 0.83, 支流和岷江悬浮物(Ce/Ce^*)_N 为 0.75~ 0.87。金沙江主河道攀枝花以上河段 Eu 亏损大, (Eu/Eu^*)_N 值为 0.74~ 0.77, 攀枝花及其以下河段样品的(Eu/Eu^*)_N 均高于 0.80。支流及岷江的(Eu/Eu^*)_N 为 0.65~ 0.86, 其中夕河、定曲河的(Eu/Eu^*)_N 值分别为 0.68 和 0.65。由于巴塘河流域基性超基性岩分布较广, (La/Yb)_N 值小于上地壳; 而夕河、雅砻江流域有较大面积酸性岩出露, (La/Yb)_N 较大, 均高于上地壳。

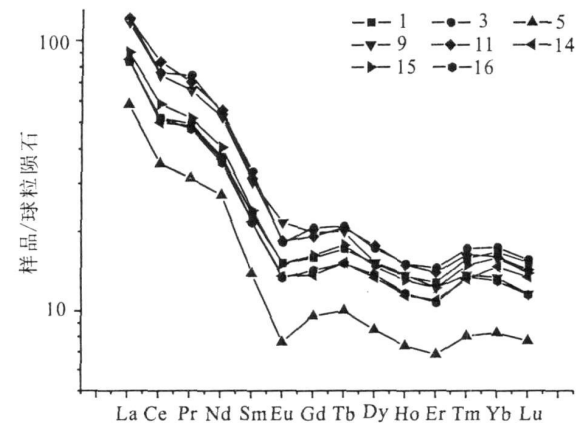


图 2 金沙江支流及岷江悬浮物 REE 球粒陨石标准化图
Fig. 2 Chondrite-normalized curves of REE of the branches and Min River

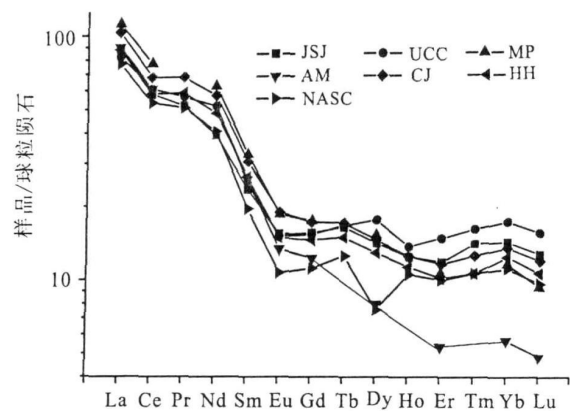


图 3 世界河流 REE 球粒陨石标准化图
Fig. 3 Chondrite-normalized curves of REE of other rivers in the world

金沙江轻稀土元素分异参数(La/Sm)_N 与北美页岩^[16]基本相同, 重稀土元素分异参数(Gd/Yb)_N 则大于北美页岩, 金沙江稀土元素分异参数(La/Yb)_N、(La/Sm)_N、(Gd/Yb)_N 均大于上地壳^[17]。(La/Sm)_N 大于, (Gd/Yb)_N 则小于世界大河长江^[18]、黄河下游^[18]、Mississippi^[19]、Amazon^[19]等。恒河上游^[20](La/Yb)_N、(Gd/Yb)_N 小于金沙江的平均值, (La/Sm)_N 大于金沙江的平均值。

3 微量元素地球化学特征

经计算, 不同采样点悬浮物的元素变异系数($C_v\%$)高于 15% (远高于元素含量测定的相对偏差 < 7%)。除 Li、Rb、Ta、Th、U、Hf、Ga、Ba、Tb、Mn、Mo 及稀土元素外, 其余元素的变异系数均高于 30%, 表明不同采样点的悬浮物微量元素含量存在明显差异。

3. 1 悬浮物微量元素标准化图

图 4、5 为上地壳标准化模式图, 横坐标中元素依据上地壳元素含量^[21]与原始地幔^[22]标准化比值递减的顺序排列。左边为最不相容性的元素 Cs, 右边为最相容元素 Ni, 因 Bi、Mo、V、Er、W、Li 等元素的原始地幔含量未知, 故置于蛛网图横坐标最右端。

金沙江主河道样品的差别较小(图 4), 而巴塘河、夕河、定曲、雅砻江、黑水河等支流间的差别相对较大(图 5)。根据图 4 和图 5, 大致可将元素分为两组: 第一组为呈负异常的元素, 包括 Rb、Ba、Ta、Nb、Zr、Hf、Sr 等; 其中, Sr、Rb、Ba 亏损不明显, 甚至个别采样点呈微弱正异常。第二组为正异常的元素, 包括 Cs、Pb、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Y、Dy、Ho、Lu、Tb、Ti、Cu、Co、Cr、Sn、Bi; 其中 Sn、Bi 富集程度最高。流经攀枝花地区后, Ti、V、Ni、Cu 含量

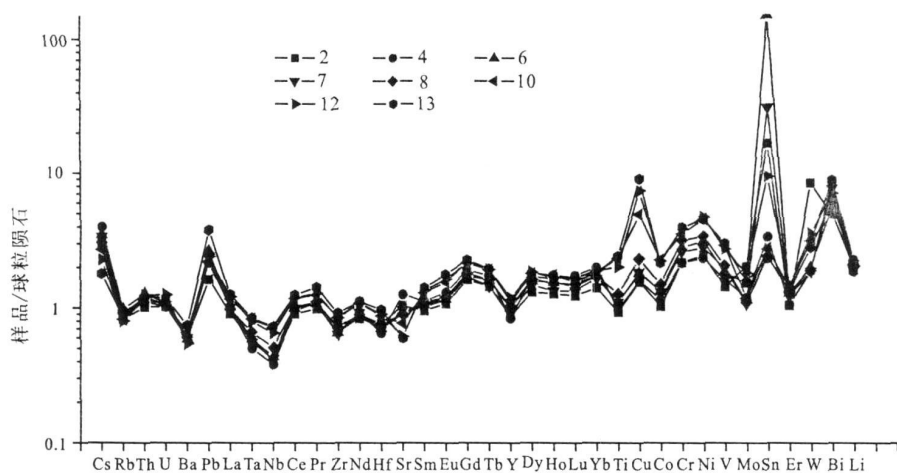


图4 金沙江主河道采样点悬浮物上地壳标准化模式图

Fig. 4 UCC normalized pattern of the trace elements in SPM of the main channel of Jinsha River

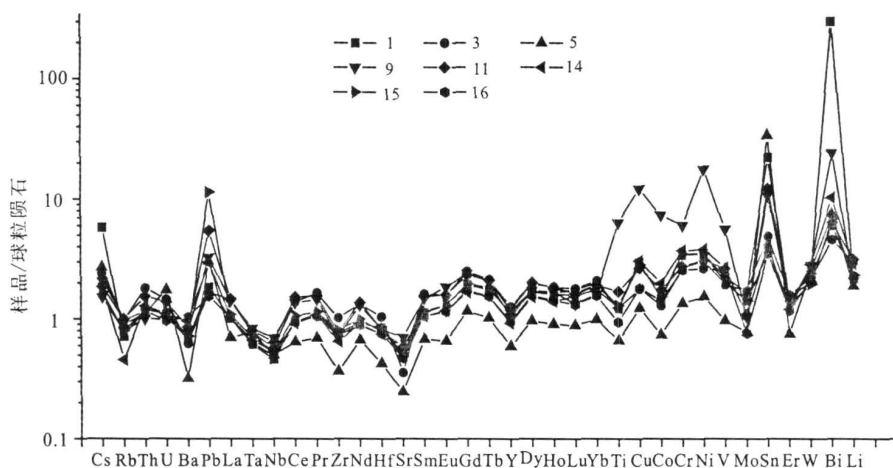


图5 金沙江支流及岷江采样点悬浮物上地壳标准化模式图

Fig. 5 UCC normalized pattern of the trace elements in SPM of the branches and Min River

显著增高。

除 Sr、Ba 等少量活泼元素外,金沙江悬浮物中元素均有一定程度的富集。金沙江流域分布有较多的多金属元素富集区^[23,24], Pb、Cu、W、Co、Cr、Ni、V、Bi、Sn 等元素的较为富集。悬浮物中 Ba、Li 亏损不明显,反映流域悬浮物化学风化程度较低。攀枝花位于雅砻江与金沙江交汇处,是重要的钒-钛-磁铁矿矿区,采矿废弃物输入造成流域内 V、Ni、Cu、Ti、Cr、As、Zn 等重金属元素的富集^[25]。

将金沙江主河道、支流悬浮物微量元素含量与源岩的含量(三江全部地层元素平均含量)^[26] 标准化,结果见图 6 和图 7。上游通天河、德格、得荣和石鼓四个点均呈 Sr 正异常,但中下游四个点为负异常。Zr 与过渡金属富集较明显。支流悬浮物 Sr 呈弱正异常到弱负异常,稀土元素有一定程度的富集,除定曲河之外 Li、Ba 略有富集;所有支流悬浮物的

Zr 含量均呈弱负异常,含量低于主河道。黑水河、大渡河悬浮物中 Pb 富集程度较高。除 Sr 之外,金沙江主河道各采样点悬浮物微量元素标准化曲线大致相同,反映了金沙江河流悬浮物元素组成一致性较好。金沙江下游攀枝花到宜宾段分布大量的侏罗系和白垩系地层,水土流失严重,地表岩石的机械剥蚀产物是攀枝花、华弹、水富悬浮物的重要来源。Sr 由上游富集到下游变为亏损,与灰岩地层减少相关;金沙江主河道悬浮物中 Zr,有一定程度的富集(图 6)。

3.2 元素因子分析

对所有元素进行因子分析,以主成分分析方法提取出 5 个主因子,它们的累计方差达 87.2%。第一因子的方差贡献率达 53.9%,表明控制悬浮物的地球化学特征的因素以第一个因子为主,其他因素为辅。第一因子代表的元素组合为 Sc、Ti、V、Cr、

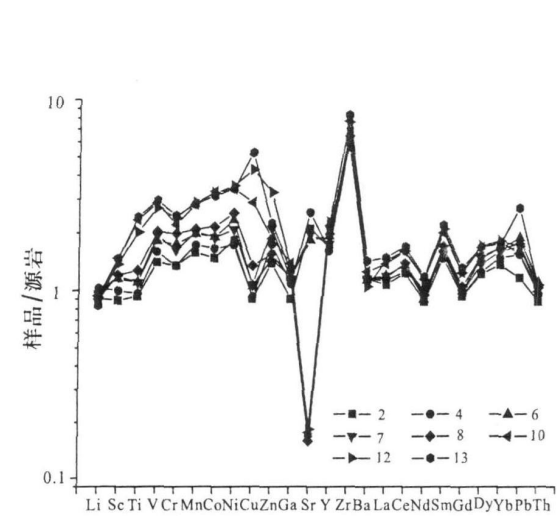


图6 金沙江主河道悬浮物微量元素与三江地区地层元素含量标准化图

Fig. 6 All-layers-normalized pattern of the trace elements of SPM in the main channel of Jinsha River

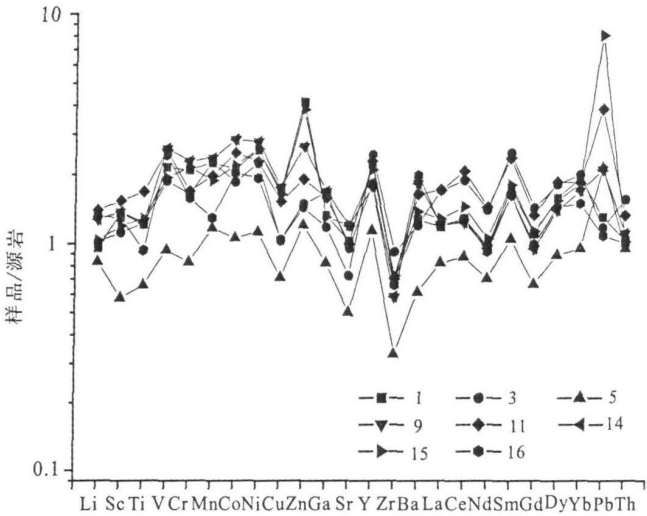


图7 金沙江支流及岷江悬浮物微量元素与三江全部地层元素平均含量标准化图

Fig. 7 All-layers-normalized pattern of the trace elements of SPM in the branches

Mn、Co、Ni、Y、Zr、Nb、REE、Hf> 70% 正载荷, Cu、Ga、Ta、Th> 50% 正载荷, Sr、Sn、Cs 为- 30% ~ - 20% 为负载荷。由于REE及Cr、V、Y、Ga、Mn、Ni、Co、Cu、Th等与粘土矿物和重矿物均有一定的相关性, 其中Sc、Ti、V、Cr、Mn、Co、Ni也与基性岩有一定关系, 与本流域基岩基本相对应。因此, 第一因子为碎屑物源, 即受以风化源岩为主多因子综合影响。

4 讨 论

4.1 物源判断

风化和混合作用的叠加给物源分析带来诸多难题, 某些特征元素含量或元素比值可反映物源信息^[27, 28], 由于REE、Th、Sc、Cr和Co的溶解性较低, 相对稳定, 是常用的物源判别特征元素^[12, 27, 28]。

在Th-Hf-Co图解(图8A)中, 雅砻江的点偏离上地壳点, 且与Hf边距离最远; 夕河与定曲河点距Hf较近。金沙江下游攀枝花、华弹、水富集中在长方形区域内, 上游样品则集中在椭圆区内。岷江乐山介于上下游之间, 都江堰、大渡河点则与金沙江中上游相似。在Th-Co-Zr/10(图8B)图解中, 几乎所有样品均比上地壳点距Th边距离大, 雅砻江点距Th边最大, 夕河、定曲河最小。下游三个点较为集中, 金沙江上游5个采样点及支流黑水河、岷江都江堰、大渡河采样点较集中。岷江乐山采样点介于两者之间。La-Th-Sc(图8C)中除夕河、定曲河、雅砻江三条支流较为分散外, 其他点较为集中。

由于元素含量与悬浮物的粒度有密切的关系, 通常用元素对比值来降低粒度的影响^[27, 28]。Th/Sc、Zr/Sc是常用的有效参数^[12, 29]。由Th/Sc-Zr/Sc图中可知(图9A), 雅砻江、通天河、夕河、定曲河较分散, 其他样品相对集中。雅砻江与上地壳比值差别较大。用Th/Sc、Zr/Sc可以反映重矿物的变化^[29], 悬浮物中重矿物含量小于上地壳。

Cr/Th-Sc/Th图解^[12, 30](图9B)用于判断物源。除雅砻江Cr/Th、Sc/Th值最高和夕河、定曲河比值低外, 其他样品基本相同。金沙江及支流悬浮物Cr/Th比值均高于上地壳。主河道Cr/Th、Sc/Th比值相对集中, 从上游到下游有增加趋势; 支流较分散, 定曲河、夕河低于源岩。攀枝花附近因受采矿活动影响, 重金属含量高, 可能造成雅砻江Cr/Th、Sc/Th偏高。

Th/U与Th图解(图9C)通常用来表示风化趋势^[12, 30]。仅有夕河、都江堰两个点比值高于上地壳, 其他点均较低, 可能是富铀矿物的富集所致, 较高的风化剥蚀速率与低Th/U原因相同^[12]。因U在该区无明显富集(图4), 推测与流域内剥蚀速率较高有关。La/Th更能反映沉积粒度效应, 而非源区特征^[27]。除定曲河La/Th为1.99外, 所有采样点的La/Th均大于源岩、上地壳及页岩的值。雅砻江点最大4.38, 很可能说明雅砻江悬浮物颗粒度最小。

4.2 悬浮物微量元素组成的主要影响因素

悬浮物的化学组成受源岩、构造作用、风化强度、河流运输、元素的表生地球化学行为及污染等因

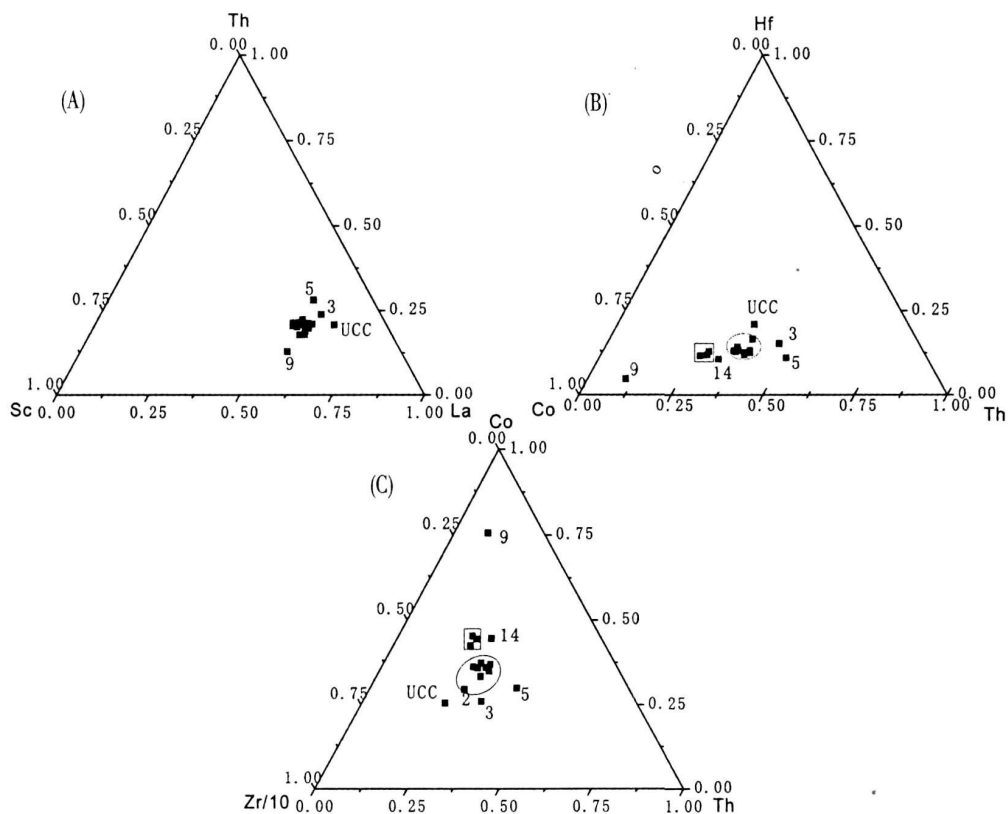
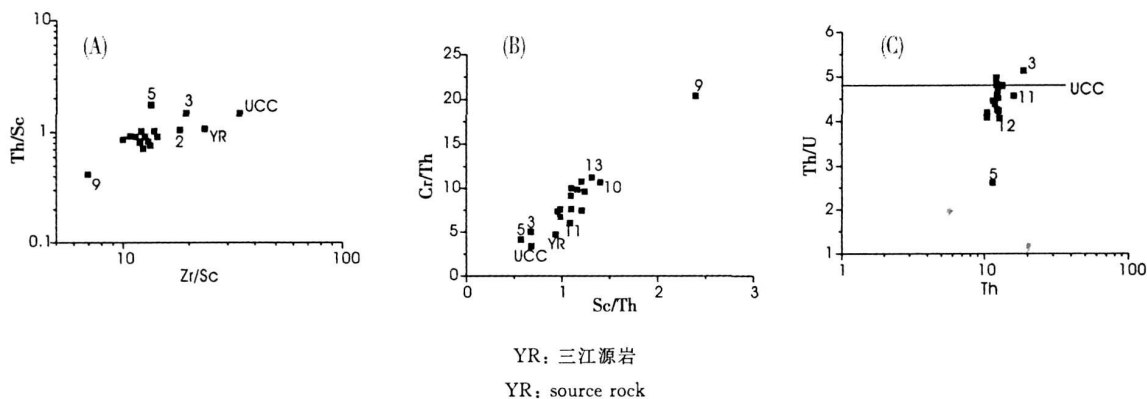


图 8 相容(Sc、Co)、不相容(Th)及受重矿物影响(Hf、Zr)元素之间的三角关系图

(A) Th-Hf-Co; (B) Th-Co-Zr/10; (C) La-Th-Sc

Fig. 8 Ternary plots of compatible(Sc, Co), incompatible (Th) and heavy mineral affected elements(Hf, Zr),

(A) Th-Hf-Co, (B) Th-Co-Zr/10, (C) La-Th-Sc



YR: 三江源岩

YR: source rock

图 9 Th/Sc-Zr/Sc(A)、Cr/Th-Sc/Th(B)、Th-Th /U(C)微量元素二维判别图

Fig. 9 plots of Th/Sc-Zr/Sc(A), Cr/Th-Sc/Th(B), Th-Th /U YR means source rock

素的控制^[31, 32, 33]。因子分析和物源分析表明, 本区的微量元素地球化学行为受流域源岩为主的多因素综合影响, 化学风化程度较差。采样期在 6 月份, 金沙江开始进入汛期, 流域山地坡陡土薄, 河流携带大量的泥沙物质^[1]。Zr 和 Hf 倾向于大颗粒沉积物中富集^[7, 18], 主河道样品 Zr 含量比支流明显富集, 很可能由金沙江地势起伏, 水流急, 携带颗粒物粒度较大所致。

金沙江和长江、黄河下游、密西西比河、亚马逊河流悬浮物的稀土元素特征曲线大致相同, 表明河流颗粒物在运输过程中均一化趋势。金沙江主河道稀土元素分异程度 $(La/Yb)_N$ 低于长江、黄河下游, 密西西比河、亚马逊河差距较大, 反映流域风化程度相对较低; 这一点与矿物研究结果一致^[14]。长江中下游武汉到上海段地势较为平坦, 气候温热, 中生代岩浆岩沿江分布^[3], 不同点悬浮物稀土元素含量差

别很小, 悬浮物稀 REE 分异程度大于金沙江^[6]。热带河流悬浮物风化程度较高, 有机质含量高^[31], 河流悬浮物稀土元素分异程度高。发源于喜马拉雅山脉南缘的河流悬浮物和金沙江一样^[11, 34], 水土流失严重, 泥沙含量高而富 REE 的胶体与有机质比例相对偏低^[18, 32], 稀土含量和分异程度均偏低。

5 结 论

(1) 金沙江主河道稀土元素球粒陨石标准化模式与密西西比、亚马逊等河流大致相同, 稀土元素分异程度略低。稀土元素含量差别不大, 主河道分异参数基本一致。悬浮物中 Cs、Cu、Pb、Bi、Sn、Ti、V、Cu、Cr、Co 等相对上地壳平均值均有不同程度的正异常; 活泼元素 Ba、Rb、Sr 等亏损不明显。

(2) 金沙江支流悬浮物中稀土元素含量及分异参数差别较大。金沙江支流过渡金属元素也有不同程度的富集, 与主河道采样点有较大差别。岷江及支流大渡河采样点与金沙江主河道较为一致。

(3) 根据微量元素地球化学特征, 可将金沙江点分为三组: 金沙江支流、金沙江上游及下游。金沙江支流元素组成特征反映径流较小, 流域内出露岩性单一; 上游从通天河到树地桥主要受横断山区源岩影响; 下游攀枝花到水富段河流悬浮物元素组成则是叠加了上游悬浮物和四川盆地边缘源岩风化剥蚀产物, 采矿活动、矿化带等对部分元素也有一定的影响。

参考文献 (References):

[1] 张荣祖, 郑度, 杨勤业, 刘燕华. 横断山区自然地理[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
Zhang Rongzu, Zheng Du, Yang Qinye, Liu Yanhua. Physical geography of Hengduan mountains [M]. Beijing: Science Press, 1997. (in Chinese)

[2] 陈静生, 洪松, 王立新, 王飞越. 中国东部河流颗粒物的地球化学性质[J]. 地理学报, 2000, 55(4): 417–427.
Chen Jingsheng, Hong Song, Wang Lixin, Wang Feiyue. Geochemical parameters of river particulate in eastern China [J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(4): 417–427. (in Chinese with English abstract)

[3] 王中波, 杨守业, 李萍, 李从先, 蔡进功. 长江水系沉积物碎屑矿物组成及其示踪意义[J]. 沉积学报, 2006, 24(14): 570–578.
Wang Zhongbo, Yang Shouye, Li Ping, Li Congxian, Cai Jingong. Detrital mineral compositions of the Changjiang River sediments and their tracing implications[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(14): 570–578. (in Chinese with English abstract)

[4] Yang S Y, Soo J H, Sik C M, Li C X. The rare earth element

compositions of the Changjiang (Yangtze) and Huanghe (Yellow) River sediments [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 201: 407–419.

[5] Yang S Y, Jungb H S, Li C X. Two unique weathering regimes in the Changjiang and Huanghe drainage basins: Geochemical evidence from river sediments[J]. Sedimentary Geology, 2004, 164: 19–34.

[6] Zhang C S, Wang L J, Zhang S, Li X X. Geochemistry of rare earth elements in the mainstream of the Yangtze River, China [J]. Applied Geochemistry, 1998, 13(4): 451–462.

[7] Dupre B, Gaillardet J, Rousseau D, Allegre C J. Major and trace elements of river-borne material the Congo Basin [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60(8): 1301–1321.

[8] Gaillardet J, Dupre B, Allegre C J. A global geochemical mass budget applied to the Congo Basin rivers: Erosion rates and continental crust composition[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(17): 3469–3485.

[9] Roy S, Gaillardet J, Allegre C J. Geochemistry of dissolved and suspended loads of the Seine river, France: Anthropogenic impact, carbonate and silicate weathering [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(9): 1277–1292.

[10] Singh P, Rajamni V. REE geochemistry of recent clastic sediments from the Kaveri floodplains, southern India: Implication to source area weathering and sedimentary processes[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, 65(18): 3093–3108.

[11] Sharma A, Rajamani V. Weathering of charnockites and sediment production in the catchment area of the cauvery river, southern india[J]. Sedimentary Geology, 2001, 143: 169–184.

[12] Vital H, Statterger K. Major and trace elements of stream sediments from the lowermost Amazon river[J]. Chemical Geology, 2000, 168: 151–168.

[13] 高剑峰, 陆建军, 赖鸣传, 林雨萍, 濮巍. 岩石样品中微量元素的高分辨率等离子质谱分析[J]. 南京大学学报(自然科学), 2003, 39(6): 844–850.
Gao Jianfeng, Lu Jianjun, Lai Mingchuan, Lin Yuping, Pu Wei. Analysis of trace elements in rock samples using HR-ICPMS[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2003, 39(6): 844–850. (in Chinese with English abstract)

[14] 刘文, 徐士进, 杨杰东, 吴卫华, 陆现彩, 尹宏伟. 金沙江河流悬浮物与沉积物矿物学特征及表生地球化学意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2007, 26(2): 164–169.
Liu Wen, Xu Shijin, Yang Jiedong, Wu Weihua, Lu Xiancai, Yin Hongwei. Mineralogical characteristic of suspended matters and sediments in the Jinsha river and their superficial geochemical significance[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2007, 26(2): 164–169. (in Chinese with English abstract)

[15] Brownlow A H. Geochemistry [M]. NJ. Prentice-Hall, 1979: 498.

- [16] Gromet L P, Dymek R F, Haskin L A. The "North American Shale Composite": Its compilation, major and trace element characteristics[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1984, 48: 2469–2482.
- [17] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution[J]. Cambridge, Mass: Blackwell, Oxford, 1985, 312: 29–45.
- [18] Gaillardet J, Dupre B, Allegrea C J. Geochemistry of large river suspended sediments: Silicate weathering or recycling tracer? [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(23/24): 4037–4051.
- [19] Goldstein S J, Jacobson S B. Rare earth elements in river waters[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1988, 89: 35–47.
- [20] Chakrapani G J. Major and trace element geochemistry in upper Ganga river in the Himalayas, India[J]. *Environ Geol.*, 2005, 48: 189–201.
- [21] Wedepohl K H. The composition of the continental crust[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(7): 1217–1232.
- [22] Hofmann A W. Chemical differentiation of the earth: the relationship between mantle, continental crust and oceanic crust[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1988, 90: 297–314.
- [23] 骆耀南, 俞如龙. 西南三江地区造山演化过程及成矿时空分布[J]. *地球学报*, 2002, 23(5): 417–422.
Luo Yaonan, Yu Rulong. Orogenic evolution and metallogenic time-space distribution in Jinshajiang-Lancangjiang-Nujiang region, southwest China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2002, 23(5): 417–422. (in Chinese with English abstract)
- [24] 沈上越, 魏启荣, 莫宣学, 喻学惠, 曾普胜, 胡长寿. 三江地区中段岩石地球化学分区研究[J]. *矿物岩石*, 2003, 6: 37–43.
Shen Shangyue, Wei Qirong, Mo Xuanxue, Yu Xuehui, Zeng Pusheng, Hu Changshou. Study on rock geochemical division in the middle part of Jinshajiang river-Lancangjiang river-Nujiang river area in China[J]. *J. Mineral Petrol.*, 2003, 6: 37–43. (in Chinese with English abstract)
- [25] 滕彦国, 倪师军, 虞先国, 张成江, 徐争启. 攀枝花地区河流沉积物的重金属污染研究[J]. *长江流域环境与资源*, 2003, 12(6): 569–573.
Teng Yanguo, Ni Shijun, Tuo Xianguo, Zhang Chengjiang, Xu Zhengqi. Heavy metal pollution of stream sediment in Panzhihua Area[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2003, 12(6): 569–573. (in Chinese with English abstract)
- [26] 叶庆同, 胡云中, 杨岳清. 三江地区区域地球化学背景和金银铅锌成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1992.
Ye Qingtong, Hu Yunzhong, Yang Yueqing. Regional geochemical background and gold, silver and lead-zinc mineralization in Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang Area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992. (in Chinese)
- [27] McLennan S M, Nance W B, Taylor S R. Rare earth element-thorium correlation in sedimentary rocks, and the composition of the continental crust[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1980, 44: 1833–1839.
- [28] Rollinson H R. Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation[M]. Longman, 1993: 352.
- [29] McLennan S M, Hemming S, McDaniell D K, Hanson, G N. Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics[A]. Johnsson M J, Basu A. Processes controlling the composition of clastic sediments[M]. Geological Society of America, Boulder, 1993: 284.
- [30] Condie K C, Wronkiewicz D J. The Cr/Th ratio in precambrian pelites from the Kaapvaal Craton as an index of craton evolution[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1990, 97: 256–267.
- [31] 陈衍景, 邓健, 胡桂兴. 环境对沉积物微量元素含量和配分型式的制约[J]. *地质地球化学*, 1996, 3: 97–105.
Chen Yanjing, Deng Jian, Hu Guixing. Environmental constraints on the abundance and distribution of trace elements in sediments[J]. *Geology Geochemistry*, 1996, 3: 97–105. (in Chinese with English abstract)
- [32] 王中良, 刘丛强, 徐志方, 韩贵琳, 朱建明, 张劲. 河流稀土元素地球化学研究进展. *地球科学进展*, 2000, 15(5): 553–558.
Wang Zhongliang, Liu Congqiang, Xu Zhifang, Han Guilin, Zhu Jianming, Zhangjin. Advances in research on geochemistry of rare earth elements in rivers[J]. *Advance in Earth Science*, 2000, 15(5): 553–558. (in Chinese with English abstract)
- [33] Taylor S R, McLennan S M, Maynard J B. Geochemical and Nd-Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: Crustal evolution and plate tectonic associations[J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 1990, 54: 2014–2050.
- [34] Ahmad T, Khanna P P, Chakrapani G J, Balakrishnan S. Geochemical characteristics of water and sediment of the Indus river, Trans-Himalaya, India: Constraints on weathering and erosion[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 1998, 16(2–3): 333–346.