

文章编号: 1009-3850(2010)03-0018-06

# 青藏高原东部金沙江流域盆地陆地风化特征

秦建华, 杜谷, 冉敬

(成都地质矿产研究所, 四川 成都 610081)

**摘要:** 青藏高原东部金沙江流域是研究高原隆升与陆地风化的理想地区。本文通过对金沙江河流系统的取样, 从河流溶质载荷主要离子和悬浮载荷粘土矿物等方面揭示青藏高原东部金沙江流域盆地陆地风化特征。研究表明, 金沙江流域盆地陆地岩石风化主要是碳酸盐岩、蒸发盐岩和硅酸盐岩。利用  $\text{Si} / \text{Si} + \text{TZ}^{+*}$ 、 $\text{Si} / \text{Na}^{+} + \text{K}$  和  $\text{Si} / \text{K}$  以及  $(\text{Na}^{+} + \text{K}) / \text{TZ}^{+}$  等 5 个指标结合流域区域岩石分布和土壤特征揭示出流域硅酸盐岩为浅表性初级风化, 风化产物主要是富含阳离子的次生粘土矿物。

**关键词:** 金沙江; 流域盆地; 陆地风化; 青藏高原

**中图分类号:** P512.1      **文献标识码:** A

金沙江流经青藏高原东部横断山脉, 流域盆地中陆地风化受到青藏高原隆升影响, 是研究青藏高原隆升与陆地风化的理想地区。Wu 等<sup>[1]</sup>对金沙江硅酸盐岩风化和  $\text{CO}_2$  消耗进行过取样分析研究。

本文通过对金沙江河流系统的取样从河流溶质载荷主要离子和悬浮载荷粘土矿物特征等方面来揭示青藏高原东部金沙江(含长江河源区, 下同)流域盆地陆地风化特征。

## 1 样品采取

共采取河流溶质载荷样品 13 件, 悬浮载荷样品 8 件(样品分布见图 1, 悬浮载荷样品编号与溶质载荷相同)。样品尽量在河口处采取。野外采取的水样通常需在 24 小时之内进行过滤处理, 以备后期的室内分析测试, 其具体过滤方式为: 用  $0.45 \mu\text{m}$  的滤纸进行抽滤, 将水样分别过滤两份: 一份体积为  $250 \text{mL}$ , 贮备在聚乙烯瓶中, 以备分析  $\text{Ca}$ 、 $\text{Mg}$ 、 $\text{K}$ 、 $\text{Na}$ 、 $\text{Sr}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、碱度等项目; 另一份为  $10 \text{mL}$ , 贮备在聚乙烯瓶中, 加入  $1 \text{mL}$  的  $1:1 \text{HCl}$  用于测  $\text{Si}$ 。

## 2 溶质载荷主要离子地球化学特征与陆地风化

### 2.1 溶质载荷主要离子总体特征

#### 1. NICB 指数特征

金沙江溶质载荷样品主要离子分析数据见表 1。在溶质载荷中, 主要元素总溶解阳离子与总溶解阴离子之间的电离平衡可用参数 NICB (normalized inorganic charge balance) 来反映。NICB 代表了河水中标准化的非有机质电离平衡:

$$\text{NICB} = [\text{TZ}^- - \text{TZ}^+] / \text{TZ}^+$$

$$\text{其中: } \text{TZ}^+ = \text{Na}^+ + \text{K}^+ + 2\text{Mg}^{2+} + 2\text{Ca}^{2+};$$

$$\text{TZ}^- = \text{Cl}^- + \text{HCO}_3^- + 2\text{SO}_4^{2-}$$

NICB 在  $0.05 \sim 0.05$  之间, 表示河水中主要元素离子间电离是平衡的, 来自其它未测定离子的影响不明显; 反之, 说明河水中存在着尚未测定的离子(如未分析的有机酸阴离子等), 对河水中阴阳离子的电离平衡具有影响。

金沙江溶质载荷 NICB 指数特征见表 2 和图 2

在金沙江(含长江河源区, 下同)所分析的 13 件样品中: 主要离子电离平衡指数 NICB (表 2 和图 2) 在  $\pm 0.05$  范围内的有 3 件, 占样品总数 23%; 河水中 NICB 最小值为  $-0.58$  (C239 河源区样品)。从表 2 和图 2 可以看出, 多数样品 (8 件)  $\text{NICB} < -0.05$ , 仅有 2 件样品  $\text{NICB} > 0.05$ , 占样品总数 15%。



图 1 青藏高原东部金沙江溶质载荷取样分布图

Fig 1 Sampling sites of the dissolved loads from the Jinsha River in the eastern part of the Qinghai-Xizang Plateau

表 1 金沙江溶质载荷主要离子分析结果

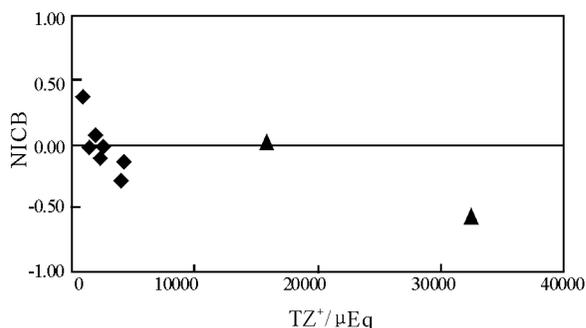
Table 1 Analytical data of the dissolved loads samples from the Jinsha River

样品编号	取样时间	水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH	导电率 ( $\mu\text{S}$ )	K ( $\mu\text{M}$ )	Na ( $\mu\text{M}$ )	Ca ( $\mu\text{M}$ )	Mg ( $\mu\text{M}$ )	Cl ( $\mu\text{M}$ )	$\text{SO}_4$ ( $\mu\text{M}$ )	$\text{HCO}_3$ ( $\mu\text{M}$ )	Si ( $\mu\text{M}$ )	Sr ( $\mu\text{M}$ )
CJ213	2000 5	12.4	7.85	45.9	7.0	33.9	337	34	2	51	392	85	0.3
CJ214	2000 5	14.1	7.52	205	12.7	79.7	724	335	8	308	1539	85	1.7
CJ215	2000 5	17.3	7.61	434	30.4	1063.3	932	530	1704	477	2147	85	4.4
CJ236*	2000 6	15.2	7.84	445	14.8	588.3	1374	509	276	891	2143	152	5.2
CJ237*	2000 6	15.7	7.94	479	24.8	1083.0	1064	379	1165	617	2111	144	4.9
CJ238*	2000 6	19.1	8.12	1649	184.7	4697.6	4425	1042	9813	1249	2471	193	12.8
CJ239*	2000 6	13.5	8.22	2870	315.3	19968.1	2791	3350	40389	4008	2242	119	28.8
CJ230	2002 5 23	14.2	8.78	127.2	11.7	132.0	510	264	14	17	1539	77	0.8
CJ231	2002 5 24	7.7	8.69	153.6	7.6	40.3	635	363	4	51	1819	68	1.5
CJ232	2002 5 25	14.8	8.67	160.8	8.3	58.1	758	270	12	69	1885	68	1.7
CJ233	2002 5 25	16.3	8.52	435	29.7	1170.4	1005	614	1791	377	2212	77	4.5
CJ234	2002 5 25	17.9	8.63	401	26.1	1093.6	1023	580	1659	274	2212	77	4.2
CJ235	2002 5 26	19.5	8.76	387	25.9	1014.2	972	577	1571	274	2278	87	4.0

表 2 金沙江溶质载荷主要离子 N/CB 指数特征

Table 2 N/CB indexes of the major ions in the dissolved loads samples from the Jinsha River

样品编号	TZ <sup>+</sup> (μEq)	TZ <sup>-</sup> (μEq)	N/CB
Cb213	782	497	0.37
Cb214	2211	2164	0.02
Cb215	4018	4804	-0.20
Cb236*	4368	4202	0.04
Cb237*	3993	4510	-0.13
Cb238*	15817	14783	0.07
Cb239*	32565	50647	-0.56
Cb230	1692	1587	0.06
Cb231	2044	1926	0.06
Cb232	2122	2034	0.04
Cb233	4439	4757	-0.07
Cb234	4326	4419	-0.02
Cb235	4138	4397	-0.06
Cb203	2622	2443	0.07
Cb204	1801	1784	0.01
Cb205	3702	3515	0.05
Cb206	3767	3777	0.00
Cb207	2965	3202	-0.08
Cb208	3847	3858	0.00
Cb209	4118	4072	0.01
Cb210	2633	2565	0.03

图 2 金沙江溶质载荷主要离子 N/CB-TZ<sup>+</sup> 关系

(图中▲代表河源区样品,下同)

Fig 2 Relationship between N/CB and TZ<sup>+</sup> indexes of the major ions in the dissolved loads samples from the Jinsha River. The solid triangle▲ represents the samples from the Changjiang source area.

在河源区 4 件样品中,除 1 件样品 N/CB 为 0.03 位于测试精度范围内,其余 3 件样品均 < -0.05,说明河水中尚有未测定的对主要离子电离平衡有影响的阳离子存在。

## 2 TZ<sup>+</sup> 指数特征

河水中主要阳离子参数 TZ<sup>+</sup>,从表 2 和图 2 中

可以看出,多数样品 < 5000 μEq,其中:< 1000 μEq 有 1 件样品,占样品总数 8%; 1 件样品介于 1000 ~ 2000 μEq,占 8%; 介于 2000 ~ 3000 μEq 有 3 件样品,占 23%; 介于 3000 ~ 5000 μEq 有 6 件,占样品总数 46%。此外,有 2 件样品(均为河源区) TZ<sup>+</sup> > 10000 μEq,分别为 15817 μEq 和 32565 μEq。

## 3 主要离子分布特征

在阴离子 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-SiCl<sup>-</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 三角图上(图 3 a),多数样品落在 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> > SiCl<sup>-</sup> + SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 范围之内,在阳离子 CaMg(Ca+K)三角图(图 3 b)上,显示出向 Ca 和 (Na+K)集中的趋势。说明流域盆地中碳酸盐岩和蒸发盐岩风化对河水主要离子的影响是比较明显的。特别需要指出的是,取自长江河源区的 3 件样品(Cb237 尕尔曲,通天河桥下; Cb238 沱沱河; Cb239 楚玛尔河),明显的向 Ca+SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 Na+K 两个端点方向集中,尤其是沱沱河和楚玛尔河的样品受地表蒸发盐岩风化影响就更为明显。

## 2.2 流域盆地地表岩石风化

### 1. 碳酸盐和蒸发盐岩石的风化

从图 3 中可以看到,河水中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Ca+Na+K 和 Ca+SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 为金沙江河水中最主要的离子成分,显示出碳酸盐岩或含 Ca 硅酸盐岩与蒸发盐岩的混合风化特征。从地表土壤和岩性分布来看,金沙江流域河谷大量发育了富含碳酸盐岩的土壤(褐土和亚高山岭钙土),流域盆地中也有蒸发盐的分布,特别是长江源区,构造上位于羌塘前陆拗陷。地表出露大量的中生代碳酸盐和蒸发盐岩石(主要是石膏),并发育了钙积作用明显的高山寒钙土。另外,在金沙江楚雄和贡觉地区,地表也出露有大片的第三系陆相蒸发盐(为石盐和石膏)。

蒸发盐石膏对河水主要离子的影响,可从 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Ca 图上看出(图 4 a)。

河水中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 主要有两种来源:一是黄铁矿的风化,其特征是在阴离子三角图上投点位于中间地带(Youngsook 1998);二是蒸发盐石膏的风化溶解。从图 3 a 不难看出河水中的 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 主要是来源于石膏溶解。在图 4 a 中,过量的 Ca 来自于碳酸盐和含 Ca 硅酸盐的风化。

值得注意的是,金沙江流域 Na-C 分布(图 4 b)显示出与其它造山带河流(如恒河源头<sup>[3]</sup>;西伯利亚 Lena 河<sup>[2]</sup>)不同的特征,表现在 Cl<sup>-</sup> > Na<sup>+</sup>。据李炳元等<sup>[4]</sup>研究,可可西里长江源区的地下水表现为 Cl<sup>-</sup> > Na<sup>+</sup> 而其冰水中的 Cl<sup>-</sup> 和 Na<sup>+</sup> 含量极低。因此,金沙江河水中多余的 Cl<sup>-</sup> 可能主要与上游地下水补

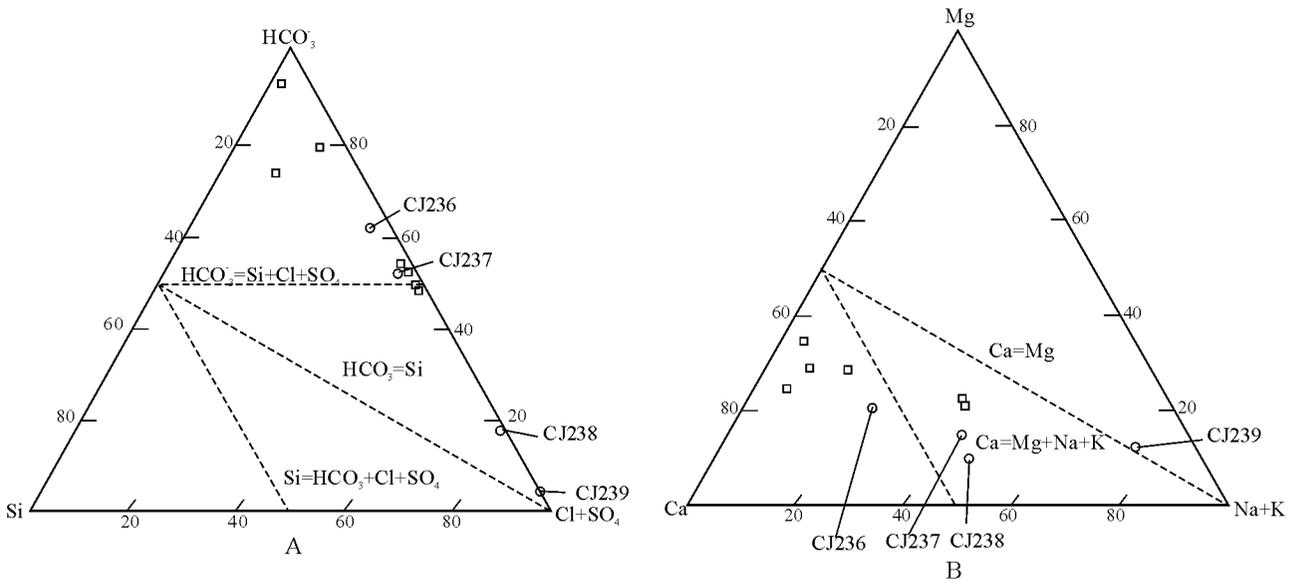


图 3 金沙江河流溶质载荷主要阴离子 (a) 和阳离子 (b) 三角图解

○ 河源区样品 □ 金沙江样品

Fig 3 Triangular diagrams showing the distribution of major anions (a) and cations (b) in the dissolved loads from the Jinsha River

○ Sample from the Changjiang source area □ Sample from the Jinsha River

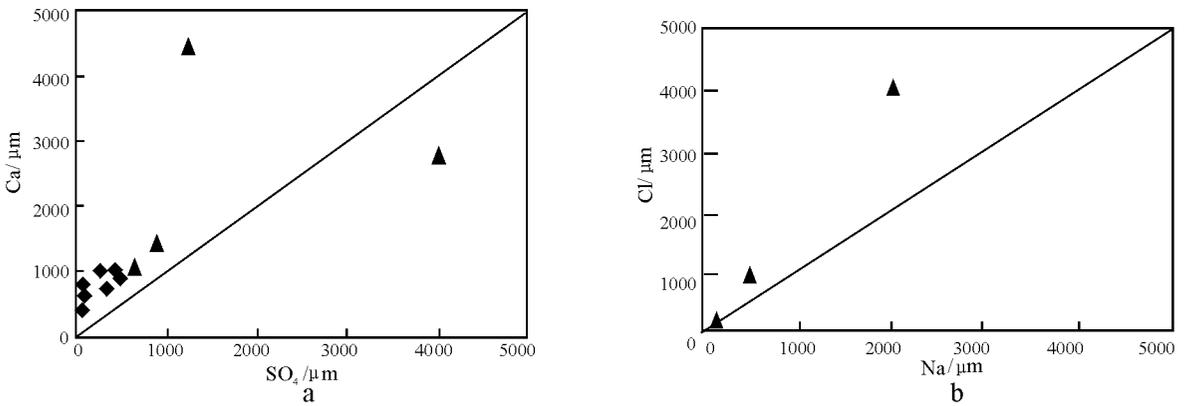


图 4 金沙江(含河源区,下同) Ca/SO<sub>4</sub> (a) 和 Cl/Na (b) 特征

Fig 4 Illustrations of Ca vs SO<sub>4</sub> (a) and Cl vs Na (b) from the Jinsha River (including Changjiang source area)

给有关。

### 2 流域盆地硅酸盐岩石的风化

河流中的 S 主要来源于地表硅酸盐岩的风化。在金沙江流域陆源碎屑岩分布较多, 河水中 S 浓度大多 < 100 μM 平均为 78.8 μM (不含河源区), 但在长江河源区河水 S 浓度显示出异常特征, 均 > 100 μM 平均为 152 μM (表 1), 最高达 193 μM 几乎可与地盾河流相比较<sup>[2]</sup>。但二者的地质背景和岩性分布迥然不同, 前者主要是中深变质岩和火成岩, 后者(长江源区)主要是陆屑岩和碳酸盐岩, 长江源区河水 S 异常可能主要与其地下水的补给有关。值得指出的是, 虽然长江源区河水 S 含量绝对值较高, 但在阴离子 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> - Si - Cl + SO<sub>4</sub> 三角图中(图

3 a), 河源区河水中 S 的相对含量还是比较低的。

Si/TZ\* 可作为流域盆地硅酸盐岩风化强度的一个指标<sup>[5]</sup>。河水 Si/TZ\* 投点均落在大大低于碎屑岩页岩风化到高岭石阶段的 0.25 (图 5 a)。其中, 最高值为 0.13 (样品 C213), 该样品流经花岗岩, 其余样品均小于 0.1, 主要介于 ±0.05 说明金沙江流域地表硅酸盐岩的风化尚处于初级风化阶段, 为浅表性风化 (superficial)。形成的风化产物还是富含阳离子的次生粘土矿物, 从流域土壤粘土矿物和河流悬浮物粘土矿物测定结果分析, 所形成的次生粘土矿物应主要是水云母。

鉴于 Si/TZ\* 指标的局限性, 需要利用 Si/(Na<sup>+</sup> + K) (Na<sup>+</sup> = Na + K) 指标来进一步揭示流域盆

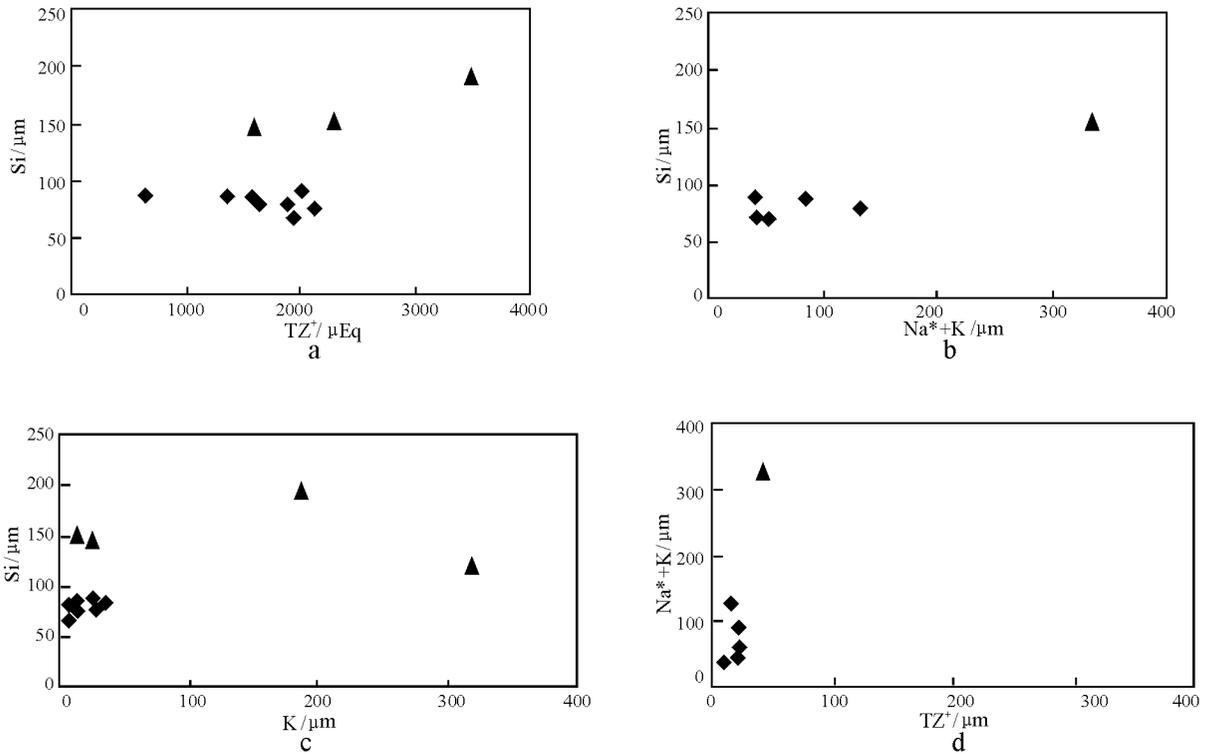


图 5 金沙江溶质载荷  $Si/TZ^{+}$  (a),  $Si/(Na^{+}+K)$  (b),  $Si/K$  (c),  $(Na^{+}+K)/TZ^{+}$  (d) 特征

Fig 5 Illustrations of  $Si$  vs  $TZ^{+}$  (a),  $Si$  vs  $(Na^{+}+K)$  (b),  $Si$  vs  $K$  (c) and  $(Na^{+}+K)$  vs  $TZ^{+}$  (d) for the dissolved loads from the Jinsha River

地硅酸盐岩的风化。

在图 5 b 中,金沙江(除河源区外)河水  $Si/(Na^{+}+K)$  主要介于 0.59~1.54 之间,个别可达 2.17(样品 C213)。其余样品  $Si/(Na^{+}+K) < 1.7$ , 说明硅酸盐岩石总体尚处于初步风化阶段,主要处于形成水云母,部分可能已达蒙脱石形成阶段,少量可能已达到高岭石形成阶段。

河水  $Si/K$  比是另一个反映铝硅酸盐风化的指标。从图 5 中可以看到,金沙江(不含河源区)地表硅酸盐岩的风化还是初步浅表性的 (superficial weathering)。

据研究<sup>[3][6]</sup>,可用  $(Na^{+}+K)/TZ^{+}$  ( $Na^{+}=Na+C$ ) 指标来反映地表硅酸盐岩风化对河水中阳离子 ( $TZ^{+}$ ) 总量的贡献。对于有地下水供应的河水,该指标就代表了来自于地表硅酸盐岩风化对河水阳离子贡献的上限。金沙江  $(Na^{+}+K)/TZ^{+}$  介于 0.02~0.08 之间,平均为 0.05(图 5 d), 低于恒河(平均为 0.1~0.2)<sup>[3]</sup>, 说明由硅酸盐风化降解对河水中阳离子的贡献并不明显,河水中主要离子应主要是由地表碳酸盐(含蒸发岩)风化贡献的。

### 3 河流悬浮载荷粘土矿物特征与陆地风化

表 3 是金沙江流域悬浮载荷粘土矿物出现的种类和相对丰度。河流悬浮物中鉴定出的主要粘土矿物有绿泥石、绢云母和伊利石及蒙脱石等,其中绢云母和伊利石为主要成分,相对丰度占 50%~92%。在长江源区的四个样品中,未出现蒙脱石而是绢云母和伊利石为主要成分,占 60%~92%。这与恒河源区悬浮沉积物中的粘土矿物特征具有相似性<sup>[3]</sup>。悬浮沉积物中伊利石粘土矿物的大量出现,说明流域盆地地表硅酸盐岩石的风化主要与酸性岩石有关,风化程度总体上还处于比较浅的阶段,这与上述从河流溶质载荷主要离子特征的分析结论相一致。

## 4 结论

金沙江流域盆地陆地岩石风化主要是碳酸盐岩、蒸发盐岩和硅酸盐岩的风化。碳酸盐岩和蒸发盐岩风化对河流溶质载荷主要离子的影响较为明显。长江河源区沱沱河和楚玛尔河溶质载荷主要离子明显受蒸发盐岩风化影响。流域硅酸盐岩的风化尚处于初级风化阶段,为浅表性风化,形成的风化产物主要是富含阳离子的次生粘土矿物。风化形成的次生粘土矿物主要是水云母,少量为蒙脱石和高岭石。

表3 金沙江河流悬浮载荷粘土矿物特征

Table 3 Types and contents of the clay minerals in the suspended loads from the Jinsha River

粘土矿物类型和相对含量/%	绿泥石	绢云母和伊利石	蒙脱石	
样品编号	C <sub>h</sub> 215	31	69	
	C <sub>h</sub> 233	37	50	13
	C <sub>h</sub> 234	40	53	7
	C <sub>h</sub> 235	40	53	7
	C <sub>h</sub> 36*	40	60	
	C <sub>h</sub> 37*	16	84	
	C <sub>h</sub> 38*	25	75	
	C <sub>h</sub> 39*	8	92	

长江源区

样品由西南科技大学城建学院中心实验室测定

## 参考文献:

- Ganga-Brahmaputra river system: weathering processes and fluxes to the Bay of Bengal [ J ]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 1989, 53: 997—1009
- [ 1 ] WU WEIHUA, XU SHIJIN, YANG JIEDONG, YIN HONGWEI. Silicate weathering and CO<sub>2</sub> consumption deduced from the seven Chinese rivers originating in the Qinghai-Tibetan Plateau [ J ]. *Chemical Geology* 2008, 249: 307—320.
- [ 2 ] HUH Y, PANTELEYEV G et al. The fluvial geochemistry of the rivers of Eastern Siberia II. Tributaries of the Lena, Olenok, Yana, Indigirka, Kolyma and Anadyr draining the collisional/accretionary zone of the Verkhoyansk and Chersky ranges [ J ]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 1998, 62: 2053—2075
- [ 3 ] SARIN M M, KRISHNASWAMI S et al. Major ion chemistry of the
- [ 4 ] 李炳元. 青海可可西里地区自然环境 [ M ]. 北京: 科学出版社, 1996
- [ 5 ] EDMOND J M et al. Chemical weathering yields from basement and orogenic terrains in hot and cold climate [ A ]. *Ruddiman W F Tectonic Uplift and Climate Change* [ C ]. New York: Plenum Press, 1997: 329—351
- [ 6 ] STALLARD R F, EDMOND J M. Geochemistry of the Amazon 2: The influence of geology and weathering environment on the dissolved load [ J ]. *Journal Geophysical Research* 1983, 88: 9671—9688

## Continental weathering features in the Jinsha River drainage basin in the eastern part of the Qinghai-Xizang Plateau

QIN Jianhua, DU Gu, RAN Jing

( Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, Sichuan, China)

**Abstract:** The Jinsha River drainage basin in the eastern part of the Qinghai-Xizang Plateau is interpreted as an ideal area for the study of the relationship between the Plateau uplift and continental weathering. The emphasis in the present paper is placed on the continental weathering features in the Jinsha River drainage basin based on the major ions in the dissolved loads and clay minerals as suspended loads. The results of research in this study show that the weathered rocks are significantly composed of carbonate rocks, evaporites and silicate rocks in the Jinsha River drainage basin. Five indexes such as  $Si/Si+TZ^+$ ,  $Si/(Na^+ + K)$ ,  $Si/K$  and  $(Na^+ + K)/TZ^+$  for the dissolved loads, in combination with rock distribution and soil features, have disclosed that the weathering of the silicate rocks is generally in the superficial weathering stage, with the secondary cations-rich clay minerals as the weathering products.

**Key words:** Jinsha River; drainage basin; continental weathering; Qinghai-Xizang Plateau