

金沙江河流悬浮物与沉积物的 矿物学特征及其表生地球化学意义

刘 文, 徐士进, 杨杰东, 吴卫华, 陆现彩, 尹宏伟

南京大学 地球科学系, 南京 210093

摘 要: 为研究金沙江流域表生风化特征, 系统采集了金沙江和岷江流域 32 件河流悬浮物和河床砂样品, 对其进行了矿物组成分析。结果表明, 不同江段河流悬浮物、沉积物的矿物组成大致相同, 以石英、方解石、斜长石和粘土矿物为主, 局部有白云石、钾长石和角闪石等; 粘土矿物主要有伊利石、绿泥石、高岭石和蒙脱石。河床沉积物中非粘土矿物碎屑(岩屑)含量明显高于悬浮物。伊利石为铁镁质, Kubler 指数在轻微变质范围内, 主要来源于三叠系碎屑岩和砂板岩。金沙江、岷江的河流悬浮物矿物组成与流域内出露的碎屑岩、砂板岩、火成岩、碳酸盐岩等的分布有较好的对应关系。河流悬浮物和沉积物的矿物组成及伊利石结晶指数特征表明流域内以物理风化为主。

关 键 词: 金沙江; 悬浮物; 河床沉积物; 矿物组成; 风化作用

中图分类号: P594⁺. 2 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2007) 02-0164-06

Mineralogical Characteristics of Suspended Matters and Sediments in the Jinshajiang River and Their Superficial Geochemical Significance

LIU Wen, XU Shi-jin, YANG Jie-dong, WU Wei-hua, LU Xian-cai, YIN Hong-wei

The Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract: In order to investigate the superficial weathering characteristics of the Jinshajiang River, 32 samples of the suspended matters and sediments, which were collected from 13 places along the main drainage of the Jinshajiang River and 3 places along the drainage of the Minjiang River, have been analyzed by using X ray diffraction. The analytical results indicate that the mineral components of the suspended matters and sediments from different parts or branches of the rivers are approximately identical. They include clay minerals of ferromagnesian illite, chlorite, kaolinite, montmorillonite and non-clay minerals of quartz, albite, and calcite, with dolomite, K-feldspar and hornblende locally. The contents of non-clay mineral fragments of the sediments in the river bed is obviously higher than that of the suspended matters in the river. The Kubler indexes of ferromagnesian illite in the suspended matters and sediments indicate that illite was mainly originated from low-grade metamorphosed Triassic clastic rocks, sandstone and slates. There is good correlation between the mineral components of the suspended matters and sediments and the distribution of clastic rocks, sandstone and slates, igneous rocks and carbonates. The mineral components of the suspended matters and sediments and the Kubler indexes of ferromagnesian illite indicate that the superficial physical weathering is the major type of weathering in the drainage area of the Jinshajiang River.

Key words: suspended matter; sediment; mineralogy; weathering; Jinshajiang River

金沙江从亚寒带高原区流经气候多变的横断山区, 注入温暖湿润的四川盆地, 全长 3364 km, 流域面积达 $47.32 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[1]。流域内构造复杂、岩性多样(图 1)。横断山区污染较轻, 但所流经的攀枝花矿床是钒钛磁铁矿和稀土矿开采基地, 污染较重,

四川盆地也有一定程度的污染^[2]。

河流悬浮物和沉积物是流域内地表风化产物的混合物, 既能反映源区岩石的风化特征, 又能体现迁移过程中的均一化趋势, 是认识表生地质过程的重要研究对象^[3]。世界上许多重要河流^[4-9]以及长江

收稿日期: 2006-09-28 收到, 2006-10-29 改回

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

第一作者简介: 刘文(1981—), 女, 硕士研究生, 专业方向: 矿物学岩石学矿床学。

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

中下游^[10~15]的悬浮物和沉积物已得到较为深入的研究。金沙江处于造山带,江水悬浮物浓度大,是长江中下游河水悬浮物的重要输入河段^[4,10],但有关研究却鲜有报道。本文通过系统取样,对不同江段悬浮物、沉积物的矿物学特征进行了初步分析。

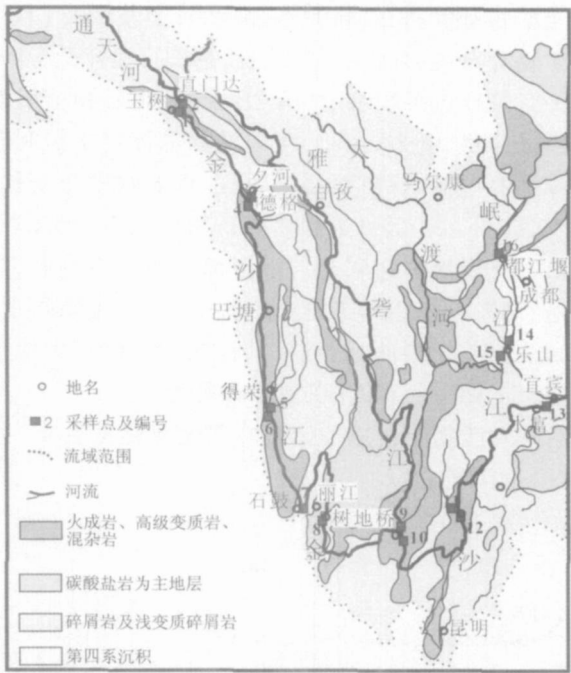
1 样品采集与实验方法

1.1 样品采集

2005年6月自玉树沿金沙江13个点分别采取河流水样和沉积物样品(图1、表1)。其中,主河道采样点8个,支流采样点5个,另外,在岷江段选了3个点进行对比分析。江水在现场用2.5 L的塑料桶密封保存,河床沉积物用聚乙烯塑料袋密封。

1.2 样品处理和分析

水样经0.22 μm滤膜过滤分离,得到悬浮物样品。河床沉积物风干后,经显微镜观察鉴定、统计颗粒粒度分布,用玛瑙研钵磨细至200目以下。所有样品在50℃下烘干,进行粉晶X射线衍射分析(南京大学现代分析中心,Rigaku D/max III-a)。测试条件为Cu靶,2θ设定为2°~36°,步长为0.02°,扫描速度7.50°/min,管流管压40 mA、40 kV。



据文献[13]、[16]修改
modified after [13], [16]

图1 金沙江流域水系和地质简图

Fig. 1 Geological sketch of the drainage area of the upper reaches of the Jinsha jiang River

表1 采样点位置一览表

Table 1 Positions of sampling spots

编号	采样日期	采样点名称	采样河流及地点	经纬度坐标
1	2005-06-15	巴塘河	巴塘河(通天河大桥距玉树约10 km)	N33° 0053.49"E97° 0504.22"
2	2005-06-15	通天河	通天河(直门达水文站,通天河和金沙江分界点处)	N33° 0032.35"E97° 1435.64"
3	2005-06-17	夕河	夕河(白玉距德格约25 km处)	N31° 4134.81"E98° 3456.34"
4	2005-06-17	德格	金沙江(白玉距德格约31 km处)	N31° 3732.73"E98° 3530.08"
5	2005-06-20	定曲	定曲(古学水文站,距得荣40 km)	N28° 2208.53"E99° 1430.69"
6	2005-06-20	得荣	金沙江(曲综大桥前,距得荣46 km)	N28° 2022.59"E99° 1355.12"
7	2005-06-21	石鼓	金沙江(石鼓镇大同村)	N26° 5249.95"E99° 5737.95"
8	2005-06-22	树底桥	金沙江(树底桥,攀枝花方向距丽江约50 km处)	N26° 4741.66"E100° 2500.17"
9	2005-06-23	雅砻江	雅砻江(二滩距攀枝花约1 km处)	N26° 3645.96"E101° 4757.65"
10	2005-06-23	攀枝花	金沙江(攀枝花安宁镇)	N26° 3440.70"E101° 5054.67"
11	2005-06-23	黑水河	黑水河(黑水河大桥)	N26° 5717.06"E102° 5050.09"
12	2005-06-24	华弹	金沙江(华塘水文站)	N26° 5440.34"E102° 5400.01"
13	2005-06-25	水富	金沙江(水富县会议镇)	N28° 3732.78"E104° 2613.40"
14	2005-06-27	乐山	岷江(乐山关庙砂厂)	N29° 3853.44"E103° 4500.03"
15	2005-06-27	大渡河	大渡河(大渡河、青衣江交汇斑竹湾桥)	N29° 3308.85"E103° 4325.19"
16	2005-06-28	都江堰	岷江(都江堰鱼嘴向上游约1 km处)	N31° 0039.12"E103° 3613.02"

2 结果与讨论

2.1 矿物组成

河流沉积物粗颗粒矿物镜下观察主要有石英、钠长石、钾长石、白云母和少量硅质岩岩屑。所有采样点沉积物均含有暗色矿物(黑云母、角闪石等),云

母边缘有风化成霏细片状颗粒的现象。碎屑颗粒分选较差、磨圆度不一。粒径大于15 μm的沉积碎屑物数量统计表明,粒度大致呈双峰式分布,以50~100 μm矿物颗粒最多。从上游到下游,河流颗粒物分选性、磨圆度渐好。支流颗粒磨圆度普遍较差。从XRD谱图(图2)可以看出,悬浮物与河床沉积物

粘土矿物有伊利石、绿泥石、高岭石和蒙脱石；非粘土矿物有石英、方解石、白云石、钠长石和钾长石等。

各采样点沉积物中(图 2B、D)粘土矿物衍射峰低于悬浮物(图 2A、C)。沉积物和悬浮物中伊利石和绿泥石/高岭石衍射峰较明显,且大致同步变化。主河道(图 2A、C)得荣到树底桥段伊利石、绿泥石/高岭石衍射峰最为明显。岷江都江堰点伊利石、绿泥石/高岭石衍射峰最强,雅砻江、黑水河则很弱。火成岩出露较多的雅砻江、攀枝花、黑水河、大渡河采样点的蒙脱石/绿泥石混合峰最为明显。

非粘土矿物组成和衍射峰强度变化见表 2。相

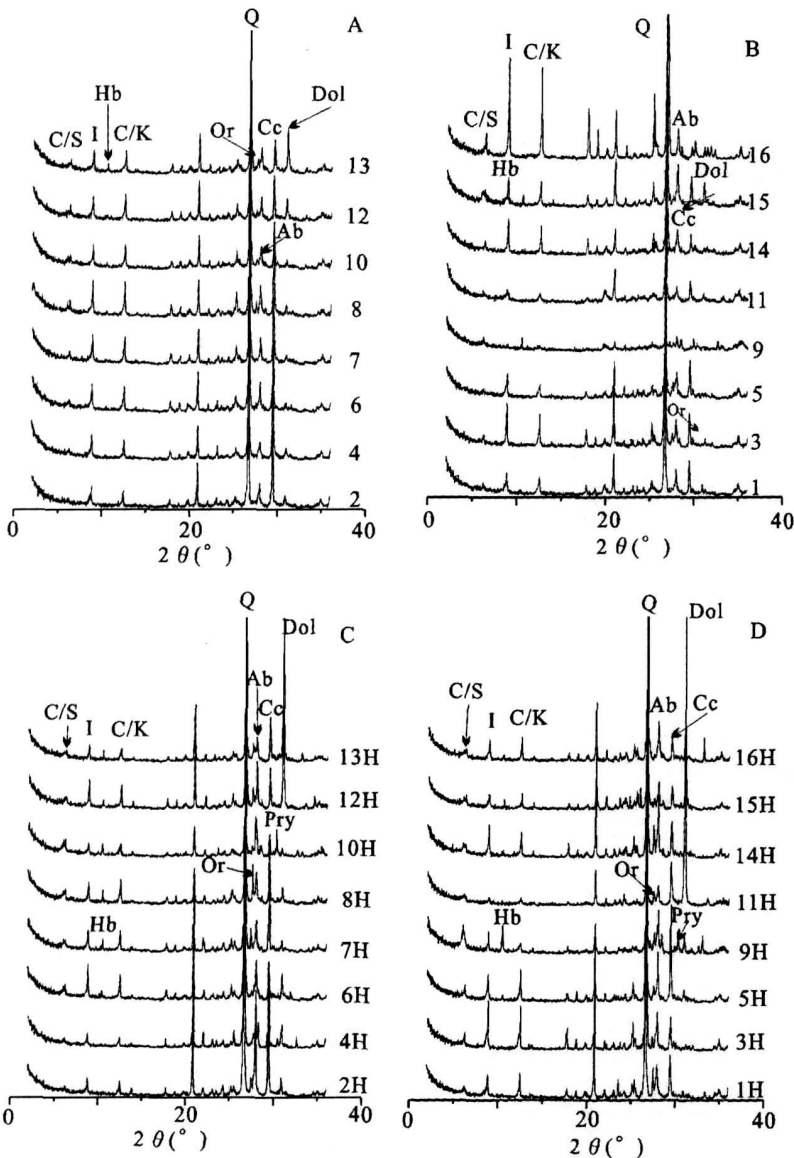
对于河流悬浮物(图 2A、C),沉积物(图 2B、D)非粘土矿物衍射峰强度普遍较高。钾长石、角闪石在沉积物中比悬浮物中普遍。主河道得荣采样点以上,沉积物中几乎不存在角闪石衍射峰,得荣及以下均有角闪石出现,而悬浮物中仅攀枝花、水富点衍射峰较明显。雅砻江悬浮物中非粘土矿物衍射峰均较低,且明显低于该点的沉积物中矿物的衍射强度。黑水河沉积物中白云石衍射峰比悬浮物中的明显。造成对应点中悬浮物沉积物差别的原因很可能是:悬浮物充分混合了流域内的风化产物,搬运距离较远;河床沉积物颗粒物较大,搬运距离较短,较大颗粒物

来主围岩直接剥蚀产物,混合度不及悬浮物,受小范围岩性的影响较大。

2.2 伊利石结晶指数

在多种测量伊利石结晶度指数的方法(如 Weaver 指数、Kubler 指数、Weber 指数等^[17])中,我们选用 Kubler 指数。它是指伊利石(100)峰半高宽,是同类方法中最简单、有效的参数,被普遍用于判断环境或环境演化阶段^[17,18]。Kubler (1967) 依据伊利石(100)峰半高宽,将伊利石的结晶度划分为:成岩作用相(Kubler 指数> 0.42),浅层或近变质作用相(0.42~ 0.25),浅变质作用相(< 0.2)。采样点悬浮物和沉积物中伊利石的 Kubler 指数(表 2)大都在浅层变质作用与浅变质成因范围。川西地区广布的三叠纪碎屑岩、微变质砂板岩中的伊利石为近变质作用相和浅变质作用相^[19,20],推断金沙江悬浮物和沉积物中的伊利石主要来源于这些岩石的风化,其结晶特征反映了原岩中伊利石的结晶特征。

巴塘河和黑水河点的悬浮物和沉积物中伊利石的 Kubler 指数差别较大。这两点的悬浮物伊利石(100)衍射峰不规则,很可能含一定量的伊利石/蒙脱石混层矿物,造成 Kubler 指数偏大。黑水河沉积物中伊利石衍射峰强度很小,Kubler 指数可靠性偏低,误差较大。雅砻江悬浮物中伊利石峰强甚微,未给出 Kubler 指数。



A、C 为金沙江主河道采样点悬浮物和沉积物; B、D 为金沙江支流及岷江采样点悬浮物和沉积物。C/S、I、Hb、C/K、Q、Or、Ab、Cc、Dol 和 Pyr 依次为绿泥石/蒙脱石混层、伊利石、角闪石、绿泥石/高岭石、石英、钾长石、钠长石、方解石、白云石和辉石

图 2 悬浮物、沉积物 XRD 图谱

Fig. 2 XRD spectra of the suspended matters and sediments

表 2 非粘土矿物组成及衍射峰强

Table 2 The compositions and intensities of XRD spectral peaks of non-clay minerals			
江段	采样点	悬浮物的非粘土矿物组成	沉积物的非粘土矿物组成
金沙江主河道	通天河	Q、Ab、Cc、Dol(较弱)	Q、Ab(强)、Cc(较强)、Dol、Or
	德格	Q、Ab、Cc、Dol(较弱)	Q、Ab、Cc、Dol、Or
	得荣	Q、Ab、Cc、Dol(弱)、Or(弱)	Q、Ab、Cc、Dol、Or(弱)、Hb
	石鼓	Q、Ab、Cc、Dol(弱)	Q、Ab、Cc(较强)、Dol(弱)、Or、Hb
	树底桥	Q、Ab、Cc、Dol(弱)、Or	Q、Ab、Cc(弱)、Dol(弱)、Or(较强)、Hb
	攀枝花	Q、Ab、Cc(较弱)、Dol(弱)、Or(较弱)、Hb	Q、Ab、Cc(较弱)、Dol(弱)、Or、Hb、Pyr
	华弹	Q、Ab、Cc、Dol(强)、Or(较弱)	Q、Ab、Cc、Dol(强)、Or、Hb
金沙江支流	水富点	Q、Ab、Cc、Dol(强)、Or、Hb	Q、Ab、Cc、Dol(强)、Or、Hb
	巴塘河	Q、Ab、Cc、Dol(弱)	Q、Ab、Cc、Dol(弱)
	夕河	Q、Ab、Cc、Dol、Or(较弱)	Q、Ab、Cc、Dol、Or
	定曲河	Q、Ab、Cc、Dol、Or(弱)	Q、Ab、Cc、Dol(较弱)、Or、Hb
	雅砻江	Q、Ab、Hb、Pyr 衍射峰都较低	Q、Ab、Or、Hb、Pyr
	黑水河	Q、Ab(较弱)、Dol、Or(弱)	Q、Ab、Dol(强)、Or
	乐山	Q、Ab、Cc、Or、Hb、Dol(弱)	Q、Ab(强)、Cc、Or、Hb、Dol(弱)
岷江	大渡河	Q、Ab、Cc(弱)、Dol(弱)、Hb	Q、Ab、Cc、Dol、Hb
	都江堰	Q、Ab、Cc、Dol(弱)	Q、Ab、Cc、Dol(弱)、Hb

注:表中矿物代号同图 2 注解

表 3 伊利石 Kubler 指数

Table 3 Kubler index of illite

采样点	巴塘河	通天河	夕河	德格	定曲河	得荣	石鼓	树底桥	雅砻江	攀枝花	黑水河	华弹	水富	乐山	大渡河	都江堰
悬浮物	0.56	0.44	0.2	0.28	0.36	0.32	0.24	0.2		0.32	0.92	0.36	0.28	0.2	0.28	0.16
沉积物	0.24	0.2	0.2	0.28	0.28	0.2	0.28	0.28	0.32	0.4	0.02	0.24	0.32	0.2	0.52	0.24

通过伊利石 0.5 nm(002)、1 nm(001) 衍射峰面积比可以计算伊利石的化学指数。比值小于 0.5 代表富 Fe-Mg 伊利石,为物理风化的结果;比值大于 0.5 为富 Al 伊利石,代表强烈的水解作用^[19]。这批采样点中的伊利石化学指数均小于 0.5,为物理风化成因。绿泥石峰衍射峰(002)、(004) 衍射峰值较高,而(001)、(003) 衍射峰强度较弱,判定流域内的绿泥石为富铁绿泥石。

2.3 矿物组成的物源分析

不同点组合的变化可以用来判断源岩对河流矿物输入的影响,以分析河流悬浮物和沉积物的物源。

从图 2(A、C) 可见,主河道中粘土矿物变化基本一致,而非粘土矿物峰随流域内岩性的不同,呈现一定的规律性变化。从横断山区德格、得荣到四川盆地的水富,方解石衍射峰强度有减弱的趋势。横断山区碎屑岩中含有大量的碳酸岩夹层,下游地表出露岩层以侏罗系和白垩系砂页岩为主,碳酸岩分布较少。可见,方解石的这一变化与地层岩性的分布一致。从通天河到树底桥的悬浮物中(图 2A)白云石强度均较弱,且变化不大,到华弹、水富两个点

峰值明显增强。四川盆地含大量白云岩^[16],华弹和水富的悬浮物中白云石衍射峰的增强很可能与白云岩的风化输入有关。钾长石在通天河到石鼓,衍射峰微弱,甚至没有衍射峰存在,从树底桥到水富出现较为明显的衍射峰。在树底桥以上,地表出露的碎屑岩(主要为微变质砂板岩)含大量钠长石,几乎不存在钾长石^[16、21],金沙江断裂带混杂岩中的火成岩以基性-中基性为主,其中钾长石也较少出现。树底桥及其以下,开始有普遍含钾长石的侏罗系和白垩系地层出露^[20、22]。树底桥以下悬浮物中钾长石的出现很可能是侏罗系和白垩系岩层物理风化输入所致。四川盆地水富以上有少量的火山碎屑岩和片岩,碎屑岩和砂岩中也含有一定量的岩屑^[16],水富的悬浮物中角闪石的出现很可能与这些岩石有关。

金沙江支流中(图 2B、D) 非粘土组成也受流域原岩的影响。方解石衍射峰强度低于邻近主河道样品,而石英与长石则相反。夕河中出现的钾长石很可能是其上游雀儿山花岗岩体风化的产物。定曲河流域有一套中基性-中酸性火成岩,钾长石很可能与之有关。雅砻江样品的悬浮物与沉积物中蒙脱

石/绿泥石混合峰明显,而伊利石、绿泥石/高岭石峰较弱,非粘土矿物中有非常不稳定的暗色矿物辉石。这种矿物组合特征与流域内广泛分布的火成岩、变质岩的物理、化学风化作用有关。辉石也有可能来自攀枝花矿床。从图 2(A、C)可见,攀枝花采样点相对其上游的树地桥、下游的华弹矿物组成有明显差别,很可能是雅砻江物质输入所致。黑水河采样点以上出露大量火成岩和变质岩、白云岩^[16],导致白云石衍射峰较强,悬浮物和沉积物中均有角闪石,而伊利石、绿泥石/高岭石的衍射峰较弱。

岷江流域三个采样点矿物组成明显不同,为其物源差别较大所致。都江堰的方解石和长石峰较弱,原因在于采样点以上出露大面积的页岩。大渡河采样点蒙脱石/绿泥石混合峰较明显,有少量角闪石,流域内酸性-中基性岩石和斜长角闪岩较为发育。乐山采样点在成都平原下游,受到平原内第四纪坡积物的影响,粘土矿物衍射峰比都江堰弱。

2.4 矿物组成的影响因素

不同的风化气候环境下,产生不同的粘土矿物组合,并表现出良好的气候特征^[23]。在降水量大、温度高、植被覆盖茂密的热带亚热带地区,化学风化和生物风化作用强烈,如珠江流域^[10]、Nyong 盆地^[5]的高岭石最为普遍,伴有蛋白石、三水铝石和铁矿物等。在温度低、植被稀少的极地冻土带,化学风化作用微弱,如瑞典的极地阿尔比斯地区普遍含有云母/伊利石^[24],育空河流域出现大量的绿泥石^[6]。

发源于造山带的河流受地势起伏影响较大,河水中矿物组成变化也较大,基岩颗粒物往往与土壤层粘土矿物混合在一起,被河流剥蚀运输。河流携带了区域物理剥蚀和化学风化的混合物,包括伊利石、绿泥石、高岭石、蒙脱石以及非粘土矿物长石、铁矿物等。可见,源区岩层中矿物的组成也在很大程度上影响了流域风化产物中粘土矿物的组合特征。此外,非粘土矿物也具一定的气候分带特征。热带、亚热带造山带河流中^[5,9]非粘土矿物主要有长石和铁矿物,温带和寒带造山带的河流^[4,7,8],包括金沙江流域以长石、角闪石及其他暗色矿物为主。河流携带的长石和角闪石等非稳定矿物反映了流域风化程度较低,也表明流经地区地层的岩性,有一定的物源指示和沉积作用价值^[4]。

金沙江作为中纬度造山带的河流,矿物组合和含量的变化主要受风化气候带、源岩和造山带综合作用的控制。影响流域风化特征的还有植被、人为和季节变化等因素,不同的地段主导因素也可能有差异。在进行物源判别和风化环境解译时应综合考

虑各个方面的因素,以期达到最好的效果。

3 结 论

(1) 金沙江悬浮物和河床沉积物中,粘土矿物有伊利石、绿泥石、高岭石和蒙脱石,非粘土矿物以石英、钠长石、方解石为主,钾长石、白云石和角闪石也较普遍。粘土矿物绿泥石、伊利石和长石、角闪石的出现,表明流域内化学风化强度较弱。

(2) 金沙江和岷江的沉积物和悬浮物矿物组合随流域内出露岩性的变化而变化。伊利石为铁镁质、绿泥石富铁型,且伊利石结晶度较高,处于低变质作用范围内,地表岩石的物理风化是金沙江粘土类矿物的主要来源。

致 谢: 在野外采样中得到成都地矿局付小方高级工程师的指导,谨此致谢。

参考文献 (References):

- [1] 张信宝. 长江上游河流泥沙近期变化、原因及减沙对策——嘉陵江与金沙江的对比[J]. 中国水土保持, 1999, (2): 22– 24.
Zhang Xinbao. Status and causes of sediment change in the upper Yangtze River and sediment reduction measures—Comparison of Jialing River with Jinsha River[J]. Soil and Water Conservation in China, 1999, (2): 22– 24. (in Chinese with English abstract)
- [2] Qin J H, Huh Y S, Edmond M J, Du G, Ran Jing. Chemical and physical weathering in the M in Jiang, a headwater tributary of the Yangtze River[J]. Chem. Geol., 2006, 227: 53– 69.
- [3] 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[J]. 地球科学进展, 2000, 15(5): 553– 558.
Wang Zhongliang, Liu Congqiang, Xu Zhifang, Han guilin, Zhu jianming, Zhang jin. Advances in Research on Geochemistry of Rare Earth Elements in Rivers[J]. Adv. Earth Sci., 2000, 15(5): 553– 558. (in Chinese with English abstract)
- [4] 王文正, 张经. 欧洲罗纳河和中国几条主要河流悬浮物的矿物学组成分析[J]. 海洋与湖沼, 1994, 25(3): 319– 327.
Wang Wenzheng, Zhang Jing. Analysis on the mineral compositions of suspended matter from Rhone and some main Chinese rivers[J]. Ocean Limnol Sinica, 1994, 25(3): 319– 327. (in Chinese)
- [5] Ollivier-Lauquet G, Allard T, Bertaux J, Muller J. Crystal chemistry of suspended matter in a tropical hydrosystem, Nyong basin (Cameroon, Africa) [J]. Chem. Geol., 2000, 170: 113– 131.
- [6] Eberl D D. Quantitative mineralogy of the Yukon River system: Changes with reach and season and determining sediment provenance[J]. Am. Miner., 2004, 89: 1784– 1794.
- [7] Ahmad T, Khanna P P, Chakrapani G J, Balakrishnan S. Ge-

- geochemical characteristics of water and sediment of the Indus river, Trans-Himalaya, India: constraints on weathering and erosion[J]. *J. Asian Earth Sci.*, 1998, 16: 333–346.
- [8] Konhauser K O, Powell M A, Fyfe W S, Jlingstaffe F, Tripathy S. Trace element geochemistry of river sediment, Orissa State, India[J]. *Journal of Hydrology*, 1997, 193: 258–269.
- [9] Elbaz-Poulichet F, Seyler P, Maurice Bourgois L, Jean-Loup G, Claude D. Trace element geochemistry in the upper Amazon drainage basin (Bolivia) [J]. *Chem. Geol.*, 1999, 157 (3): 319–334.
- [10] 杨作升. 黄河、长江、珠江沉积物中粘土的矿物组合、化学特征及其与物源区气候环境的关系[J]. *海洋与湖沼*, 1988, 19 (4): 336–346.
- Yang Zuosheng. Mineralogical assemblages and chemical characteristics of clays from sediments of the Huanghe, Changjiang, Zhujiang Rivers and their relationship to the climate environment in their sediment source areas[J]. *Ocean Limn. Sinica*, 1988, 19(4): 336–346. (in Chinese)
- [11] 何良彪, 刘秦玉. 黄河与长江沉积物中粘土矿物的化学特征[J]. *科学通报*, 1997, 429(7): 730–734.
- He Liangbiao, Liu Qinyu. Chemical characteristics of clays from sediments of the Yellow River and Yangtze River[J]. *Chinese Sci. Bull.*, 1997, 429(7): 730–734. (in Chinese)
- [12] Li Y H, Teraoka H, Yang T S, Chen J S. The elemental composition of suspended particles from the Yellow and Yangtze River[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1984, 48: 1561–1566.
- [13] Ding T, Wan D, Wang C, Zhang F. Silicon isotope compositions of dissolved silicon and suspended matter in the Yangtze River, China[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2004, 68 (2): 205–216.
- [14] Yang S Y, Jung H S, Choi M S, Li C X. The rare earth element compositions of the Changjiang (Yangtze) and Huanghe (Yellow) river sediments[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2002, 201(2): 407–419.
- [15] Yang S Y, Li C X, Yokoyama K. Elemental compositions and monazite age patterns of core sediments in the Changjiang Delta: Implications for sediment provenance and development history of the Changjiang River[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2005, 245(3–4): 762–776.
- [16] 四川省地质矿产局. 四川省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province. Regional geology of Sichuan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990. (in Chinese)
- [17] 王河锦, 周健. 关于伊利石结晶度诸指数的评价[J]. *岩石学报*, 1998, 14(3): 395–405.
- Wang Hejin, Zhou Jian. On the indices of illite crystallinity [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1998, 14(3): 395–405. (in Chinese with English abstract)
- [18] 陈涛, 王河锦, 张祖青, 王欢. 浅谈利用粘土矿物重建古气候[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2005, 41(2): 309–316.
- Chen Tao, Wang Hejin, Zhang Zuqing, Wang Huan. An approach to paleoclimate-reconstruction by clay minerals [J]. *Acta Sci. Nat. Univ. Pekinensis*, 2005, 41(2): 309–316. (in Chinese with English abstract)
- [19] 陈明, 何文劲, 梁斌, 谢启兴. 川西高原西康群极低级变质岩特征[J]. *四川地质学报*, 2001, 21(2): 65–69.
- Chen Ming, He Wenjin, Liang Bin, Xie Qixing. Petrographic characteristics of extremely weak metamorphic rock of the Xikang Group on the West Sichuan Plateau [J]. *Acta Geol. Sichuan*, 2001, 21(2): 65–69. (in Chinese)
- [20] 杨琦, 刘伟新. 松潘-阿坝地区三叠系成岩演化实验研究[J]. *石油实验地质*, 2005, 27(5): 534–538.
- Yang Qi, Liu Weixin. Experimental study on diagenetic evolution for Triassic in the Songpan-Aba Area[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2005, 27(5): 534–538. (in Chinese with English abstract)
- [21] She Z B, Ma C Q, Mason R, Li J W, Wang G C, Lei Y H. Provenance of the Triassic Songpan-Ganzi flysch, west China [J]. *Chem. Geol.*, 2006, 231: 159–175.
- [22] 游翔, 朱波. 紫色母岩不同粒级风化物钾素形态分配特征[J]. *山地学报*, 2003, 21: 482–486.
- You Xiang, Zhu Bo. Distribution of potassium form in different class of weathered particles of purple rocks [J]. *J. Mount. Sci.*, 2003, 21: 482–486. (in Chinese)
- [23] 陈涛, 王欢, 张祖青, 王河锦. 粘土矿物对古气候指示作用浅析[J]. *岩石矿物学杂志*, 2003, 22(4): 416–420.
- Chen Tao, Wang Huan, Zhang Zuqing, Wang Hejin. Clay minerals as indicators of paleoclimate[J]. *Acta Petrol. Miner.*, 2003, 22(4): 416–420. (in Chinese with English abstract)
- [24] Allen C E, Darmody R G, Thorn C E, Dixon J C, Schlyter P. Clay mineralogy, chemical weathering and landscape evolution in Arctic-Alpine Sweden[J]. *Geoderma*, 2001, 99: 277–294.