

文章编号: 1000-0550(2006)04-0570-09

# 长江水系沉积物碎屑矿物组成及其示踪意义<sup>①</sup>

王中波<sup>1,2</sup> 杨守业<sup>2</sup> 李萍<sup>2</sup> 李从先<sup>2</sup> 蔡进功<sup>2</sup>

(1. 青岛海洋地质研究所 山东青岛 266071; 2. 同济大学海洋地质国家重点实验室 上海 200092)

**摘要** 长江碎屑矿物组成研究表明,轻矿物以石英、长石和岩屑为主,不同支流轻矿物组成特征不同,成熟度指数平均是 2.0,一般干流高于支流,成熟度随沉积物搬运距离增加而增大。QFL 及 Q,FL 三角图解显示长江沉积物主要来自再旋回造山带物源区,流域风化剥蚀速度较快,不同支流物质汇入干流,使得干流轻矿物组成复杂多变而难以和支流区别。重矿物含量从长江上游至下游呈递减趋势,其主要组合是磁铁矿—普通角闪石—普通辉石—石榴子石—绿帘石—褐铁矿—钛铁矿。红柱石和磷灰石是金沙江沉积物的特征矿物组合;蓝晶石是岷江流域的特征矿物;涪江的特征矿物是楣石;汉江的特征矿物组合是磷灰石、紫苏辉石和硅镁石;锆石是湘江的特征矿物。不同流域的特征矿物指示其源岩性质。上游的雅砻江、大渡河以及岷江等支流沉积物对中、下游干流沉积物的贡献较弱。涪陵以上长江流域风化作用强烈,母岩主要是沉积岩类(碎屑岩、泥岩);其下流域沉积物中近源弱风化物质明显增加,其源岩类型体现为岩浆岩和变质岩类;而金沙江攀枝花地区及湘江、沅江沉积物则更多来自流域内广泛分布的大片变质岩类。

**关键词** 长江 沉积物 物源 碎屑矿物

**第一作者简介** 王中波 男 1979 年出生 硕士 海洋地质

**中图分类号** P512.2 **文献标识码** A

## 0 引言

长江作为我国第一大河,水系发育,支流众多,每年携带大量泥沙入海,多年平均值达到  $4.6 \times 10^8$  [1]。矿物组成是河流沉积学研究的一个基础而重要的内容 [2]。长江水系沉积物矿物组成特征的研究对于深入探讨长江沉积物的从源到汇过程,以及揭示边缘海沉积物的来源和第四纪古环境变化具有重要意义。

前人对长江沉积物的矿物组成做了大量研究。陈丽蓉通过对长江口、东海大陆架表层沉积物矿物组成的研究,认为白云石是长江沉积物的特征矿物 [3,4];孙白云研究了长江三角洲沉积物中的碎屑矿物组成,认为楣石和白云石是其特征矿物,轻矿物中石英的含量高于长石含量 [5];吕全荣统计了长江口 0.063~0.125 mm 粒级沉积物矿物组成后,发现石英含量高达 65%~70%,长石主要是正长石和斜长石;重矿物中云母类片状矿物含量较高,锆石、磁铁矿及金红石含量甚低,矿物种类较少 [6];王腊春等揭示出长江干流沉积物的特征重矿物组合是角闪石—绿帘石—金属矿物,此外辉石、石榴子石及锆石含量也较高 [7]。

综合来看,前人研究主要集中在长江河口三角洲

及干流部分地区,研究认识并不一致,且对长江水系包括干流和主要支流的矿物组成系统研究相当薄弱,因而不能够全面认识长江干、支流的轻重矿物组成。本文选择长江干流及主要支流沉积物样品,分析其中轻、重矿物组合及其控制因素,进而探讨不同流域的物源及对干流沉积物的可能影响。

## 1 样品来源和分析方法

研究样品是 2003 年 4 月及 2004 年 8 月取自长江各水系的沉积物,采样地点从上游的金沙江的丽江到长江下游大通水文站地区,包括干流及主要支流共 29 个取样点(图 1),共采集河漫滩样品 71 个。

沉积物矿物分离时,选取约 50 g 样品进行湿筛,分选出 0.063~0.125 mm 粒级的样品烘干。利用三溴甲烷(比重  $2.89 \text{ g/cm}^3$ )进行轻重矿物分离。分离出来的样品用酒精反复冲洗后 60℃ 恒温烘干后称重。其中轻矿物利用环氧树脂和三乙醇胺按照 6:1 比例的混合粘合剂做成矿物薄片,恒温 70℃ 烘 48 小时。轻矿物薄片选取 3~5 个镜下视域进行矿物鉴定,各个视域取平均值减小分析误差。在实体显微镜和偏光显微镜下,每个重矿物样品鉴定颗粒数为 300~500 颗,然后统计每种重矿物的百分含量。

①国家自然科学基金(批准号:40206008,40476029)和上海青年科技启明星计划(04QMX1430)资助。

收稿日期:2005-05-24;收修稿日期:2005-10-31

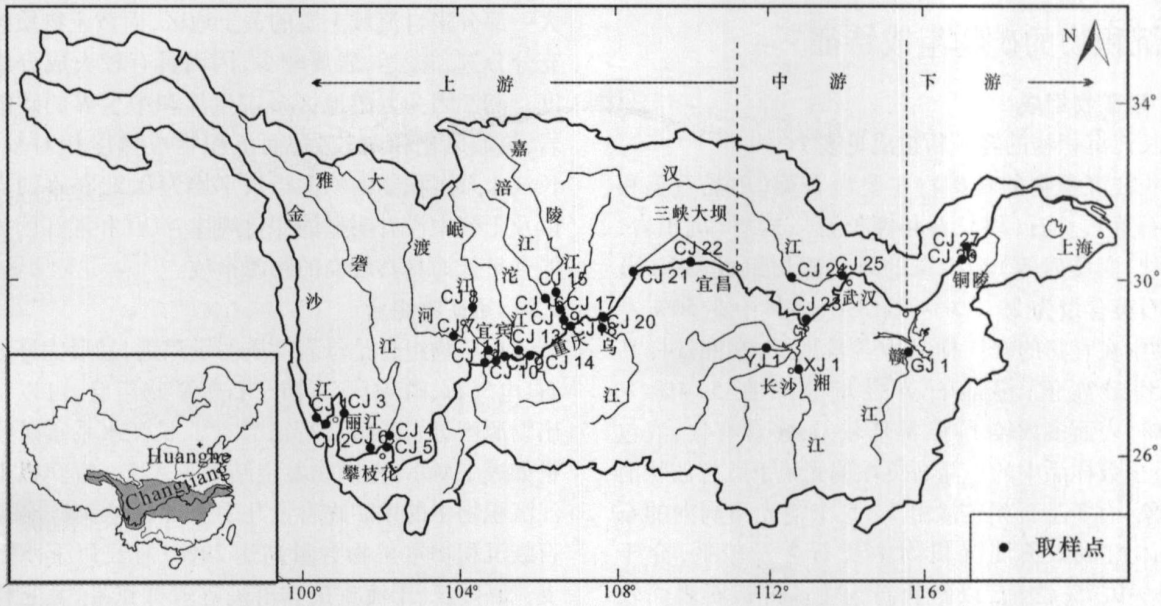


图 1 长江水系沉积物样品点分布图

Fig 1 Sample locations of sediments in the Changjiang and its tributaries

表 1 长江水系沉积物的轻矿物组成 (%)

Table 1 Contents of light minerals in the Changjiang sediments (%)

| 样品号    | 取样地点     | LM   | HM   | Qm   | Qp   | Qt   | K   | P   | F   | L    | Lt   | M   | S    |
|--------|----------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|------|------|-----|------|
| CJ1-1  | 金沙江(石鼓)  | 71.1 | 29.0 | 51.0 | 14.3 | 65.3 | 1.2 | 3.0 | 4.3 | 30.4 | 44.8 | 1.9 | 0.14 |
| CJ1-2  | 金沙江(石鼓)  | 95.6 | 4.4  | 47.7 | 9.9  | 57.6 | 0.0 | 4.2 | 4.2 | 38.2 | 48.1 | 1.4 | 0.11 |
| CJ4-2  | 雅砻江(攀枝花) | 90.2 | 9.8  | 43.9 | 16.3 | 60.2 | 3.6 | 6.1 | 9.7 | 30.1 | 46.4 | 1.5 | 0.32 |
| CJ5-2  | 金沙江(攀枝花) | 90.3 | 9.7  | 32.5 | 22.6 | 55.1 | 0.0 | 7.7 | 7.7 | 37.3 | 59.9 | 1.2 | 0.21 |
| CJ7-4  | 大渡河(乐山)  | 91.1 | 8.9  | 42.8 | 15.1 | 57.9 | 0.0 | 9.0 | 9.0 | 33.2 | 48.3 | 1.4 | 0.27 |
| CJ8-2  | 岷江(乐山)   | 96.3 | 3.7  | 29.3 | 25.1 | 54.4 | 1.4 | 4.8 | 6.2 | 39.4 | 64.5 | 1.2 | 0.16 |
| CJ8-3  | 岷江(乐山)   | 90.1 | 9.9  | 45.7 | 18.7 | 64.4 | 4.6 | 3.7 | 8.3 | 27.3 | 46.0 | 1.8 | 0.30 |
| CJ9-5  | 长江头(宜宾)  | 93.4 | 6.6  | 57.5 | 10.9 | 68.4 | 3.1 | 1.4 | 4.5 | 27.1 | 38.0 | 2.2 | 0.17 |
| CJ11   | 岷江(宜宾)   | 93.9 | 6.1  | 51.1 | 11.9 | 63.0 | 0.0 | 6.7 | 6.7 | 30.3 | 42.2 | 1.7 | 0.22 |
| CJ12-1 | 金沙江(宜宾)  | 90.2 | 9.8  | 50.7 | 10.4 | 61.1 | 2.1 | 0.7 | 2.8 | 36.1 | 46.5 | 1.6 | 0.08 |
| CJ13-2 | 长江(泸州)   | 98.6 | 1.4  | 55.9 | 12.7 | 68.6 | 0.7 | 8.2 | 8.9 | 22.4 | 35.2 | 2.2 | 0.40 |
| CJ16-1 | 涪江(合川)   | 99.9 | 0.1  | 55.1 | 13.0 | 68.1 | 0.3 | 4.2 | 4.5 | 25.0 | 40.4 | 2.4 | 0.18 |
| CJ17-1 | 嘉陵江(合川)  | 98.5 | 1.5  | 53.7 | 7.5  | 61.2 | 1.9 | 3.4 | 5.3 | 33.5 | 41.0 | 1.6 | 0.16 |
| CJ18-1 | 长江(重庆)   | 88.3 | 11.7 | 60.7 | 11.7 | 72.4 | 1.4 | 2.2 | 3.5 | 24.0 | 35.7 | 2.6 | 0.15 |
| CJ19-3 | 嘉陵江(重庆)  | 91.8 | 8.3  | 52.3 | 16.7 | 69.1 | 1.1 | 4.7 | 5.8 | 25.2 | 41.9 | 2.2 | 0.23 |
| CJ20-4 | 长江(涪陵)   | 93.9 | 6.1  | 53.6 | 12.0 | 65.6 | 1.3 | 5.6 | 6.9 | 27.5 | 39.5 | 1.9 | 0.25 |
| CJ20-5 | 长江(涪陵)   | 96.2 | 3.8  | 51.6 | 9.8  | 61.4 | 0.4 | 7.7 | 8.1 | 30.5 | 40.3 | 1.6 | 0.27 |
| CJ22-3 | 长江(三峡)   | 96.0 | 4.0  | 64.2 | 6.1  | 70.3 | 0.0 | 4.9 | 4.9 | 24.8 | 30.9 | 2.4 | 0.20 |
| CJ24   | 汉江(仙桃)   | 95.5 | 4.5  | 67.5 | 13.5 | 81.0 | 0.5 | 4.6 | 5.1 | 13.9 | 27.4 | 4.3 | 0.37 |
| CJ25-2 | 长江(武汉)   | 95.3 | 4.7  | 67.1 | 7.6  | 74.7 | 1.2 | 3.9 | 5.2 | 20.2 | 27.7 | 2.9 | 0.26 |
| CJ27-2 | 长江(铜陵)   | 97.9 | 2.2  | 42.7 | 13.9 | 56.6 | 1.3 | 4.7 | 6.0 | 37.3 | 51.2 | 1.3 | 0.16 |
| YJ1    | 沅江(常德)   | 99.7 | 0.3  | 53.4 | 9.2  | 62.6 | 0.0 | 5.1 | 5.1 | 32.2 | 41.5 | 1.7 | 0.16 |
| YJ1-2  | 沅江(常德)   | 94.2 | 5.8  | 42.7 | 13.5 | 56.2 | 0.0 | 5.1 | 5.1 | 38.7 | 52.2 | 1.3 | 0.13 |
| YJ-2   | 沅江(常德)   | 98.8 | 1.2  | 57.1 | 6.5  | 63.6 | 0.0 | 2.4 | 2.4 | 34.0 | 40.4 | 1.7 | 0.07 |
| XJ1    | 湘江(长沙)   | 98.5 | 1.5  | 62.1 | 13.7 | 75.8 | 1.1 | 2.9 | 4.0 | 20.2 | 33.9 | 3.1 | 0.20 |
| XJ-2   | 湘江(长沙)   | 98.9 | 1.1  | 73.8 | 5.4  | 79.2 | 0.4 | 5.9 | 6.3 | 14.5 | 19.9 | 3.8 | 0.43 |

LM 轻矿物, HM 重矿物, Qm 单晶石英, Qp 多晶石英, Qt 石英, K 钾长石, P 斜长石, F 长石, L 岩屑, Lt (长石 + 岩屑), M 为成分成熟度指数 (Qt /

(L + F)), S 为物源区指数 (F / L)

## 2 沉积物的矿物组成特征

### 2.1 轻矿物组成

长江沉积物的轻矿物组成见表 1。

长江沉积物的轻矿物主要由石英(单晶石英和多晶石英)、长石(斜长石和钾长石)、岩屑(沉积岩、碳酸盐、变质岩等)和少量的风化碎屑组成(表 1)。单晶石英含量为 29.3%~73.8%,多集中在 50%左右,其中在宜宾的岷江样品中含量最低,在湘江样品中达到最高值;多晶石英含量分布在 5.4%~25.1%。表面多数较干净,晶形较差,多含有气、液包裹体;少数样品中的单晶石英在偏光镜下具有波状消光现象,而多晶石英通常由 3~5 个消光不同向的石英晶体组成。长江沉积物中长石含量较低,介于 2.4%~9.7%之间,以斜长石为主。钾长石表面较脏,少数样品呈绢云母化;斜长石主要特征是绢云母化,少量具有侵染状特征。长江沉积物的岩屑含量较高,多在 30%左右,主要为变质岩、沉积岩、碳酸盐岩屑。变质岩岩屑主要是石英和长石相互交熔,具有明显的交熔线;沉积岩岩屑是石英或长石再度成岩的产物;碳酸盐岩屑则是细小碳酸盐矿物的集合体。

金沙江从上游到下游石英逐渐增加,多数颗粒干净无杂质且存在波状消光现象;长石则是逐渐减少;而岩屑变化不大。对比整个长江轻矿物组成,金沙江长石含量相对较高,而石英含量较低。岷江轻矿物中的石英颗粒较大,在同一采样点的心滩和漫滩沉积物中含量变化较大;长石存在解理纹和绢云母化现象,正长石有格子双晶;岩屑多是变质岩和沉积岩屑的复合体。嘉陵江中的单晶石英颗粒较大而表面较脏;长石存在格子双晶特征。长江干流轻矿物组成比较复杂,上游地区石英颗粒较大且表面较脏,而下游石英颗粒细小但表面干净,含量从上到下呈现先减少后增加再减少的趋势;长石含量变化较大且规律不明显,少数正长石具有格子双晶和解理,斜长石存在卡钠复合双晶、环带以及绢云母化特征。

佩蒂庄等认为碎屑矿物成分具有重要的成因意义,将轻矿物的骨架矿物的不同组合比值作为判断指标,提出轻矿物的成分成熟度指数和物源区指数<sup>[8]</sup>。成分成熟度说明碎屑沉积物中碎屑矿物的改造程度;而物源区指数则反映了物源区和母岩的性质、气候及风化情况<sup>[9]</sup>,其计算公式见表 1。长江水系沉积物中轻矿物的成熟度指数平均是 2.0,一般干流中高于支

流;汉江中成熟度指数最高,可能是由于其沉积物很大一部分来自流域上游的黄土地区,而黄土物质经过充分分选和搬运,岩屑较少,因而具有较大成分成熟度。湘江因为上游地区多古生界和中生界的碳酸盐岩,流域风化相对较强,而沉积物成熟度相对较高。长江水系沉积物的物源指数平均为 0.2,在不同支流以及干流中没有明显的变化规律,汉江和湘江因为岩屑含量低而具有较高的物源指数。

### 2.2 重矿物组合

重矿物组合是母岩性质的示踪剂,晶形完好的锆石、电气石、磷灰石、石榴子石等矿物组合,可以指示出物源区母岩的组成特征<sup>[10,11]</sup>。长江水系重矿物含量如表 1 所示,重矿物鉴定结果见表 2。宜宾以上长江沉积物中的重矿物含量几乎全部超过 5%,金沙江石鼓沉积物重矿物含量高达 29%;宜宾以下水系除支流嘉陵江、干流重庆和涪陵等取样点外,其它样品重矿物含量皆低于 5%。沉积物中磁性矿物含量普遍较高,磁铁矿占绝大多数,还有少量的含有磁铁矿包裹体的其它矿物,如角闪石等。磁铁矿颗粒粒径较小,表面较脏,多数呈黑色、金属光泽,少数样品的晶形较好,呈八面体或十二面体。褐铁矿呈土状,黄褐色,易碎。钛铁矿呈板状、块状,黑色,粒径较小,主要分布在 0.05~0.1 mm 之间。金红石深红褐色、短柱状,磨圆较好。锆石分布较为广泛,几乎所有的样品中都有,但颜色、晶形都有差异,主要为短柱状、长柱双锥状,颜色多为无色、浅粉红、浅褐、红褐色等,透明,少数样品晶形较好,多磨圆。石榴子石含量较高,多呈无色、浅粉红色,透明,不规则粒状,不同样品颗粒大小不等。普通角闪石在大部分样品中含量最高,呈深灰绿色、墨绿色,柱状解理发育,不同样品中存在不同程度的风化,风化后呈现浅绿色。绿泥石为鳞片状,珍珠光泽,不同样品中颗粒粒径不同。黑云母在绝大多数样品中普遍存在,但含量不高,呈黑色片状,金刚光泽。

将重矿物组合结果投影到长江水系分布图上(图 2),发现长江沉积物的主要重矿物组合是磁铁矿—普通角闪石—普通辉石—石榴子石—绿帘石—褐铁矿—钛铁矿,与长江口地区沉积物的重矿物组合不同<sup>[6]</sup>,亦与长江中、下游的干流沉积物重矿物矿物组合存在差别<sup>[7]</sup>。长江中、下游重矿物特征组合为角闪石—绿帘石—金属矿物,少量辉石、石榴石、锆石、榍石、磷灰石、电气石、金红石等<sup>[7]</sup>,而中、下游矿

物组合中辉石、石榴子石、绿泥石、黑云母及锆石含量的减少说明上游富集这些矿物的支流沉积物对中、下游干流沉积物的影响很弱,或沉积物向下游搬运过程中存在明显的水动力分选作用。

不同取样地点的特征矿物不尽相同,反映出源岩性质特征及对沉积物的控制。金沙江流域的岩石类型复杂多变,上游主要是沉积岩类的泥岩、碎屑岩、碳酸岩和岩浆岩类的花岗岩、玄武岩,以及攀枝花地区

表 2 长江水系沉积物重矿物颗粒百分含量(%)

Table 2 The contents of heavy minerals in the sediments from the Changjiang and its main tributaries (%)

| 矿物名称 | CJ1-2 | CJ3-3 | CJ4-2 | CJ5-2 | CJ7-4 | CJ8  | CJ9-5 | CJ11 | CJ12-1 | CJ16-1 | CJ17-1 | CJ18-1 | CJ19-3 | CJ20-4 | CJ20-5 | CJ21-2 | CJ22-3 | CJ24 | CJ27-2 | XJ1-1 | YJ1-1 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|--------|-------|-------|
| 采样地点 | 金沙江   | 金沙江   | 雅鲁江   | 金沙江   | 大渡河   | 岷江   | 长江头   | 岷江   | 金沙江    | 涪江     | 嘉陵江    | 长江     | 嘉陵江    | 长江     | 长江     | 长江     | 长江     | 汉江   | 长江     | 湘江    | 沅江    |
|      | 石鼓    | 丽江    | 攀枝花   | 攀枝花   | 乐山    | 乐山   | 宜宾    | 宜宾   | 宜宾     | 合川     | 合川     | 重庆     | 重庆     | 涪陵     | 涪陵     | 万州     | 三峡     | 仙桃   | 铜陵     | 长沙    | 常德    |
| 磁性矿物 | 20    | 5.0   | 16.7  | 15.0  | 2.5   | 2.1  | 15.0  | 7.0  | 25.0   | 8.3    | 12.2   | 12.5   | 33.3   | 33.3   | 33.3   | 40.0   | 10     |      | 12.5   | 16.7  | 10.0  |
| 褐铁矿  | 2.5   | 22.3  | 8.2   | 29.5  | 3.4   | 8.4  | 24.9  | 13.3 | 32.6   | 8.9    | 2.3    | 18.3   | 27.3   | 18.0   | 16.9   | 16.6   | 16.9   | 5.3  | 3.2    | 26.0  | 41.8  |
| 钛铁矿  | 32    | 1.5   |       |       |       | 1.9  | 10.6  | 9.8  |        | 13.3   |        |        |        |        |        | 2.1    | 11.5   |      | 3.2    | 8.1   | 5.5   |
| 榍石   | 1.0   | 1.3   |       | 4.8   | 0.7   |      |       |      | 1.5    | 13.1   |        | 2.0    | 2.5    | 5.0    | 1.6    |        |        |      | 1.4    |       | 9.7   |
| 金红石  | 0.9   |       |       | 1.0   |       |      |       |      |        | 1.0    |        |        |        |        |        |        |        |      |        |       | 0.8   |
| 锆石   | 13    | 0.9   |       | 2.1   | 1.4   |      | 2.3   | 1.4  | 0.3    | 1.2    | 0.4    | 0.2    |        |        |        |        |        | 2.1  | 0.4    | 0.5   | 29.4  |
| 电气石  | 1.1   |       | 0.3   |       | 3.1   | 0.3  |       | 1.4  |        | 1.0    |        | 0.4    | 0.3    |        |        | 0.4    |        | 0.6  | 0.7    | 0.7   | 2.2   |
| 绿帘石  | 3.1   | 4.5   | 4.5   | 5.8   | 10.3  | 12.1 | 5.9   | 7.7  | 3.3    | 7.9    | 20.8   | 13.3   | 4.1    | 2.1    | 4.3    | 9.7    | 1.1    | 17.3 | 14.9   | 3.4   | 4.5   |
| 石榴子石 | 23.7  | 5.0   | 7.9   |       | 3.0   | 4.9  |       | 4.2  | 2.3    | 10.1   | 8.0    | 0.7    | 1.0    | 1.8    | 0.4    | 3.0    | 26.4   | 14.5 | 3.0    | 1.2   |       |
| 普角闪石 | 2.6   | 35.5  | 52.8  | 12.7  | 65.2  | 66.5 | 13.5  | 28.7 | 14.7   | 32.5   | 36.2   | 45.2   | 16.3   | 7.4    | 23.5   | 42.7   | 15.5   | 55.9 | 55.2   | 9.8   | 20.6  |
| 普通辉石 |       | 8.7   | 8.2   |       | 0.7   | 3.4  | 10.8  | 6.3  | 11.1   |        | 2.3    | 3.2    | 13.5   | 6.5    | 16.9   | 20.1   | 7.1    |      | 2.3    | 4.7   | 3.0   |
| 磷灰石  |       |       |       | 2.7   |       |      |       |      |        | 1.7    | 3.1    |        |        |        | 1.6    | 1.4    | 0.6    | 2.0  | 0.5    |       | 1.0   |
| 红柱石  | 4.3   | 2.0   | 12.7  | 0.7   |       |      |       | 0.7  | 2.8    |        |        |        |        |        |        |        |        |      |        |       |       |
| 黑云母  | 0.4   | 1.7   | 4.1   | 5.2   | 0.4   | 2.6  | 4.2   | 3.8  |        |        |        | 1.5    | 0.1    | 1.8    | 0.4    |        | 0.8    |      | 0.2    |       |       |
| 绿泥石  | 2.1   |       | 8.9   |       | 0.5   | 3.9  | 4.9   | 1.5  | 1.0    |        |        | 2.7    | 0.4    | 3.1    | 1.3    |        |        |      |        | 1.6   |       |
| 蓝晶石  |       |       |       |       |       |      |       | 5.6  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |      |        | 0.2   |       |
| 紫苏辉石 |       |       |       |       | 1.7   |      | 10.8  |      |        |        |        |        |        |        |        |        |        |      | 2.9    |       |       |
| 黄玉   |       |       |       |       | 2.1   |      |       |      |        |        |        |        |        |        |        |        |        |      |        |       |       |
| 十字石  |       |       | 1.5   | 0.7   |       |      |       |      |        |        |        |        | 1.0    |        |        |        |        |      |        |       |       |
| 硅镁石  |       |       |       |       |       |      |       |      |        |        |        |        |        |        |        |        |        |      |        | 1.0   |       |
| 风化矿物 | 8.7   | 1.2   |       |       |       |      |       |      | 1.3    |        |        |        |        | 21.0   |        |        |        |      | 8.2    |       | 2.1   |

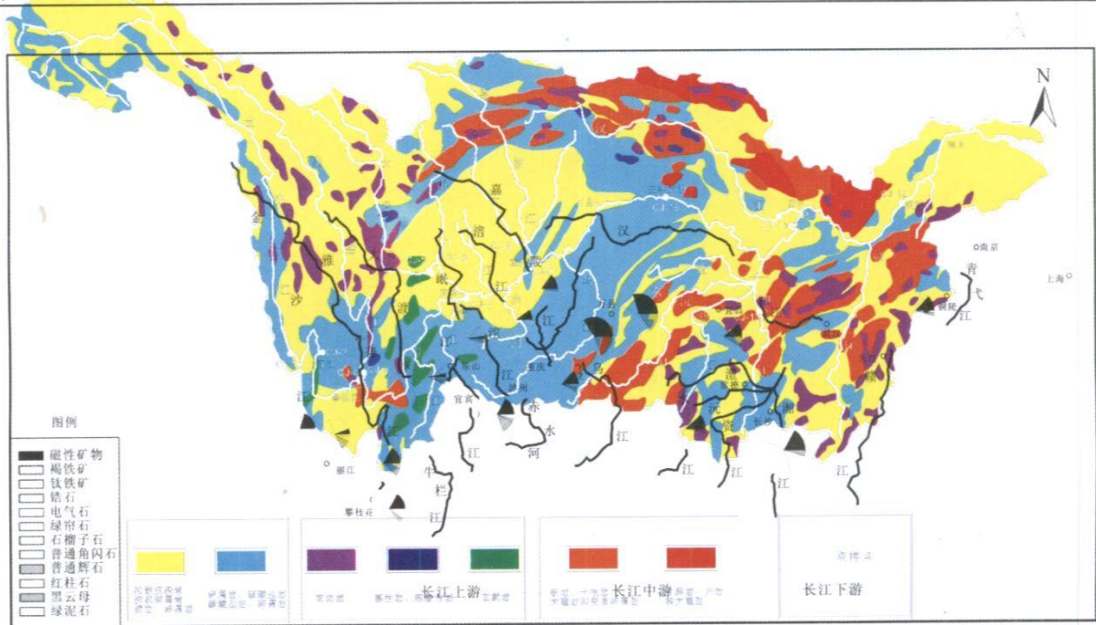


图 2 长江水系沉积物重矿物组合分布图

Fig 2 Distribution of heavy mineral assemblages of the Changjiang river channel and tributaries

广泛分布的变质碎屑岩(图 3)<sup>[12]</sup>。CJ3-3(金沙江—丽江金安桥)样品的特征矿物是多分布于泥岩和花岗岩的接触变质岩中的红柱石,且风化较强。CJ5-2(金沙江—攀枝花)样品的特征矿物也是红柱石,但其晶形较好,呈红褐色玻璃状光泽,说明沉积物受到近源母岩影响较大;此外还有岩浆岩和变质岩中的主要副矿物磷灰石,呈无色透明且有气、液体包裹体。岷江和大渡河流域分布有大片的高绿片岩相和低角闪岩相岩石及岩浆混染花岗岩<sup>[12]</sup>。岷江沉积物的CJ11样品中存在大量的蓝晶石是典型的泥质区域变质矿物,是变质分带的标志性矿物,是低角闪岩相中压相系岩石的特征矿物,可以作为岷江流域沉积物的示踪矿物。CJ9-5(长江头—宜宾)样品是岷江和金沙江交汇处沉积物,其主要矿物组合是普通角闪石、黑云母和绿泥石等,它们通常在深成岩中以蚀变产物产出;特征矿物是多见于深度区域变质岩中的紫苏辉石,应是金沙江(主要是上游)和岷江流域物质的共同影响的结果。涪江流域分布着大片各类沉积岩,CJ16-1样品中的榴石含量明显高于其他支流,反映出物源物质沉积旋回较多、风化作用较强的特点。汉江流域变质岩类的广泛存在,决定了CJ24样品中变质岩的主要副产物磷灰石以及作为区域变质的特征矿物的紫苏辉石和作为接触变质产物的硅镁石的相

对富集。XJ1-1(湘江)样品的特征矿物是主要产于各种火成岩、变质岩和碎屑沉积岩中的锆石,基本上反映出湘江流域分布的岩石类型(图 3)。因而不同流域沉积物特征矿物及组合可以指示流域源岩性质。

### 3 讨论

#### 3.1 轻矿物的 QFL 三角图解分析

长江干流沉积物中石英含量及成熟度指数从从上游到下游呈明显的增加趋势(表 1),反映沉积物随搬运距离增加,矿物的成熟度逐渐增加,这显然与一般的沉积物搬运机制一致。Dickinson等提出通过砂岩组分的统计、对比和判断分析,建立和确定定量判断标准和三角图解模式图,为判断物源和沉积盆地构造环境分析提供了一种重要途径<sup>[13,14]</sup>。长江水系沉积物轻矿物的  $Q_1FL$  及  $Q_mFL$  三角图解显示(图 4),干、支流样品主要位于再旋回造山带物源区,反映出长江沉积物物源具多旋回性特征。长江流域主要位于扬子克拉通地块上,中、新生代构造复杂,流域源岩也非常复杂,没有哪一种岩石可以作为流域源岩的代表。岩石类型从太古代变质岩、古生代碳酸盐岩和碎屑岩、中生代岩浆岩和碎屑岩以及第四纪松散沉积物都有分布,而且在不同流域,岩石的类型差异明显<sup>[15]</sup>。长江流域岩石分布图显示(图 3),长江上游

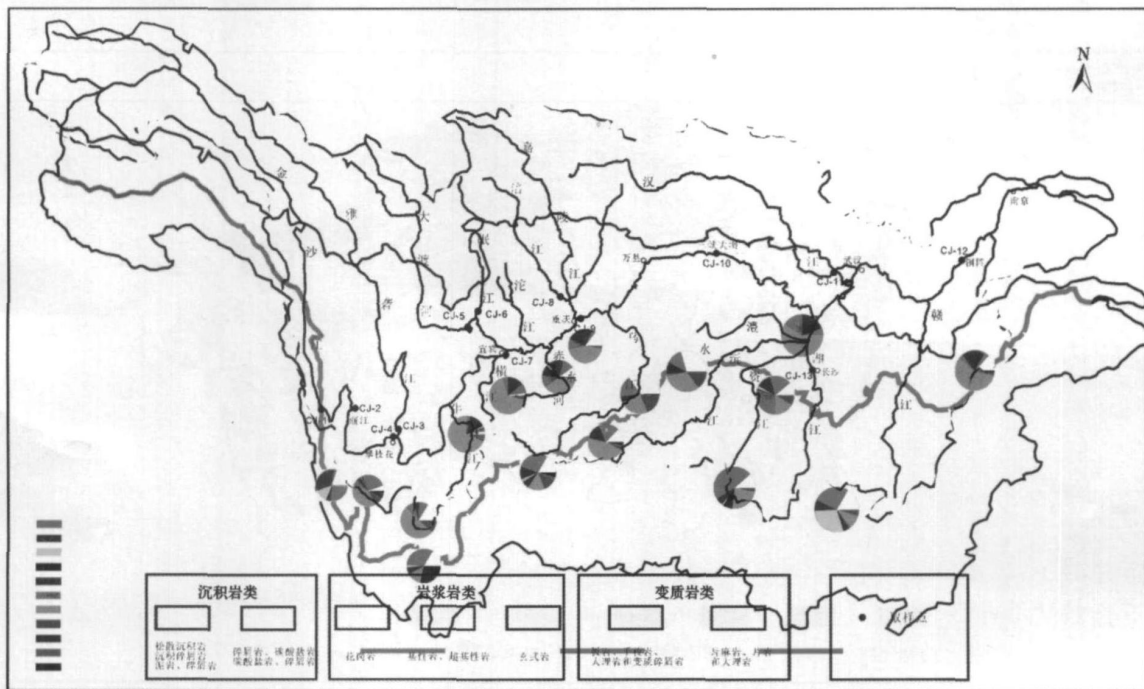


图 3 长江流域岩石分布图(据文献 13 修改)

Fig 3 Distribution of rocks of the Changjiang drainage basin

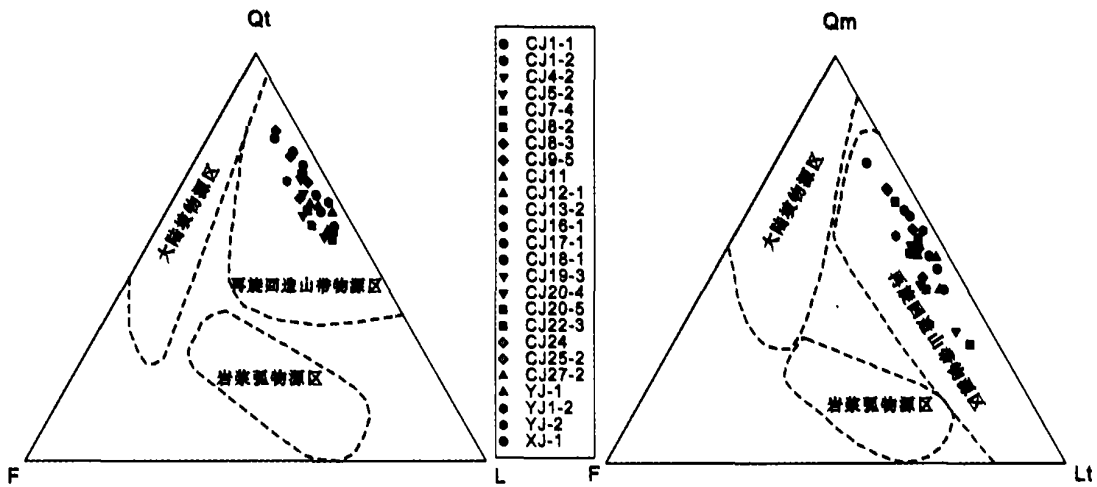


图 4 轻矿物的 QFL 图解(据 Dickinson 和 Sucek 1979)

Fig 4 The QFL diagrams of the light minerals of the Changjiang sediments( after Dickinson and Sucek 1979)

岩石类型有青藏高原地区的第四系沉积物,云贵高原及四川盆地的碳酸岩,三叠纪的紫砂页岩,川西花岗岩、基性岩浆岩及川西、青南的绿片岩相至角闪石相变质岩,以及松藩—甘孜岩区、盐源—丽江岩区、攀西岩区和贵州岩区的峨眉山玄武岩。长江中下游以碎屑岩以及中酸性岩浆岩分布最广泛,中生代岩浆岩沿江分布,中、低变质岩零星出露。而火山岩主要分布于沿江及其两侧的中生代断陷盆地中<sup>[16]</sup>。长江水系非常发育,拥有雅砻江、大渡河、岷江、嘉陵江及汉江等众多支流,这些主要支流的流域面积非常广大;长江流域所在的扬子准地台四周围绕着三江褶皱系、松潘—甘孜褶皱系、秦岭褶皱系和华南褶皱系等活性强的活跃造山带<sup>[17]</sup>;流域大部分处于亚热带季风气候区,强烈的构造隆升背景下流域风化剥蚀速度较快。因此沉积物来源多变,不同支流的流域物质汇入干流,使得长江沉积物的矿物组成具有明显复杂性和多旋回特征。

### 3.2 重矿物特征指数分析

重矿物组合和丰度在搬运沉积过程中往往受到多种因素的影响,如物理分选、机械磨蚀、化学溶蚀等,这些都影响着物源判别的准确性。Morton 和 Hallsworth 认为水动力条件是影响物源的主要因素之一,而在相似的水动力作用下,稳定重矿物的比值能够更好的反映物源特征,这些比值被称作重矿物的特征指数<sup>[11]</sup>,包括 ATi 指数、GZi 指数和 ZTR 指数等。计算方法如下:

$$GZi \text{ 指数} = \frac{100 \times \text{石榴子石}}{\text{石榴子石} \% + \text{锆石} \%}$$

$$ZTR \text{ 指数} = (\text{锆石} \% + \text{电气石} \% + \text{金红石} \%)$$

其中 ATi 指数和 GZi 指数数值特征反映出来的信息可以分别揭示沉积物中磷灰石的风化程度及石榴子石的稳定性<sup>[18]</sup>。如果风化作用很弱,则 ATi 数值的变化主要反映沉积物物源的变化<sup>[19]</sup>;GZi 的变化反映含有石榴子石的母岩组成,主要是角闪岩和麻粒岩的变化<sup>[20]</sup>。而 ZTR 指数则代表重矿物的成熟度,ZTR 指数愈大,矿物的成熟度指数愈高,系统的研究可以指示沉积物的搬运距离和物源方向<sup>[21, 22]</sup>。

长江水系沉积物的重矿物特征指数如表 3 所示。多数样品的 ATi 指数为零,说明沉积物源岩成分不含磷灰石或磷灰石经历强烈风化<sup>[23]</sup>,可以看出由于磷灰石的含量分布非常不均,ATi 指数的单独指示意义并不显著,这显然同长江流域大、水系源岩组成复杂有关。GZi 指数数值主要集中在 60~100 之间,而长江只有湘江和沅江近于零,反映出湘江和沅江流域含石榴子石的源岩缺乏,该流域的源岩组成主要为碳酸盐岩、碎屑岩类沉积岩及板岩、千枚岩类变质岩。ZTR 指数除个别样品高外,其它样品皆低于 5。与轻矿物的成熟度指数变化不同,长江流域沉积物的重矿物成熟度很低,也不具有明显的变化规律,这说明长江沉积物的来源相当复杂,由于流域风化剥蚀较快,一些支流的沉积物可能没有经过显著的动力分选和长期风化磨蚀。

$$ATi \text{ 指数} = \frac{100 \times \text{磷灰石}}{\text{磷灰石} \% + \text{电气石} \%}$$

表 3 长江水系沉积物的重矿物特征指数

Table 3 Heavy mineral indices of the Changjiang sediments

| 样品     | 地点         | ATi 指数 | GZi 指数 | ZTR 指数 |
|--------|------------|--------|--------|--------|
| CJ1-2  | 丽江石鼓(金沙江)  | 0      | 65     | 15     |
| CJ3-3  | 丽江金安桥(金沙江) | 0      | 85     | 1      |
| CJ4-2  | 攀枝花(雅砻江)   | 0      | 100    | 0      |
| CJ5-2  | 攀枝花(金沙江)   | 100    | 0      | 3      |
| CJ7-4  | 乐山(大渡河)    | 0      | 69     | 4      |
| CJ8    | 乐山(岷江)     | 0      | 100    | 0      |
| CJ9-5  | 宜宾(长江头)    | 0      | 0      | 2      |
| CJ11   | 宜宾(岷江)     | 0      | 75     | 3      |
| CJ12-1 | 宜宾(金沙江)    | 0      | 90     | 0      |
| CJ16-1 | 合川(涪江)     | 63     | 89     | 3      |
| CJ17-1 | 合川(嘉陵江)    | 100    | 95     | 0      |
| CJ18-1 | 重庆(长江)     | 0      | 78     | 1      |
| CJ19-3 | 重庆(嘉陵江)    | 0      | 100    | 0      |
| CJ20-4 | 涪陵(长江)     | 0      | 100    | 0      |
| CJ20-5 | 涪陵(长江)     | 100    | 100    | 0      |
| CJ21-2 | 万州(长江)     | 80     | 100    | 0      |
| CJ22-3 | 三峡大坝(长江)   | 100    | 93     | 2      |
| CJ24   | 仙桃(汉江)     | 77     | 97     | 1      |
| CJ27-2 | 铜陵(长江)     | 40     | 87     | 1      |
| XJ1-1  | 长沙(湘江)     | 0      | 4      | 30     |
| YJ1-1  | 常德(沅江)     | 31     | 0      | 4      |

沉积物矿物的特征指数 ATi 指数与 GZi 指数的相关性图显示(图 5), 长江水系不同流域沉积物存在三种不同类型的母岩, 说明这三类岩石组合控制了整个长江水系沉积物的物质组成。一种母岩的 ATi 指数数值趋近零而 GZi 指数数值介于 60~100 之间变化, 且变化较大, 说明石榴子石的含量相对较高, 而磷

灰石的含量较低, 岩石类型比较单一, 应该是以中—低级变质岩为主要成分, 而 CJ1-2(金沙江—丽江石鼓)、CJ3-3(金沙江—攀枝花)、CJ4-2(雅砻江—攀枝花)、CJ7-4(大渡河—乐山)、CJ8(岷江—乐山)、CJ11(岷江—宜宾)、CJ12-1(金沙江—宜宾)、CJ18-1(长江—重庆)、CJ19-3(嘉陵江—重庆)、CJ20-4(长江—涪陵)等样品, 全部分布在上游地区, 岩石类型主要是沉积岩(松散沉积岩、泥岩、碎屑岩)及攀枝花地区分布的变质岩类(图 3), 表明沉积物母岩经过强烈风化作用, 通过多期风化—搬运—沉积作用, 磷灰石因而含量减少; 一种母岩的 ATi 指数数值与 GZi 指数数值呈明显的正相关关系, 且都集中在 80~100 附近, 表明其母岩应该是岩浆岩和变质岩的混合成分, 如 CJ20-5(长江—涪陵)、CJ16-1(涪江—合川)、CJ17-1(嘉陵江—合川)、CJ21-2(长江—万州)、CJ22-3(长江—三峡大坝)、CJ24(汉江—仙桃)以及 CJ27-2(长江—铜陵)样品, 结合图 3 发现这些样品的取样点主要分布在长江的中、下游干流上, 由于干流近源物质的影响, 母岩既有碎屑岩, 亦有岩浆岩和变质岩, 表明长江干流沉积物主要由嘉陵江及以上河流及汉江物质控制; 最后一种则是 GZi 指数较低接近于零而 ATi 值高, 其物源区母岩含有较多的变质岩类物质, 如 CJ5-2(金沙江—攀枝花)、XJ1-1(湘江—长沙)和 YJ1-1(沅江—常德)样品, 这些样品在岩石类型图上所处流域中变质岩广泛存在, 尤其是板岩、千枚岩、大理岩和变质碎屑岩。

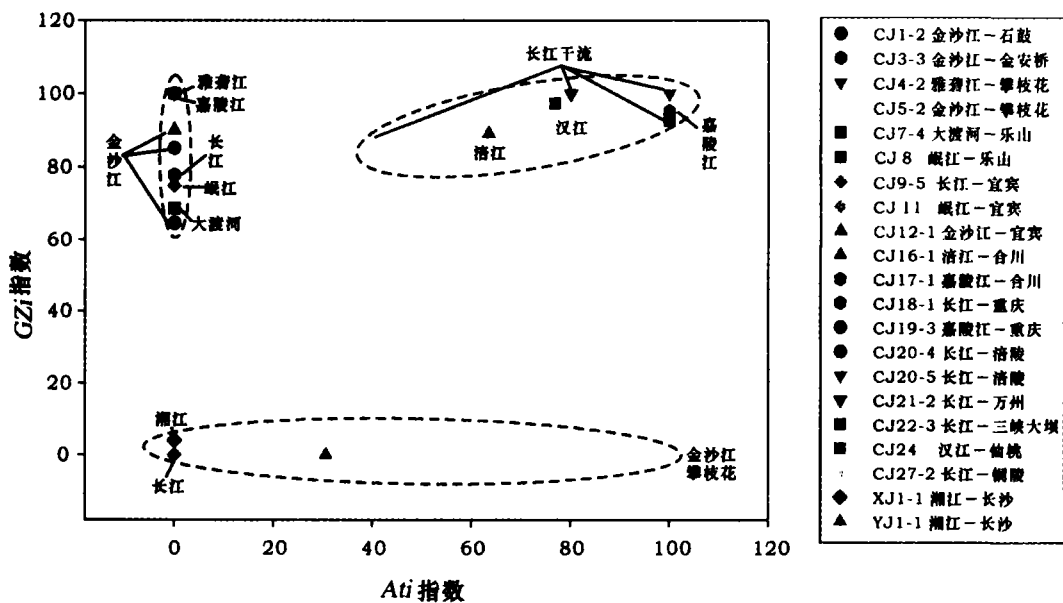


图 5 重矿物的 ATi 指数与 GZi 指数相关性图

Fig. 5 Correlation of ATi with GZi of the heavy minerals

## 4 结论

通过长江水系沉积物碎屑矿物的系统研究,我们得出以下主要认识:

(1) 长江水系沉积物的轻矿物主要是由长石、石英、岩屑组成,其中单晶石英占有优势比例,不同流域矿物特征不同;干流沉积物成分成熟度指数从上游到下游呈现出逐渐增加的趋势。汉江由于其沉积物很大一部分来自上游的黄土地区,且经过充分分选和搬运,岩屑较少,汉江中成熟度指数最高。湘江则是因为上游地区多古生代和中生代的碳酸盐岩,流域风化相对较强,而沉积物成熟度相对较高。轻矿物的三角图解反映出沉积物物源区主要属于再旋回造山带物源区,源区物质剥蚀速度较快,不同支流的流域物质汇入干流,使得长江沉积物的矿物组成具有明显复杂性和多旋回特征。

(2) 宜宾以上长江沉积物中的重矿物含量较高,而中下游的重矿物含量相对较低,多在5%以下。主要重矿物组合是磁铁矿—普通角闪石—普通辉石—石榴子石—绿帘石—褐铁矿—钛铁矿。红柱石和磷灰石是金沙江沉积物的特征矿物组合,蓝晶石是岷江流域的特征矿物,涪江的特征矿物是榍石,汉江的特征矿物组合是磷灰石、紫苏辉石和硅镁石,锆石是湘江的特征矿物。不同流域的特征矿物可以指示其源岩性质及源岩分布。上游的雅砻江、大渡河以及岷江等支流沉积物对中下游干流沉积物的影响很弱。重矿物特征指数相关性表明涪陵以上流域沉积物的经过强烈的风化作用,母岩主要是沉积岩类(碎屑岩、泥岩);其下流域沉积物中近源物质增多,其源岩类型体现为岩浆岩和变质岩类;而金沙江攀枝花地区及湘江、沅江沉积物物源区直接就是流域内分布的大片变质岩类。

致谢 在本文的完成过程中,作者得到了中国海洋大学海洋地球科学学院林振宏教授的悉心指导以及青岛海洋地质研究所王红霞博士和国家海洋局青岛第一研究所王昆山博士在矿物鉴定分析中给予的极大帮助,在此一并致谢。

## 参考文献 (References)

1 程天文,赵楚年. 我国主要河流入海径流量、输沙量及对沿岸的影响. 海洋学报, 1985, 7(4): 460~471 [ Cheng Tianwen, Zhao Chunian. Runoff volumes and sediment discharges of large rivers in China and their influence on the coastal zone. *Acta Oceanologica Sinica*, 1985, 7(4): 460~471 ]

2 林晓彤,李巍然,时振波. 黄河物源碎屑沉积物的重矿物特征. 海洋地质与第四纪地质. 2003, 23(3): 17~21 [ Lin Xiaotong, Li Weiran, Shi Zhenbo. Characteristics of mineralogy in the clastic sediments from the Yellow River Provenance. *China Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, 23(3): 17~21 ]

3 陈丽蓉,栾作峰,郑铁民,等. 渤海沉积物中的矿物组合特征. 海洋与湖沼, 1980, 11(1): 46~64 [ Chen Lirong, Luan Zuofeng, Zhen Tienmin, et al. Mineral assemblages and their distribution patterns in the sediments of the Gulf of Bohai Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1980, 11(1): 46~64 ]

4 陈丽蓉. 东海地质. 北京:科学出版社, 1987. 33~57 [ Chen Lirong. *Geology of East China Sea*. Beijing: Science Press, 1987. 33~57 ]

5 孙白云. 黄河、长江和珠江三角洲沉积物中碎屑矿物的组合特征. 海洋地质与第四纪地质, 1990, 10(3): 23~34 [ Sun Baiyun. Detrital mineral assemblages in the Huanghe, Changjiang and Zhujiang delta sediments. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1990, 10(3): 23~34 ]

6 吕全荣. 长江口细颗粒沉积物的矿物特征和沉积分异. 上海地质, 1992, 43(3): 18~25 [ Lu Quanrong. Mineral characteristics of fine-grain sediment and its sedimentary differentiation in Changjiang Estuary. *Shanghai Geology*, 1992, 43(3): 18~25 ]

7 王腊春,陈晓玲,储同庆. 黄河、长江泥沙特性对比分析. 地理研究, 1997, 16(4): 71~79 [ Wang Lachun, Chen Xiaoling, Chu Tongqing. A contrast analysis on the loads character of the Changjiang River and the Yellow River. *Geographical Research*, 1997, 16(4): 71~79 ]

8 佩蒂庄 F J,波特 P E,西弗 R. 砂和砂岩. 北京:科学出版社, 1977. 35~40 [ Pettijohn F J, Potter P E, Siever R. *Sand and Sandstone*. Beijing: Science Press, 1977. 35~40 ]

9 刘宝善. 沉积岩石学. 北京:地质出版社, 1980. 126 [ Liu Baojun. *Sedimentary Petrology*. Beijing: Geological Publishing House, 1980. 126 ]

10 薛君治,白学让,陈武. 成因矿物学. 武汉:地质出版社, 1986. 23~35 [ Xue Junzhi, Bai Xuerang, Cheng Wu. *Genetic Mineralogy*. Wuhan: China Geology University Press, 1986. 23~35 ]

11 Morton Andrew C, Hallsworth Claire R. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. *Sedimentary Geology*, 1999, 124(1-4): 3~29

12 中国科学院长春地理研究所. 长江水体环境背景值研究图集. 北京:科学出版社, 1998. 6~12 [ Changchun Institute of Geography, CAS. *Atlas of Study on Background Value of Aquatic Environment of the Changjiang River Valley*. Beijing: Science Press, 1998. 6~12 ]

13 Dickinson W R, Suczek C A. Plate tectonics and sandstone compositions. *AAPG Bulletin*, 1979, 63(12): 2164~2182

14 Dickinson W R, Valloni R. Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonics setting. *Geological Science of America Bulletin*, 1983, 94(2): 222~235

15 屈翠辉,郑建勋. 黄河、长江、珠江下游控制站悬浮物的化学成分及其制约因素的研究. 科学通报, 1984, 17: 1063~1066 [ Qu Cuihui and Zhen Jianxun. The study of the composition of suspended



- materials in the lower areas of Huanghe Changjiang, Zhujiang and the restricted factors. Chinese Science Bulletin, 1984, 17: 1063~1066]
- 16 吕新彪, 赵鹏大, 姚书振. 长江中下游地区地质异常与成矿. 地质学报, 1998, 72(3): 260~266 [Lu Xinbiao, Zhao Pengda and Yao Shuzhen. Geological anomaly and mineralization in the middle-lower reaches of the Yangtze River. Acta Geologica Sinica, 1998, 72(3): 260~266]
- 17 夏金梧, 李长安. 长江流域地学研究现状与前沿课题. 人民长江, 2004, 35(2): 1~3 [Xia Jinwu and Li Chang'an. The actuality and hot topics of the earth science research of Changjiang Drainage Basin. Yangtze River, 2004, 35(2): 1~3]
- 18 赵红格, 刘池洋. 物源分析方法和研究进展. 沉积学报, 2003, 21(3): 409~415 [Zhao Hongge and Liu Chiyang. Approaches and prospects of provenance analysis. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(3): 409~415]
- 19 Andrew C Morton and Claire R. Hallsworth. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. Sedimentary Geology, 1999, 124: 3~29
- 20 Morton A and Hurst A. Correlation of sandstones using heavy minerals: an example from the Statfjord Formation of the Snorre Field, northern North Sea. In: Dunay R E, Hailwood E A, eds. Nonbiostratigraphical Methods of Dating and Correlation. Geological Society Special Publication, 1995, 89: 3~22.
- 21 和钟铎, 刘招君, 郭巍. 柴达木盆地北缘大煤沟剖面重矿物分析及其地质意义. 世界地质, 2001, 20(3): 275~281 [He Zhonghua, Liu Zhaojun, Guo Wei. The heavy mineral analysis and its geological significance of Dameigou section in northern Qaidam Basin. World Geology, 2001, 20(3): 275~281]
- 22 陆洁民, 郭召杰, 赵泽辉, 等. 新生代西盆地沉积特征及其与祁连山隆升关系的研究. 高校地质学报, 2004, 10(1): 50~61 [Lu Jiemín, Guo Zhaojie, Zhao Zehui et al. Cenozoic sedimentation characteristics of Juxi Basin and uplift history of Northern Qilian Mountain. Geological Journal of China Universities, 2004, 10(1): 50~61]
- 23 Andrew C Morton and Claire Hallsworth. Identifying provenance: specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones. Sedimentary Geology, 1994, 90: 241~256

## Detrital Mineral Compositions of the Changjiang River Sediments and Their Tracing Implications

WANG Zhong-bo<sup>1,2</sup> YANG Shou-ye<sup>2</sup> LI Ping<sup>2</sup> LI Cong-xian<sup>2</sup> CAI Jin-gong<sup>2</sup>

(1. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao, Shandong 266071;

2. State Key Laboratory for Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092)

**Abstract** The study of the detrital minerals of Changjiang sediments indicates that the light minerals mainly consist of quartz, feldspar and lithic fragment. The light mineral assemblages are different between the tributaries and the mature index increases downstream with an average of 2.0. The diagrams of QFL and  $Q_1FL$  show that the Changjiang sediments are primarily sourced from recycled orogenic provenance due to stronger tectonic erosion and weathering in the river basin. The main assemblages of heavy minerals include magnetite, common hornblende, augite, garnet, epidote, limonite and ilmenite. Among which, andalusite and apatite are characteristic minerals of the Jinshajiang, cyanite is typical in the Minjiang, sphene and zircon abound in the Fujiang and Xiangjiang respectively, while the Hanjiang is relatively rich in apatite, hypersthene and humite. The distributions of characteristic minerals in the tributaries are obviously controlled by source rock types in the drainage basins. The sediments from the Yalongjiang, Daduhe and Minjiang contribute little to the middle-lower Changjiang reaches. The indexes of heavy minerals indicate that the heavy minerals in the river upstream Fuling are mainly provided by sedimentary rocks whereas the river sediments downstream Fuling are mixed by different source rocks with a large contribution from local magmatic and metamorphic rocks. In contrast, the sediments from the Xiangjiang and Yuanjiang are largely provided from low- and medium-grade metamorphic rocks.

**Key words** Changjiang River sediments, provenance, detrital mineral