

# 台湾山溪性小河流碎屑重矿物组成及其示踪意义

邓凯<sup>1,2</sup> 杨守业<sup>2</sup> 王中波<sup>3</sup> 李超<sup>2</sup> 毕磊<sup>1,2</sup> 张永斌<sup>4</sup> 刘祖乾<sup>4</sup>

(1.同济大学海洋与地球科学学院 上海 200092;2.同济大学海洋地质国家重点实验室 上海 200092;  
3.青岛海洋地质研究所 山东青岛 266071;4.台湾中山大学海洋学院 台湾高雄 80424)

**摘要** 台湾山溪性小河流每年向边缘海输入巨量沉积物,对东海陆架的沉积过程产生了显著的影响。本文分析台湾两条典型河流(兰阳溪和浊水溪)沉积物的全粒级碎屑重矿物组成,共鉴定出20种重矿物,但重量百分含量较低,为0.004%~0.116%。兰阳溪的主要重矿物组合为:锆石—菱镁矿—赤褐铁矿—锐钛矿—黄铁矿,浊水溪为:锆石—石榴石—赤褐铁矿—钛铁矿—锐钛矿—白钛石。研究流域的碎屑重矿物组成存在明显的沿程不均一性,指示出多数沉积物主要受到近源影响,从上游至下游重矿物组成的继承性较差。因此,基岩性质是河流碎屑重矿物组成的主要控制因素;兰阳溪和浊水溪的下游地区主要受各自流域内第四纪碎屑沉积物的贡献,上游地区则主要受到中央山脉庐山组的贡献。基岩控制起主导作用也使得重矿物指数如 ATi、GZi 和 ZTR 等难以恰当地应用于台湾山溪性小河流中。并且,大陆东部典型入海河流的重矿物组成与台湾河流存在明显区别:大陆入海河流中主要重矿物为磁铁矿和绿帘石;与之不同的是,兰阳溪河口富集锆石、菱镁矿和黄铁矿,浊水溪河口富集锆石和石榴石。这种差异主要反映了流域内基岩性质的不同。

**关键词** 台湾 浊水溪 兰阳溪 重矿物 物源分析

**第一作者简介** 邓凯 男 1993年出生 博士研究生 海洋科学 E-mail: 103459@tongji.edu.cn

**通讯作者** 王中波 男 副研究员 E-mail: my\_zhongbo@163.com

**中图分类号** P575 **文献标识码** A

## 0 引言

东亚大陆边缘发育全球罕见且异常活跃的河流沉积物输送和沉积体系<sup>[1]</sup>。在新生代地质构造运动、季风气候、台风与人类活动等多因素影响下,我国东部海区形成了两类陆源物质入海的源—汇体系,即以长江、黄河为代表的“大河—大三角洲—宽广陆架—强烈人类活动影响”的源—汇体系,和以台湾与浙闽沿岸小河流为代表的“小河流—瞬时大流量—极端气候影响—快速物质转换”的源—汇体系<sup>[2]</sup>。过去几十年,世界大河如长江、黄河和珠江的水文泥沙、入海物质组成及其对边缘海沉积环境的影响等受到学术界广泛关注;相对而言,对中小入海河流源—汇体系的认识明显不够。其中,台湾河流年均携带悬浮物3.84亿吨(1970—1999年)入海<sup>[3]</sup>,相当于目前我国三条主要大河(长江、黄河与珠江)输沙量的总和。因此,台湾入海河流沉积物的化学组成及其在边缘海的沉积动力过程成为近些年学术界的热点。目前,对台湾河流源—汇体系的研究主要集中在以现

代观测为基础的沉积动力学<sup>[4-6]</sup>、黏土矿物组成<sup>[7-8]</sup>、陆源有机碳<sup>[9-12]</sup>和同位素地球化学组成<sup>[13-14]</sup>等,但矿物学方面的研究十分薄弱。

碎屑重矿物分析是物源示踪的重要手段。由于重矿物种类多样且多具有特殊的共生关系<sup>[15]</sup>,因此利用特征重矿物组合及重矿物指数<sup>[16]</sup>能够较灵敏地确定沉积物源区及性质<sup>[17-18]</sup>。相关研究已在中国大陆河流沉积物(如:长江、黄河、珠江、浙闽中小河流、琼西小河流等)<sup>[19-26]</sup>以及钻孔中开展较多<sup>[27-28]</sup>,用于反映源岩类型及贡献比例、水动力分选、沉积环境以及物源演变等。然而,对于台湾河流沉积物的重矿物组成却鲜有报道。

本文分析了台湾两条典型河流——兰阳溪和浊水溪沉积物的碎屑重矿物组成,研究台湾河流的特征重矿物组合,以及流域内不同地层对碎屑重矿物组成的贡献,揭示台湾河流重矿物组成的控制因素;并与中国大陆入海河流重矿物组合对比,探讨台湾河流碎屑重矿物组成的特殊性及其原因。

# 1 流域概况

## 1.1 流域地质概况

台湾新生代以来的构造演化塑造了现今台湾自西向东的三个大地构造单元:①褶皱—逆冲带(海岸平原、西部麓山带和雪山山脉),为被动大陆边缘沉积体系,6.5 Ma 开始变形;②增生楔(中央山脉—恒春半岛),原为被动大陆边缘沉积体系,中—晚中新世南海洋壳俯冲菲律宾海板块时,在马尼拉海沟东侧堆积形成的增生楔;③弧前盆地—火山岛弧(海岸山脉),形成于中中新世以来。其中,中央山脉和雪山山脉以梨山—荖浓断层为界,海岸山脉和中央山脉被台东纵谷分隔。浊水溪依次流经中央山脉(西侧)、雪山山脉、西部麓山带和海岸平原四个构造单元。兰

阳溪主河道主要位于梨山断层上,两侧分别为雪山山脉和中央山脉(西侧)(图 1a)<sup>[29]</sup>。

兰阳流域内主要存在三类物源供给区:①渐新世水长流组及四棱组的板岩、(变质)砂岩,及部分始—渐新世西村组板岩、千枚岩(雪山山脉北部);②中新世庐山组的板岩、千枚岩及变质砂岩(中央山脉西侧);③第四纪碎屑沉积物(宜兰平原)。

浊水流域的主要地层为:①中新世庐山组的板岩、千枚岩及变质砂岩及始新世毕禄山组的板岩、变质砂岩(中央山脉西侧);②始新世达见组和十八重溪组的板岩、变质砂岩,始—渐新世西村组板岩、千枚岩以及渐新世水长流组及四棱组的板岩、(变质)砂岩(雪山山脉南部);③中—上新世三峡群砂页岩,上一更新世卓兰组、锦水组砂页岩,以及更新世头崙

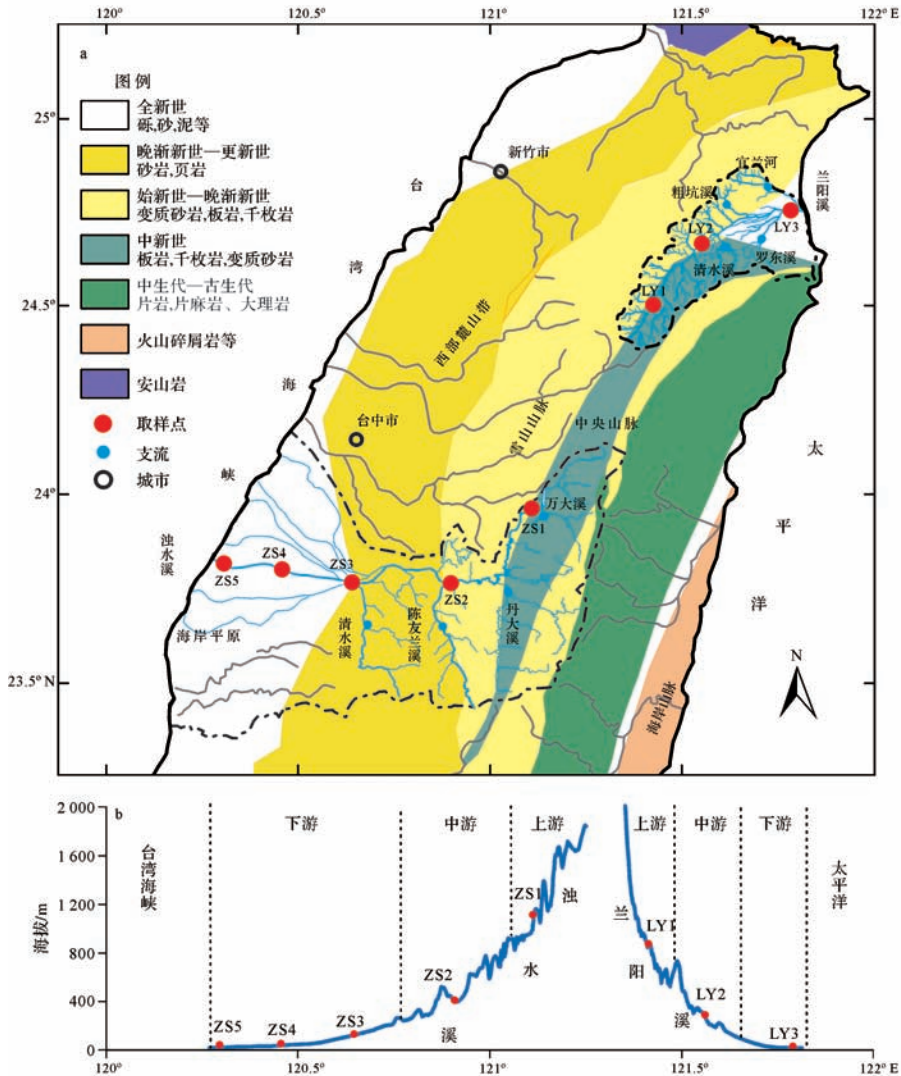


图 1 浊水溪、兰阳流域范围、基岩组成和及沉积物采样站位

Fig.1 A map showing the catchments of the Zhuoshui and Lanyang Rivers with the provenance rock types and localities of sediment samples

山组砂岩、砾岩及页岩(西部麓山带中部);④第四纪碎屑沉积物(海岸平原)<sup>[30]</sup>(表1)。

表1 研究流域构造单元主要地层划分表  
(修改自参考文献[30])

Table 1 The Cenozoic stratigraphy of main tectonic units in the study watersheds

地质时代	海岸平原	西部麓山带	雪山山脉		中央山脉 西侧
			北部	中部和南部	
全新世	碎屑冲积物				
更新世		头嵙山组			
更—上新世		卓兰组			
锦水组					
上新世					
上—中新世		三峡群			
		南港组			
中新世		石底组	苏乐组		庐山组
		大寮组			
中—渐新世		木山组	澳底组		
			水长流组		
渐新世		五指山组	四棱组		
			西村组		
渐—始新世			达见组		
始新世			十八重溪组		毕禄山组

## 1.2 流域水文概况

台湾岛地形以山地丘陵为主,约占总面积的2/3。中部和东部为山地,西部沿海是较宽广平原。中央山脉作为贯穿全岛的分水岭,将全岛分为不对称的两半。台湾年均降雨量为2 535 mm,且自中部山地向两边递减。夏秋两季为降雨主要贡献时段,但岛内东西两侧降水的季节性差异很大,东部地区秋季降水量大于夏季,而西部相反。台湾河流共有151条,多发源于中央山脉<sup>[31]</sup>。兰阳溪和浊水溪分别向东汇入太平洋和向西汇入台湾海峡(图1)。

浊水溪是台湾最长的河流,长度约186 km,流域面积约为3 155 km<sup>2</sup>,平均比降为1:55,年平均径流量(集集站)为145 m<sup>3</sup>/s。浊水溪发源于合欢山南麓,源头海拔约为3 416 m,沿途接纳万大溪、郡大溪、丹大溪、陈友兰溪和清水溪等支流,最终穿过海岸平原进入台湾海峡。兰阳溪又称为宜兰浊水溪,长约73 km,流域面积约为979 km<sup>2</sup>,平均比降为1:22,年平均径流量(牛斗站)为36.7 m<sup>3</sup>/s。兰阳溪发源于中央山脉南湖大山北麓,源头海拔为3 535 m,在牛斗附近进入兰阳平原,与宜兰河和冬山河汇合后进入太平洋。浊水溪和兰阳溪输沙量都很大,其原因主要有:河流上游以板岩和页岩为主,易风化剥蚀;山区植被

被开垦,地表裸露;地震频繁,易山体滑坡;河流坡度陡,原岩侵蚀能力强,并且到台风暴雨来临时,洪水也携带大量碎屑物质<sup>[31]</sup>。

## 2 样品来源与分析方法

沉积物样品于2013年5月(枯水季)采自台湾兰阳溪和浊水溪的河漫滩,共8个取样点,涵盖了两条河流的上、中、下游,分别编号为LY1~LY3和ZS1~ZS5(图1、表2)。

沉积物的粒度测试步骤为:取0.15 g已烘干样品,置于烧杯中,加入10 mL 30%的双氧水,60°C保温8~10 h,以去除样品中的有机质;加入10 mL 1 mol/L的HCl,以去除样品中的无机碳,60°C保温3 h;向烧杯中加入1 L去离子水,静置24 h,倒掉上清液;加入10 mL (NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>分散剂,超声振荡3~5 min;利用美国Beckman Coulter LS230型全自动激光粒度仪进行粒度测试。测试仪器测量范围为0.04~2 000 μm,重复测量的相对误差小于1%。实验在同济大学海洋地质国家重点实验室完成。

并且,沉积物在全粒级内挑选重矿物,具体分离步骤为:将所取砂样烘干称重,所得重量为分析重量;用水对样品进行淘洗并晾干,再利用三溴甲烷(密度2.89 g/cm<sup>3</sup>)进行轻、重矿物分离;对于重矿物部分,用强磁铁选出强磁部分,剩余的用电磁仪选出电磁部分(强、弱)和重无磁部分,分别包装。然后利用体式显微镜、偏光显微镜和微化分析等对分离好的重无磁、电磁(强电磁、弱电磁)、强磁三种组分分别进行定性及半定量鉴定:将某一组分的颗粒平摊在玻璃板上,划分4~5个视域,每个视域100~150粒左右,分别数出各种矿物的颗粒数并求视域间的平均值,可获得各种重矿物的颗粒百分含量;然后再乘上各自组分的权重(组分重量/重矿物总重量)得到每种矿物占所有重矿物的颗粒百分数。重矿物分析鉴定由廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司按照规定要求完成。

## 3 沉积物粒度分布及重矿物组成特征

### 3.1 沉积物粒度分布

兰阳溪和浊水溪沉积物粒度频率分布曲线见图2。研究流域沉积物多为粉砂,其中兰阳溪各样品平均粒径为2~4.6 φ,浊水溪平均粒径为3.9~6.8 φ。兰阳溪上游粒度频率分布为单峰态且较粗,属于中砂(2 φ),而中下游粒度频率分布均为双峰态,平均粒

表2 台湾浊水溪和兰阳溪沉积物样品的重矿物组成

Table 2 Heavy mineral types and contents of sediment samples from the Zhuoshui and Lanyang Rivers

样品编号	LY1	LY2	LY3	ZS1	ZS2	ZS3	ZS4	ZS5
经度 (°E)	121.423 4	121.545 8	121.780 2	121.114 1	120.913 5	120.646 2	120.466 0	120.289 1
纬度 (°N)	24.485 4	24.625 9	24.716 8	23.973 3	23.792 6	23.787 1	23.808 5	23.834 3
重矿物重量百分含量 (%)	0.040	0.057	0.004	0.116	0.061	0.044	0.039	0.049
锆石 (Zr)	6.0	9.0	21.5	0.0	6.9	13.4	38.5	32.1
石榴石 (Ga)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	15.1	14.0
角闪石 (Hb)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.1
辉石 (Px)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	0.0	0.0
电气石 (Tur)	0.2	1.7	0.0	0.0	0.2	3.8	1.1	2.3
绿帘石 (Ep)	6.6	1.4	0.0	0.0	0.1	0.6	0.0	0.5
菱镁矿 (Do)	0.8	4.8	6.5	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0
磷灰石 (Ap)	1.0	0.1	0.0	0.0	1.0	3.0	0.9	1.4
独居石 (Mnz)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1
重晶石 (Brt)	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
赤褐铁矿 (Lm)	0.0	17.8	9.4	8.7	13.1	9.5	4.0	17.7
磁铁矿 (Mt)	0.0	0.0	0.0	1.2	23.7	1.3	1.0	1.6
钛铁矿 (Ilm)	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	1.3	11.9	3.8
金红石 (Rt)	0.6	0.7	3.2	0.0	0.5	1.3	6.3	3.2
锐钛矿 (Ant)	2.2	1.7	7.4	0.0	1.4	4.0	8.6	5.9
白钛石	2.0	4.6	2.6	0.0	1.2	7.1	5.9	7.0
铬尖晶石 (Chr)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	4.0	3.4
黄铁矿 (Py)	39.3	0.8	32.7	68.3	33.1	1.1	0.6	0.9
方铅矿 (Gn)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0
闪锌矿 (Sp)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
其他矿物 *	41.3	57.4	16.3	21.5	17.8	45.6	1.6	6.3

\* 其他: 蚀变矿物、石英、长石和碳酸盐等。

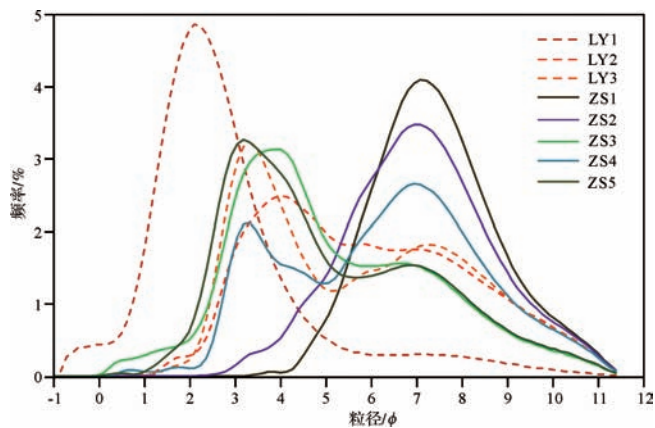


图2 浊水溪和兰阳溪沉积物粒度频率分布曲线

Fig.2 Grain-size frequency of sediment samples from the Zhuoshui and Lanyang Rivers

径减小为  $4.6 \phi$  (LY2) 和  $4.4 \phi$  (LY3)。

浊水溪上游 (ZS1) 和中游 (ZS2) 的粒度频率曲线都为单峰态,属于细粉砂,平均粒径分别为  $6.8 \phi$  和  $6.2 \phi$ 。下游样品粒度频率分布与上游明显不同,为双峰态,且主峰粒径较粗,为极细砂 ( $3 \sim 4 \phi$ ),次级峰粒径约为细粉砂 ( $6 \sim 7.5 \phi$ )。进入平原地区后水流变

缓,ZS4 平均粒径减为  $4.8 \phi$ ,虽然仍是双峰态,但主峰和次级峰的粒径发生反转。之后 ZS5 平均粒径变粗为  $3.9 \phi$ 。总体而言,浊水溪沉积物的粒径向下游逐渐增大,而兰阳溪向下游先减小后增大。

### 3.2 重矿物组成

传统的重矿物分析一般会挑选特定粒级进行测试,比如:  $63 \sim 125 \mu\text{m}$ 、 $125 \sim 250 \mu\text{m}$  或  $63 \sim 250 \mu\text{m}$  等,以减小粒径效应或水动力效应等因素的影响<sup>[32-33]</sup>。但事实上,若考虑等效沉降效应的影响,同一样品内不同粒级的重矿物组成同样存在明显差别,且窄粒径区间的样品间矿物组成变化甚至会大于宽粒径区间<sup>[34-35]</sup>。并且比重比较大的重矿物相对集中于细粒级组分,常规的粒级选取区间也会使得这些矿物含量被明显低估。因此,特定的窄粒级选取策略对于解决矿物组分的粒径影响以及水动力环境偏差问题并没有很大帮助<sup>[35]</sup>。最近一些学者建议,为了尽量减小样品内粒级选取差异引起的偏差,沉积物的分析粒径范围应当尽可能宽(比如  $32 \sim 500 \mu\text{m}$ <sup>[36]</sup>)。又考虑到本研究沉积物的粒度主峰大多  $< 32 \mu\text{m}$  ( $5 \phi$ ),若采用以上提到的特定粒级策略将会筛除相当

一部分重矿物信息。因此本研究采取了全样分析,可能能够更有效地消除样品内粒级选取差异引起的偏差。

研究流域沉积物的碎屑重矿物鉴定结果见表2。为了便于对比,我们选取主要重矿物绘制颗粒百分含量饼状图(图3)。由于沉积物在全粒级范围挑选重矿物,因此重矿物的重量百分含量较低:浊水溪变化范围在 0.039% ~ 0.116%, 兰阳溪为 0.004% ~ 0.040%。整体上,重矿物含量由上游到下游逐渐降低。沉积物中共鉴定出 20 种重矿物,包括:锆石、石榴石、角闪石、辉石、电气石、绿帘石、菱镁矿、磷灰石、独居石、重晶石、赤褐铁矿、磁铁矿、钛铁矿、金红石、锐钛矿、白钛石、铬尖晶石、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿等。

锆石主要为极浅粉色半自形一次圆粒状,少数为紫色。在两条河流中,含量分布总体为上游含量低、下游含量高。金红石主要为褐红色、黑色的次棱角一次滚圆柱(粒)状;锐钛矿主要为灰色、蓝色、褐色、黄色的次棱角一次滚圆粒状。在浊水溪流域,以上两种矿物的百分含量总体向下游逐渐增大;而兰阳溪流域这种规律则不明显。绿帘石以黄绿色的柱状一次棱角粒状为主,主要出现在兰阳溪上游地区(LY1:

6.6%)。石榴石主要为浅粉色、枚红色的棱角一次棱角块(粒)状;铬尖晶石主要为黑色、黑红色的棱角一次棱角块(粒)状。两种矿物几乎只出现在浊水溪下游及冲积扇中,且都是冲积扇中含量较高。

赤褐铁矿在流域上、中游地区主要为褐红色、黑色滚圆粒状,而在下游(ZS3 和 LY3)都以褐红色,次棱角一次滚圆状为主。黄铁矿在上游呈现铜黄色,次棱角状,且存在少数立方体块状;而下游主要为圆球粒状一次滚圆粒状,表面多因氧化而显假红色。黄铁矿在兰阳溪的上、下游及浊水溪上、中游相对富集。磁铁矿为黑色或褐红色的棱角一次棱角块(粒)状,主要见于浊水溪流域,粒度从上游至下游逐渐变细(100~250 μm 至 30~100 μm)。磁铁矿含量高值出现在浊水溪中游(ZS2 含量 23.7%),其余样品中含量较低(<2.0%)。钛铁矿为黑色棱角一次棱角粒状,主要见于浊水溪流域,粒度从上游至下游逐渐变细(100~200 μm 至 30~80 μm)。钛铁矿在冲积扇的两个样品(ZS4 和 ZS5,分别为 11.9%和 3.7%)中相对富集,而其余样品中含量较低(<2.0%)。菱镁矿以桔黄色的棱角一次棱角块(粒)状为主,主要见于兰阳溪样品中,且中下游地区较多。

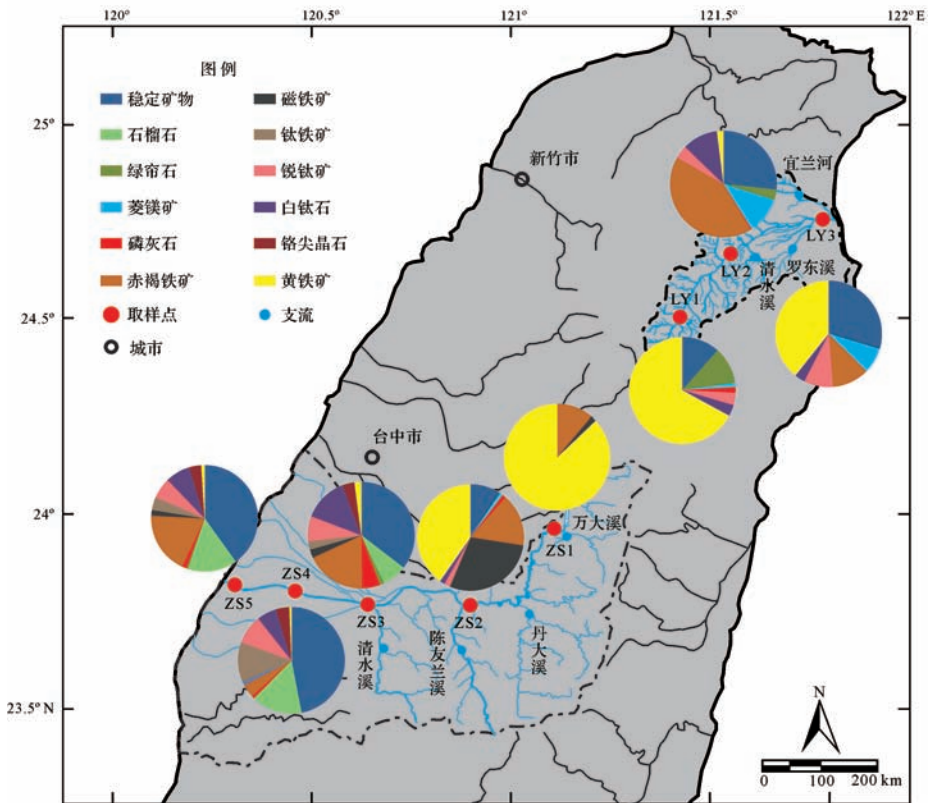


图3 浊水溪和兰阳溪碎屑重矿物组成百分含量(稳定矿物包含:锆石、金红石和电气石)

Fig.3 Distributions of heavy mineral contents in the sediments from Zhuoshui and Lanyang Rivers

兰阳溪和浊水溪主要重矿物组合存在明显的不均一性。兰阳溪上游(LY1)的主要重矿物组合为锆石—绿帘石—黄铁矿;中游(LY2)为锆石—菱镁矿—赤褐铁矿—白钛石;下游(LY3)为锆石—菱镁矿—赤褐铁矿—锐钛矿—黄铁矿。其中,菱镁矿和绿帘石可以作为兰阳溪河流沉积物的特征矿物。

浊水溪上游(ZS1)的主要重矿物组合为黄铁矿—赤褐铁矿—磁铁矿;中游(ZS2)为锆石—赤褐铁矿—磁铁矿—黄铁矿;下游(ZS3、ZS4、ZS5)为锆石—石榴石—赤褐铁矿—钛铁矿—锐钛矿—白钛石。磁铁矿、钛铁矿、石榴石和铬尖晶石可以作为浊水溪河流沉积物的特征矿物。

## 4 讨论

浊水溪沉积物的粒度向下游逐渐增大,而兰阳溪向下游先减小后增大。导致这种变化的原因可能是水动力因素或邻近物源的贡献。碎屑重矿物组成上,兰阳溪主要为锆石—菱镁矿—赤褐铁矿—锐钛矿—黄铁矿,浊水溪主要为锆石—石榴石—赤褐铁矿—锐钛矿—白钛石。总体上,研究流域沉积物的重矿物组成与台湾周边陆架沉积物存在差异,尤其在一些透明重矿物如角闪石、绿帘石和辉石等的相对含量上<sup>[37-38]</sup>,陆架沉积物明显更高,这与沉积物源区的岩性特征有关。对于陆架沉积物而言,角闪石及辉石作为火成岩中常见重矿物,主要来源于澎湖列岛和台湾北部大屯—基隆火山群;绿帘石属于变质矿物,主要来源于中央山脉的变质岩层<sup>[38]</sup>。而研究流域主要岩性为沉积岩,未涵盖大屯—基隆火山群,因此角闪石和辉石较少出现;只涵盖少量低变质岩层,因此绿帘石只出现在少数样品中。

### 4.1 重矿物组成的物源指示意义

研究流域的碎屑重矿物组成存在明显的沿程不均一性,这与流域内源岩的差异和沉积动力环境密切相关。而特征重矿物含量的变化规律对物源和水动力变化有着较好的指示意义。

锆石由于具有较好的抗风化、抗磨蚀和抗热蚀变能力,在沉积循环中不易被破坏<sup>[39]</sup>,因此在台湾(变质)沉积岩中十分常见。大体上,锆石在两条河流中的分布为上游含量低、下游含量高,这可能是水动力筛选或是不同物源混合的结果。绿帘石主要出现在兰阳溪上游地区,推断主要源自雪山山脉北部变质岩如硬绿泥石岩等<sup>[40]</sup>的贡献。石榴石和铬尖晶石几乎只出现在浊水溪下游及冲积扇中,且都是冲积扇中

含量较高,说明第四纪碎屑沉积物是两者的主要供给区。推测这两者可能形成于台湾的变质超基性岩中,但难以确定源岩的具体地区。

菱镁矿主要见于兰阳溪中下游地区,由于流域中游清水溪有白云岩的报道<sup>[40]</sup>,可能是菱镁矿富集的原因。磁铁矿主要出现在浊水溪中游,可能来自雪山山脉南部始新世地层及中央山脉西侧始新世毕禄山组。赤褐铁矿在研究流域下游的磨圆程度较上、中游变差,说明与近源物质影响有关。钛铁矿在浊水溪冲积扇样品中相对富集,指示海岸平原第四纪碎屑沉积物的贡献。黄铁矿主要富集于四个样品(LY1、LY3、ZS1、ZS2)中,它们都处于中央山脉西侧庐山层或者邻近地区有支流流经庐山层。这与黄铁矿广泛存在于中央山脉西侧麓山带的区域地调相吻合<sup>[40]</sup>。因此,这些沉积物中的黄铁矿可能主要来自庐山层。尽管兰阳溪上游和下游黄铁矿较高,但LY2中几乎未见,原因可能与兰阳溪自上而下的继承性较差有关。3~5月份台湾主要受西南季风影响,东部河流径流量普遍减小,尤其是兰阳溪,在5月径流量为全年最低<sup>[31]</sup>。所以兰阳溪沉积物的重矿物组成可能更多反映邻近岩层或支流的贡献,来自上游的信号较弱。而LY2由于采于兰阳溪雪山山脉段,主要受到雪山山脉北部上游支流的贡献。黄铁矿较易风化,却常见于台湾河流沉积物中,也反映台湾以物理风化为主,而化学风化并未导致黄铁矿完全溶解<sup>[41]</sup>。

根据兰阳溪流域的主要地层和基岩特征,上游沉积物(LY1)主要受到中央山脉西侧庐山层以及雪山山脉北部物质的供给,黄铁矿含量高,同时有少量绿帘石的出现;中游地区(LY2)的重矿物组成与上游明显不同,主要反映邻近物源,即雪山山脉北部渐新世地层的贡献;下游地区(LY3)重矿物主要为宜兰平原及中央山脉西侧庐山层的贡献,前者导致稳定矿物锆石和金红石的含量增多,后者使得黄铁矿及菱镁矿含量增多。

浊水溪流域内,上游(ZS1)干流及主要支流(万大溪)都处于中央山脉西侧庐山层,是浊水溪上游的主要物源区,也是黄铁矿含量很高的原因。中游(ZS2)沉积物在继承部分上游物质的同时,还受到丹大溪(主要流经中新世庐山层以及始新世毕禄山组)的汇入以及雪山山脉南部始新世地层物质供给。因此,ZS2中黄铁矿含量仍然较高,且始新世地层的贡献使得磁铁矿突然增多。浊水溪下游(ZS3)的重矿物组成和上、中游明显不同,尤其是磁铁矿及黄铁矿

含量迅速减小。上、中游沉积物为细粒级单峰态曲线(图2),而下游为双峰态曲线且主峰粒径较粗(3~4 $\phi$ ),说明ZS3的重矿物组成更多受到邻近支流如清水溪、陈友兰溪(主要流经西部麓山带中部中—上新世地层以及海岸平原第四纪碎屑沉积物)的影响,导致上游的重矿物信号被迅速掩盖,石榴子石和铬尖晶石出现、赤褐铁矿磨圆度变差以及锆石相对百分含量增高。而当浊水溪流入冲积扇地区,重矿物的含量变化则主要受到海岸平原第四纪碎屑沉积物供给的影响,使锆石、石榴石及铬尖晶石等含量进一步增高。ZS5处于河口地区,可能还受到海洋动力因素影响,重矿物组成与ZS4存在差异。

综上所述,研究流域大多数沉积物主要受到近源影响,且不同源岩对碎屑重矿物组成的贡献存在差异。最主要的源区包括第四纪碎屑沉积物和中央山脉西侧庐山组,前者是影响研究流域下游重矿物组成的主要因素,后者则主要影响上游地区。

#### 4.2 重矿物特征指数分析与控制因素

在相似的水动力条件下,稳定重矿物的比值能够很好地反映沉积物的物源特征,这些比值被称为重矿物特征指数<sup>[16]</sup>,较常用的有ATi指数、GZi指数和ZTR指数。ATi指数=100×磷灰石%/(磷灰石%+电气石%),它属于物源敏感指标,但在沉积旋回的不同阶段,也会受到风化的影响<sup>[15]</sup>;GZi指数=100×石榴石%/(石榴石%+锆石%),指示含有石榴石母岩(高级变质岩)的分布区域<sup>[15]</sup>;ZTR指数=锆石%+电气石%+金红石%,主要反映物源以及水动力的分选磨蚀作用<sup>[42]</sup>。

重矿物特征指数已被用于中国多个大河流域(长江、黄河和珠江等)的物源示踪研究中<sup>[19-21]</sup>,而对

于台湾河流这类山溪性小河流研究较少。下面将探究这些指数能否指示浊水溪和兰阳溪的水动力环境和物源特征(图4)。

(1) ATi指数。兰阳河流域ATi指数变化较大,由上游至下游指数值自87逐渐减为0;浊水溪上游ATi指数为0,相较于中下游差别较大,可能指示浊水溪上游源岩缺少磷灰石;而中游至下游ATi指数呈下降趋势,从83变化至38。但整体而言,流域内ATi指数并无明显变化规律。考虑到台湾隆升剥蚀作用强烈<sup>[41]</sup>且河道短小,因此ATi指数更多地反映沉积物物源的变化<sup>[15]</sup>,而非风化和搬运过程中磨蚀的影响。

(2) GZi指数。该指数仅于浊水溪下游地区存在非零值,范围为23~38。下游地区源岩主要为第四纪碎屑沉积物和新近纪、古近纪碎屑沉积岩,因此石榴石可能并非形成于下游地区岩层,而是搬运自其他地区的变质超基性岩。所以对台湾河流而言,GZi指数并不能用于指示中高级变质岩的分布范围。

(3) ZTR指数。ZTR最早用于盆地物源分析中<sup>[15,42]</sup>,是指锆石、电气石和金红石占透明碎屑重矿物的百分含量,即ZTR<sub>1</sub>,反映物源变化和成岩作用的影响;而后该指数又常被应用于河流沉积物中,指锆石、电气石和金红石占总碎屑重矿物的百分含量<sup>[19-20]</sup>,即ZTR<sub>2</sub>,主要反映物源变化和水动力分选磨蚀的影响。在研究流域中,ZTR<sub>1</sub>的变化范围为36~100,ZTR<sub>2</sub>为0~46。从上游至下游,ZTR<sub>1</sub>在浊水溪流域呈现减小的趋势,在兰阳溪呈现增大的趋势;而ZTR<sub>2</sub>在两条河流中皆呈现逐渐增大的趋势。ZTR<sub>2</sub>指数向下游逐渐增大,说明沉积物的重矿物成熟度向下游逐渐增大。但考虑到台湾河流短小且坡陡(图1b),

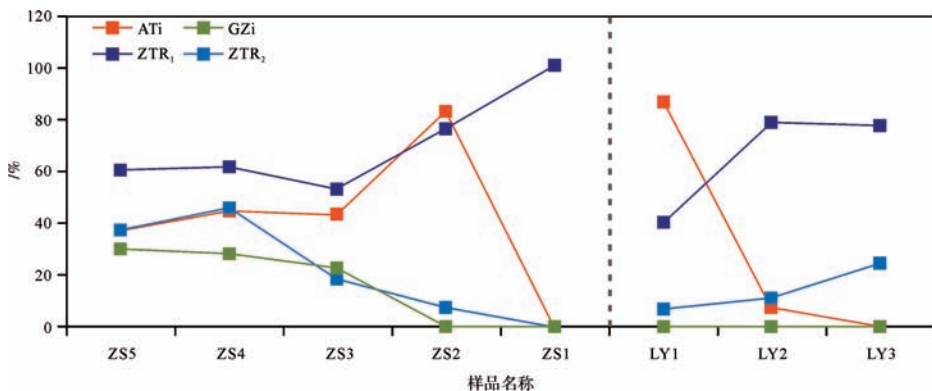


图4 浊水溪和兰阳溪的碎屑重矿物特征指数沿程变化

(ZTR<sub>1</sub>为锆石、电气石和金红石占透明重矿物的百分含量<sup>[15,42]</sup>;ZTR<sub>2</sub>为锆石、电气石和金红石占总重矿物的百分含量<sup>[19-20]</sup>)

Fig.4 Downstream changes of heavy mineral indices in the sediments from Zhuoshui and Lanyang Rivers

水动力分选作用较弱,并且沉积物多受到邻近物源的强烈影响,因此干流  $ZTR_2$  变化可能是受到指数值较高的下游支流沉积物供应的影响。此外,通过和长江<sup>[19]</sup>、黄河<sup>[20]</sup>等大河(干流  $ZTR_2$  数值多小于5)对比,发现台湾河流  $ZTR_2$  普遍高于大陆大河系统,这与流域的源岩差异存在一定关联。研究流域的基岩主要为经历再旋回搬运的沉积岩,物源区为华夏板块甚至扬子板块<sup>[43-45]</sup>,因此基岩  $ZTR_2$  指数应当较高。 $ZTR_1$  的波动也能较好地体现源岩的重矿物组成情况。尤其在浊水河流域,岩层存在向上游明显偏老的趋势(图1a),因此源岩中重矿物的溶解程度向上游逐渐加强,稳定重矿物如:锆石、电气石和金红石则相对更多地被保存<sup>[46]</sup>,  $ZTR_1$  指数偏高。所以在浊水河流域中,上游沉积物  $ZTR_1$  指数高,向下游逐渐降低。而  $ZTR_1$  和  $ZTR_2$  的波动差异,主要受到流域源岩中不透明重矿物含量变化的控制。所以,在源岩重矿物组成较为复杂的流域,两种  $ZTR$  指数都难以反映沉积物搬运距离的远近。

总之,由于台湾的物理风化明显强于化学风化,并且研究流域大多数沉积物受到近源的强烈影响,重矿物组成的主要影响因素为基岩组成而非化学风化以及水动力分选作用。因此,在台湾的山溪性小河流中,重矿物指数主要直接反映物源区的特征,而难以指示化学风化或沉积动力环境。

#### 4.3 中国典型入海河流的碎屑重矿物组成差异

台湾河流与中国大陆典型入海河流(长江、黄河及浙闽小河流)在地质背景或是水动力环境上存在

明显差别,通过对比不同入海河流的重矿物组成,不仅可以了解各类控制因素对重矿物组成的影响,而且对中国边缘海沉积的源—汇过程研究具有一定的参考价值。

台湾河流的主要重矿物组合和大陆河流存在着明显差异(表3)。大陆入海河流的典型重矿物为磁铁矿和绿帘石,分别代表着岩浆岩源区和低级变质岩源区,可见基岩对重矿物组成的控制作用。除此之外,较为常见的矿物还包括角闪石、黑云母、钛铁矿等。

而在台湾浊水溪和兰阳河流域,锆石作为最常见的重矿物,几乎在整个研究流域广泛存在。同时,浊水溪河口沉积物中石榴石的富集,兰阳溪河口菱铁矿和黄铁矿的富集,都与大陆入海河流存在明显差异。造成这种差异的主要原因与基岩组成有关。浊水溪和兰阳溪流域内基本为新近纪、古近纪碎屑沉积岩和第四纪碎屑沉积物,以及少量低级变质岩和白云岩。沉积岩所代表的物源多旋回性使得其中的稳定矿物锆石含量较多;又由于台湾化学风化较弱<sup>[41]</sup>、河流短小且沉积物搬运迅速,因此黄铁矿及菱铁矿等不稳定矿物才能够在河流搬运过程中保存下来;而大陆河流的碎屑重矿物组成除了受物源控制外,水动力分选也是重要的影响因素,将改变不同密度重矿物间的比例<sup>[20]</sup>。为了进一步区分台湾山溪性小河流与大陆大河系统的重矿物组成差异,选取两类河流系统中较为常见的三种重矿物端元(绿帘石、磁性矿物和锆石—电气石—金红石)绘制 Ep-Mm-ZTR 三角图(图5)。

表3 中国典型入海河流重矿物组成特征

Table 3 Heavy mineral assemblages of Chinese rivers into the sea

流域	具体分区	主要重矿物组合	分析粒径	参考文献
长江	中、下游	角闪石—绿帘石—磁铁矿	63~125 μm	[19]
黄河	河道	黑云母—角闪石—绿帘石	63~125 μm	[47]
钱塘江	河口	黑云母—绿帘石—绿帘石—角闪石	>63 μm	[22]
甬江	河口	绿帘石—普通角闪石—磁铁矿—绿帘石		
椒江	河口	绿帘石—普通角闪石—锆石—磁铁矿		
瓯江	河口	绿帘石—普通角闪石—磁铁矿—钛铁矿—赤铁矿—褐铁矿		
飞云江	河口			
鳌江	河口			
九龙江	河口	磁铁矿—赤铁矿—绿帘石—钛铁矿—褐铁矿	63~125 μm	[24]
闽江	河口	磁铁矿—绿帘石—赤铁矿—角闪石—钛铁矿	125~250 μm	[23]
珠江	西江上游	磁铁矿—钛铁矿—锆石—白钛石—磷灰石	63~270 μm	[21]
	西江中下游	钛铁矿—磁铁矿—锆石—电气石—白钛石—绿帘石		
	东江/北江	角闪石—电气石—磁铁矿—钛铁矿—绿帘石		
浊水溪	河口	锆石—石榴石—赤褐铁矿—锐钛矿—白钛石	全粒级	本研究
兰阳溪	河口	锆石—菱铁矿—赤褐铁矿—锐钛矿—黄铁矿		



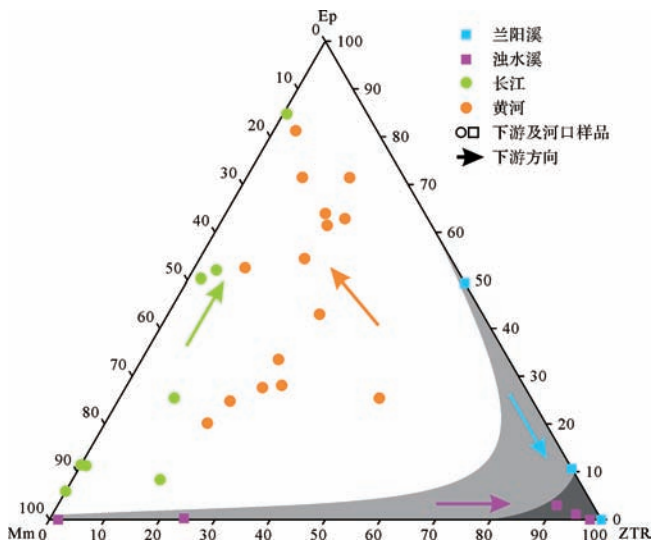


图5 长江<sup>[48-49]</sup>、黄河<sup>[20]</sup>和台湾河流沉积物 Ep-Mm-ZTR 三角图解

(Ep:绿帘石;Mm:磁性矿物;ZTR:锆石+电气石+金红石)

Fig.5 Ternary diagram of epidote, magnetic minerals and zircon+tourmaline+rutile for river sands from the Changjiang, Yellow River and Taiwan rivers

整体而言,长江沉积物中极稳定重矿物(ZTR)相对含量较低,且上游至下游/河口地区磁性矿物相对含量减少,绿帘石相对含量增高;黄河沉积物中 ZTR 相对含量较长江更高,但绿帘石和磁性矿物相对含量变化较大且沿程无明显规律。相较于前两者,台湾河流多数样品 ZTR 相对含量极高;而浊水溪上、中游磁性矿物相对含量较高与雪山山脉南部或中央山脉西侧的始新世地层贡献有关,兰阳溪上游绿帘石相对含量较高与雪山山脉北部低级变质岩供应有关。因此,利用 Ep-Mm-ZTR 三角图解能有效地将台湾河流端元和大陆大河体系进行区分,尤其是对于各自的入海物质,即下游/河口样品。

## 5 结论

(1) 台湾兰阳溪的主要碎屑重矿物组合为锆石—菱铁矿—赤褐铁矿—锐钛矿—黄铁矿,浊水溪为锆石—石榴石—赤褐铁矿—锐钛矿—白钛石。重矿物组合的物源示踪指出,研究流域内多数沉积物受到近源强烈影响,重矿物组成从上游到下游的继承性较差。由于台湾岛岩性、风化模式以及河流沉积物输送形式的特殊性,某些重矿物指数难以在台湾河流中得到恰当的应用。

(2) 源岩性质是台湾河流碎屑重矿物组成的主

要控制因素。其中,主要源区包括第四纪碎屑沉积物和中央山脉西侧的庐山组,前者主要影响研究流域下游的重矿物组成,后者则主要影响上游地区。

(3) 台湾河流碎屑重矿物组成与大陆典型入海河流存在明显差异。后者的主要重矿物,如磁铁矿和绿帘石在台湾河流中并不常见;而兰阳溪河口的主要重矿物——锆石、菱镁矿和黄铁矿以及浊水溪河口的锆石和石榴石都可以与大陆入海河流区分。

## 参考文献 (References)

- 1 Milliman J D, Farnsworth K L. River Discharge to the Coastal Ocean: A Global Synthesis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- 2 Yang Shouye, Wang Zhongbo, Dou Yangguang, et al. A review of sedimentation since the Last Glacial Maximum on the continental shelf of eastern China [J]. Geological Society, London, Memoirs, 2014, 41 (1): 293-303.
- 3 Dadson S J, Hovius N, Chen H, et al. Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen [J]. Nature, 2003, 426 (6967): 648-651.
- 4 Liu J P, Liu C S, Xu K H, et al. Flux and fate of small mountainous rivers derived sediments into the Taiwan Strait [J]. Marine Geology, 2008, 256(1/2/3/4): 65-76.
- 5 Liu J T, Hung J J, Lin Huiling, et al. From suspended particles to strata: The fate of terrestrial substances in the Gaoping (Kaoping) submarine canyon [J]. Journal of Marine Systems, 2009, 76(4): 417-432.
- 6 Liu J T, Kao S J, Huh C A, et al. Gravity flows associated with flood events and carbon burial: Taiwan as instructional source area [J]. Annual Review of Marine Science, 2013, 5(1): 47-68.
- 7 Liu Zhifei, Tuo Shouting, Colin C, et al. Detrital fine-grained sediment contribution from Taiwan to the northern South China Sea and its relation to regional ocean circulation [J]. Marine Geology, 2008, 255 (3/4): 149-155.
- 8 李传顺,石学法,高树基,等.台湾河流沉积物的黏土矿物组成特征与物质来源 [J]. 科学通报,2012,57(2/3): 169-177. [Li Chuan-shun, Shi Xuefa, Kao Shuhji, et al. Clay mineral composition and their sources for the fluvial sediments of Taiwanese rivers [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(2/3): 169-177.]
- 9 Goldsmith S T, Carey A E, Lyons W B, et al. Extreme storm events, landscape denudation, and carbon sequestration: Typhoon Mindulle, Choshui River, Taiwan [J]. Geology, 2008, 36(6): 483-486.
- 10 Hung J J, Yeh Y T, Huh C A. Efficient transport of terrestrial particulate carbon in a tectonically-active marginal sea off southwestern Taiwan [J]. Marine Geology, 2012, 315-318: 29-43.
- 11 Hilton R G, Galy A, Hovius N, et al. The isotopic composition of particulate organic carbon in Mountain Rivers of Taiwan [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2010, 74(11): 3164-3181.
- 12 Kao S J, Shiah F K, Wang C H, et al. Efficient trapping of organic

- carbon in sediments on the continental margin with high fluvial sediment input off southwestern Taiwan[J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(20): 2520-2537.
- 13 Hale R P, Nittrouer C A, Liu J T, et al. Effects of a major typhoon on sediment accumulation in Fangliao Submarine Canyon, SW Taiwan [J]. *Marine Geology*, 2012, 326-328; 116-130.
  - 14 Liu H C, You C F, Chung C H, et al. Source variability of sediments in the Shihmen Reservoir, Northern Taiwan; Sr isotopic evidence[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(3): 297-306.
  - 15 Morton A C, Hallsworth C R. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones [J]. *Sedimentary Geology*, 1999, 124(1/2/3/4): 3-29.
  - 16 Morton A C, Hallsworth C. Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones [J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 90(3/4): 241-256.
  - 17 Dill H G. A review of heavy minerals in clastic sediments with case studies from the alluvial-fan through the nearshore-marine environments [J]. *Earth-Science Reviews*, 1998, 45(1/2): 103-132.
  - 18 Garzanti E, Andò S. Plate tectonics and heavy mineral suites of modern sands [J]. *Developments in Sedimentology*, 2007, 58: 741-763.
  - 19 王中波, 杨守业, 李萍, 等. 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(4): 570-578. [Wang Zhongbo, Yang Shouye, Li Ping, et al. Detrital mineral compositions of the Changjiang River sediments and their tracing implications [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(4): 570-578.]
  - 20 王中波, 杨守业, 李日辉, 等. 黄河水系沉积物碎屑矿物组成及沉积动力环境约束 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(4): 73-85. [Wang Zhongbo, Yang Shouye, Li Rihui, et al. Detrital mineral composition of the sediments from Huanghe and its hydrodynamic environmental constraints [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(4): 73-85.]
  - 21 向绪洪, 邵磊, 乔培军, 等. 珠江流域沉积物重矿物特征及其示踪意义 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 31(6): 27-35. [Xiang Xuhong, Shao Lei, Qiao Peijun, et al. Characteristics of heavy minerals in Pearl River sediments and their implications for provenance [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, 31(6): 27-35.]
  - 22 黄文盛, 黄月法. 浙江省河口重矿物及其组合特征 [J]. *浙江大学学报*, 1984, 11(4): 496-506. [Huang Wensheng, Huang Yuefa. Characteristics of heavy mineral groups in the estuary regions of Zhejiang province [J]. *Journal of Zhejiang University*, 1984, 11(4): 496-506.]
  - 23 徐茂泉. 闽江口表层沉积物中碎屑矿物的研究 [J]. *厦门大学学报: 自然科学版*, 1995, 34(3): 466-469. [Xu Maoquan. Studies on fragmentary minerals in surface sediments of the Minjiang Estuary [J]. *Journal of Xiamen University: Natural Science*, 1995, 34(3): 466-469.]
  - 24 徐茂泉, 李超. 九龙江口沉积物中重矿物组成及其分布特征 [J]. *海洋通报*, 2003, 22(4): 32-40. [Xu Maoquan, Li Chao. Characteristics of heavy minerals composition and distribution in sediment from Jilong River Estuary [J]. *Marine Science Bulletin*, 2003, 22(4): 32-40.]
  - 25 王策, 梁新权, 童传新, 等. 莺歌海盆地东北部邻区 7 条主要入海河流重砂矿物特征及其地质意义 [J]. *沉积学报*, 2014, 32(2): 228-237. [Wang Ce, Liang Xinquan, Tong Chuanxin, et al. Characteristics and geological implications of heavy minerals from seven rivers in adjacent areas of northeastern Yinggehai Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(2): 228-237.]
  - 26 康春国, 李长安, 邵磊. 江汉平原主要河流沉积物重矿物特征与物源区岩性的响应 [J]. *第四纪研究*, 2009, 29(2): 334-342. [Kang Chunguo, Li Chang'an, Shao Lei. Heavy mineral characteristics of river sediments in Jianghan Plain and its response to provenance rock types [J]. *Quaternary Sciences*, 2009, 29(2): 334-342.]
  - 27 王秋良, 胡生辉, 李长安. 周老镇钻孔砾石层重矿物特征及地质意义 [J]. *中国地质*, 2009, 36(4): 878-884. [Wang Qiuliang, Hu Sihui, Li Chang'an. Heavy mineral characteristics of gravel layers in the Zhoulao Town borehole [J]. *Geology in China*, 2009, 36(4): 878-884.]
  - 28 陈静, 王哲, 王张华, 等. 长江三角洲东西部晚新生代地层中的重矿物差异及其物源意义 [J]. *第四纪研究*, 2007, 27(5): 700-708. [Chen Jing, Wang Zhe, Wang Zhanghua, et al. Heavy mineral distribution and its provenance implication in Late Cenozoic sediments in western and eastern area of the Changjiang River Delta [J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(5): 700-708.]
  - 29 Huang C Y, Yuan P B, Tsao S J. Temporal and spatial records of active arc-continent collision in Taiwan: A synthesis [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2006, 118(3/4): 274-288.
  - 30 何春荪. 台湾地质概论: 台湾地质图说明书 [M]. 台北: 经济部中央地质调查所, 1986. [He Chunsun. *The Outline of Taiwan Geology: Geological Map Instruction of Taiwan* [M]. Taipei: The Central Geological Survey of the Ministry of Economic Affairs (Taiwan), 1986.]
  - 31 刘恩宝, 程天文, 赵楚年, 等. 台湾河流水文特征分析 [J]. *水文*, 1981(1): 37-43. [Liu Enbao, Cheng Tianwen, Zhao Chunian, et al. An analysis of hydrological characteristics of Taiwan's rivers [J]. *Journal of China Hydrology*, 1981(1): 37-43.]
  - 32 Datta D K, Subramanian V. Distribution and fractionation of heavy metals in the surface sediments of the Ganges-Brahmaputra-Meghna river system in the Bengal basin [J]. *Environmental Geology*, 1998, 36(1/2): 93-101.
  - 33 Morton A, Hallsworth C, Strogon D, et al. Evolution of provenance in the NE Atlantic rift: the Early - Middle Jurassic succession in the Heidrun Field, Halten Terrace, offshore Mid-Norway [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(7): 1100-1117.
  - 34 Garzanti E, Andò S, Vezzoli G. Settling equivalence of detrital minerals and grain-size dependence of sediment composition [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 273(1/2): 138-151.
  - 35 Garzanti E, Andò S, Vezzoli G. Grain-size dependence of sediment composition and environmental bias in provenance studies [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 277(3/4): 422-432.
  - 36 Garzanti E, Andò S, Vezzoli G, et al. Petrology of the Namib Sand Sea: Long-distance transport and compositional variability in the wind-displaced Orange Delta [J]. *Earth Science Reviews*, 2012, 112(3/4): 173-189.

- 37 陈华胄. 台湾海峡表层沉积物中重矿物特征及其物质来源[J]. 台湾海峡, 1993, 12(2): 136-144. [Chen Huazhou. Characteristics and sources of heavy minerals in surface sediment of Taiwan Strait[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1993, 12(2): 136-144.]
- 38 海洋局情报所一室 103 组. 台湾周围陆架沉积物的结构和成分[J]. 海洋通报, 1976(2): 99-124. [The structure and composition of shelf deposits around Taiwan[J]. Marine Science Bulletin, 1976(2): 99-124.]
- 39 Fedo C M, Sircombe K N, Rainbird R H. Detrital zircon analysis of the sedimentary record[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53(1): 277-303.
- 40 陈培源, 刘德庆, 黄怡祯. 台湾之矿物[M]. 台北: 经济部中央地质调查所, 2004. [Chen Peiyuan, Liu Deqing, Huang Yizhen. Minerals in Taiwan[M]. Taipei: The Central Geological Survey of the Ministry of Economic Affairs (Taiwan), 2004.]
- 41 Selvaraj K, Chen C T A. Moderate chemical weathering of subtropical Taiwan: Constraints from solid-Phase Geochemistry of Sediments and Sedimentary Rocks[J]. The Journal of Geology, 2006, 114(1): 101-116.
- 42 Hubert J F. A zircon-tourmaline-rutile maturity index and the interdependence of the composition of heavy mineral assemblages with the gross composition and texture of sandstones[J]. Journal of Sedimentary Research, 1962, 32(3): 440-450.
- 43 Chen Chenghong, Lu H Y, Lin W, et al. Thermal event records in SE China coastal areas: Constraints from Monazite Ages of Beach Sands from two sides of the Taiwan Strait[J]. Chemical Geology, 2006, 231(1/2): 118-134.
- 44 Lan C Y, Usuki T, Wang K L, et al. Detrital zircon evidence for the antiquity of Taiwan[J]. Geosciences Journal, 2009, 13(3): 233-243.
- 45 Lan Qing, Yan Yi, Huang Chiyue, et al. Topographic architecture and drainage reorganization in Southeast China: Zircon U-Pb chronology and Hf isotope evidence from Taiwan[J]. Gondwana Research, 2015, doi: 10.1016/j.gr.2015.07.008.
- 46 Garzanti E, Andò S. Heavy mineral concentration in modern sands: Implications for provenance interpretation[J]. Developments in Sedimentology, 2007, 58: 517-545.
- 47 林晓彤, 李巍然, 时振波. 黄河物源碎屑沉积物的重矿物特征[J]. 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[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2003, 23(3): 17-21.]
- 48 Yang Shouye, Wang Zhongbo, Guo Yun, et al. Heavy mineral compositions of the Changjiang (Yangtze River) sediments and their provenance-tracing implication[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 35(1): 56-65.
- 49 王昆山, 王国庆, 蔡善武, 等. 长江水下三角洲沉积物的重矿物分布及组合[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(1): 7-12. [Wang Kunshan, Wang Guoqing, Cai Shanwu, et al. Heavy mineral characteristics of surface sediments in the subaqueous Yangtze River Delta [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2007, 27(1): 7-12.]

## Detrital Heavy Mineral Assemblages in the River Sediments from Taiwan and Its Implications for Sediment Provenance

DENG Kai<sup>1,2</sup> YANG ShouYe<sup>2</sup> WANG ZhongBo<sup>3</sup> LI Chao<sup>2</sup> BI Lei<sup>1,2</sup>  
Yuan-pin CHANG<sup>4</sup> James T. LIU<sup>4</sup>

(1. School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao, Shandong 266071, China;

4. Department of Oceanography, National Sun Yat-sen University, Kaohsiung, Taiwan 80424, China)

**Abstract:** A total of 384 Mt/yr of suspended sediment is supplied to ocean by small mountainous rivers in Taiwan (1970—1999), equivalent to the sum of sediment discharge from three major rivers (the Yangtze River, the Yellow River and the Pearl River) in China. Hence, it has an appreciable impact on the sedimentary process of the epicontinental shelf. There are altogether 151 rivers in Taiwan, most of which originate from the Central Range. For our study river basins, the Zhuoshui River and the Lanyang River feed into the Taiwan Strait and the Pacific Ocean, respectively. The Zhuoshui River flows through the western Central Range, the Hsuehshan Range, the Western Foothills and the Coastal Plain in turn. And sequences of the Hsuehshan Range and the western Central Range outcrop in the Lanyang River basin. Heavy mineral types and contents of eight sediment samples from the Zhuoshui River (ZS1~ZS5) and the Lanyang River (LY1~LY3) are analyzed in whole size fraction. Twenty kinds of heavy minerals are identified.

The weight percentage of heavy minerals varies from 0.039% to 0.116% in the Zhuoshui River, and from 0.004% to 0.040% in the Lanyang River. On the whole, the weight percentage declines from upstream to downstream.

There is an irregular spatial distribution of heavy mineral assemblages along both rivers. For the Zhuoshui River, the dominated heavy mineral assemblage is pyrite-limonite-magnetite in the upper reaches, zircon-limonite-magnetite-pyrite in the middle reaches, zircon-garnet-limonite-ilmenite-anatase-leucoxene in the lower reaches. For the Lanyang River, the dominated heavy mineral assemblage is zircon-epidote-pyrite in the upper reaches, zircon-magnesite-limonite-leucoxene in the middle reaches, zircon-magnesite-limonite-anatase-pyrite in the lower reaches. Variations of heavy mineral types and contents along the two rivers indicate that most sediments are mainly supplied by proximal source rocks, and signatures of heavy minerals from upstream are masked. Also, there exists difference in contributions to sediments between potential provenances; heavy minerals in the lower reaches of both rivers are mostly derived from Quaternary sediments, and in the upper reaches mainly supplied by Lushan Formation of the Central Range. In addition, because the distribution of heavy mineral assemblages is primarily controlled by source rocks, some heavy mineral indexes (ATi, GZi and ZTR) cannot be used properly in these small mountainous rivers.

The differences in bedrocks between mainland and Taiwan make the heavy mineral assemblages different between both sides of the strait. The typical heavy minerals in the rivers of Chinese mainland, like magnetite and epidote, are not common in the Taiwanese Rivers. However, the enrichment of zircon, magnesite and pyrite in the mouth of the Lanyang River, and the enrichment of zircon and garnet in the mouth of the Zhuoshui River, are there respective characteristics. All these features may offer some reference value for tracing the provenances of sediments in the epicontinental shelf.

**Key words:** Taiwan; Zhuoshui River; Lanyang River; heavy mineral; provenance analysis