

文章编号: 1000-0550(2013)01-0120-10

# 台湾海峡表层沉积物中黏土矿物特征及物质来源<sup>①</sup>

徐勇航 陈 坚 王爱军 李云海 汪卫国 张晓飞 赖志坤

(海洋与海岸地质环境开放实验室 国家海洋局第三海洋研究所 福建厦门 361005)

**摘 要** 利用 X 射线衍射仪, 对比分析台湾海峡及周边表层沉积物的黏土矿物特征, 讨论长江、福建和台湾河流对海峡黏土矿物的贡献程度。福建河流(闽江)的黏土矿物以高岭石为主(>40%), 其次是伊利石(30%)和绿泥石, 不含蒙脱石; 长江和浙闽泥质区的黏土矿物特征是伊利石含量最高(61%~66%), 其次是绿泥石(16%~17%)和高岭石(10%~13%), 少量蒙脱石(6%~9%)。台湾河流(浊水溪)黏土矿物组合为伊利石(>70%)和绿泥石, 不含高岭石和蒙脱石为特征。台湾海峡高岭石含量由西向东明显减少, 说明高岭石主要来自福建的河流。台湾海峡 50 m 等深线以东区域的黏土矿物具有高的伊利石和绿泥石含量, 低的蒙脱石和高岭石含量, 且伊利石的化学指数和结晶度值都明显低于长江和福建的河流, 反映台湾河流的物质来源。在台湾暖流作用下, 台湾河流为台湾海峡中北部提供了大量的伊利石和绿泥石。福建近海的黏土矿物主要是由福建河流提供的, 但在平潭岛周边海域的黏土矿物可能有长江物质的混合。

**关键词** 台湾海峡 表层沉积物 黏土矿物 源区

**第一作者简介** 徐勇航 男 1980 年出生 博士 助理研究员 海洋地质 E-mail: yonghang\_xu@163.com

**中图分类号** P736.21 **文献标志码** A

## 0 引言

台湾海峡连通着西太平洋两个主要的边缘海——东海和南海, 是研究入海陆源碎屑物质的来源、通量和在大陆架地区的分布、搬运和扩散模式等的典型区域<sup>[1-7]</sup>。河流是世界陆源碎屑物质搬运入海的主要方式, 对边缘海的沉积体系形成、古环境演化以及全球海洋化学通量变化等均具有显著影响<sup>[8]</sup>。黏土矿物作为海洋沉积物的重要组成部分, 在海洋沉积研究中占有重要的地位, 由于它是由母岩在特定的气候条件下风化形成的, 因此, 海洋中的黏土矿物组合可以用于示踪其物源<sup>[9-12]</sup>, 以及进行区域性及全球性的洋流示踪<sup>[13, 14]</sup>。

冬季在浙闽沿岸流作用下, 长江的物质最远能被带到 24°30'N 的泉州湾附近<sup>[15, 16]</sup>; Xu 等 2009 年研究台湾海峡表层沉积物黏土矿物特征, 认为台湾海峡中北部的黏土矿物主要来自长江, 是受浙闽沿岸流影响, 将长江黏土物质再悬浮、搬运而来的<sup>[12]</sup>。然而, 台湾岛西部河流每年直接向台湾海峡输入 50~150 Mt 的泥沙<sup>[10]</sup>, 受常年北上台湾暖流的影响, 大量的台湾泥沙输入对台湾海峡表层沉积物的特征影响如何? 此外, Liu 等 2010 年研究南海北部黏土矿物输

运机制, 提出南海北部高含量的蒙脱石是受黑潮分支的影响, 促使南海表层洋流把吕宋岛的蒙脱石搬运到南海北部的<sup>[14]</sup>。台湾海峡同样受到北上的黑潮分支的影响, 是否也有吕宋岛的物质被输送到台湾海峡, 这些问题都是值得进一步研究。

因此, 本文利用 2010 年 6—7 月在台湾海峡中北部取得大量的表层沉积物样品, 结合闽江流域、浙闽泥质区及台湾浊水溪河口采集的表层沉积物样品, 系统研究台湾海峡表层的黏土矿物空间分布特征, 进而探讨了该区黏土矿物的来源和沉积动力过程。

## 1 样品采集和分析方法

台湾海峡表层沉积物是国家海洋局第三海洋研究所于 2010 年 6—7 月进行“我国近海海洋综合调查与评价专项”调查时用抓斗获得。这次站位大致覆盖整个台湾海峡的中北部(图 1), 共 138 件; 闽江流域表层沉积物是 2010 年 3 月采集闽江主流、支流以及闽江口的泥质沉积物, 共 25 件; 厦门湾 12 件样品; 6 件浙闽泥质区样品是 2009 年 8—9 月采集的; 1 件长江口样品是在崇明岛东南侧采集的, 6 件样品是 2011 年 12 月在台湾浊水溪河口采集。

①国家青年基金资助项目(批准号: 40906047), 国家自然科学基金资助项目(批准号: 40976037), 国家 908 专项台湾海峡地质与地球物理补充调查与研究(908-01-BC19) 共同资助  
收稿日期: 2012-02-23; 收修改稿日期: 2012-05-09

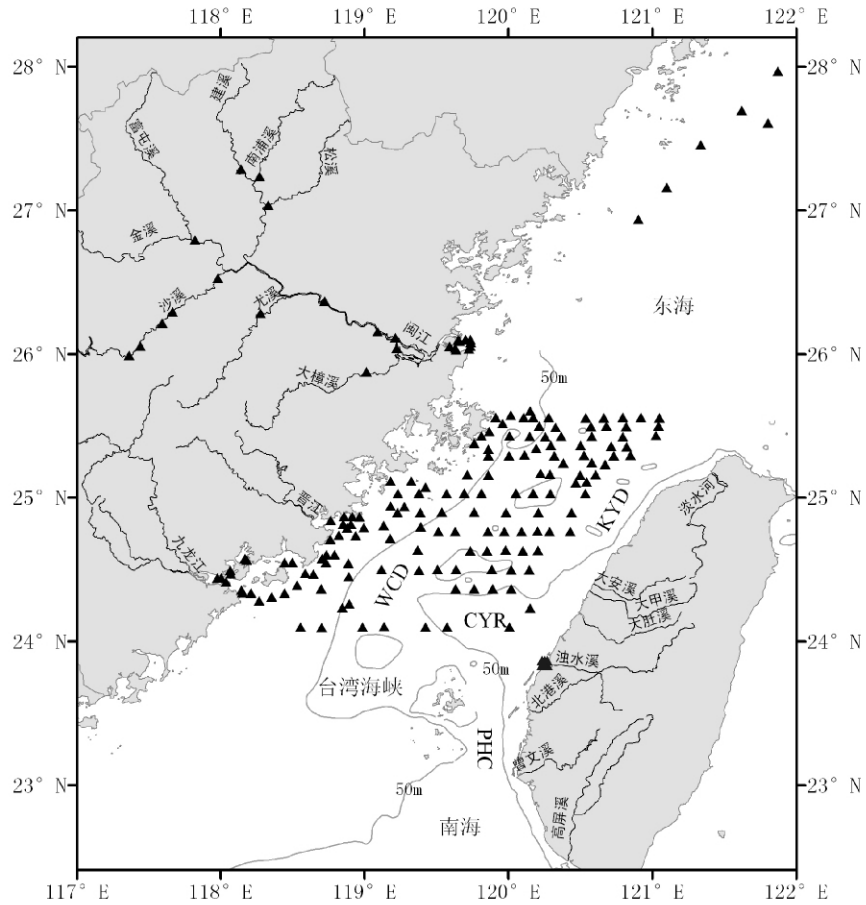


图 1 台湾海峡及周边表层沉积物站位图

PHC—澎湖水道, WCD—乌丘盆地, CYR—云彰隆起, KYD—观音盆地

Fig. 1 Location of surface sediments in the Taiwan Strait and adjacent area

PHC—Penghu Channel, WCD—Wu Chiu Depression, CYR—Chang Yun Ridge, KYD—Kuan Yin Depression

黏土矿物样品先后用 15%  $H_2O_2$  和 25% 醋酸在 60 °C 水浴锅中各反应 1 h, 去除有机质和碳酸盐, 用去离子水离心清洗两次, 直到具有抗絮凝作用发生。样品处理方法详见文献 [17, 18]。按 Stokes 原理所确定的沉降时间, 将小于 2  $\mu m$  的悬浮液吸出, 离心, 用涂片法制成定向薄片。采用荷兰的 PANalytical X' Pert PRO 衍射仪, 分别对自然条件、乙二醇蒸气饱和、加热条件 (490 °C, 2 h) 的样品薄片进行测试 (图 2)。黏土矿物的鉴定和解释主要依据 3 种测试条件下获得的 XRD 叠加图谱的综合对比, 波峰参数的半定量计算使用 HighScore 软件在乙二醇曲线上进行。4 种黏土矿物蒙脱石、伊利石、高岭石和绿泥石的相对含量按 Biscaye<sup>[19]</sup> 的方法计算, 绿泥石和高岭石的相对比例通过拟合 3.54 nm/3.58 nm 的衍射峰面积比确定。为了更好区分 3.54 nm/3.58 nm 的高岭石和绿泥石的双峰, 对 24° ~ 26° 2 $\theta$ , 进行慢扫描, 步长为

0.01°<sup>[18, 20]</sup>。利用乙二醇曲线计算伊利石的化学指数, 即 5Å/10Å 峰面积比, 用伊利石 10Å 的半高宽 FWHM 表示伊利石的结晶度。

## 2 区域背景

台湾海峡长约 350 km, 平均宽为 180 km, 平均水深为 60 m。由于太平洋板块的俯冲和碰撞, 断块升降运动尤为强烈, 陆地的差异性上升加强了两岸陆地的侵蚀、剥蚀作用, 台湾岛被认为是世界上剥蚀速度最快的地区, 剥蚀率可达 3 ~ 6 mm/a<sup>[1]</sup>。台湾岛西部河流 (淡水河、大肚溪、浊水溪、增文溪等) 每年向台湾海峡输沙量平均为 50 ~ 150 Mt, 其中一半都是来自浊水溪的输入<sup>[10, 21]</sup>。特别是受台风影响时, 浊水溪一次的输沙量就可以高达 72 Mt<sup>[2]</sup>。福建的闽江和九龙江也属于山溪性河流, 闽江年平均输沙量为 7.5 Mt, 高峰期时为 20 Mt, 九龙江为 2.5 Mt (表 1)。

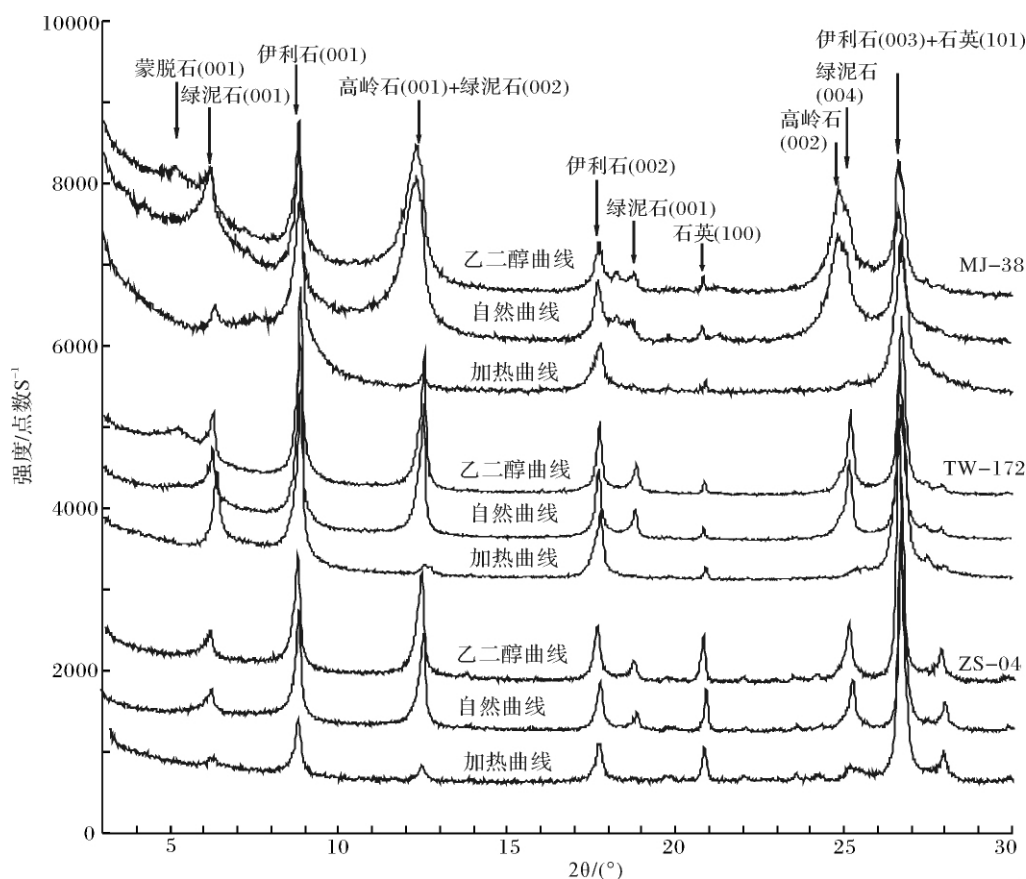


图2 闽江口、浊水溪河口及台湾海峡典型样品 X 射线衍射叠加波谱

样品 MJ-38 取自闽江口, TW-172 取自云彰隆起, ZS-04 取自浊水溪河口

Fig. 2 Multiple X-ray diffractograms of typical samples from the Min River, Choshui River and Taiwan Strait

表1 台湾海峡两侧主要河流流域面积和悬移输沙量特征  
Table 1 Sediment loads and drainage basin area of rivers both sides of the Taiwan Strait

河流	流域面积/km <sup>2</sup>	悬移质输沙量/(Mt/a)	资料来源
淡水河	2726	11.5	[1]
大安溪	633	7.1	[1]
大甲溪	1236	4.0	[1]
大肚溪	1981	9.8	[1]
浊水溪	2989	54.1	[1]
北港溪	597	2.2	[1]
曾文溪	1157	25.1	[1]
高屏溪	3067	49.0	[1]
闽江	61000	7.5	[1]
九龙江	14700	2.5	[1]

台湾海峡是连接东海和南海的通道,因此受到不同海流(浙闽沿岸流,台湾暖流)的相互作用<sup>[24]</sup>,可能携带来自其他海域的物质进入台湾海峡。云彰隆起把台湾海峡分为东、西两个盆地,东部为观音盆地,西部为乌丘盆地。观音盆地,呈 NE 走向,狭长形海盆,平均水深 80 m 左右,沉积物粒度从东向西逐渐变细趋势,其物源来自台湾<sup>[7]</sup>。乌丘盆地位于海坛岛东南,为一狭长形盆地,东南过澎北水槽与澎湖水道相

通,平均水深 75 m 左右<sup>[25]</sup>。黑潮分支汇入台湾暖流,沿澎湖水道向北,受云彰隆起的阻挡,向西进入乌丘盆地然后继续向北运移。澎湖水道水深达 100 ~ 150 m,在地形上呈由南倾斜的 V 型谷,北连澎北水槽,南部直接进入南海盆地东北角,是沟通台湾海峡南北两区以及南海的主要通道。

长江是我国第一大河,每年约有 480 Mt 的物质输入东海,其中 47% 的入海泥沙在河口附近的水下三角洲沉积,21% 沉积在近岸水下三角洲,剩余 32% 的沉积物在浙闽沿岸流的携带下沉积在浙闽沿岸,形成了东西宽约 100 km,南北长近 800 km,最大厚度达 40 m 的浙闽沿岸泥质区<sup>[15]</sup>。在强烈冬季季风作用下,浙闽沿岸流南下到达台湾海峡中部,受到云彰隆起地阻隔,向北折返进入观音盆地<sup>[24, 26]</sup>。

### 3 结果和讨论

#### 3.1 台湾海峡及周边黏土矿物特征对比

长江黏土矿物以高的伊利石含量(64% ~ 70%)和少量的蒙脱石含量(4% ~ 10%)为特征<sup>[27]</sup>,具有高

的伊利石结晶度值( $0.36^\circ\Delta 2\theta$ )<sup>[12]</sup>(表 2)。浙闽泥质区黏土矿物特征是伊利石含量最高(61~66%),其次是绿泥石(16%~17%)和高岭石(10%~13%),蒙脱石含量最少(6%~9%);伊利石结晶度值也较大,为 $0.31^\circ\sim 0.38^\circ\Delta 2\theta$ (平均为 $0.34^\circ\Delta 2\theta$ ),伊利石化学指数为 0.46~0.60(平均为 0.54)(表 2)。浙江沿岸东海内陆架区的泥质沉积物的来源较为单一,基本是长江入海泥沙随浙闽沿岸流,通过再悬浮与搬运过程沉积下来的<sup>[27]</sup>。因此,浙闽泥质区的黏土矿物特征与长江的相似(表 2)。

福建省沿岸入海河流主要有闽江、九龙江和晋江等,均属于山溪性河流。福建沿岸河流的黏土矿物特征相似(图 3),以高岭石为主(平均为 38%),其次是伊利石(平均为 34%)和绿泥石(平均为 22%);含有少量的蒙脱石(平均为 5%)。伊利石结晶度为 $0.25^\circ\sim 0.28^\circ\Delta 2\theta$ (平均为 $0.27^\circ\Delta 2\theta$ ),伊利石化学指数为 0.46~0.51,平均为 0.49(表 2)。福建河流的黏土矿物特征都是以高岭石为主,明显不同于长江和浙闽泥质区的黏土矿物组合特征(表 2),在 X 射线衍射图谱上也表现明显不同的特征(图 2)。

台湾河流黏土矿物组合以高的伊利石和绿泥石含量,不含高岭石和蒙脱石为特征(图 3),低的伊利石结晶度(平均为 $0.24^\circ\sim 0.25^\circ\Delta 2\theta$ )(表 2),台湾浊水溪伊利石的含量达到 70%。台湾河流黏土矿物组合特征明显不同于长江、福建河流的黏土矿物特征,因此可以有效的区分不同的物质来源。

台湾海峡黏土矿物组合特征在海峡东西两侧存在明显差异,以 50 m 等深线为分界线,大致可分为东

侧的 A 区和西侧的 B 区(图 4)。A 区的伊利石含量很高(大于 60%),绿泥石含量在靠近台湾河口附近也具有较高的含量(大于 20%),但高岭石和蒙脱石含量都很低(均小于 10%)。B 区的伊利石含量较低(小于 60%),特别在九龙江河口和晋江河口伊利石含量仅为 40% 左右;而在河口区域高岭石含量大于 30%,绿泥石含量也较高(大于 20%)。

### 3.2 黏土矿物源区分析

黏土矿物是母岩风化作用形成的,其组成和结晶形态等特征受源区母岩岩性和形成时的风化环境所控制。一般认为,高岭石是在潮湿气候条件下富铝硅酸盐矿物(长石、云母和辉石等)被强烈淋滤作用形成的,其主要阳离子为 Si、Al,因此气候温暖潮湿有利于高岭石的形成。伊利石是在气温稍低、弱碱性条件下,由长石、云母等铝硅酸盐矿物在风化脱钾的情况下形成的,其主要阳离子为 Si、Al、K<sup>[30]</sup>。在温湿气候条件下,强烈的淋滤作用将导致伊利石晶层间 K<sup>+</sup> 的淋失,促使伊利石向蒙脱石演化,如果气候变得湿热,化学风化更加彻底,伊利石晶层间的 K<sup>+</sup> 则被完全带走,伊利石将进一步分解形成高岭石。

福建出露大量的花岗岩(含大量长石),受亚热带温暖潮湿的气候影响,加上起伏的地貌,大大增强了化学风化的强度,形成闽江表层沉积物中以高岭石为主,而基本不含蒙脱石的特征(图 3)。而台湾河流(浊水溪、高屏溪等)大部分发源于中央山脉,中央山脉以变质岩为主,形成的黏土矿物以伊利石和绿泥石为主,几乎不含高岭石和蒙脱石(图 3),反映的是强烈降雨和快速的机械剥蚀的环境条件形成的<sup>[3,14]</sup>。

表 2 台湾海峡及周边主要河流黏土矿物组合特征

Table 2 Average clay mineral characteristic in the Taiwan Strait adjacent area

区域	样品数目	蒙脱石/%	伊利石/%	高岭石/%	绿泥石/%	伊利石结晶度/ $^\circ\Delta 2\theta$	伊利石化学指数	资料来源
闽江流域	15	0	29	52	19	0.33	0.60	本文
闽江口	10	4	33	43	20	0.29	0.53	本文
九龙江口	12	5	35	38	22	0.27	0.50	本文
浙闽泥质区	6	7	64	12	17	0.34	0.54	本文
长江	1	6	64	9	21	0.35	0.64	本文
台湾海峡	138	8	61	12	19	0.25	0.45	本文
台湾浊水溪	6	0	70	1	29	0.24	0.34	本文
台湾浊水溪	7	0	71	1	28	0.25		[12]
台湾高坪溪	19	1	55	1	43	0.16	0.33	[3]
台湾湖泊	5	1	55	2	42	0.18	0.38	[14]
长江	18	5	67	9	19	0.36		[12]
钱塘江口	9	3	61	17	19			[28]
吕宋河流	35	87	1	5	7			[29]

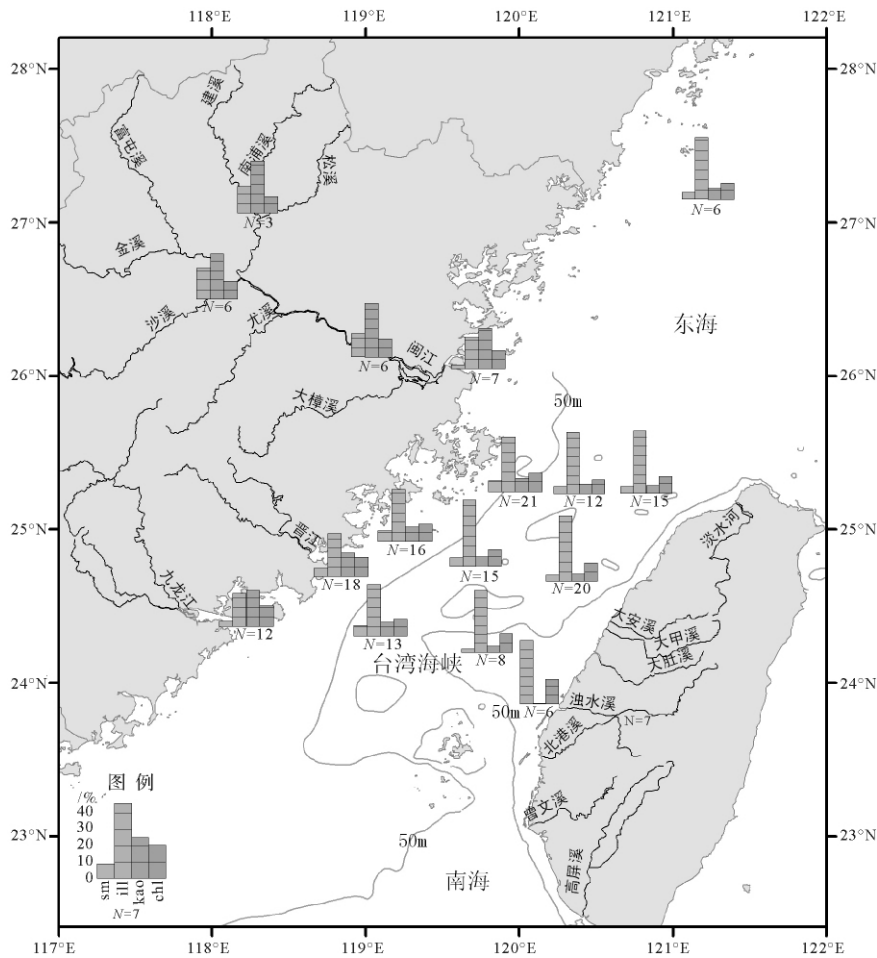


图 3 台湾海峡、闽江和浙闽泥质区平均黏土矿物分布格局

sm - 蒙脱石; ill - 伊利石; kao - 高岭石; chl - 绿泥石; N - 样品个数

Fig. 3 Distribution of average clay mineral in the Taiwan Strait and adjacent area

在风化过程中,伊利石晶层间  $K^+$  脱离得越多,结晶度就越差,因此,伊利石结晶度的大小反映了源区水解程度。这个参数可用于示踪物源区和搬运路径<sup>[11]</sup>。伊利石化学指数大小可以指示其风化程度,例如伊利石化学指数小于 0.5 代表富 Fe—Mg 伊利石,为物理风化;大于 0.5 为富 Al 伊利石,代表强烈的水解作用<sup>[32]</sup>,从而可以用来指示物源和气候变化<sup>[31]</sup>。通过台湾海峡及周边黏土矿物中伊利石的化学指数和结晶度对比分析,可以看出它们呈较好的线性分布(图 5),进一步证实伊利石化学指数和结晶度可以应用于水解作用的解释。化学指数较大时,结晶度较低(表现为高值),代表水解作用加强,如长江、闽江的伊利石。

闽江伊利石结晶度值较大(平均为  $0.33^\circ\Delta 2\theta$ ),反映伊利石的结晶程度差,指示陆地物源区水解作用强烈(图 5);伊利石化学指数也较大(0.47~0.70),

大部分大于 0.5,为富 Al 伊利石,也代表强烈的水解作用<sup>[32]</sup>。而台湾河流和台湾湖泊的伊利石化学指数较小,结晶度好,反映弱的水解作用,为快速的机械剥蚀作用形成的(图 5)。

### 3.3 台湾海峡中北部黏土矿物的物质来源

伊利石是台湾海峡黏土矿物的主要类型。从闽江上游至闽江口伊利石含量虽然略有增加(33%),但仍远远小于台湾海峡伊利石的含量(60%);而且福建河流跟闽江黏土矿物特征一致,都含有很低的伊利石(如九龙江口伊利石含量为 35%),因此福建河流不可能为台湾海峡 A 区提供大量的伊利石(大于 60%)。长江和浙闽泥质区虽都含有很高的伊利石含量(大于 60%),但是长江和浙闽泥质区伊利石的结晶度值高(大于  $0.3^\circ\Delta 2\theta$ ),指示陆地物源区水解作用强;而台湾海峡 A 区伊利石结晶度值较小为  $0.21^\circ\sim 0.25^\circ\Delta 2\theta$ ,伊利石结晶度为低值代表结晶度高,指

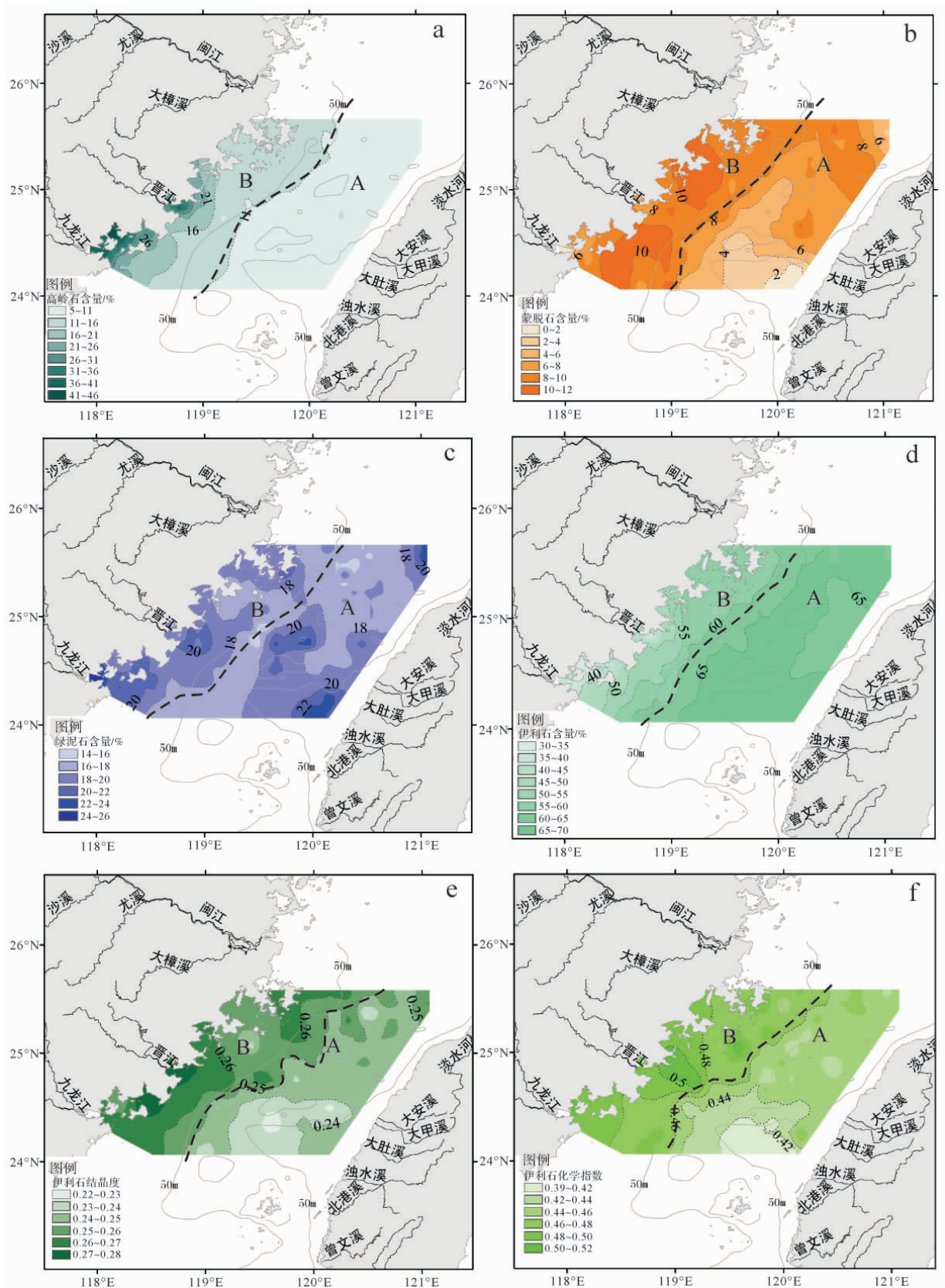


图 4 台湾海峡黏土矿物含量、伊利石结晶度和化学指数空间分布图

a. 高岭石; b. 蒙脱石; c. 绿泥石; d. 伊利石; e. 伊利石结晶度; f. 伊利石化学指数

Fig. 4 Spatial distribution of clay mineral content, illite chemistry index and crystallinity in the Taiwan Strait

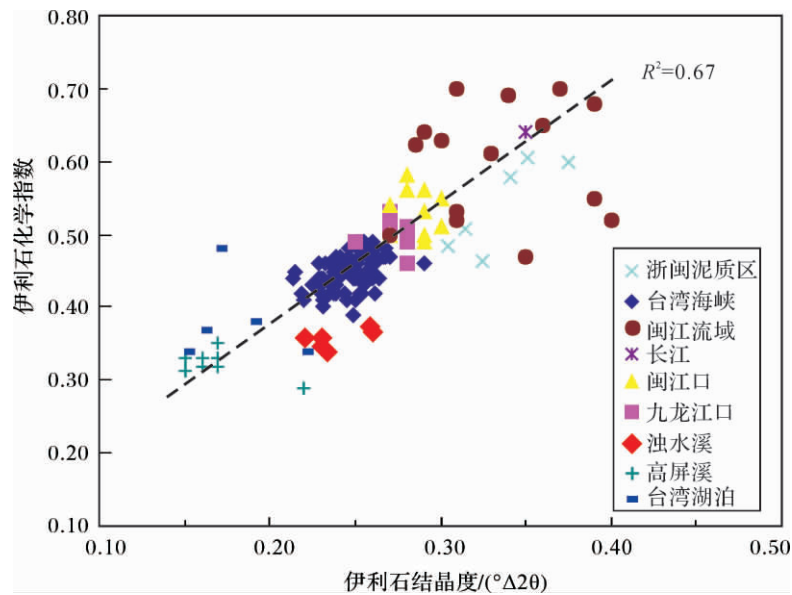


图5 台湾海峡及周边沉积物的伊利石结晶度和化学指数对比高屏溪和台湾湖泊资料据文献[3]

Fig. 5 Correlations of illite chemistry index with illite crystallinity of surface sediments in the Taiwan Strait and adjacent area

示陆地物源区水解作用弱<sup>[31]</sup>。因此,长江也不是台湾海峡A区伊利石的主要物源。台湾河流沉积物具有高的伊利石含量和低的伊利石结晶度<sup>[3,12]</sup>,如浊水溪的伊利石含量很高(70%),伊利石结晶度值(平均为 $0.24^{\circ}\Delta 2\theta$ ) (表2)。在云彰隆起北部,沉积物含有很高的伊利石(70%)和绿泥石,很低的高岭石和蒙脱石(图4),这一特征与台湾河流黏土矿物组合特征相似。因此,认为台湾河流是台湾海峡A区伊利石的主要来源。

B区伊利石含量小于60% 结晶度值为 $0.25^{\circ} \sim 0.27^{\circ}\Delta 2\theta$ ;伊利石化学指数为 $0.46 \sim 0.49$ (图4e,f),明显高于A区伊利石结晶度和化学指数,黏土矿物主要来自福建的河流,可能受到部分长江物质的影响。特别是在平潭岛周边海域黏土矿物中的伊利石含量在55%~60%之间,伊利石的结晶度值较大(大于 $0.26^{\circ}\Delta 2\theta$ ),绿泥石的含量也较高,可能是受长江与闽江的混合物影响。

高岭石含量从九龙江口、晋江河口向海逐渐减少,含量从40%降至小于10%(图4a),显示福建河流对台湾海峡黏土矿物的贡献程度从河口到陆架依次降低,这是由于黏土矿物在海洋环境中沉淀一般具有分异性特征,高岭石颗粒一般较大,具有粒状或板状特征,在靠近黏土来源的近岸河口区先沉积,沿着黏土搬运方向,由于水流的分选作用,高岭石含量减少<sup>[33]</sup>。台湾岛的河流几乎不含高岭石,表明台湾海峡的高岭石主要来自福建的河流。

台湾海峡绿泥石特征在靠近河口的地区,其含量都明显较高,向海逐渐减少。从图4c明显看出福建河流是B区绿泥石的主要来源,而台湾河流(北面的淡水河,西面的大安溪、大甲溪、大肚溪和浊水溪等)是A区绿泥石的主要来源。

蒙脱石在福建沿岸含量较高,在靠近台湾一侧含量很低(图4b)。福建沿岸较高的蒙脱石可能是在该地区出露的玄武岩风化有关(如漳州的火山岛等)。在浊水溪口外蒙脱石的含量很低,往北略有增加趋势。吕宋河流的黏土矿物特征以蒙脱石为主,含量为87%,绿泥石为7%,高岭石含量为5%,几乎不含伊利石(表2)。虽然有部分黑潮分支汇入台湾暖流一起北上流经台湾海峡,但从台湾暖流流经的区域可以看出蒙脱石的含量很低,特别是在云彰隆起附近几乎不含蒙脱石,反映台湾河流的特征。

### 3.4 台湾海峡黏土矿物运输机制

台湾海峡东侧常年受台湾北上的台湾暖流的影响,特别是在夏季,台湾暖流增强,表层海水受西南季风作用往北东方向运移。Huh等2011年通过台湾海峡大量的沉积速率数据和粒度资料,提出台湾西北部的八条河流(包括浊水溪)是台湾海峡主要源区之一,每年向台湾海峡输入98 Mt碎屑物质,大部分沉积在观音盆地,并有部分物质随着台湾暖流进入东海。其次,台湾西南部的8条河流是台湾海峡的另一个重要物质来源,每年向台湾海峡输入55 Mt碎屑物质,这些物质先进入澎湖水道,然后受黑潮分支北上

的作用,被搬运到台湾海峡北部<sup>[7]</sup>。

黏土矿物的分布除了与物源区特征有关外,还与海流特征密切相关。Xu 等研究台湾海峡 2006 年 5 月份表层沉积物黏土矿物组合特征,认为台湾海峡中北部的黏土矿物主要来自长江<sup>[12]</sup>。但是,本研究发 现台湾海峡 50 m 等深线以东海域(A 区)的黏土矿物组合特征与台湾河流的极其相似,说明主要来自台湾河流的提供。台湾河流的黏土矿物随台湾暖流,沿 澎湖水道向北,受云彰隆起的阻挡,一个分支向西进 入乌丘盆地后向北运移,最后向东北方向进入观音盆 地,在黏土矿物组合特征空间分布上也表现出沿台湾 暖流方向分布的趋势,台湾暖流流经的区域具有高的 伊利石和绿泥石含量,低的蒙脱石含量(图 6)。受西南 表层流的影响,福建河流为台湾海峡提供了高岭石。此外, 受黑潮分支作用,吕宋岛高含量的蒙脱石能被搬运到南海北部<sup>[14]</sup>,但是同样受到黑潮分支影 响的台湾海峡,其表层沉积物却没有表现出高的蒙脱

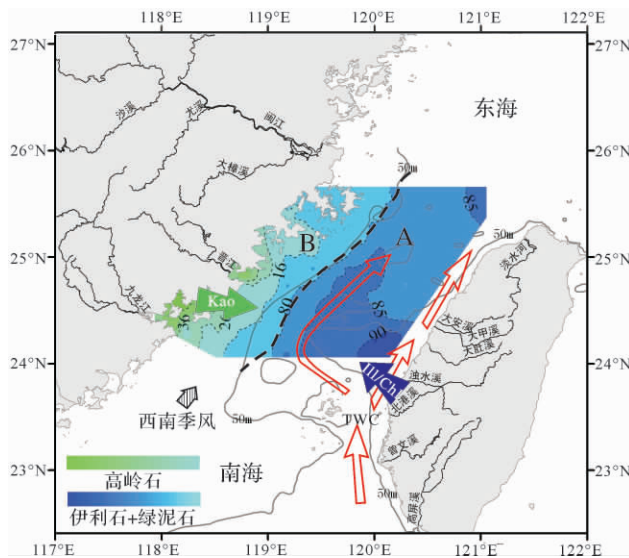


图 6 台湾海峡黏土矿物运输途径

ill - 伊利石; kao - 高岭石; chl - 绿泥石; TWC - 台湾暖流

Fig. 6 Spatial transport processes of the clay mineral in the Taiwan Strait

石含量,因此台湾海峡受吕宋岛物质的影响不明显。

台湾海峡 B 区的黏土矿物主要来自福建的河 流,可能受到部分长江物质的影响。特别是在平潭岛 周边海域黏土矿物中的较高伊利石含量和绿泥石的 含量,可能是受长江与闽江的混合物影响。前人资料 也表明浙闽沿岸流能把长江的物质最远带到泉州湾 附近<sup>[15,16]</sup>,但长江物质对台湾海峡的影响也仅仅局 限在福建沿岸,对于受强烈台湾暖流作用的 A 区,其

沉积物的来源还是以台湾河流为主。

## 4 结论

(1) 福建河流(闽江)的黏土矿物以高岭石为 主,其次是伊利石和绿泥石,不含蒙脱石,主要是福建 大量花岗岩在潮湿气候条件下化学风化作用形成的; 而台湾河流黏土矿物组合以高的伊利石和绿泥石含 量,不含高岭石和蒙脱石为特征,是快速的机械剥蚀 作用形成的。

(2) 源区母岩和风化条件的不同,导致台湾海峡 两侧河流黏土矿物的组合特征差异及伊利石的矿物 学特征的不同。

(3) 台湾海峡 50 m 等深线以东区域的黏土矿物 特征及伊利石的化学指数和结晶度与台湾河流的黏 土矿物特征相似,反映在台湾暖流作用下,台湾河流 为海峡中北部提供了大量的伊利石和绿泥石。台湾 海峡高岭石含量由西向东明显减少,表明高岭石主要 来自福建河流。福建近海的黏土矿物主要是由福建 河流提供的,但在平潭岛周边海域的黏土矿物可能有 长江物质的混合。

致谢 对黄财宾,尹希杰,叶翔,李东义及广东海 洋大学“天龙号”全体船员协助海上取样工作,在此 一并表示感谢。

## 参考文献 (References)

- 1 Dadson S J, Hovius N, Chen H, *et al.* Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen [J]. *Nature*, 2003, 426: 648-651
- 2 Milliman J D, Liu S W, Kao S J, *et al.* Short-term changes in seafloor character due to flood-derived hyperpycnal discharge: typhoon Mindulle, Taiwan, July 2004 [J]. *Geology*, 2007, 35(9): 779-782
- 3 Liu Z F, Tuo S T, 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: 149-155
- 4 Liu J T, Liu K J, Huang J C. The effect of a submarine canyon on the river sediment dispersal and inner shelf sediment movements in southern Taiwan [J]. *Marine Geology*, 2002, 181: 357-386
- 5 Liu J T, Huh C A, You C F. Fate of terrestrial substances in the Gaoping (formerly spelled Kaoping) submarine canyon [J]. *Journal of Marine Systems*, 2009, 76: 367-368
- 6 Huh C A, Liu J T, Lin H L, *et al.* Tidal and flood signatures of settling particles in the Gaoping submarine canyon (SW Taiwan) revealed from radionuclide and flow measurements [J]. *Marine Geology*, 2009, 267: 8-17
- 7 Huh C A, Chen W F, Hsu F H, *et al.* Modern (< 100 years) sedimentation in the Taiwan Strait: rates and source-to-sink pathways eluci-



- dated from radionuclides and particle size distribution [J]. *Continental Shelf Research*, 2011, 31: 47-63
- 8 Galy A, France L C. Higher erosion rates in the Himalaya: Geochemical constraints on riverine fluxes [J]. *Geology*, 2001, 29: 23-26
- 9 刘志飞. 南海沉积物中的黏土矿物: 指示东亚季风演化历史 [J]. *沉积学报*, 2010, 28(5): 1012-1019 [Liu Zhifei. Clay mineral assemblages in sediments of the South China Sea: East Asian monsoon evolution proxies [J]? *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(5): 1012-1019]
- 10 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: 65-76
- 11 Petschick R, Kuhn G, Gingele F. Clay mineral distribution in surface sediments of the South Atlantic: sources, transport, and relation to oceanography [J]. *Marine Geology*, 1996, 130: 203-229
- 12 Xu K H, Milliman J D, Li A C, *et al.* Yangtze- and Taiwan-derived sediments on the inner shelf of East China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2009, 29: 2240-2256
- 13 Raman C V, Rao G K, Reddy K S N, *et al.* Clay mineral distribution in the continental shelf sediments between the Ganges mouths and Madras, east coast of India [J]. *Continental Shelf Research*, 1995, 15(14): 1773-1793
- 14 Liu Z F, Colin C, Li X J, *et al.* Clay mineral distribution in surface sediments of the northeastern South China Sea and surrounding fluvial drainage basins: source and transport [J]. *Marine Geology*, 2010, 277: 48-60
- 15 Liu J P, Xu K H, Li A C, *et al.* Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea [J]. *Geomorphology*, 2007, 85: 208-224
- 16 Liu J P, Li A C, Xu K H, *et al.* Sedimentary features of the Yangtze River-derived alongshore clinoform deposit in the East China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26: 2141-2156
- 17 Wan S M, Li A C, Clift P D, *et al.* Development of the East Asian summer monsoon: evidence from the sediment record in the South China Sea since 8.5 Ma [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 241(1): 139-159
- 18 Wan S M, Li A C, Clift P D, *et al.* Development of the East Asian monsoon: mineralogical and sedimentologic records in the northern South China Sea since 20 Ma [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 254: 561-582
- 19 Biscaye P E. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1965, 76: 803-831
- 20 Thamban M, Rao V P, Schneider R R. Reconstruction of late Quaternary monsoon oscillations based on clay mineral proxies using sediment cores from the western margin of India [J]. *Marine Geology*, 2002, 186: 527-539
- 21 Kao S J and Milliman J D. Water and sediment discharge from small mountainous rivers, Taiwan: the roles of lithology, episodic events and human activities [J]. *Journal of Geology*, 2008, 116(5): 431-448
- 22 陈峰,王海鹏,郑志凤,等. 闽江口水下三角洲的形成与演变 I. 水下三角洲形成的环境因子与地貌发育 [J]. *台湾海峡*, 1998, 17(4): 396-401 [Chen Feng, Wang Haipeng, Zheng Zhifeng, *et al.* Formation and evolution of underwater delta in Minjiang estuary I. Formative environment factors of underwater delta and its geomorphological development [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1998, 17(4): 396-401]
- 23 徐茂泉. 九龙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*, 1994, 33(5): 675-680 [Xu Maoquan. Study on fragmentary minerals surface sediments in Jiulong River estuary [J]. *Journal of Xiamen University: Natural Science*, 1994, 33(5): 675-680]
- 24 Jan S, Wang J, Chern C S, *et al.* Seasonal variation of the circulation in the Taiwan Strait [J]. *Journal of Marine Systems*, 2002, 35: 249-268
- 25 洪华生,丘书院,阮五崎,等. 闽南-台湾浅滩渔场上升流区生态系统研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1991: 19-74 [Hong Huasheng, Qiu Shuyuan, Ruan Wuqi, *et al.* Minnan-Taiwan Bank Fishing Ground Upwelling Ecosystem Study [M]. Beijing: Science Press, 1991: 19-74]
- 26 Wu C R, Chao S Y, Hsu C. Transient, seasonal and interannual variability of the Taiwan Strait Current [J]. *Journal of Oceanography*, 2007, 63: 821-833
- 27 杨作升. 黄河、长江、珠江沉积物中黏土的矿物组合、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 Yellow, Changjiang and Pearl Rivers and their relations to the climate environments in their sediment source areas [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1988, 19(4): 336-346]
- 28 周晓静,高抒,贾建军. 长江黏土矿物示踪标记稳定性的初步研究 [J]. *海洋与湖沼*, 2003, 34(6): 683-692 [Zhou Xiaojing, Gao Shu, Jia Jianjun. Preliminary evaluation of the stability of Changjiang clay minerals as fingerprints for material source tracing [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2003, 34(6): 683-692]
- 29 Liu Z F, Zhao Y, Colin C, *et al.* Chemical weathering in Luzon, Philippines from clay mineralogy and major element geochemistry of river sediments [J]. *Applied Geochemistry*, 2009, 24: 2195-2205
- 30 汤艳杰,贾建业,谢先德. 黏土矿物的环境意义 [J]. *地学前缘*, 2002, 9(2): 337-344 [Tang Yanjie, Jia Jianye, Xie Xiande. Environment significance of clay minerals [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(2): 337-344]
- 31 Ehemann W. Implications of late Eocene to early Miocene clay mineral assemblages in McMurdo Sound (Ross Sea, Antarctica) on paleoclimate and ice dynamics [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1998, 139: 213-231
- 32 Gingele F X, Müller P M, Schneider R R. Orbital forcing of freshwater input in the Zaire Fan area clay mineral evidence from the last 200 kyr [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1998, 138: 17-26
- 33 Gibbs R J. Clay mineral segregation in the marine environment [J].

Journal of Sedimentary Petrology, 1977, 47: 237-243

## Clay Minerals in Surface Sediments of the Taiwan Strait and Their Provenance

XU Yong-hang CHEN Jian WANG Ai-jun LI Yun-hai  
WANG Wei-guo ZHANG Xiao-fei LAI Zhi-kun

(Open Laboratory of Ocean & Coast Environmental Geology, Third Institute of Oceanography State Oceanic Administration, Xiamen, Fujian 361005)

**Abstract:** The Taiwan Strait connects the East China Sea and the South China Sea, which are two major marginal seas of west Pacific Ocean. This region serves as a canonical area for investigating the terrigenous detrital materials that are transported into the sea, including the provenance and flux, as well as the modelling of the distribution, transport and dispersion in continental shelf areas. Under the combined influence of the south-bound Zhemín Coastal Current (ZCC) and north-bound Taiwan Warm Current, the sediments in the Taiwan Strait exhibit the characteristics of multiple origins. Clay minerals in surface sediments from the Taiwan Strait and adjacent area were analyzed by X-Ray Diffraction (XRD) method to constrain the possible provenances including the Yangtze, Fujian and Taiwanese rivers. Clay mineral assemblage in the Min River (one of the largest Fujian rivers) consists dominantly of kaolinite (>40%) with minor amounts of illite and chlorite but without smectite, indicating that clay minerals in Min River drainage basin is originated from upriver granites by weathering under warm and humid conditions. Yangtze-dominated clays have relatively high illite (61% ~ 66%), with small amounts of chlorite (16% ~ 17%) and kaolinite (10% ~ 13%), low smectite (6% ~ 9%) and poor illite crystallinity. Taiwan-dominated clays (Zhoshui River), in contrast, have the highest illite contents (>70%), and no smectite. The clay mineral assemblages from both sides of the Taiwan Strait are different, because of the source rocks and weathering condition factors. In the Taiwan Strait, kaolinite contents of the sediments decrease gradually from west to east, indicating that they are mostly originated from Fujian rivers. In the east region of the 50 m isobath in the Taiwan Strait, the clay mineral assemblage is dominated by illite and chlorite with scarce smectite and kaolinite (both generally <5%), different from those of the Yangtze and Fujian rivers. Moreover, both chemistry index and crystallinity of illite are lower than those of the Yangtze and Fujian rivers, but similar to those of the Taiwanese rivers. Our data suggest that most of illite and chlorite in the northern Taiwan Strait were provided by Taiwanese rivers through the Taiwan Warm Current. However, clay minerals in offshore areas of Fujian Province were mainly provided by Fujian rivers, and locally possible mixed by the Yangtze river, such as the neighbor oceanic area of Pingtan island.

**Key words:** Taiwan Strait; surface sediment; clay mineral; provenance