

台湾河流沉积物的黏土矿物组成特征与物质来源

李传顺^①, 石学法^{①*}, 高树基^②, 陈明德^③, 刘焱光^①, 方习生^①, 吕华华^①, 邹建军^①,
刘升发^①, 乔淑卿^①

① 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266071;

② 台湾中央研究院环境变迁研究中心, 台北 11529;

③ 台湾海洋大学应用地球科学研究所, 基隆 20224

* 联系人, E-mail: xfshi@fio.org.cn

2011-04-06 收稿, 2011-09-05 接受

国家自然科学基金(41006037)、国家海洋局青年海洋科学基金(2011309)、我国近海海洋综合调查与评价专项(908-ZC-1-05)和国家海洋局基本科研业务费(GY02-2011G28)资助

摘要 台湾岛位于欧亚板块与菲律宾板块的碰撞地带, 活跃的构造活动和丰富的降雨量以及其独特的地理位置造就了它在大陆边缘和“源到汇”研究中的重要地位, 每年通过河流注入到周边海域的沉积物多达数亿吨, 成为周边海域重要的物质来源, 也成为沉积物“源到汇”系统研究的天然实验室. 对台湾东部、西部 12 条代表性河流沉积物的黏土矿物分析结果显示, 台湾西北部淡水河黏土矿物组成以伊利石(73%)和绿泥石(24%)为主, 含有少量高岭石(3%), 不含蒙脱石; 台湾西部浊水溪沉积物中黏土矿物由伊利石(75%)和绿泥石(25%)组成; 台湾西南部高屏溪黏土矿物主要由伊利石(75%)和绿泥石(23%)组成, 含有少量高岭石(2%), 不含蒙脱石. 台湾东部河流沉积物与西部河流相比具有不同的黏土矿物组成, 其中花莲溪沉积物中绿泥石平均含量高达 48%, 是台湾所有河流中绿泥石含量最高值. 与大陆河流对比, 台湾河流具有明显不同的黏土矿物组合特征. 台湾河流中几乎不含蒙脱石, 高岭石含量也较低. 台湾河流沉积物中的黏土矿物组成特征主要与流域内岩石类型和物理、化学风化强度有关, 广泛出露的第三纪沉积岩, 尤其是砂岩、页岩、板岩等在经过强烈的物理风化作用后形成丰富的伊利石与绿泥石. 由于台湾雨量充沛, 地形陡峭, 使得这些黏土矿物被河流快速搬运至出海口, 并进一步随海流和波浪作用向其他海区扩散.

关键词

台湾河流
河流沉积物
黏土矿物
风化作用
物质来源

台湾岛位于欧亚板块交界处, 属于构造上升区, 其地层主要以第三纪以来的新生代沉积和变质岩层为主, 质地松软易于风化, 而且台湾地区地形陡峭, 与美国“大陆边缘研究计划”(Margins)底下的“Source to Sink”十年计划中选定的新西兰及巴布亚几内亚研究重点地区相比, 也一样常常受地震、台风及暴雨等的侵袭^[1,2], 造成台湾有世界最高的土壤侵蚀速率^[3], 因此每年会有侵蚀作用产生的大量陆源沉积物, 使得台湾河流每年可以携带约 $1.8 \times 10^8 \sim 3.8 \times 10^8$ t 沉积物进入周围海域^[4,5], 成为周围海域重要的物质来源^[6-8].

然而, 对于台湾河流沉积物的组成特征一直缺乏系统的调查研究, 因此, 每当遇到对台湾来源的物质贡献进行对比讨论时, 总是难以找到准确可靠的资料进行分析研究. 为此, 我们与台湾海洋大学和中央研究院环境变迁研究中心合作先后于 2010 年 1 和 8 月两次奔赴台湾对台湾西部及东部 12 条大型河流进行了系统的取样, 其中台湾西部河流由南往北依次为高屏溪、曾文溪、浊水溪、乌溪、大甲溪、大安溪、头前溪及淡水河, 台湾东部河流由南往北依次为秀姑峦溪、花莲溪、兰阳溪与双溪(图 1). 本文将利用这

些河流沉积物进行黏土矿物分析,建立台湾河流沉积物的黏土矿物组合特征,并探讨其物源示踪意义.

1 台湾河流概况及地质和气候背景

台湾共有大小河流约 150 条,总长度 42000 km,平均每平方千米拥有 1.17 m 长的河流,是我国水网最密集地区之一.高耸入云的中央山脉成为台湾岛水系与河流的重要分水岭,其东部河流注入太平洋或东海,西部河流则注入台湾海峡及南海北部.因为主分水岭偏东,故河流东短西长.台湾河流共同的特点是长度短、坡度大、水流急,最长的浊水溪长度仅为 186 km,而坡度则达 1/46.枯水期时水量小,河床裸露,常成野溪,而洪峰流量十分庞大,面积两三千平方千米的集水区域,经常出现 $10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上的洪水量.而且,洪水期间携带的泥沙量大,比如浊水溪,仅在 1996 年哈勃台风期间 3 d 内便向台湾海峡输出 $1.3 \times 10^8 \text{ t}$ 泥沙^[9],显示了台湾河流的巨大输沙能力.

台湾是一个主要由第三纪海相沉积岩为主体建造的岛屿,这些沉积岩覆盖了全岛的绝大部分面积,主要分布在屈尺断层以西的西部麓山带和冲积平原.中央山脉主脊和西翼的地层,是一套单调的海相泥质碎屑岩,称为板岩系.其地质时代从始新世到中新世早期,不整合在大南澳群变质基底地层之上.岩相变化表明,这套海相沉积物来自西面的大陆.板岩系的变形和变质程度向东增强,至最东面可达低绿片岩相.新近纪的浅海相碎屑沉积岩,分布在更靠西的台湾西部丘陵地区,为一套互层状砂岩、粉砂岩和页岩,局部夹石灰岩.台湾东部海岸山脉地带也主要以沉积岩为主,其中包含安山岩质集块岩和凝灰岩,这些是未变质的沉积岩.台湾东部、西部沉积岩分布区约占全台湾面积的 55%,在这些沉积岩中,以页岩、泥岩和粉砂岩分布最广,其次为砂岩,再次为砾岩和角砾岩.除这些沉积岩分布区外,在台湾中轴地带,大体上由屈尺断层以东至脊梁山脉棱线之间的地区,分布着已经发生轻度变质的第三纪沉积岩.这些第三纪沉积岩和轻度变质的沉积岩分布面积约占台湾岛面积的 86%,其余 14% 主要是由第三纪变质岩所覆盖.此外,台湾地表地层均呈狭长带状分布,大致与岛轴线平行.除了中央山脉和雪山山脉由变质岩构成以外,环岛的麓山带、海岸平原和海岸山脉则由沉积岩构成.火成岩的露头不多,以火山岩为主,缺乏深成岩.台湾的火成岩主要分布在大屯火山、基隆

火山、海岸山脉和澎湖群岛,前三者以安山岩和石英安山岩为主,后者以玄武岩为主.根据上述岩石性质,台湾大致可分为 3 个地质区,即中央山脉地质区、西部山麓带地质区以及东部海岸山脉地质区^[10].

台湾岛地跨北回归线的两侧,属亚热带海洋性气候,年平均气温为 22°C . 1 和 2 月平均气温为 $15\sim 18^\circ\text{C}$, 7 和 8 月平均气温为 $24\sim 28^\circ\text{C}$. 雨量丰沛,多年平均降雨量 2515 mm,总降水量为 $905 \times 10^8 \text{ m}^3$. 台湾降雨空间分配不均,山区年平均降雨量高达 3000~5000 mm,平原地区仅 1500 mm; 时间分配也相差悬殊,5~10 月为丰水期,降雨量占了全年降雨量的 78%,南部地区的丰枯差异更大,丰水年的雨量占了全年降雨量 90.5%,而枯水期 11~4 月的降雨量不足 10%. 另外,台湾由于受季风影响,夏季台风雨极为严重,常常带来大规模的洪涝灾害,据资料统计,1897~1998 年发生过 350 次台风,有上千次的特大暴雨侵袭,平均每年发生 3~5 次台风.

2 样品来源与分析

2010 年 1 与 8 月分别进行了台湾东部、西部河流的野外地质考察,系统采集了台湾 12 条典型河流的沉积物样品.此次用于黏土矿物分析的样品共 41 个,这些河流沉积物样品主要采集于各河流下游河漫滩,考虑到河床表层泥质沉积物可以近似代表河水悬浮颗粒的物质成分^[11],我们直接从河水位置附近的河床或河漫滩采集细粒沉积物(表 1). 样品采集主要选择在河流下游或河口采集,尽量避开城市和其他可能的污染源,使这些样品的矿物成分能代表整个流域的平均效果.为了进行比较,我们还收集了长江、黄河、珠江以及前人对台湾个别河流沉积物中黏土矿物的分析研究资料.

在实验室利用蒸馏水对样品进行充分浸泡,然后利用 $63 \mu\text{m}$ 孔径湿筛筛分出 $<63 \mu\text{m}$ 细颗粒组分与 $>63 \mu\text{m}$ 的粗颗粒组分,细颗粒组分用于黏土矿物分析及化学元素分析,而粗颗粒组分则用于碎屑矿物分析.黏土矿物分析使用黏土粒级矿物($<2 \mu\text{m}$)定向薄片的 X 射线衍射方法(XRD). 每个细颗粒样品取大约 1 cm^3 ,先后用 H_2O_2 与 HAc 充分反应以去除有机质和碳酸盐,然后根据 Stokes 原理所确定的沉降时间来提取黏土粒级矿物并制成定向片 2 份,一份直接上机测试(自然样品),然后在 490°C 马弗炉中加热 2 h 后测试(加热样品);另一份在乙二醇蒸汽(60°C , 12 h)

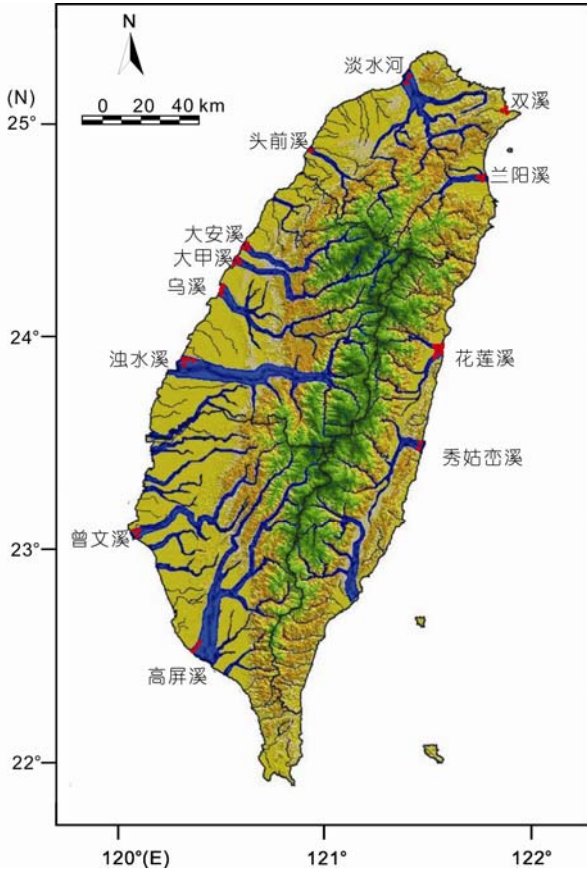


图 1 台湾东部、西部 12 条主要河流
圆点代表取样站位

饱和后上机测试(乙二醇样品). 将制片剩余的样品加入 6 mol/L 的 HCL 在 80°C 水浴中反应 2 h 后洗酸并

制成定向片上机测试(热盐酸处理样品). 乙二醇饱和和样品扫描 2 次: 第一次扫描角度 $3^{\circ}\sim 35^{\circ}(2\theta)$, 步长 0.02° ; 第二次扫描角度 $24^{\circ}\sim 26^{\circ}(2\theta)$, 步长 0.01° , 后一次扫描是为了更精确地识别绿泥石和高岭石在 $3.54^{\circ}/3.58^{\circ}$ 的混合峰. XRD 分析在国家海洋局第一海洋研究所海洋沉积与环境地质重点实验室完成, 仪器型号及仪器工作条件为: 日本理学 D/max-2500 型转靶 X 射线衍射仪, CuK α 辐射, 工作电压 40 kV, 工作电流 100 mA.

对黏土矿物的识别主要是根据衍射图谱上(001)晶面反射峰的位置来确定: 主要黏土矿物的衍射峰为蒙脱石(17 Å)、伊利石(10 Å)及高岭石/绿泥石(7 Å). 其中高岭石和绿泥石是通过拟合 $3.58\text{ \AA}/3.54\text{ \AA}$ 衍射峰峰面积比值来确定. 黏土矿物的半定量计算是基于 Biscaye^[13]与 Petschick 等人^[14]所确立的计算方法, 利用每种黏土矿物(001)晶面的衍射峰面积乘以强度因子而计算出来. 同时, 利用乙二醇曲线计算伊利石矿物学特征. 伊利石的结晶度是根据 10 Å 衍射峰处的半峰宽来确定. 在此我们同时也利用了 Diekmann^[15]对结晶程度的划分标准: 对伊利石来说, 结晶极好(<0.4)、结晶好(0.4~0.6)、中等结晶(0.6~0.8)和结晶差(>0.8). 伊利石结晶度低值代表结晶度高, 指示陆地物源区水解作用弱, 为干冷的气候条件, 这个参数也可用于示踪物源区和搬运路径. 伊利石的化学指数是通过 $5\text{ \AA}/10\text{ \AA}$ 峰面积比来计算, 比值大于 0.5 为富 Al 伊利石, 代表强烈的水解作用; 比值小于 0.5 为富 Fe-Mg 伊利石, 为物理风化结果^[15].

表 1 台湾河流取样信息^{a)}

河流	取样点	纬度 (°N)	经度 (°E)	河流长度 (km)	流域面积 (km ²)	年降雨量 (mm/a)	年径流量 (10 ⁶ m ³)	年输沙量 (10 ⁶ t)
淡水河	官渡大桥	25.131	121.452	158.87	2726	2939	7043.97	11.45
头前溪	中正大桥	24.785	121.057	63.03	566	2200	989.21	2.56
大安溪	大安溪桥	24.368	120.646	95.76	758	2300	1573.24	4.97
大甲溪	大甲溪桥	24.314	120.605	140.21	1235	2200	2596.33	4.03
乌溪	台中热电厂	24.327	120.839	116.75	2026	1800	3726.93	6.79
浊水溪	西滨大桥	23.834	120.289	186.4	3155	2200	6094.76	63.87
曾文溪	曾文溪大桥	23.156	120.339	138.47	1177	2300	2361.27	31
高屏溪	万大大桥	22.597	120.437	170.9	3256	2500	8455.33	35.61
花莲溪	花莲大桥	23.937	121.609	57.28	1507	2600	3809.26	20.61
秀姑峦溪	长虹桥	23.478	121.499	81.15	1790	2300	4179.02	19.97
兰阳溪	葛玛兰桥	24.717	121.811	73.06	979	3200	2773.11	7.98
双溪	龙门吊桥	25.023	121.936	26.81	132	3000	—	1.15

a) 台湾河流资料来源于 Kao 和 Milliman (2008)^[12], 台湾经济部水资源管理局. “—”表示无数据

3 实验结果

黏土矿物的定性及半定量分析是利用 X 衍射仪测得的数据结果结合 Jade5.0 软件进行的. 定性分析主要是通过 4 种不同测试条件下得到的衍射曲线特征, 鉴别出样品中所含黏土矿物的种类(图2). 我们选取了 4 条河流沉积物在 4 种不同条件下的衍射曲线进行比较分析, 在这 4 条河流样品的自然定向片 X 射

线衍射图谱上可以看到 6.1°, 8.7°, 12.4°, 17.6°, 18.7°, 25.1°和石英(26.5°), 斜长石(27.8°)衍射峰. 8.7°, 17.6°反射峰清晰明显, 经乙二醇饱和处理后, 特征峰位置和强度无明显变化, 说明伊利石的存在. 当加热 490°C 后, 由于伊利石矿物层间水被驱出, 衍射峰强度有所增强. 6.1°附近衍射峰为绿泥石第一级基面衍射峰, 经过乙二醇饱和和处理后, 仅仅有乌溪和花莲溪样品中的特征峰分异为 5.1°, 6.1°两个峰, 并且 5.1°附

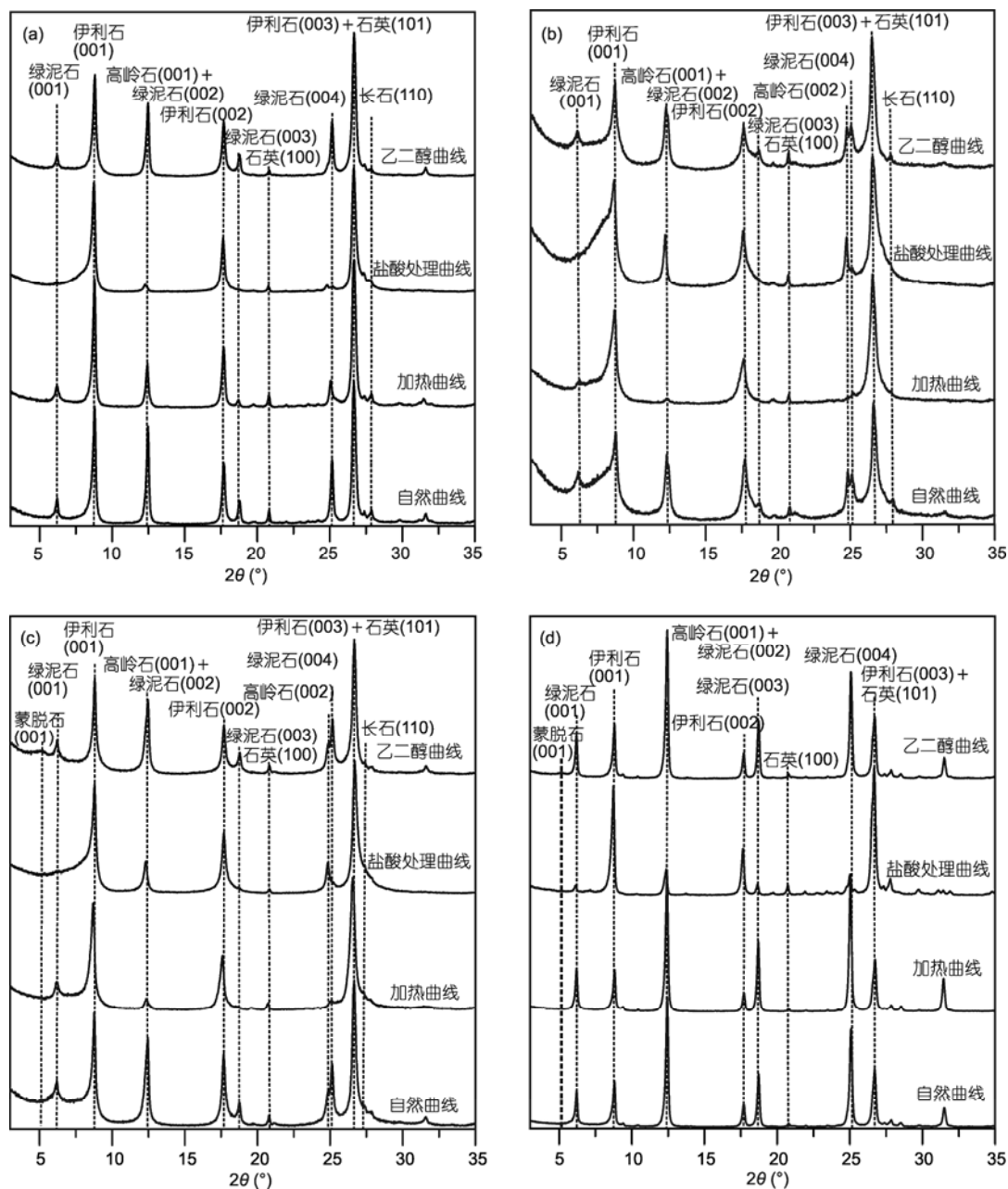


图2 台湾河流 X 射线衍射峰特征图
(a) 高屏溪; (b) 双溪; (c) 乌溪; (d) 花莲溪

近蒙脱石衍射峰较弱, 经 490 °C 加热处理后, 5.1°蒙脱石衍射峰完全消失, 表明乌溪与花莲溪河流样品中含有少量蒙脱石矿物, 而高屏溪与双溪河流沉积物中不含蒙脱石矿物. 在双溪和乌溪自然样品衍射图谱上出现了 12.4°, 24.8°两个特征峰, 经乙二醇饱和后, 特征峰位置和强度无明显变化, 当加热 490 °C 后, 两个衍射峰明显降低, 说明这两条河流沉积物中有高岭石矿物的存在. 而在高屏溪和花莲溪两个样品的自然衍射图谱中没有出现 24.8°特征峰, 对 24°~26°经过步长为 0.01°的慢扫以后仍然没有高岭石峰存在; 热盐酸处理样品中 25.1°特征峰接近完全消失, 说明高屏溪和花莲溪这两个样品中不含高岭石矿物. 4 条河流样品自然片衍射图谱中均出现 12.4°与 25.1°两个特征峰, 乙二醇饱和处理后无明显变化, 盐酸处理后衍射峰明显减弱或消失, 表明这 4 条河流样品中均有绿泥石矿物的存在. 其他河流样品中黏土矿物的鉴定与此相同.

台湾河流沉积物中的黏土粒级矿物(粒径<2 μm)

主要有伊利石、绿泥石两种黏土矿物和石英、长石非黏土矿物组成, 根据上述 XRD 数据处理方法, 对取得的台湾河流沉积物中黏土矿物相对含量进行计算得出, 台湾河流沉积物中的黏土矿物主要以伊利石(52%~81%, 平均 71%)和绿泥石(13%~48%, 平均 26%)为主, 高岭石(平均 3%)在台湾西部的曾文溪和乌溪以及东北部的双溪中含量较高, 其他河流中高岭石含量较低, 各河流沉积物中基本不含蒙脱石(表 2). 这其中伊利石含量最高, 除了台湾东部花莲溪与秀姑峦溪河流沉积物中的伊利石平均含量低于 65%以外, 其他河流沉积物中伊利石平均含量均高于 65%, 尤其以台湾西北部大安溪中含量最高, 其伊利石平均含量为 81%. 绿泥石含量仅次于伊利石, 除了双溪和大安溪中绿泥石平均含量为 13%和 18%外, 其他河流沉积物中绿泥石平均含量均高于 20%, 尤其是台湾东部花莲溪与秀姑峦溪中绿泥石平均含量更是高达 48%与 36%, 这与长江、黄河以及珠江中的黏土矿物组合类型明显不同(图 3, 表 2). 台湾河流沉积物中含

表 2 台湾河流与长江、黄河、珠江、东海陆架及南海北部陆架沉积物中黏土矿物组成特征

河流名称	样品数量	蒙脱石(%)	伊利石(%)	高岭石(%)	绿泥石(%)	伊利石结晶度(°Δ2θ)	伊利石化学指数
大安溪	3	0	81	1	18	0.35	0.56
大甲溪	3	0	73	2	25	0.29	0.54
淡水河	2	0	73	3	24	0.34	0.49
头前溪	2	0	66	0	34	0.37	0.43
浊水溪	4	0	75	1	24	0.27	0.40
高屏溪	4	0	75	2	23	0.30	0.47
双溪	3	0	76	11	13	0.46	0.63
曾文溪	3	0	72	8	20	0.36	0.49
乌溪	3	0	69	7	24	0.31	0.56
花莲溪	8	0	52	0	48	0.24	0.46
兰阳溪	3	0	77	0	23	0.34	0.48
秀姑峦溪	3	0	64	0	36	0.25	0.44
浊水溪 ^{a)}	3	0	69	1	30	0.20	0.30
台湾西南河流 ^{b)}	19	0	71	1	28	0.16	0.33
兰阳溪 ^{c)}	6	0	78	6	17	0.30	0.45
浊水溪 ^{d)}	7	0±0	71±1	1±1	28±1	—	—
长江 ^{e)}		6	66	16	12	—	—
黄河 ^{e)}		12	62	10	16	—	—
珠江 ^{f)}	47	1	42	36	21	0.28	0.60
东海陆架泥 ^{g)}	7	3	77	9	12	—	—
台湾西南陆架 ^{b)}	11	0	74	0	26	0.16	0.36

a) Wan 等人^[16]; b) 根据 Liu 等人^[7]数据换算得出; c) 郑智睿^[17]; d) Xu 等人^[18], Liu 等人^[19]; e) Yang 等人^[20]; f) 刘志飞等人^[21]; g) Liu 等人^[22]. “—”表示无数据

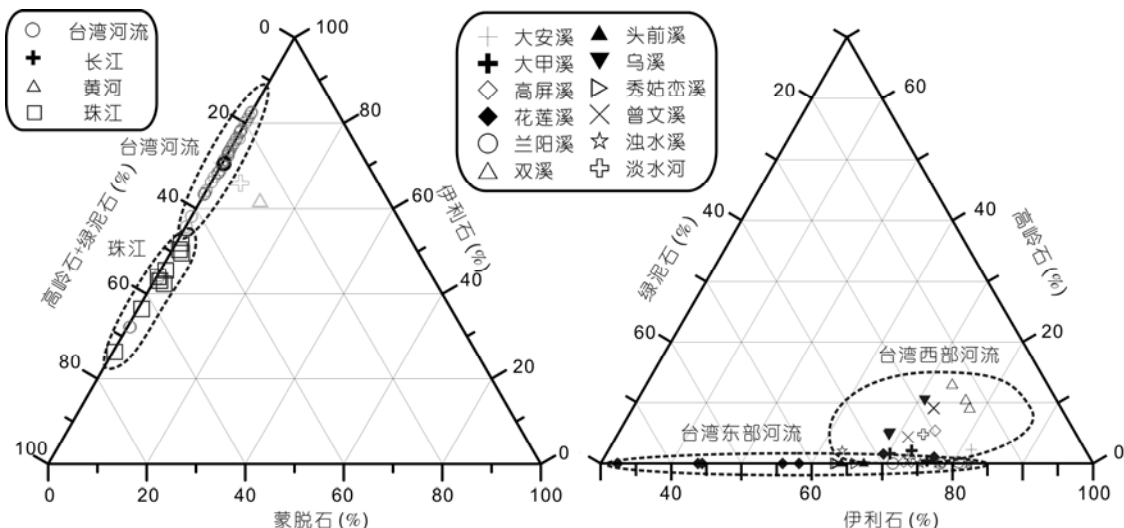


图3 台湾河流沉积物黏土矿物组合与长江、黄河、珠江黏土矿物组合对比
 长江、黄河黏土矿物资料据文献[20], 珠江黏土矿物资料据文献[21]

有丰富的伊利石和绿泥石, 而高岭石和蒙脱石含量极低, 其中, 蒙脱石含量最低, 仅仅在曾文溪、乌溪以及花莲溪沉积物中含有极少量蒙脱石(不足1%), 其他河流样品中则完全不含蒙脱石. 台湾河流样品中的高岭石含量也较低, 除了乌溪、曾文溪及双溪3条河流中高岭石平均含量分别为7%, 8%, 11%以外, 其他河流沉积样品中高岭石矿物含量均低于3%, 而台湾东部的花莲溪、兰阳溪、秀姑峦溪和台湾西部的头前溪这4条河流沉积物样品中基本不含高岭石矿物. 伊利石结晶度在台湾东部、西部各条河流沉积物中均较小, 12条河流中伊利石结晶度值平均为 $0.32^{\circ}\Delta 2\theta$, 除了双溪河流沉积物中伊利石结晶度为 $0.47^{\circ}\Delta 2\theta$ 以外, 其他河流样品中伊利石结晶度均小于 $0.40^{\circ}\Delta 2\theta$, 结晶极好, 表明台湾河流沉积物中的伊利石主要形成于物理风化比较强的气候环境. 台湾河流沉积物中伊利石化学指数平均为0.49, 其中台湾东部河流沉积物中伊利石化学指数平均为0.46, 台湾西部河流沉积物中伊利石化学指数平均为0.49, 表明台湾河流沉积物中伊利石主要为Fe-Mg伊利石, 并且台湾西部化学风化作用相比东部较强.

4 讨论

地表岩石与土壤的风化作用是沉积物生成与搬运的先驱过程, 而风化作用一般包括物理与化学风化两部分. 物理风化是一种机械崩解作用, 可以使岩石的颗粒失去结合力, 由大块岩石破碎成细小颗粒,

成为砾石、砂、粉砂等, 但是化学成分没有发生显著的改变. 化学风化作为化学的分解作用, 也可以说是一种腐蚀作用. 岩石受到化学风化后, 不仅是外型破坏散开, 其内部矿物成分的化学组成及性质也会发生改变. 海洋沉积物中的碎屑黏土矿物主要是形成于陆地硅铝酸盐岩的化学风化作用, 伊利石和绿泥石被认为初始矿物, 形成于弱的水解作用和岩石的直接侵蚀; 高岭石代表了强烈的水解作用, 是温暖和潮湿气候条件下化学风化作用的结果; 而蒙脱石代表铁镁质硅铝酸盐岩的化学风化产物^[23]. 因此, 从直观上来讲, 高岭石形成于温暖和潮湿的气候条件, 伊利石和绿泥石形成于相对寒冷和干旱的气候条件, 而蒙脱石也形成于温暖和潮湿的气候环境, 但与火山岩化学风化作用密切相关.

在台湾, 虽然气候温暖湿润, 植被茂盛, 有利于化学风化作用的进行; 但是台湾地壳抬升速率快, 土壤剥蚀速率高, 加之频繁发生的地震和台风活动, 使得陆上出露的岩石没有充足的时间发生化学风化作用就遭侵蚀, 因此台湾地区物理风化作用强烈, 而化学风化作用较弱^[24]. 台湾陆上的黏土矿物组成不仅与台湾的风化类型相关, 还与台湾的基岩类型密切相关. 前面讲到, 台湾岛地层主要以第三纪沉积岩和轻度变质岩为主, 包括砂岩、页岩、板岩和千枚岩等^[10], 而伊利石主要产于台湾南部泥质岩区、雪山山脉和中央山脉的硬页岩及板岩中; 绿泥石多产于中央山脉绿色片岩、角闪岩、片麻岩及变质泥岩内^[17].

而台湾主要河流均发源于中央山脉, 本项研究中所涉及的这 12 条河流均为台湾主要河流, 其源头均为台湾中央山脉, 因此各河流沉积物中的黏土矿物均以伊利石(平均为 71%)和绿泥石(平均为 26%)为主(图 3), 台湾西部三大河流浊水溪、高屏溪及淡水河沉积物中伊利石分别达到 75%, 75%, 73%, 而绿泥石含量也分别为 25%, 23%, 24%, 表明这些河流流域内基岩及土壤在经过强烈的物理风化后通过雨水的冲刷被快速运移到河口, 并随着海流和波浪作用进一步向周边海区运移, 这也与前人对台湾河流及周边海域表层沉积物的研究结果相一致^[7,8,17-19,22]。另外, 台湾河流是明显的季节性河流, 在取样过程中发现, 台湾西部大甲溪、大安溪等河流在枯水期河床裸露, 几近断流, 而河道里遍布大小不一的鹅卵石, 有的甚至直径超过 1 m, 充分体现了台湾河流在台风期间的巨大搬运能力, 因此, 台湾每年向周边海域输出的巨量泥沙主要是通过台风期间的洪水作用发生^[9,25]。

台湾东部花莲溪和秀姑峦溪河流沉积物中黏土矿物组成特征与其他河流明显不同, 表现为这两条河流样品中绿泥石含量非常高(图 2, 表 2), 其中花莲溪 8 个沉积物样品中绿泥石平均含量为 48%, 最高含量达到 67%, 最低含量为 22%, 是台湾河流中绿泥石含量最高的。与花莲溪邻近的秀姑峦溪 3 个沉积物样品中绿泥石含量分别为 36%, 37% 和 34%, 平均含量为 36%。这两条河流中基本不含高岭石矿物, 蒙脱石矿物含量也极低, 在花莲溪 8 个沉积物样品中平均含量不足 1%, 而在秀姑峦溪中则不含蒙脱石矿物。因为含有丰富的绿泥石矿物, 这两条河流中伊利石矿物的百分含量相对较低, 其中花莲溪中伊利石含量平均为 52%, 最低为 32%, 是台湾河流所有样品中伊利石含量最低的; 秀姑峦溪中伊利石的平均含量为 64%。花莲溪与秀姑峦溪沉积物中绿泥石含量较高的黏土矿物组成特征与台湾东南部特殊的岩石类型相关。花莲溪发源于台湾岛花莲县中央山脉大山支脉之拔子山, 其基岩主要以板岩和千枚岩为主, 在变质的泥质岩层中也夹有较厚的变质砂岩层, 有的为石灰质砂岩, 有的为长石质砂岩^[10], 这些岩石经过强烈的物理风化后形成含量较为丰富的绿泥石矿物, 使得花莲溪沉积物中绿泥石含量异常丰富。另外, 花莲溪沉积物中伊利石结晶度平均为 $0.24^\circ\Delta 2\theta$, 为台湾各河流样品中伊利石结晶度的最低值(图 4), 伊利石结晶程度极好, 这表明花莲河流域岩石的物理风

化作用比较强烈。作为台湾东部第一大河流的秀姑峦溪发源于中央山脉秀姑峦山东南侧, 大范围流经大南澳片岩、绿色片岩分布区, 并且流域内地形陡峭, 河流平均坡降为 1/34, 加之台湾东部经常受到台风引起的暴雨侵蚀, 使得河流沉积物中富含物理风化作用形成的伊利石和绿泥石矿物。根据前人对台湾东部上新世-更新世泥岩中的黏土矿物研究结果来看, 台湾东部泥岩中主要黏土矿物为碎屑状伊利石和绿泥石, 含有少量的伊/蒙混层矿物和高岭石, 并且伊利石和绿泥石都是来自附近变质岩区的碎屑组分而不是原地理藏变质作用的自生产物^[26]。

除了由岩石直接侵蚀形成的丰富伊利石和绿泥石外, 在化学风化作用比较强烈的地区也含有较高含量的高岭石, 比如台湾东北部海拔 1700~2200 m 的高山地区化学风化较强烈的地表土壤中, 高岭石含量就比较丰富^[27], 但是这些富含高岭石的沉积物主要堆积在高山湖泊中, 一般无法经由河流输送入海。台湾西部河流乌溪、曾文溪和台湾东北部的双溪河流沉积物中均含有高岭石矿物, 高岭石平均含量分别为 7%, 8% 和 11%, 表明这 3 条河流沉积物中可能有部分沉积物来源于化学风化较强烈的地区。因为台湾受到台风暴雨的侵袭比较频繁, 异常丰富的降雨量可以将上游地区经过强烈化学风化的基岩风化物质及表层土壤冲刷并被河流搬运至下游平缓低地沉积下来。野外取样过程中也发现, 这 3 条河流的河漫滩及河道中分布有黄色浮泥, 与其他河流中青灰色的沉积物明显不同。这种土黄色沉积物中含有较高的高岭石, 而伊利石和绿泥石含量则相比邻近河流偏低。以台湾东北部小型河流双溪为例, 双溪河流沉积物中高岭石的含量为 11%, 而绿泥石的含量相比邻近的兰阳溪明显偏低, 伊利石的结晶度为 $0.47^\circ\Delta 2\theta$, 为所有河流样品中最高值, 这表明双溪与邻近的兰阳溪具有不同的物质来源。双溪是 1 条非常小的河流, 长度仅有不足 27 km, 水流平缓, 从上游至下游地势比较平缓, 表明双溪流域内除物理风化作用较强外, 化学风化作用也相对较强, 导致其河流沉积物与其他河流的明显不同。

台湾岛虽然地处亚热带, 气候温暖湿润, 但是受到构造活动和台风降雨的强烈影响, 剥蚀速率极高, 平均土壤剥蚀率为 $1365 \text{ mg cm}^{-2}\text{a}^{-1}$, 是世界土壤剥蚀率最高的地区^[3]。如此高的剥蚀速率使得出露的岩石没有充足的时间发生化学风化作用就遭侵蚀, 形

成伊利石和绿泥石黏土矿物组合,并且伊利石化学指数明显比同样处于亚热带气候区的珠江沉积物^[21]偏低,另外台湾西部伊利石化学指数高于台湾东部(图4),表明台湾西部化学风化强度高于台湾东部.这是因为台湾主分水岭(中央山脉)偏东,使得台湾河流呈左右不对称分布:台湾西部河流长度较长、流域面积较大;而台湾东部河流长度较短、坡度较陡.另外,台湾东部每年受到台风、暴雨的影响高于台湾西部,使得台湾东部遭受更为强烈的物理风化作用,而化学风化作用较弱.但是台湾东北部的双溪例外,双溪流域的风化类型更接近于台湾西部河流(图4).

5 结论

本文通过系统分析台湾岛河流表层沉积物样品的黏土矿物组成特征,结合台湾岩石类型和风化过程,取得了以下主要结论.

台湾河流沉积物的黏土矿物组合以伊利石为主(52%~81%),平均含量高达71%,其次为绿泥石(13%~48%,平均26%),高岭石只在个别河流沉积物中出现,并且含量较低,各河流基本不含蒙脱石.其中台湾西部三大河流浊水溪、高屏溪及淡水河沉积物中伊利石分别达到75%,75%,73%,而绿泥石含量也分别为25%,23%,24%.台湾东部河流具有明显不同

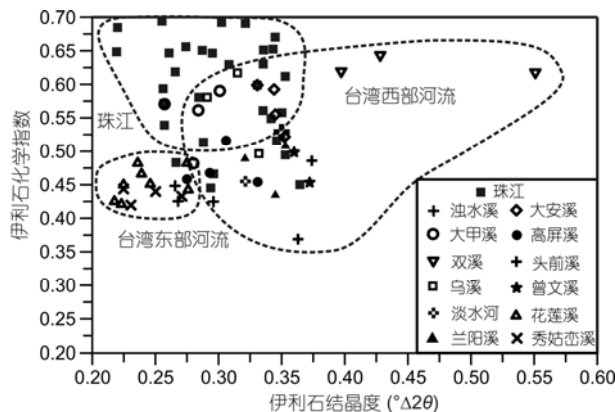


图4 台湾各河流沉积物的伊利石结晶度和化学指数对比
珠江黏土矿物资料据文献[20]

的黏土矿物组合类型,其中,花莲溪中绿泥石含量平均高达48%,秀姑峦溪中绿泥石平均含量为36%.与大陆河流相比,台湾河流几乎不含蒙脱石,高岭石含量也很低.

台湾岛伊利石和绿泥石的形成主要受到了活跃的构造背景、基岩类型以及强烈的物理风化过程所控制,台湾岛地形陡峭,地震活动和台风暴雨频繁,使得台湾岛具有强烈的机械剥蚀作用,而没有充分的时间进行化学风化作用,加之基岩类型主要以第三纪沉积岩为主,从而形成含量丰富的伊利石和绿泥石.

致谢 台湾海洋大学尤伯森博士参加了野外工作和有关讨论,中国科学院海洋研究所万世明博士与中国科学院南海海洋研究所刘建国博士参与有益讨论,在此表示衷心感谢!

参考文献

- Pickup G, Higgins R J, Warner R F. Erosion and sediment yield in Fly River drainage basins, Papua New Guinea. *Int Assoc Sci Hydrol Pub*, 1981, 132: 438-456
- Berryman K, Marden M, Eden D N, et al. Tectonic and paleoclimatic significance of Quaternary river terraces of the Waipaoa River, East Coast, North Island, New Zealand. *New Zeal J Geol Geop*, 2000, 43: 229-245
- Li Y H. Denudation of Taiwan Island since the Pliocene epoch. *J Geol*, 1976, 4: 105-107
- Dadson S J. Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen. *Nature*, 2003, 426: 648-651
- Kao S J, Horing C S, Hsu S C, et al. Enhanced deepwater circulation and shift of sedimentary organic matter oxidation pathway in the Okinawa Trough since the Holocene. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: 1-4
- Diekmann B, Hofmann J, Henrich R, et al. Detrital sediment supply in the southern Okinawa Trough and its relation to sea-level and Kuroshio dynamics during the late Quaternary. *Mar Geol*, 2008, 255: 83-95
- Liu Z, Tuo S, Colin C, et al. Detrital fine-grained sediment contribution from Taiwan to the northern South China Sea and its relation to regional ocean circulation. *Mar Geol*, 2008, 255: 149-155
- Wan S, Li A, Clift P D, et al. Increased contribution of terrigenous supply from Taiwan to the northern South China Sea since 3 Ma. *Mar Geol*, 2010, 278: 115-121

- 9 Kao S J, Jan S, Hsu S C, et al. Sediment budget in the Taiwan Strait with high fluvial sediment inputs from mountainous rivers: New observations and synthesis. *Terr Atmos Ocean Sci*, 2009, 19: 525–546
- 10 陈培源. 台湾地质. 台北: 台湾省应用地质技师公会, 2008
- 11 Liu Z, Zhao Y, Colin C, et al. Chemical weathering in Luzon, Philippines from clay mineralogy and major-element geochemistry of river sediments. *Appl Geochem*, 2009, 24: 2195–2205
- 12 Kao S J, Milliman J D. Water and sediment discharge from small mountainous rivers, Taiwan: The roles of lithology, episodic events, and human activities. *J Geol*, 2008, 116: 431–448
- 13 Biscaye P E. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans. *Geol Soc Am Bull*, 1965, 76: 803–832
- 14 Petschick R, Kuhn G, Gingele F. Clay mineral distribution in surface sediments of the South Atlantic: Sources, transport, and relation to oceanography. *Mar Geol*, 1996, 130: 203–229
- 15 Diekmann B, Wopfner H. Petrographic and diagenetic signatures of climatic change in peri- and postglacial Karoo Sediments of SW Tanzania. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1996, 125: 5–25
- 16 Wan S, Li A, Clift P D, et al. Development of the East Asian monsoon: Mineralogical and sedimentologic records in the northern South China Sea since 20 Ma. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2007, 254: 561–582
- 17 郑智睿. 南冲绳海槽表层沉积物中黏土矿物之研究. 硕士学位论文. 台北: 台湾大学海洋研究所, 2008
- 18 Xu K H, Milliman J D, Li A C, et al. Yangtze-and Taiwan-derived sediments on the inner shelf of East China Sea. *Cont Shelf Res*, 2009, 29: 2240–2256
- 19 Liu J P, Liu C S, Xu K H, et al. Flux and fate of small Mountainous Rivers derived sediments into the Taiwan Strait. *Mar Geol*, 2008, 256: 65–76
- 20 Yang S Y, Jung H S, Lim D, et al. A review on the provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea. *Earth-Sci Rev*, 2003, 63: 93–120
- 21 刘志飞, Colin C, 黄维, 等. 珠江流域盆地表层沉积物的黏土矿物及其对南海沉积物的贡献. *科学通报*, 2007, 52: 448–456
- 22 Liu J P, Li A C, Xu K H, et al. Sedimentary features of the Yangtze River-derived along-shelf clinoform deposit in the East China Sea. *Cont Shelf Res*, 2006, 26: 2141–2156
- 23 Chamley H. *Clay Sedimentology*. Berlin: Springer, 1989. 623
- 24 Selvaraj K, Chen C T A. Moderate chemical weathering of subtropical Taiwan: Constraints from solid-phase geochemistry of sediments and sedimentary rocks. *J Geol*, 2006, 114: 101–116
- 25 Milliman J D, Lin S W, Kao S J, et al. Short-term changes in seafloor character due to flood-derived hyperpycnal discharge: Typhoon mindulle, Taiwan, July 2004. *Geology*, 2007, 35: 779–782
- 26 Dorsey R J, Buchovecky E J, Lundberg N. Clay mineralogy of Pliocene-Pleistocene mudstones, eastern Taiwan Combined effects of burial diagenesis and provenance unroofing. *Geology*, 1988, 16: 944–947
- 27 Pai C W, Wang M K, Chiu C Y. Clay mineralogical characterization of a toposequence of perhumid subalpine forest soils in northeastern Taiwan. *Geoderma*, 2007, 138: 177–184