



华南沿岸大型河流粘土矿物组合特征及对南海北部沉积物的贡献

曹立^{1,2}, 刘建国^{1,3*}, 何伟^{1,2}, MD Hafijur Rahaman Khan^{1,2}

1. 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广东广州 510301
2. 中国科学院大学, 北京 100049
3. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东青岛 266061

摘要: 为系统分析华南大陆沿岸河流沉积物的粘土矿物组成特征, 及其对南海北部陆架粘土粒级沉积物的贡献, 通过采集 6 条大型 (年输沙量 >0.5 Mt/year) 沿岸河流沉积物样品及南海北部陆架区表层沉积物, 运用 X 射线衍射 (XRD) 方法进行了粘土矿物测试。结果显示: 九龙江、韩江与漠阳江高岭石与伊利石含量之和超过 90%; 除榕江蒙脱石含量达 18%, 其他河流蒙脱石含量极低; 6 条河流沉积物中绿泥石含量极低, 仅珠江和鉴江含 9% 绿泥石。分析表明: (1) 华南沿岸 6 条大型河流粘土矿物组成区别明显, 可用以指示南海北部沉积物来源; (2) 南海北部陆架区伊利石与绿泥石主要来自台西南河流; 高岭石来自珠江、漠阳江及鉴江; 蒙脱石来自榕江及珠江三角洲—大鹏湾—大亚湾等沿岸区域。

关键词: 华南沿岸河流; 粘土矿物; 南海北部; 物质来源; 表层沉积物。

中图分类号: P736.21

文章编号: 1000—2383(2018)S2—0192—011

收稿日期: 2017—12—10

Clay Mineral Assemblage Features of Major Rivers along the South China Coast and Their Contributions to the Northern South China Sea

Cao Li^{1,2}, Liu Jianguo^{1,3*}, He Wei^{1,2}, MD Hafijur Rahaman Khan^{1,2}

1. CAS Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Guangzhou 510301, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Laboratory for Marine Geology and Environment, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China

Abstract: In order to explain distribution characteristics of clay mineral composition in sediments from coastal rivers, and their contribution to sediments in the northern South China Sea (NSCS), we collected sediment samples from six major rivers along the South China coast whose annual sediment discharge is greater than 500 thousand tons, together with surface sediment samples in the NSCS. The results show that (1) the total percentage of illite and kaolinite in sediments from the Han, Jiulong and Moyang rivers is more than 90%, (2) smectite percentage in coastal river sediments is very low except for the Rong river (18%), (3) sediments in these six rivers have low chlorite percentage, and only the Jian and Pearl rivers can reach 9%. The clay mineral assemblages in sediments from the above rivers are different from each other, which can be used to identify sediment sources in the NSCS. On the NSCS continental shelf, illite and chlorite mainly originate from the southwestern Taiwan, while kaolinite is primarily sourced from Jian, Moyang and Pearl Rivers. Smectite is largely derived from the Rong River, and area ranged from the Pearl River Delta to the Dapeng and Daya Bays.

Key words: South China coastal rivers; clay mineral; northern South China Sea; sediment sources; surface sediment.

基金项目: 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室开放基金项目 (No.MGQNL201705); “全球变化与海气相互作用”专项国际合作项目 (No.GASI-GEOGE-03); 中国科学院战略性先导科技专项“西太平洋典型海山的岩石圈物质组成与沉积环境” (No.XDA11030103)。

作者简介: 曹立 (1990—), 男, 博士研究生, 主要从事海洋沉积与矿物学研究。ORCID:0000-0001-9077-543X。E-mail:caoli115@mails.ucas.ac.cn

* **通讯作者:** 刘建国, E-mail:jgliu@scsio.ac.cn

引用格式: 曹立, 刘建国, 何伟, 等, 2018. 华南沿岸大型河流粘土矿物组合特征及对南海北部沉积物的贡献. 地球科学, 43 (Suppl. 2): 192–202.

0 引言

南海北部海域邻近华南大陆、印支大陆、台湾岛和海南岛, 这些地区发育有众多河流, 每年向南海北部输送了大量的碎屑物质。前人研究认为, 由于受到海南岛的阻隔, 红河输入的碎屑物质主要沉积在南海西北部的北部湾盆地、莺歌海盆地和琼东南盆地(邵磊等, 2013); 南海北部陆架大部分沉积物堆积主要受珠江的控制(蔡观强等, 2011; 邵磊等, 2013), 因此珠江一直是研究南海北部沉积物来源的重点。

华南沿海大陆岸线(闽粤边境至中越边境)长约 5 000 km, 海南岛岸线长约 1 500 km, 沿岸有大小入海河流数百条(王文介, 1986), 其中流域面积在 1 000 km²以上者近 20 条(详见表 1), 虽以珠江输沙量最大, 对南海北部陆架的粘土矿物贡献率最高可达 72%(刘志飞等, 2007), 但其他河流也有不少泥沙入海, 它们对南海北部沉积物的贡献也不容忽视(Liu *et al.*, 2008; 闫慧梅等, 2016; Xu *et al.*, 2017)。本次研究筛选出华南沿岸年输沙量超过 0.5 Mt 的大

型河流(详见表 1), 进行系统采样和粘土矿物分析, 进而建立起沉积物物源端元, 填补南海北部“从源到汇”过程缺乏系统研究华南沿岸河流的空白。

1 材料与方法

本次研究所用样品包括河流沉积物与海洋表层沉积物共 59 个(具体站位见图 1)。河流沉积物样品共 20 个, 于 2016 年 11 月取自华南沿岸的鉴江(3 个)、漠阳江(2 个)、珠江(9 个)、榕江(2 个)、韩江(2 个)、九龙江(2 个)等 6 条河流。其中珠江样品取自西江、北江、东江三大支流下游(各 2 个)以及珠江三角洲地区磨刀门、蕉门、虎门等入海口区域(共 3 个); 其他河流样品均取自河流中下游近入海口区域。取样时上述河流处于由洪水期向枯水期过渡时期或枯水期, 采样站点均靠近当地水文测站, 样品均取自紧挨河流水体的河漫滩表层细粒沉积物。海洋表层沉积物共 39 个, 均为中国科学院南海海洋研究所多年来在南海北部获取。

表 1 南海北部周边入海河流水文参数

Table 1 Hydrologic data of the rivers surrounding the northern South China Sea

区域	河流	汇入海域	流域面积 (10 ³ km ²)	长度 (km)	年径流量 (10 ⁸ m ³ /year)	年输沙量 (10 ⁶ t/year)	资料来源
华南大陆及海南岛	珠江*	南海	453.69	2 214	6 306.1	84.30	Liu <i>et al.</i> (2016)
	韩江*	南海	30.112	430	8 666.7	10.00	Milliman and Farnsworth (2011)
	九龙江*	南海	14.751	260	150.0	2.23	徐茂泉和李超 (2003)
	鉴江*	南海	9.500	232	108.0	2.00	Milliman and Farnsworth (2011); 陈金庆 (2005)
	南流江	北部湾	8.635	287	56.1	1.11	肖晓 (2015)
	漠阳江*	南海	6.100	200	88.2	0.80	陈鸿文和陈文乐 (2006); 王文介 (1986)
	榕江*	南海	4.408	175	31.1	0.64	Milliman and Farnsworth (2011); 陈世豪 (2010)
	南渡江	北部湾	7.033	333.8	66.8	0.48	李丹 (2009)
	万泉河	南海	3.700	163	48.4	0.45	杨志宏等 (2013)
	茅领江	北部湾	2.959	112	1.6	0.32	肖晓 (2015)
	钦江	北部湾	2.457	179	1.2	0.27	肖晓 (2015)
	防城江	北部湾	0.843	98	1.8	0.24	肖晓 (2015)
	大风江	北部湾	1.927	185	0.6	0.12	肖晓 (2015)
	昌化江	南海	5.150	232	745.1	0.08	Milliman and Farnsworth (2011)
	台湾岛	浊水溪	台湾海峡	3.100	190	60.9	63.87
高屏溪		南海	3.300	170	84.5	35.61	李传顺等 (2012)
曾文溪		南海	1.200	140	23.6	31.00	李传顺等 (2012)
淡水河		台湾海峡	2.700	160	70.4	11.45	李传顺等 (2012)
二仁溪		南海	0.350	65	14.3	10.00	Milliman and Farnsworth (2011)
乌溪		台湾海峡	2.000	120	3 726.9	6.79	李传顺等 (2012)
东港溪		南海	0.470	47	23.4	5.20	Milliman and Farnsworth (2011)
大甲溪		台湾海峡	1.200	140	9.9	4.03	李传顺等 (2012)
大安溪		台湾海峡	0.760	96	14.5	4.00	Milliman and Farnsworth (2011)
八掌溪		南海	0.470	80	15.7	2.50	Milliman and Farnsworth (2011)
后龙溪		台湾海峡	0.470	58	14.9	2.40	Milliman and Farnsworth (2011)
盐水溪		南海	0.220	87	13.6	2.20	Milliman and Farnsworth (2011)
林边溪		南海	0.340	42	25.3	1.80	Milliman and Farnsworth (2011)
北港溪		南海	0.640	82	12.5	1.40	Milliman and Farnsworth (2011)
头前溪	台湾海峡	0.600	63	13.3	1.10	Milliman and Farnsworth (2011)	
朴子溪	南海	0.430	76	12.8	0.83	Milliman and Farnsworth (2011)	

注: “*”河流为本次取样河流。

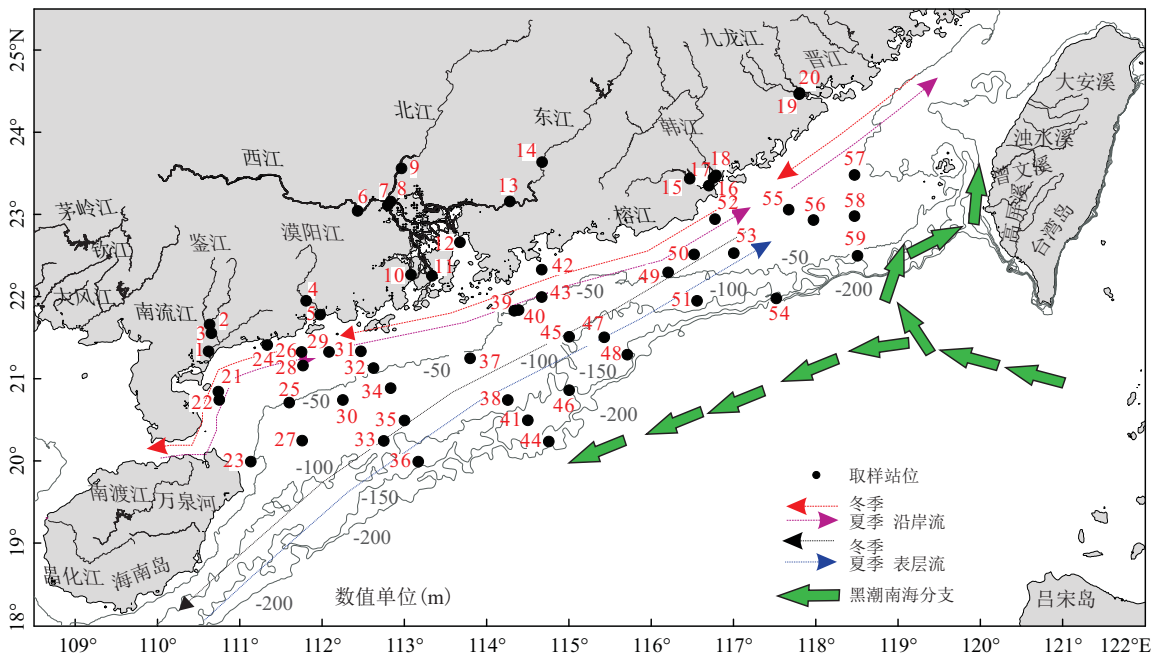


图 1 采样站位分布

Fig.1 Distribution of the sampling sites

粘土矿物采用 Stokes 沉降法提取粘土粒级 ($<2 \mu\text{m}$) 组分制备定向薄片 (Liu *et al.*, 2017), 使用 X 射线衍射方法 (XRD) 进行分析. 实验室分析测量步骤如下: (1) 样品经过 $63 \mu\text{m}$ 滤网分离出 $<63 \mu\text{m}$ 的部分; (2) 称取该部分样品 2 g 先后用 10% H_2O_2 溶液和 10% 醋酸溶液在水浴锅中 60°C 环境下各反应 2 小时, 去除有机质和碳酸盐; (3) 用纯净水反复离心清洗 3 次, 至抗絮凝作用发生; (4) 按 Stokes 沉降经验公式确定沉降时间, 将悬浮物 $<2 \mu\text{m}$ 的上层浊液吸出, 上层浊液以 4 800 转/分的速度离心十分钟, 采用涂片法将离心后的样品制成自然片 (N 片), 自然片在 60°C 环境中经乙二醇蒸汽处理 12 小时后制成乙二醇饱和片 (EG 片), 然后进行 XRD 分析; (5) 用 Topas2P 衍射数据处理软件分析衍射图谱, 计算各衍射峰强度与峰面积; (6) 采用 Biscaye (1965) 方法计算 4 种主要粘土矿物 (蒙脱石、高岭石、伊利石、绿泥石) 的相对百分含量: 4 种粘土矿物的相对含量是以乙二醇饱和片衍射图谱上蒙脱石 (001)、伊利石 (001)、绿泥石 (002) 和高岭石 (001) 4 种矿物 3 个特征峰 (见图 2) 的面积作为基础数据进行计算, 其权重因子分别为 1、4、2, 绿泥石和高岭石的含量比例以 $3.54 \text{ \AA}/3.58 \text{ \AA}$ 的衍射峰面积比值求出, 4 种粘土矿物的总含量校正为 100%. 所有样品 XRD 测试在中国科学院广州能源研究所分析测试中心完成,

使用荷兰的 PANalytical X'Pert PRO 衍射仪进行测定, 并保持相同测试条件, 数据读取与处理在中国科学院海洋研究所完成.

2 结果

2.1 华南沿岸大型河流粘土矿物组合特征

XRD 分析结果表明, 华南沿岸包括鉴江、珠江等在内的 6 条河流沉积物的粘土矿物组合主要由伊利石和高岭石组成 (表 2). 九龙江、韩江与漠阳江沉积物中高岭石与伊利石含量之和超过 90%; 除榕江蒙脱石含量达 18%, 其他河流蒙脱石含量极低; 6 条河流沉积物中绿泥石含量极低, 仅珠江和鉴江含 9% 绿泥石.

2.2 南海北部表层沉积物的粘土矿物组合特征

结果显示, 南海北部表层沉积物的粘土矿物以伊利石为主 (平均含量为 54%), 其次为蒙脱石和高岭石 (平均含量分别为 20% 和 16%), 绿泥石含量最低 (平均为 9%), 且变化较小. 高岭石含量自西向东逐渐增高 (图 4b), 蒙脱石和伊利石的含量自西向东也有明显差异 (图 4a, 图 4d), 为了更好地研究南海北部表层沉积物粘土矿物的来源, 结合高岭石、蒙脱石、伊利石以及绿泥石 4 种主要粘土矿物含量分布趋势, 将南海北部沿岸陆架区划分为以下 3 个区域:

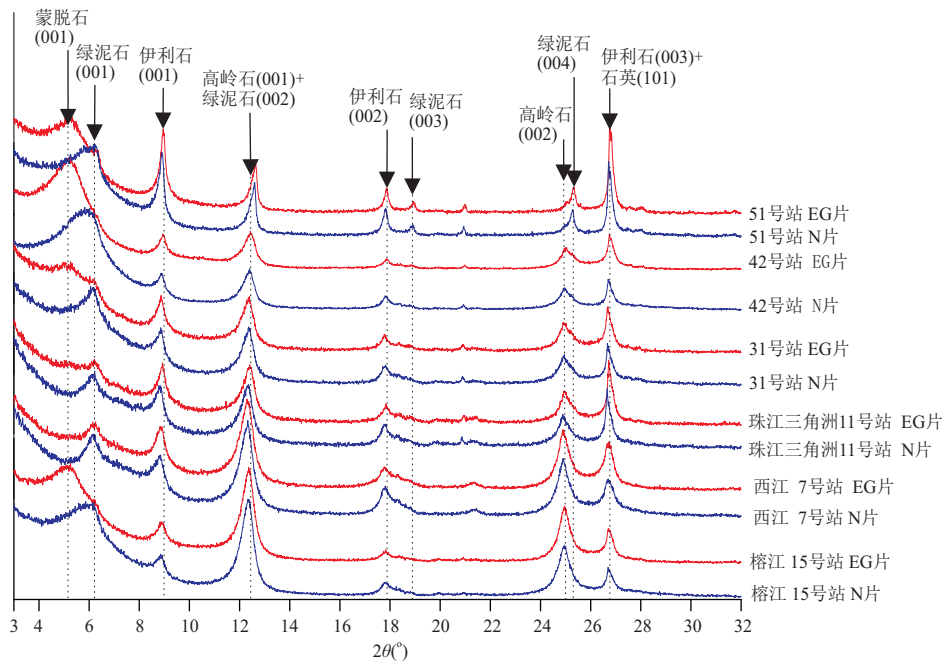


图 2 南海北部陆架区与华南沿岸河流典型样品 X 射线衍射叠加波谱

Fig.2 Multiple X-ray diffractograms of typical samples from the NSCS shelf and surrounding rivers

N 片: 自然风干片; EG 片: 乙二醇饱和片

表 2 华南沿岸河流、南海北部及周边平均粘土矿物组合

Table 2 The average clay mineral assemblages of the South China coastal rivers, the northern South China Sea shelf and surrounding rivers

地区	河流	样品数	蒙脱石 (%)	伊利石 (%)	高岭石 (%)	绿泥石 (%)
华南沿岸	九龙江	2	5	46	46	3
	榕江	2	19	55	25	1
	韩江	2	1	42	51	6
	北江	2	1	53	45	1
	东江	2	3	43	53	1
	西江	2	2	63	26	9
	珠江三角洲	3	5	58	28	9
	漠阳江	2	2	48	50	0
	鉴江	3	0	36	55	9
	大亚湾 ¹		15	41	41	4
南海北部	I 区	8	14	65	7	13
	II 区	18	25	53	13	9
	III 区	13	16	51	26	7
台湾岛 ²	大安溪	3	0	81	1	18
	浊水溪	4	0	75	1	24
	高屏溪	4	0	75	2	23
	曾文溪	3	0	72	8	20
雷州半岛 ¹	吕宋岛 ¹		25	32	41	2
			76	3	9	12
海南岛 ³	南渡江	7	0	33	43	24
	万泉河	3	0	30	45	25
	昌化江	6	4	36	37	23

注: 1 据 Liu et al. (2012); 2 据李传顺等, (2012); 3 据 Hu et al. (2014), 已用 Biscaye (1965) 方法进行换算。

I 区位于研究区东部, 北起九龙江入海口, 中部自台湾浅滩向西南延伸至南海北部陆架东部边缘, 共计 8 个沉积物样品。粘土矿物组合以高伊利石含量 (平均含量高达 65%) 和低高岭石含量 (平均含量为

7%) 为特征, 绿泥石含量平均为 13%。另外, 由九龙江口向东南至陆架海域, 高岭石含量和蒙脱石含量逐渐减少, 伊利石含量和绿泥石含量则有增加的趋势。

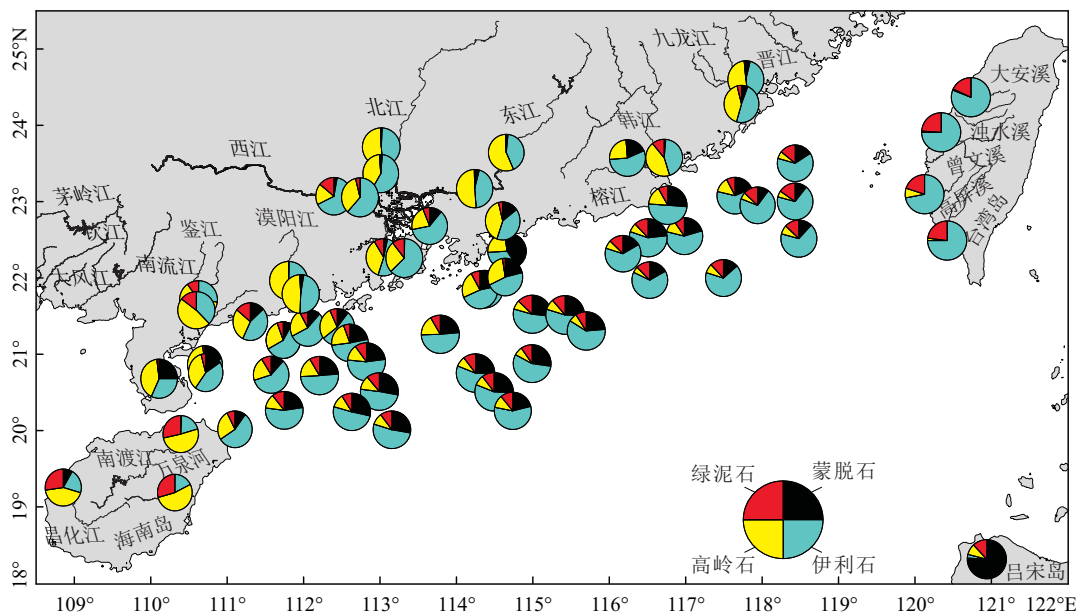


图 3 南海北部陆架及周边河流的粘土矿物组成

Fig.3 The clay mineral assemblages of the surface sediment in the northern South China Sea shelf and surrounding rivers

II 区位于研究区中部, 覆盖珠江入海口及东侧大鹏湾、大亚湾、红海湾和榕江与韩江入海口等, 向西南延伸至南海北部陆架南部边缘, 共计 18 个沉积物样品。粘土矿物组合以高伊利石含量(平均含量为 53%)与高蒙脱石含量(平均可达 25%)为特征。高岭石含量平均为 13%, 绿泥石含量平均为 9%。该区高岭石含量由陆向海呈逐渐减少的趋势, 蒙脱石含量一直保持较高的值, 伊利石含量和绿泥石含量则有增加的趋势。

III 区位于研究区西部, 包含漠阳江、鉴江入海口向西南延伸至广州湾, 西邻雷州半岛、海南岛, 共计 13 个沉积物样品。粘土矿物组合以高伊利石含量(平均为 51%)与高岭石含量(平均为 26%), 低蒙脱石含量(平均为 16%)为特征, 绿泥石含量平均为 7%, 也属于低值区域。由漠阳江口向琼州海峡, 高岭石含量逐渐减少, 伊利石含量有增加的趋势, 蒙脱石含量和绿泥石含量变化比较复杂。

3 讨论

大量的粘土矿物都是母岩经地表风化作用所形成的, 河流流域的地质背景以及环境条件极大地控制着所形成粘土矿物的种类与特征, 尤其是母岩的类型以及流域的气候条件(杨作升, 1988; 李国刚, 1990)。

一般认为, 绿泥石多在低级变质岩中衍生, 形成于碱性环境, 在化学风化作用和搬运过程中稳定性差。伊利石是由长石和云母等铝硅酸盐矿物在温暖少雨的气候条件下经弱的水解作用形成, 其代表的是一种温暖的气候背景; 一旦气候变得湿热, 化学风化加剧, 使其晶格混层的 K^+ 淋滤丢失, 破坏伊利石晶格, 则会进一步分解为高岭石(Diekmann and Wopfner, 1996)。沉积物中的高岭石, 主要是在潮湿气候条件下由酸性的长石、云母族矿物以及辉石经历强烈的淋滤作用所形成的, 其代表的是湿热的气候条件(刘志飞, 2010)。蒙脱石易形成于干湿交替的气候环境, 广泛分布于富集 Fe^{3+} 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的矿物中, 代表了碱性环境, 是各种火山岩或火山成因物质的风化变质产物(何梦颖, 2014)。

3.1 华南沿岸大型河流粘土矿物组成探讨

本次采集的华南沿岸 6 条河流沉积物样品, 其粘土矿物组合虽然均受华南地区湿热多雨的气候条件控制, 表现为富伊利石与高岭石的总体特征, 但是由于同时还受到流域岩石地质背景、径流量等因素影响, 各条河流沉积物的粘土矿物组合也存在明显差异。

珠江三大支流中, 西江是主要的输沙来源, 占比高达 87%(吴文中和赵焕庭, 1982), 结合珠江三大支流与珠江三角洲地区的粘土矿物组成(表 2)对比, 西江沉积物在粘土矿物组成上更能代表珠江沉积物。

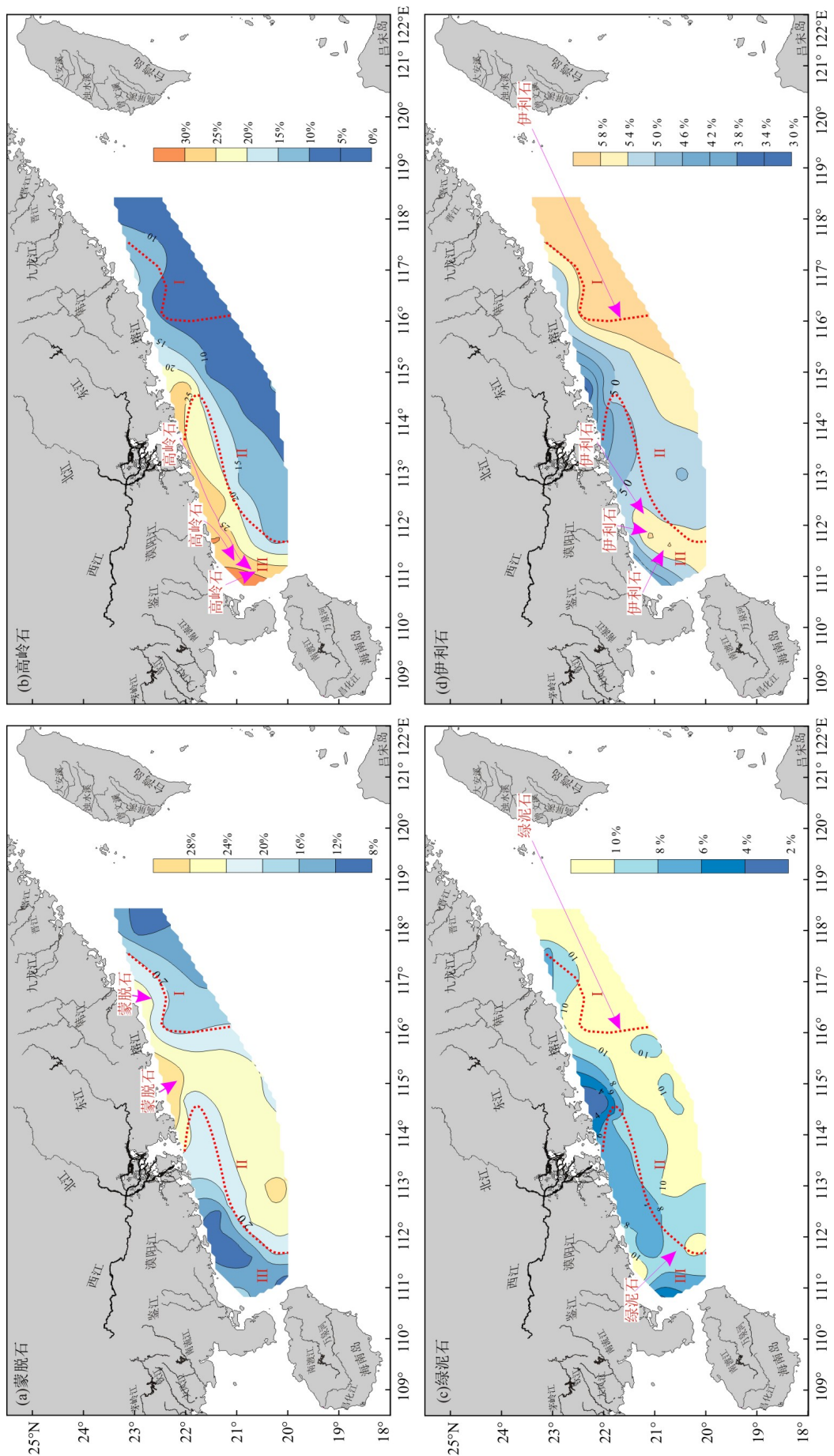


图 4 南海北部粘土矿物含量空间分布及单矿物源示意图

Fig.4 Spatial distribution of clay mineral content

a. 蒙脱石; b. 高岭石; c. 绿泥石; d. 伊利石; I, II, III 为 3 个粘土矿物分区

西江流域广泛分布各种前寒武变质岩, 古生界砂、页岩及石灰岩, 在广东境内则以火成岩和浅变质岩为主(广东省地质矿产局, 1988. 广东省区域地质志, 北京); 流域气候炎热, 降雨量大, 淋滤作用强, 表土中的蒙脱石以及绿泥石难以保存, 易形成高岭石; 受强烈的雨水冲击及极大的冲刷围岩表层, 易形成较多伊利石等原生粘土矿物, 在粘土矿物组成上表现出更高的伊利石含量. 九龙江流域的围岩性质与气候条件与珠江类似, 由于其径流量相对较小, 对围岩的冲刷作用相对较弱, 在粘土矿物组成上以高含量的高岭石与伊利石为特征.

韩江是广东省第二大河流, 流域面积小于珠江, 风化母岩种类单一(王建华和郑卓, 1990), 上游多为中生界花岗岩, 下游则为第四系冲积层(广东省地质矿产局, 1988. 广东省区域地质志, 北京), 因此地域性母岩差异对粘土矿物种类的影响极小, 气候对粘土矿物的影响较大, 从韩江沉积物以及韩江三角洲的黏土矿物组成来看, 受酸性母岩的控制, 蒙脱石与绿泥石含量低; 韩江径流量高达 8 666.7 亿立方米/年, 远高于珠江(见表1), 大量的河水冲刷围岩表层形成了大量的伊利石以及受湿热气候影响而在土壤中形成的高岭石. 榕江与韩江同在汕头市入海, 但榕江下游有较多白垩系黑云母花岗岩出露(广东省地质矿产局, 1988. 广东省区域地质志, 北京), 经风化形成了相当多的蒙脱石, 导致榕江沉积物的粘土矿物组成中蒙脱石含量高达 19%.

鉴江流域广泛出露震旦系变质砂岩、石英岩等硅质岩类, 中下游茂名境内出露有白垩系正长斑岩, 碱性的正长斑岩风化后易形成绿泥石, 且搬运距离较短, 因此鉴江沉积物中含有一定的绿泥石, 整体而言, 鉴江沉积物相对富集高岭石(55%)与伊利石(36%), 含有少量绿泥石(9%), 基本不含蒙脱石. 漠阳江流域环境与鉴江类似, 但出露的火成岩上游以中侏罗统花岗闪长岩为主, 下游阳江市境内为大面积的第四系冲积层, 整体围岩偏酸性(广东省地质矿产局, 1988. 广东省区域地质志, 北京). 因此相比于鉴江等河流而言漠阳江沉积物中含有更少的绿泥石.

3.2 南海北部陆架粘土矿物的来源分析

前人研究认为, 南海北部陆架沉积物以陆源物质为主(陈俊仁和郑祥民, 1985), 主要源区为华南沿岸、台湾岛西南部及吕宋岛等(葛倩等, 2010), 主要依靠河流输运, 部分来自潮流及沿岸流对海岸

的侵蚀以及海湾沉积物的再搬运(陈俊仁和郑祥民, 1985;李志龙, 2006;朱雅敏等, 2012).

华南沿岸入海河流泥沙多数在各河口段或口外海滨处沉积, 部分由于潮汐、海流以及沿岸流的影响, 搬运或再搬运至南海陆架区沉积, 仅有少量进入深海(王文介, 1986; 吴正等, 1993). 本次采集的华南沿岸 6 条大型河流沉积物样品, 以富伊利石与高岭石为总体特征, 除榕江蒙脱石含量高达 19%, 其他河流蒙脱石含量极低; 珠江及鉴江含 8% 左右的绿泥石, 其余河流绿泥石含量不高.

台湾岛西南部河流以山溪河流为主, 流域面积不大, 但由于河流坡度大、水流急, 汛期携带的泥沙量巨大, 具有强大的输沙能力. 其粘土矿物组合以伊利石和绿泥石为主, 伊利石平均含量高达 71%, 绿泥石平均含量可达 26%(李传顺等, 2012).

吕宋岛火山活动活跃, 中基性火山物质风化后形成了大量蒙脱石(刘志飞和李夏晶, 2011), 导致吕宋岛河流沉积物的粘土矿物组成中蒙脱石平均含量达 76%, 高岭石和绿泥石含量分别为 9% 和 12%, 伊利石含量极少, 仅为 3%(Liu *et al.*, 2008)(表2).

由此可见, 南海北部周边源区的沉积物在粘土矿物组成上有很大的区别, 能够较好地指示南海北部陆架区的粘土矿物来源.

3.2.1 I 区粘土矿物来源分析 I 区东邻台湾浅滩, 北迎九龙江入海口, 从地理格局上受华南大陆和台西南的共同影响. 从粘土矿物组成(图3和图5)来看, I 区沉积物的粘土矿物组合除了含有少量的蒙脱石(14%)以外, 另外三种主要粘土矿物与台湾西南部河流中的粘土矿物组成极为相似, 含有较高的伊利石含量(65%)及绿泥石含量(13%), 且高岭石含量最低(7%), 且与华南沿岸输入本区的九龙江的粘土矿物组成有极大区别, 说明位于研究区东侧的区域伊利石与绿泥石的主要物源是台湾西南部河流, 这与刘志飞(2010)的研究结果基本一致.

值得注意的是, I 区粘土矿物分布(图4), 尤其是从蒙脱石和高岭石含量分布(图4a, 图4b)来看, 蒙脱石和高岭石的含量存在由西北向东南的递减趋势, 且高岭石含量舌状分布明显. 结合 I 区周边河流的粘土矿物组成(图3), 台湾西南部河流沉积物则表现为几乎不含高岭石和蒙脱石, 无法为本区提供蒙脱石和高岭石; 而榕江沉积物中蒙脱石含量高达 19%, 韩江沉积物中高岭石平均含量为 51%, 这表明 I 区北部

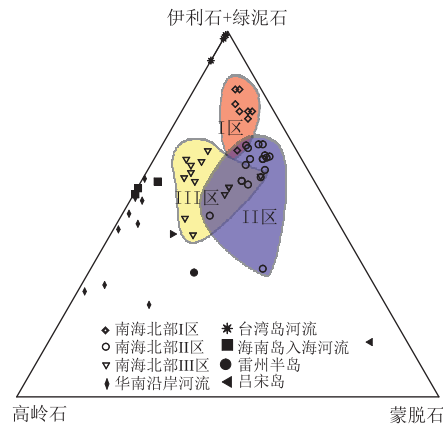


图 5 粘土矿物含量的对比三角图

Fig.5 Comparison of clay mineral content from the northern South China Sea shelf and surrounding rivers

边界区域的高岭石是由于韩江沉积物汇入南海后主要向西南输运,这不同于方建勇等(2012)基于钛铁矿分布给出的韩江物质向东输入台湾海峡的结论。

3.2.2 II区粘土矿物来源分析 II区北部为珠江入海口及入海口以东的近岸海域直至东侧的榕江与韩江入海口,向西南延伸至南海北部陆架南部边缘。本区的沉积物主要来自珠江、榕江、韩江等河流运输而来的陆源物质以及沿岸基岩与岛屿风化剥蚀产物(赵利等,2016)。

从粘土矿物组成来看,珠江沉积物中伊利石含量高(63%),而蒙脱石含量极低(2%);而本区的粘土矿物组成中含有较高的蒙脱石含量(26%),这与珠江沉积物粘土矿物组成明显不符。刘志飞和李夏晶(2011)对南海沉积物中的蒙脱石成因进行了探讨,认为南海北部的蒙脱石实际上来自吕宋岛河流沉积物,是经远距离搬运的吕宋岛河流沉积物堆积而成,但距离太远与缺乏相应的较强海流基本可以排除吕宋岛物质的输入(Liu *et al.*, 2011)。Liu *et al.* (2012)分析南海北部沿岸沉积物发现,大亚湾、大鹏湾地区海湾沉积物中的蒙脱石含量高达18%,Hu *et al.* (2013)调查发现,该区域沉积物中也含有平均含量33%的蒙脱石。因此,本区高含量的蒙脱石用珠江三角洲—大鹏湾—大亚湾沿岸的围岩遭风化剥蚀及沉积物经潮汐以及榕江等河流搬运来解释更为合理。

高岭石含量由珠江口向东南逐渐降低,往珠江口西侧则呈明显的增高汇聚趋势,显示珠江物质中的高岭石大部分并未在本区停留,而是在沿岸流影响下向西南侧扩散。

伊利石含量由陆向海逐渐增加,从33%升高至54%,差值超过20%,近岸处伊利石含量与珠江中伊

利石58%的含量有明显差异。上述结果表明珠江物质并没有直接向南输运,而是被沿岸流冲淡并向西南方向沿岸扩散,这与葛倩等(2010)关于南海北部陆架的伊利石来源的讨论相符。

3.2.3 III区粘土矿物来源分析 相比于II区,III区沉积物具有更高的高岭石含量(26%)和伊利石含量(51%)以及较低的蒙脱石含量(16%)。本区高岭石含量最高,自雷州半岛—鉴江河口—漠阳江河口沿线高岭石含量向东南逐渐减少,同时由陆向海有明显的递减趋势(从35%以上降至8%以内),自珠江口西侧向西侧陆架区,高岭石含量逐渐增高,这两者表明III区的高岭石由珠江、漠阳江与鉴江提供,由于在沿岸流的影响下,在雷州半岛附近形成高值区。

此外,本区伊利石含量较高,且在漠阳江西南侧海域,出现了明显的伊利石汇聚中心,伊利石含量向四周递减,由58%降低至42%;刘运令(2013)研究广州湾泥质区沉积特征时指出,此高值区存在明显的沉积物运输趋势,沉积物由各个方向汇聚到漠阳江口西南侧且水深约30m处的海域。这些证据表明该区伊利石高值是鉴江、漠阳江以及珠江的伊利石汇聚而成的结果。

本区蒙脱石含量呈现明显低值,且由陆向海递增,显然受北部鉴江与漠阳江冲淡水影响,III区西南侧的海南岛也无高含量的蒙脱石,Liu *et al.* (2012)发现湛江港和雷州湾中的粘土矿物特征截然相反,靠近鉴江的湛江港沉积物含低蒙脱石而雷州湾中含有高蒙脱石,这与鉴江沉积物中的低蒙脱石不符,这表明雷州湾处的高蒙脱石可能来自其他物源。蒙脱石多由基性火成岩经过风化与剥蚀形成,雷州半岛广泛分布基性火成岩,是本区西南侧蒙脱石可能来源(田

旭等, 2015)。

绿泥石含量在本区呈现由北向南逐渐降低、舌状分布, 且有从中部向两侧递减的趋势(图4), 北部输入的鉴江沉积物中绿泥石含量为 8%, 漠阳江基本不含绿泥石, 因此我们认为北部的绿泥石来源是鉴江, 受沿岸流影响两侧的绿泥石含量偏低。

4 结论

(1) 华南沿岸 6 条大型河流粘土矿物组成区别明显, 可用以指示南海北部沉积物来源: 鉴江、韩江相对富集高岭石(平均含量在 50% 左右), 几乎不含蒙脱石; 漠阳江、九龙江富集高岭石和伊利石(平均含量均超过 45%), 蒙脱石和绿泥石含量都较低, 但漠阳江中高岭石和伊利石相对含量更高(50% 和 48%), 九龙江含有相对较多的蒙脱石和绿泥石(5% 和 3%); 珠江、榕江相对富集伊利石(平均含量均在 55% 以上), 两者间珠江相对富集高岭石(26%)和绿泥石(9%)、贫蒙脱石(2%), 榕江相对富集蒙脱石, 蒙脱石平均含量可达 18%, 榕江也是六条河流中唯一含有较高蒙脱石的河流。

(2) 南海北部陆架区的不同粘土矿物受到不同陆源区域的控制。南海东北陆架的伊利石和绿泥石主要来自于台西南; 西北陆架的绿泥石来源则为鉴江; 伊利石则由鉴江、漠阳江与珠江输入; 南海北部沿岸的珠江三角洲—大鹏湾—大亚湾沿岸区域受风化剥蚀向北部近岸提供了较高的蒙脱石, 榕江沉积物中含有较高的蒙脱石, 向榕江近岸区域提供了较多蒙脱石; 榕江和韩江向东北部陆架区输送了大量高岭石, 珠江物质中的高岭石经沿岸流搬运至珠江口以西沿岸, 并与粤西的漠阳江、鉴江输送的高岭石混合, 堆积于陆架区的西北部。

致谢: 感谢中国科学院南海海洋研究所博士研究生钟福昌同学对采样工作的无私帮助; 感谢中国科学院广州能源研究所帮助进行了 XRD 测试; 感谢中国科学院海洋研究所博士研究生张晋、沈兴艳和硕士研究生朱潇在 XRD 曲线拟合计算时提供帮助; 特别感谢审稿专家提供的宝贵意见和建议使本文得以很大提高。

References

Biscaye, 1965. Mineralogy and Sedimentation of Recent Deep-Sea Clay in the Atlantic Ocean and Adjacent Seas and Oceans. *Geological Society of America Bulletin*, 76(7): 803–832.

- Cai, G.Q., Peng, X.C., Zhang, Y.L., 2011. The Significances of and Advances in the Study of Sediment Sources in the South China Sea. *Advances in Marine Science*, 29(1): 113–121 (in Chinese with English abstract).
- Chen, H.W., Chen, W.L., 2006. Hydrological Analysis of Moyangjiang River. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, (2): 60–61, 65 (in Chinese).
- Chen, J.Q., 2005. Hydrological Feature Analysis of Jianjiang River. *Pearl River*, (1): 20–22, 31 (in Chinese).
- Chen, J.R., Zheng, X.M., 1985. Sediment Sources of Northern South China Sea Shelf and Control Factors. *Acta Oceanologica Sinica*, 7(5): 579–589, 661–662 (in Chinese).
- Chen, S.H., 2010. Hydrological Feature Analysis of Rongjiang River. *Pearl River*, (4): 10–11, 41 (in Chinese).
- Diekmann, B., Wopfner, H., 1996. Petrographic and Diagenetic Signatures of Climatic Change in Peri- and Postglacial Karoo Sediments of SW Tanzania. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 125(1): 5–25.
- Fang, J.Y., Chen, J., Wang, A.J., et al., 2012. The Distribution Characteristics of Grain Size and Mineral of Surface Sediment in the Taiwan Strait. *Acta Oceanologica Sinica*, 34(5): 91–99 (in Chinese with English abstract).
- Ge, Q., Chu, F.Y., Liu, J.P., et al., 2010. Distribution of the Clay Minerals in Surface Sediments of the South China Sea and Their Provenance. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 30(4): 57–66 (in Chinese with English abstract).
- He, M.Y., 2014. The Provenance Study on the Yangtze River Sediments, Based on Mineralogy, Geochemistry and Detrital Zircon Dating (Dissertation). Nanjing University, Nanjing, 23–24 (in Chinese with English abstract).
- Hu, B., Li, J., Cui, R., et al., 2014. Clay Mineralogy of the Riverine Sediments of Hainan Island, South China Sea: Implications for Weathering and Provenance. *Journal of Asian Earth Sciences*, 96(1): 84–92.
- Hu, D., Clift, P.D., Böning, P., et al., 2013. Holocene Evolution in Weathering and Erosion Patterns in the Pearl River Delta. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(7): 2349–2368.
- Li, C.S., Shi, X.F., Gao, S.J., et al., 2012. Clay Mineral Composition and Their Sources for the Fluvial Sediments of Taiwanese Rivers. *Chinese Science Bulletin*, 57(2): 169–177 (in Chinese).
- Li, D., 2009. The Study on the Hydro-Chemical Characteristics and the Flux to the Sea about the Rivers in the East of China (Dissertation). East China Normal University, Shanghai, 8–17 (in Chinese with English abstract).
- Li, G.G., 1990. Clay Mineral Composition, Distribution in the China Offshore Surface Sediment and Its Geological Significance. *Acta Oceanologica Sinica*, 12(4): 470–479 (in Chinese).
- Li, Z.L., 2006. Erosion Mechanisms and Equilibrium Shapes of Sandy Coast of Headland Bays in South China (Dissertation). Sun Yat-sen University, Guangzhou, 139–143 (in Chinese with English abstract).

- Liu, J.P., Liu, C., Xu, K.H., et al., 2008. Flux and Fate of Small Mountainous Rivers Derived Sediments into the Taiwan Strait. *Marine Geology*, 256(1): 65–76.
- Liu, J.G., Steinke, S.V., Christoph, M., et al., 2017. Temporal and Spatial Patterns of Sediment Deposition in the Northern South China Sea over the Last 50,000 Years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 465(1): 212–224.
- Liu, J.G., Xiang, R., Chen, M.H., et al., 2011. Influence of the Kuroshio Current Intrusion on Depositional Environment in the Northern South China Sea: Evidence from Surface Sediment Records. *Marine Geology*, 285(1): 59–68.
- Liu, J.G., Yan, W., Chen, Z., et al., 2012. Sediment Sources and Their Contribution along Northern Coast of the South China Sea: Evidence from Clay Minerals of Surface Sediments. *Continental Shelf Research*, 47(10): 156–164.
- Liu, Y.L., 2013. Characteristics and Mechanisms for the Formation of Shelf Mud Deposits in the Northwestern South China Sea (Dissertation). Nanjing University, Nanjing, 82–88 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z.F., 2010. Clay Mineral Assemblages in Sediments of the South China Sea: East Asian Monsoon Evolution Proxies? *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(5): 1012–1019 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z.F., Colin, C., Huang, W., et al., 2007. Clay Minerals in Surface Sediments of the Pearl River Drainage Basin and Their Contribution to the South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 52(4): 448–456 (in Chinese).
- Liu, Z.F., Li, X.J., 2011. Discussion on Smectite Formation in South China Sea Sediments. *Quaternary Sciences*, 31(2): 199–206 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z.F., Zhao, Y.L., Colin, C., et al., 2016. Source-to-Sink Transport Processes of Fluvial Sediments in the South China Sea. *Earth Science Reviews*, 153(1): 238–273.
- Milliman, J.D., Farnsworth, K.L., 2011. River Discharge to the Coastal Ocean: A Global Synthesis. Cambridge University Press, New York, 304–307.
- Shao, L., Zhao, M., Qiao, P.J., et al., 2013. The Characteristics of the Sediment in Northern South China Sea and Its Response to the Evolution of the Pearl River. *Quaternary Sciences*, 33(4): 760–770 (in Chinese with English abstract).
- Tian, X., Xu, F.J., Wu, S.Z., et al., 2015. Clay Mineral Characteristics and Provenance of Continental Shelf Sediments in Eastern Hainan Island since Middle Holocene. *Earth Science*, 40(9): 1497–1504 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J.H., Zheng, Z., 1990. Approach of Clay Mineral and Paleo-Environment in the Quaternary of Hanjiang Delta. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 29(2): 133–136 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W.J., 1986. The Effect of Sediment Loads Discharged by the Rivers in South China on the Coast and Shelf. *Journal of Sediment Research*, 11(4): 27–36 (in Chinese with English abstract).
- Wu, W.Z., Zhao, H.T., 1982. On Silt Sources of Lingdingyang of the Zhujiang (Pearl River) Estuary by Means of Mineralogical Analyses of the Sediments. *Tropic Oceanology*, 1(2): 97–110 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Z., Feng, W.K., Liao, B.L., et al., 1993. Palaeogeographic Study in the Continental Shelf of the Northern South China Sea during the Last Stage of the Late Pleistocene. *Acta Geographica Sinica*, 48(6): 491–496, 577 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, X., 2015. Surface Sediment Grain Size and Transport of the Beibu Gulf in South China Sea (Dissertation). Ocean University of China, Qingdao, 8–9 (in Chinese with English abstract).
- Xu, F., Hu, B., Dou, Y., et al., 2017. Sediment Provenance and Paleoenvironmental Changes in the Northwestern Shelf Mud Area of the South China Sea since the Mid-Holocene. *Continental Shelf Research*, 144: 21–30.
- Xu, M.Q., Li, C., 2003. Characteristics of Heavy Minerals Composition and Distribution in Sediment from Jiulong River Estuary. *Marine Science Bulletin*, 22(4): 32–40 (in Chinese with English abstract).
- Yan, H.M., Tian, X., Xu, F.J., et al., 2016. Sediment Provenance of Offshore Mud Area of the Eastern Hainan Island in South China Sea since the Mid-Holocene. *Haiyang Xuebao*, 38(7): 97–106 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z.H., Jia, J.J., Wang, X.K., et al., 2013. Characteristics and Variations of Water and Sediment Fluxes into the Sea of the Top Three Rivers of Hainan in Recent 50 Years. *Marine Science Bulletin*, 32(1): 92–99 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z.S., 1988. Mineralogical Assemblages and Chemical Characteristics of Clays from Sediments of the Huanghe, Changjiang, Zhujiang Rivers and Their Relationship to the Climate Environment in Their Sediment Source Areas. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 19(4): 336–346 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, L., Peng, X.C., Zhong, H.X., et al., 2016. Characteristics of Grain Size Distribution of Surface Sediments and Depositional Environments in the Northern Shelf Region of the South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 36(6): 111–122 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y.M., Zhong, R.F., Li, Z.Q., 2012. Sedimentary Characteristics and Transport Trend around the Mianqianhai Cape, Yangxi, China. *Marine Geology Frontiers*, 28(3): 7–11 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡观强, 彭学超, 张玉兰, 2011. 南海沉积物物质来源研究的意义及其进展. *海洋科学进展*, 29(1): 113–121.
- 陈鸿文, 陈文乐, 2006. 漠阳江流域水文特性分析. *广东水利水电*, (2): 60–61, 65.
- 陈金庆, 2005. 鉴江流域水文特性分析. *人民珠江*, (1): 20–22, 31.
- 陈俊仁, 郑祥民, 1985. 南海北部内陆架沉积物来源及控制因素的研究. *海洋学报*, 7(5): 579–589, 661–662.
- 陈世豪, 2010. 榕江流域水文特性分析. *人民珠江*, (4): 10–11, 41.

- 方建勇, 陈坚, 王爱军, 等, 2012. 台湾海峡表层沉积物的粒度和碎屑矿物分布特征. 海洋学报, 34(5): 91–99.
- 葛倩, 初凤友, 刘敬圃, 等, 2010. 南海表层黏土矿物的分布与来源. 海洋地质与第四纪地质, 30(4): 57–66.
- 何梦颖, 2014. 长江河流沉积物矿物学、地球化学和碎屑锆石年代学物源示踪研究 (博士学位论文). 南京: 南京大学, 23–24.
- 李传顺, 石学法, 高树基, 等, 2012. 台湾河流沉积物的黏土矿物组成特征与物质来源. 科学通报, 57(2): 169–177.
- 李丹, 2009. 中国东部若干入海河流水化学特征与入海通量研究 (硕士学位论文). 上海: 华东师范大学, 8–17.
- 李国刚, 1990. 中国近海表层沉积物中黏土矿物的组成、分布及其地质意义. 海洋学报, 12(4): 470–479.
- 李志龙, 2006. 华南岬间海湾沙质海岸平衡形态与侵蚀机制 (博士学位论文). 广州: 中山大学, 139–143.
- 刘运令, 2013. 南海西北部陆架泥质沉积特征及其形成机制 (博士学位论文). 南京: 南京大学, 82–88.
- 刘志飞, 2010. 南海沉积物中的黏土矿物: 指示东亚季风演化历史? 沉积学报, 28(5): 1012–1019.
- 刘志飞, Colin, C., 黄维, 等, 2007. 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, 52(4): 448–456.
- 刘志飞, 李夏晶, 2011. 南海沉积物中蒙脱石的成因探讨. 第四纪研究, 31(2): 199–206.
- 邵磊, 赵梦, 乔培军, 等, 2013. 南海北部沉积物特征及其对珠江演变的响应. 第四纪研究, 33(4): 760–770.
- 田旭, 徐方建, 吴淑壮, 等, 2015. 中全新世以来琼东南陆架粘土矿物特征及物质来源. 地球科学, 40(9): 1497–1504.
- 王建华, 郑卓, 1990. 韩江三角洲第四系中粘土矿物与古环境探讨. 中山大学学报 (自然科学版), 29(2): 133–136.
- 王文介, 1986. 华南入海河流泥沙及其对海岸和陆架的影响初探. 泥沙研究, 11(4): 27–36.
- 吴文中, 赵焕庭, 1982. 从沉积物的矿物分析论珠江河口湾伶仃洋的泥沙来源. 热带海洋, 1(2): 97–110.
- 吴正, 冯文科, 廖秉良, 等, 1993. 晚更新世末期南海北部陆架的古地理探讨. 地理学报, 48(6): 491–496, 577.
- 肖晓, 2015. 南海北部湾底质沉积物粒度和泥沙运移趋势研究 (硕士学位论文). 青岛: 中国海洋大学, 8–9.
- 徐茂泉, 李超, 2003. 九龙江口沉积物中重矿物组成及其分布特征. 海洋通报, 22(4): 32–40.
- 闫慧梅, 田旭, 徐方建, 等, 2016. 中全新世以来南海琼东南近岸泥质区物质来源. 海洋学报, 38(7): 97–106.
- 杨志宏, 贾建军, 王欣凯, 等, 2013. 近 50 年海南三大河入海水沙通量特征及变化. 海洋通报, 32(1): 92–99.
- 杨作升, 1988. 黄河、长江、珠江沉积物中粘土的矿物组合、化学特征及其与物源区气候环境的关系. 海洋与湖沼, 19(4): 336–346.
- 赵利, 彭学超, 钟和贤, 等, 2016. 南海北部陆架区表层沉积物粒度特征与沉积环境. 海洋地质与第四纪地质, 36(6): 111–122.
- 朱雅敏, 钟任富, 李志强, 2012. 广东阳西面前海岬角附近海域泥沙沉积特征与搬运趋势. 海洋地质前沿, 28(3): 7–11.