

文章编号:1000-0550(2011)03-0544-08

长江流域沉积物黏土矿物组合特征及物源指示意义^①

何梦颖^{1,2} 郑洪波² 黄湘通¹ 贾军涛¹ 李玲²

(1. 同济大学海洋地质国家重点实验室 上海 200092; 2. 南京大学地球科学与工程学院 南京 210093)

摘要 通过X射线衍射方法系统分析了长江流域(干流和主要支流)表层沉积物(及部分表土)的黏土矿物,结果显示:长江流域黏土矿物主要由伊利石、绿泥石、高岭石和蒙脱石组成,伊利石含量最高,蒙脱石含量最低;长江干流上、中、下游黏土矿物含量基本一致,支流表现出明显区别,与流域不同的源岩类型和风化强度相对应。长江干流伊利石结晶度和化学指数自上游到下游均逐渐增大,说明长江流域从上游到下游,风化作用有增强的趋势。长江支流中,上游的伊利石化学指数均较低,中游湘江、赣江均为最高,代表上游以物理风化作用为主,中下游为化学风化作用。长江干流的黏土矿物面貌受到了上游支流的较大影响,不能只依靠干流信息,必须结合支流数据,判断长江风化作用强度。黏土矿物分布显示,长江流域上游雅砻江、大渡河、岷江、嘉陵江对中游沉积物贡献较大,乌江贡献较小;中游支流中,汉江对下游干流有一定的贡献;湘江、赣江、洞庭湖对下游及三角洲地区贡献较少。

关键词 长江 黏土矿物 物源 风化作用

第一作者简介 何梦颖 女 1985年出生 硕士研究生 第四纪地质学 E-mail: yingmh_1216@126.com

通讯作者 郑洪波 E-mail: zhenghb@nju.edu.cn

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

0 引言

河流是陆源物质向海洋搬运的主要通道,对流域和海洋环境有重要影响,而河流沉积物的矿物学和地球化学组成反映了源岩从风化剥蚀到搬运沉积的整个过程^[1],因此河流物质的物源示踪就成为陆海相互作用研究的核心内容之一。长江作为发源于青藏高原的第一大河,受亚洲季风气候控制,支流众多,流域地质地貌情况复杂,每年携带大量泥沙入海。对长江沉积区物质来源的变化以及流域现代沉积物从源到汇过程的探讨在研究长江演化方面有重要的指导作用,同时对于综合认识我国新生代宏观环境格局演化,尤其是青藏高原隆升与东亚季风演化等具有重要的意义。

前人在长江流域沉积物的矿物学和地球化学方面做了大量工作,包括碎屑矿物组成^[2]、Sr—Nd同位素组成^[3]和稀土元素^[4]等,其中黏土矿物以其能够较准确的指示物源并能反映物源区的气候条件,在物源示踪和古环境研究中发挥了重要作用^[5-13]。地表的黏土矿物主要来自于母岩的风化作用,包括岩石破碎的物理风化作用和具有离子交换反应的化学风化作用。研究发现,流域主要黏土矿物为伊利石、蒙脱

石、高岭石和绿泥石。伊利石是淋滤作用较弱,陆相中性或弱碱性环境下的产物,大多是陆相钾长石风化而成,代表寒冷少雨的气候,随气候变湿热,化学风化彻底,将进一步分解为高岭石;蒙脱石易形成于干湿交替的气候环境,广泛分布于辉绿岩、玄武岩、橄榄岩等基性岩石的风化壳中,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;高岭石在气候温暖潮湿,有持续、密集的水解作用下形成,特别在花岗岩和红黏土中,是弱酸性和淋滤作用、化学风化作用强烈的环境的指示矿物;绿泥石在低级变质岩中衍生,形成于碱性环境,常出现在火成岩和变质岩区域,富集于以物理风化为主,化学风化作用受抑制的地区^[14-20]。

针对长江流域黏土矿物的组成,杨作升等^[21]较早分析了黄河、长江、珠江下游沉积物中的黏土矿物,认为源区的气候条件是区分三条河流黏土矿物组成的客观基础;范德江等^[22]对长江和黄河沉积物中黏土矿物、地球化学组成进行研究,得出长江沉积物以伊利石/蒙脱石比值大于8为特征,黄河沉积物以伊利石/蒙脱石比值小于6为特征。在长江流域主要黏土矿物组合方面,方习生等^[23]、范德江等^[22]都发现其黏土矿物主要为伊利石、绿泥石、高岭石和蒙脱石,

^①国家自然科学基金重点项目(批准号:40830107)和联合国教科文组织IGCP项目(编号:IGCP-581)资助。
收稿日期:2010-05-10;收修改稿日期:2010-07-05

周晓静等^[24]证实了伊利石、蒙脱石和高岭石具有作为长江物源示踪标记的价值。尽管以往的研究很多,但多数研究集中在长江与黄河等流域沉积物的对比上,所用样品也仅限于长江下游及长江三角洲地区,缺乏长江中、上游(包括表土)及支流的信息,对整个长江流域黏土矿物分布的情况及其与支流关系的研究还不够深入。在前人研究的基础上,本文系统采集了长江干流和主要支流的现代沉积物,以及部分上游表土样品,进行黏土矿物分析,讨论黏土矿物组成与源岩及气候的关系,并探讨不同支流对长江干流沉积物的影响和贡献。

1 材料和方法

研究样品为2004年7月、2005年3月及2009年3月采集的长江各水系沉积物,从长江上游攀枝花地区到长江下游长兴岛均有分布。样品包括45个河道边滩、心滩砂样和6个表土样品。采样点主要选择在支流与干流汇合处,每一个采样点获得3个样品,一个位于支流,两个位于干流,分别采自汇合点的上下,采样点避开城市和可能的污染源;表土样品主要采集于长江上游大渡河和岷江地区(图1)。

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)。根据Stokes原理所规定的离心转速及时间,采用滴片的方法制成定向薄片。分别对样品进行自然条件($3^\circ \sim 36^\circ 2\theta$,步长 0.01°)、乙二醇条件($3^\circ \sim 36^\circ 2\theta$,步长 0.01°)、 $24^\circ \sim 26^\circ 2\theta$ 慢扫的测试。样品的制备和测试均在南京大

学测试中心完成。

黏土矿物的鉴定和解释主要依据样品在乙二醇数据下获得的XRD波谱,每个波峰参数的半定量计算使用JADE软件。黏土矿物的相对含量主要使用晶面衍射峰的面积比,按Biscaye^[25],蒙脱石采用 17 \AA (001)晶面,伊利石采用 10 \AA (001)晶面,高岭石(001)和绿泥石(002)使用 7 \AA 叠加峰,分别乘以权重系数1、4、2,为他们的权重强度。高岭石和绿泥石采用XRD慢扫数据,拟合 3.57 \AA 和 3.53 \AA 峰面积比确定。同时,根据乙二醇曲线计算出伊利石化学指数,为 $5 \text{ \AA}/10 \text{ \AA}$ 峰面积比,比值 < 0.4 ,代表富Fe—Mg伊利石,为物理风化作用的结果;比值 > 0.4 为富Al伊利石(白云母),代表强烈的水解作用^[26]。伊利石化学指数相对大小可以指示其风化程度,从而用来指示物源和气候变化^[6, 27, 28]。黏土矿物晶格的有序度和晶体颗粒的大小用“结晶度”衡量。伊利石结晶度与结晶时的压力和温度有关,经常用的是伊利石 10 \AA 半峰宽,但更好的方法是用乙二醇曲线上 10 \AA 的积分宽度IB(Integral Breadth)来表示^[29-30]。积分宽度IB是与目标峰等面积、等高度的一个矩形的宽度,高度是峰的强度值。IB指数低则代表结晶度高,指示陆地物源区水解作用弱^[28-29]。

2 结果

XRD分析结果如表1所示,从上游到下游,黏土矿物组合整体一致,整个流域都以伊利石为主,蒙脱石最少。在长江干流中,伊利石的平均含量上游为

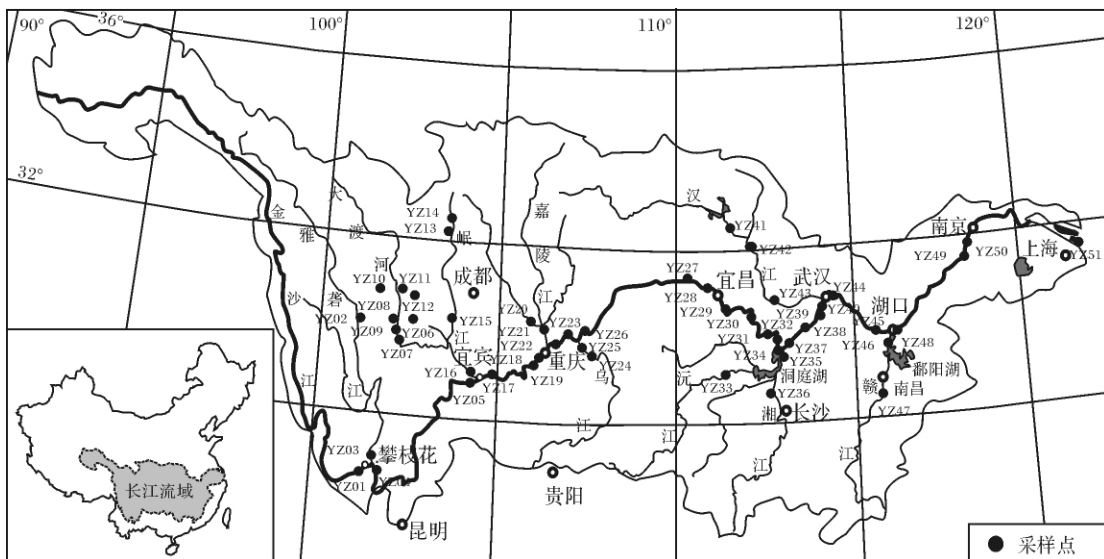


图1 长江流域样品位置分布图

Fig. 1 Sample locations in the Yangtze River drainage basin

表1 长江流域表层沉积物样品位置及黏土矿物组合

Table 1 Geographic locations and clay mineral assemblages of surface sediments in the Yangtze River drainage basin

序号	样品号	经度/E	纬度/N	位置	蒙脱石%	伊利石%	高岭石%	绿泥石%	伊利石	伊利石结晶度
									化学指数	(°Δ2θ)
1	YZ01	101°29'25.8"	26°35'16.2"	攀枝花	4.99	57.29	17.56	20.17	0.42	0.38
2	YZ02	101°31'48.1"	30°19'42.6"	塔公乡	2.33	68.59	16.35	12.73	0.38	0.42
3	YZ03	101°49'16.2"	26°46'2.4"	攀枝花	1.32	55.90	23.02	19.76	0.49	0.39
4	YZ04	101°49'13.8"	26°35'28.8"	攀枝花	4.44	62.27	13.16	20.13	0.36	0.36
5	YZ05	104°24'12"	28°43'24.6"	宜宾	0.39	66.37	14.18	19.06	0.30	0.35
6	YZ06	102°48'32.3"	30°01'31.2"	青衣江	0.71	75.28	4.86	19.16	0.40	0.45
7	YZ07	102°13'17.1"	29°53'32.1"	大渡河	2.54	81.60	1.91	13.96	0.24	0.45
8	YZ08	102°11'49.3"	30°00'15.8"	大渡河	2.12	80.94	3.54	13.40	0.28	0.39
9	YZ09	102°11'49.3"	30°00'15.8"	大渡河	1.27	77.50	12.01	9.21	0.43	0.41
10	YZ10	101°56'14.4"	30°54'34.6"	大渡河	0.37	88.45	2.41	8.78	0.32	0.35
11	YZ11	102°35'44.8"	30°59'4.8"	小金川	0.35	87.64	3.31	8.69	0.34	0.40
12	YZ12	102°59'41.7"	30°53'32"	巴郎山	0.35	89.97	1.63	8.04	0.32	0.44
13	YZ13	103°43'8.8"	32°05'37.2"	叠西海	0.17	82.79	5.89	11.14	0.35	0.39
14	YZ14	103°37'42.1"	32°32'25.8"	岷江	0.26	82.76	7.37	9.61	0.33	0.36
15	YZ15	103°52'47.4"	30°04'36.9"	眉山	3.65	69.63	13.36	13.36	0.31	0.40
16	YZ16	104°35'9"	28°47'4.8"	宜宾	0.14	69.43	9.84	20.59	0.39	0.40
17	YZ17	104°41'26.4"	28°47'00"	宜宾	0.21	61.56	12.42	25.81	0.53	0.48
18	YZ18	106°32'19.2"	29°28'18.6"	重庆	0.33	67.60	15.24	16.83	0.53	0.38
19	YZ19	106°29'22.2"	29°23'35.4"	重庆	0.01	68.24	15.88	15.88	0.46	0.43
20	YZ20	106°19'8.6"	30°4'23.3"	云门	25.52	63.21	7.20	4.06	0.33	0.49
21	YZ21	106°29'1.8"	29°33'22.8"	重庆	3.23	65.82	14.90	16.05	0.39	0.39
22	YZ22	106°37'0.6"	29°37'11.4"	重庆	3.44	62.62	15.41	18.53	0.35	0.38
23	YZ23	107°21'8.6"	29°44'1.0"	涪陵	1.11	56.82	20.91	21.16	0.50	0.40
24	YZ24	107°32'13.8"	29°24'24.2"	乌江	1.04	87.23	5.27	6.46	0.36	0.67
25	YZ25	107°23'33.8"	29°36'20.8"	涪陵	0.58	74.98	12.22	12.22	0.40	0.57
26	YZ26	107°24'37.2"	29°44'8.4"	涪陵	0.64	71.78	16.98	10.60	0.64	0.67
27	YZ27	110°20'45.9"	31°3'2.8"	巴东	1.39	81.98	8.48	8.15	0.58	0.48
28	YZ28	111°18'43.7"	30°39'49.5"	宜昌	0.74	62.31	20.70	16.26	0.68	0.43
29	YZ29	112°14'27.2"	30°17'43.9"	沙市	5.73	70.29	7.60	16.39	0.49	0.47
30	YZ30	112°24'15"	30°1'42.6"	江陵	5.06	67.34	10.19	17.41	0.44	0.45
31	YZ31	113°5'31.9"	29°23'48.8"	监利	4.57	69.52	11.53	14.38	0.37	0.47
32	YZ32	112°55'07.6"	29°32'49.5"	岳阳	1.34	69.69	11.91	17.06	0.42	0.46
33	YZ33	111°41'11.2"	29°01'25.9"	常德	0.00	70.67	19.87	9.46	0.47	0.47
34	YZ34	113°5'31.9"	29°23'48.8"	洞庭湖	0.98	45.87	30.91	22.25	0.52	0.37
35	YZ35	113°06'08.9"	29°24'02.1"	岳阳	1.02	51.31	28.19	19.48	1.16	0.46
36	YZ36	112°56'55.2"	28°08'51.6"	长沙	0.10	40.41	46.02	13.46	0.97	0.45
37	YZ37	113°11'27.3"	29°29'28.5"	岳阳	4.58	58.35	18.68	18.40	0.50	0.34
38	YZ38	113°53'30.8"	29°58'56.3"	嘉鱼	5.04	68.18	12.91	13.87	0.43	0.49
39	YZ39	114°14'32.3"	30°28'31.0"	武汉	1.75	74.22	14.96	9.07	0.33	0.40
40	YZ40	114°17'25.8"	30°33'16.9"	武汉	2.33	70.13	9.87	17.67	0.52	0.51
41	YZ41	111°47'53.6"	32°6'58"	襄樊	4.94	83.92	1.43	9.71	0.21	0.52
42	YZ42	112°7'38"	32°1'38.6"	襄樊	1.42	71.94	13.33	13.31	0.32	0.42
43	YZ43	113°25'57.8"	30°23'33.5"	仙桃	9.72	63.36	23.25	3.90	0.34	0.37
44	YZ44	114°25'32.9"	30°40'19.1"	武汉	1.15	63.36	32.44	3.06	0.49	0.41
45	YZ45	115°54'29.6"	29°43'07.5"	九江	1.06	63.59	17.51	17.84	0.60	0.45
46	YZ46	116°12'34.5"	29°45'11.3"	湖口	0.95	63.47	25.24	10.34	0.50	0.89
47	YZ47	115°51'21.5"	28°38'57.9"	南昌	1.02	23.49	55.08	20.41	1.33	0.52
48	YZ48	116°18'26.8"	29°46'03.1"	湖口	2.25	59.03	19.53	19.19	0.47	0.47
49	YZ49	118°20'3.4"	31°21'12.1"	芜湖	0.27	79.26	8.57	11.90	0.40	0.40
50	YZ50	118°39'59.0"	31°59'04.6"	南京	0.91	64.94	17.10	17.05	0.39	0.46
51	YZ51	121°46'08.1"	31°20'38.1"	长兴岛	0.30	56.85	23.29	19.56	0.67	0.56

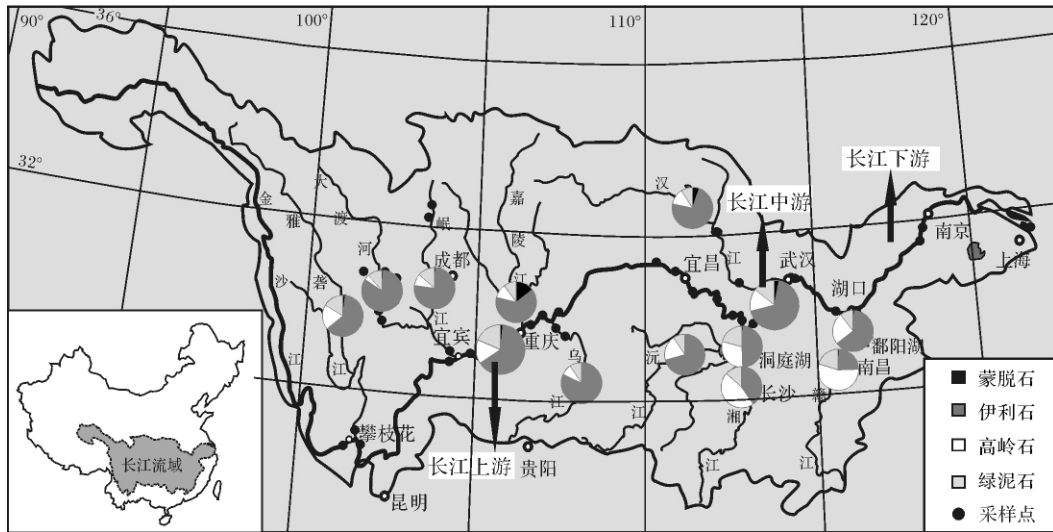


图 2 长江流域表层沉积物平均黏土矿物含量

Fig. 2 Average clay mineral contents in surface sediments of the Yangtze River drainage basin

63% ,中游为 67% ,下游为 66% ;绿泥石的平均含量上游为 18% ,中游为 14% ,下游为 16% ;高岭石的平均含量上游和下游均为 15% ,中游含量为 14% ;蒙脱石的平均含量在上游和下游均为 1% ,中游含量为 2% (表 2 图 2)。

在支流中 ,大渡河、乌江的伊利石含量达到 80% ,洞庭湖水系(湘江、洞庭湖)和赣江的伊利石含量均小于 50% ;嘉陵江和汉江的蒙脱石含量较高 ,嘉陵江可达 14% ;高岭石在湘江、赣江、洞庭湖、鄱阳湖有较高含量 ,均在 25% 以上 ,而大渡河、岷江、乌江等上游支流的高岭石含量低于 10% ;绿泥石在赣江、洞庭湖含量较高 ,可达 20% ,与上游支流含量相当(表 2 图 2) 。可以看出 ,长江干流上、中、下游黏土矿物分布相差不大 :伊利石在中下游含量略高于上游 ;绿泥石在上游的含量高于中下游 ;高岭石含量在上游和下游均高于中游 ;蒙脱石在上游和下游均低于中游 。支流的黏土矿物含量有较明显差别 :长江上游支流大渡河、岷江、乌江的伊利石和绿泥石含量较高 ;嘉陵江和汉江蒙脱石有较高含量 ;洞庭湖、湘江、赣江的高岭石含量较高。

长江沉积物的伊利石结晶度在 $0.34^{\circ} \sim 0.89^{\circ} \Delta 2\theta$ 之间 ,平均为 $0.45^{\circ} \Delta 2\theta$ 。长江干流中 ,伊利石结晶度变化趋势较明显 ,从上游平均 $0.42^{\circ} \Delta 2\theta$ 到中游平均 $0.45^{\circ} \Delta 2\theta$,下游平均变为 $0.47^{\circ} \Delta 2\theta$,表明伊利石结晶度变差 ,指示流域水解作用相对变强 。支流中除乌江、赣江、鄱阳湖的伊利石结晶度较高外 ,其他支流均在 0.45 左右 ,没有明显变化(表 2) 。长江流域

伊利石化学指数范围从 0.21 到 1.33 ,差别明显 ,平均为 0.45 。长江干流上游伊利石化学指数平均为 0.45 ,中游平均为 0.48 ,下游平均为 0.50 ,与伊利石结晶度变化一致 ,有增加的趋势 。支流中从上游到下游的伊利石化学指数亦有增加的趋势 。在上游支流中 ,除雅砻江外 ,其余支流的伊利石化学指数均小于 0.4 ,代表上游支流水解作用弱 ,以物理风化作用为主 ,中下游支流的化学指数显著增大 ,湘江、洞庭湖和赣江风化指数大于 0.8 (表 2) ,表明该地区水解作用强烈 ,主要为化学风化作用。

3 讨论

3.1 长江流域表层沉积物黏土矿物的分布特征及控制因素

由上可知 ,黏土矿物组合与源岩类型及风化作用的强弱有密切的关系 。长江干流黏土矿物组合基本一致 ,支流上存在较明显差异 ,这些特点可以从长江支流和干流的源岩类型、风化强度分别得到解释。

在源岩方面 ,长江流域面积广大 ,跨越多个造山带 ,岩石类型复杂 ,有大面积分布的碳酸盐岩、陆源碎屑岩及较多的中酸性侵入岩、片岩、片麻岩等^[31] 。长江上游青藏高原源区以变质砂页岩、碳酸盐岩和酸—中酸性火成岩为主 ,尤其是喜马拉雅期形成的富钾的中酸性岩浆岩 ;金沙江、岷江、乌江等流域分布古生代碳酸盐岩、中生代的红色碎屑沉积以及花岗岩和中生代的峨眉山玄武岩^[32] 。年轻的中酸性侵入岩和基性玄武岩形成了较多的伊利石和绿泥石 ,因此长江上游

表2 长江流域干流及支流平均黏土矿物组合

Table 2 Average clay mineral assemblages of main-reaches and tributaries in the Yangtze River drainage basin

河流	样品数	蒙脱石/%	伊利石/%	高岭石/%	绿泥石/%	伊利石化学指数	伊利石结晶度($^{\circ}\Delta 2\theta$)
长江上游	9	1.73	63.84	15.75	18.69	0.45	0.42
雅砻江	2	1.82	62.25	19.69	16.24	0.43	0.40
大渡河	7	1.10	83.05	4.24	11.61	0.33	0.41
岷江	4	1.06	76.15	9.12	13.67	0.35	0.39
嘉陵江	2	14.38	64.52	11.05	10.05	0.36	0.44
乌江	2	0.81	81.11	8.74	9.34	0.38	0.62
长江中游	12	2.99	67.87	14.90	14.24	0.48	0.45
汉江	3	5.36	73.07	12.67	8.97	0.29	0.44
沅江	1	0.00	70.67	19.87	9.46	0.47	0.47
洞庭湖	2	1.00	48.59	29.55	20.87	0.84	0.42
湘江	1	0.10	40.41	46.02	13.46	0.97	0.45
赣江	1	1.02	23.49	55.08	20.41	1.33	0.52
鄱阳湖	1	0.95	63.47	25.24	10.34	0.50	0.89
长江下游	4	1.82	66.07	15.27	16.84	0.50	0.47

地区,尤其是支流,伊利石和绿泥石含量较高。且上游地区构造运动和河流的下切作用强烈,在强劲的河水侵蚀和搬运能力下,较易悬浮和搬运的伊利石被带到中下游,使整个流域均以伊利石为主。长江中游和下游主要是第四纪松散沉积物和古生代沉积岩,出露中—酸性花岗岩和古老变质岩,利于高岭石和绿泥石的形成,故中游支流高岭石和绿泥石含量有显著增加。支流嘉陵江和汉江流域均发源于秦岭,源区花岗岩类岩石广泛分布,总体化学成分偏基性,花岗岩富钾^[33],且分布有较多第四纪黄土沉积,因此其蒙脱石含量较其他流域高。

在风化作用方面,长江流域除河源区为积雪的寒冷气候外,其他地区均为温暖湿润或潮湿气候。伊利石平均含量从上游支流到下游支流减幅约20%(表2),同时,伊利石化学指数递增,从代表物理风化作用为主的富Fe—Mg伊利石过渡到代表强烈水解作用的富Al伊利石。伊利石结晶度呈现变差的趋势,表明伊利石指示的气候条件逐渐暖湿。物理风化条件下易形成伊利石和绿泥石,故上游支流中二者含量较高。而洞庭湖和鄱阳湖地区由于水解作用较强,因

此有较高含量的高岭石。干流上、中、下游伊利石含量变化甚微,可见,要判断流域风化作用强度,不能只看干流,必须结合支流数据进行探讨。

3.2 黏土矿物反映的长江流域沉积物混合模式

长江干流的物质主要来自流域内各支流。作为长江流域物源区的主要供给,支流黏土矿物的特征对长江干流黏土矿物含量的变化起着关键的作用。对各支流及干流的上、中、下游黏土矿物含量的平均值做伊利石—蒙脱石—高岭石+绿泥石为端元的端元图(图3)能清晰发现,支流中大渡河、岷江、嘉陵江、乌江、汉江和沅江伊利石含量均高于长江干流;蒙脱石含量只有嘉陵江和汉江比长江干流高;洞庭湖、湘江、鄱阳湖和赣江的高岭石和绿泥石含量比干流高。伊利石主要在长江上游支流中含量较高,可推测长江上游支流对长江干流有较大贡献;蒙脱石在中下游干流的含量明显高于上游,说明嘉陵江和汉江对干流提供了蒙脱石,可知此两条河流向长江干流贡献较多;而长江中、下游干流的高岭石和绿泥石含量均低于上游,可知以含较高高岭石和绿泥石为特征的湘江、赣江和洞庭湖流域对长江贡献不大,可能由于湘江和赣

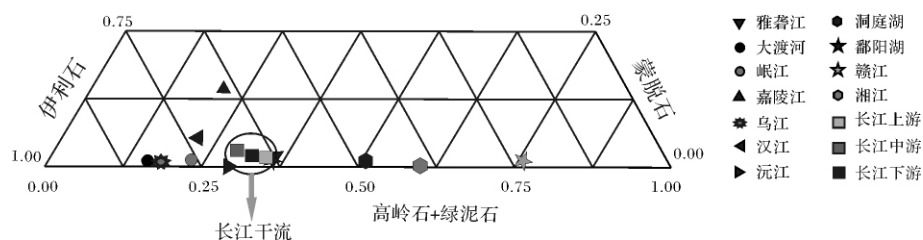


图3 伊利石—蒙脱石—高岭石+绿泥石端元图

Fig. 3 The triangular map with end members of illite, smectite and kaolinite + chlorite

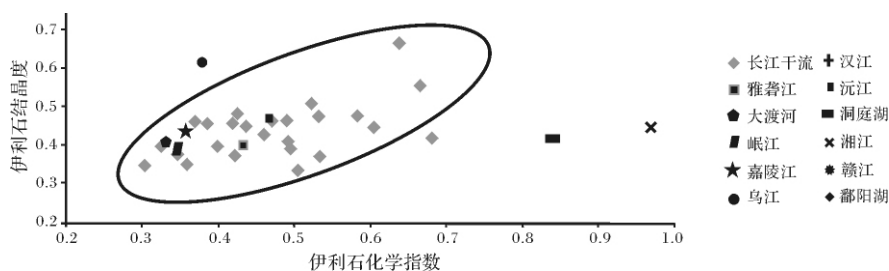


图4 伊利石化学指数和结晶度对比

Fig. 4 Contrast of illite 5Å/10Å - peak ratio and illite crystallinity

江较高含量的高岭石很大部分停滞在洞庭湖和鄱阳湖中,未能向长江中下游干流提供大量物质。

长江流域从上游到下游风化作用增强,湘江、赣江最为强烈,具有较高的伊利石化学指数。但长江干流的伊利石在经过洞庭湖、鄱阳湖后化学指数明显降低(表1,序号48~51),说明长江下游的伊利石化学指数并未受到洞庭湖和鄱阳湖地区的影响,这也证明洞庭湖水系和鄱阳湖水系对长江干流沉积物的贡献较少。此外,伊利石结晶度常用于示踪物源区和搬运路径。通过将伊利石的化学指数和结晶度对比分析发现(图4),大多数支流样品和长江干流样品的伊利石结晶度与化学指数呈很好的线性关系,集中分布于一个区域,而乌江、鄱阳湖、洞庭湖、湘江、赣江分散分布,也表明这些流域对长江的物质供给较少。

综上所述,黏土矿物含量及组合反映了长江沉积物的物源及混合情况。与杨守业^[34]用稀土元素和Sr、Nd同位素、黄湘通^[34]利用宇宙成因核素¹⁰Be以及王中波^[35]对磁铁矿化学组成的研究结果一致,长江上游地区对长江干流的物质贡献具有非常重要的作用,究其原因主要是青藏高原东部地貌过渡带构造活动强烈,物理风化作用导致大量物质剥蚀,并通过河流系统向长江下游输送。因此,尽管长江支流的黏土矿物组成有较大差异,但许多支流(尤其是下游支流)对干流的物质贡献有限,使得长江干流的黏土矿物面貌呈现较一致的特征。从这个意义上说,利用黏土矿物成分和含量指示流域风化强度时,不能仅仅利用干流的样品,还必须结合以支流。另外,本文通过对伊利石化学指数和结晶度的分析也进一步得到:在细颗粒沉积物上,乌江对长江贡献较小,中游支流的汉江对干流中下游影响较大,而洞庭湖水系和鄱阳湖水系贡献不大。

4 结论

(1) 长江流域表层沉积物黏土矿物组合主要为

伊利石、绿泥石、高岭石和蒙脱石,整个流域以伊利石为主。长江干流黏土矿物含量变化不大,而支流上有较大区别——上游大渡河、岷江、乌江等伊利石含量较高,湘江、赣江、洞庭湖相对较少;嘉陵江和汉江蒙脱石含量较高;高岭石和绿泥石在湘江、赣江、洞庭湖、鄱阳湖有较高含量,这与支流局部的岩性特征和风化作用强度有关。

(2) 伊利石化学指数和结晶度可示踪物源区和搬运路径。长江干流上,伊利石结晶度和化学指数从上游到下游均逐渐增大,说明长江流域从上游到下游,风化作用有增强的趋势。长江上游支流的伊利石化学指数均较低,湘江、赣江均为最高,表明上游以物理风化作用为主,中下游为化学风化作用。长江干流的黏土矿物面貌受到了上游支流的较大影响,不能简单依靠干流信息,必须结合支流相关数据,判断长江风化作用强度。

(3) 物源分析得出:在细颗粒沉积物上,长江上游支流雅砻江、大渡河、岷江和嘉陵江对长江中下游贡献较大,乌江贡献不大;中游汉江对长江有较多的供给;洞庭湖水系(包括洞庭湖、沅江、湘江)和鄱阳湖水系(鄱阳湖、赣江)对长江下游贡献不大。这与其他方法得出的结论基本吻合。

参考文献 (References)

- 1 杨守业. 亚洲主要河流的沉积地球化学示踪研究进展[J]. 地球科学进展, 2006, 21(6): 648-655 [Yang Shouye. Advances in sedimentary geochemistry and tracing applications of Asian rivers [J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(6): 648-655]
- 2 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]
- 3 杨守业, 蒋少勇, 凌鸿飞, 等. 长江河流沉积物 Sr-Nd 同位素组成与物源示踪[J]. 中国科学: D 辑, 2007, 37(5): 682-690 [Yang

- Shouye, Jiang Shaoyong, Ling Hongfei, *et al.* Sr-Nd isotopic composition of Changjiang River sediments and their tracing implication [J]. *Science in China: Series D*, 2007, 37(5): 682-690]
- 4 杨守业, 韦刚健, 夏小平, 等. 长江口晚新生代沉积物的物源研究: REE 和 Nd 同位素制约[J]. *第四纪研究*, 2007, 27(3): 339-346 [Yang Shouye, Wei Gangjian, Xia Xiaoping, *et al.* Provenance study of the late Cenozoic sediments in the Changjiang delta: REE and Nd isotopic constraints [J]. *Quaternary Science*, 2007, 27(3): 339-346]
 - 5 Boulay S, Colin C, Trentesaux A, *et al.* Sediment sources and East Asian monsoon intensity over the last 450ka mineralogical and geochemical investigations on South China Sea sediments [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 228(3-4): 260-277
 - 6 Liu Z, Trentesaux A, Clemens S C, *et al.* Clay mineral assemblages in the northern South China Sea: Implications for East Asian monsoon evolution over the past 2 million years [J]. *Marine Geology*, 2003, 201: 133-146
 - 7 Clift P, Lee J I, Clark M K, *et al.* Erosional response of South China to arc rifting and monsoonal strengthening: a record from the South China Sea [J]. *Marine Geology*, 2002, 184: 207-226
 - 8 Zhifei Liu, Shouting Tuo. 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
 - 9 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 [J]. *科学通报*, 2007, 52(4): 448-456 [Liu Zhifei, Colin C, Huang Wei, *et al.* Clay minerals in surface sediments of the Pearl River drainage basin and their contribution to the South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(4): 448-456]
 - 10 刘志飞, Trentesaux A, Clemens S C, 等. 南海北部 ODP1146 站第四纪黏土矿物记录: 洋流搬运和东亚季风演化 [J]. *中国科学*, 2003, 33(3): 271-280 [Liu Zhifei, Trentesaux A, Clemens S C, *et al.* Clay minerals recording in Quaternary of ODP1146 station in north sloping South China Sea: Ocean current transportations and evolution of East Asia monsoon [J]. *Science in China*, 2003, 33(3): 271-280]
 - 11 Franz X. Gingele, Patrick De Deckker, *et al.* Clay mineral distribution in surface sediments between Indonesia and NW Australia: Source and transport by ocean currents [J]. *Marine Geology*. 2001, 179: 135-146
 - 12 刘志飞, Colin C, Trentesaux A, 等. 南海南部晚第四纪东亚季风演化的黏土矿物记录 [J]. *中国科学*, 2004, 34(3): 272-279 [Liu Zhifei, Colin C, Trentesaux A, *et al.* Clay mineral records of East Asian monsoon evolution during Late Quaternary in the southern South China Sea [J]. *Science in China: Series D*, 2004, 34(3): 272-279]
 - 13 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(3-4): 203-229
 - 14 Chamley H. *Clay Sedimentology* [M]. Berlin: Springer, 1989: 1-623
 - 15 Me dard Thiry. Palaeoclimatic interpretation of clay minerals in marine deposits: an outlook from the continental origin [J]. *Earth-Science Reviews*, 2000, 49: 201-221
 - 16 隆浩, 王晨华, 刘勇平, 等. 黏土矿物在过去环境变化研究中的应用 [J]. *盐湖研究*, 2007, 15(2): 21-29 [Long Hao, Wang Chenhua, Liu Yongping, *et al.* Application of clay minerals in paleoenvironment research [J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2007, 15(2): 21-29]
 - 17 陈涛, 王欢, 张祖青, 等. 黏土矿物对古气候指示作用浅析 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2003, 22(4): 416-420 [Chen Tao, Wang Huan, Zhang Zuqing, *et al.* Clay minerals as indicators of paleoclimate [J]. *Acta Petrologica Mineralogica*, 2003, 22(4): 416-420]
 - 18 孔祥乐, 项海光. 海洋沉积黏土矿物与全球变化研究的探讨 [J]. *海洋湖沼通报*, 2003: 23-26 [Kong Xiangle, Xiang Haiguang. A discussion on the study of clay minerals from ocean sediments and global change [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2003: 23-26]
 - 19 鲁春霞. 黏土矿物在古环境研究中的指示作用 [J]. *中国沙漠*, 1997, 17(4): 456-460 [Lu Chunxia. Clay minerals as indicators of paleoenvironment [J]. *Journal of Desert Research*, 1997, 17(4): 456-460]
 - 20 张乃娴. 黏土矿物与风化作用 [J]. *建材地质*, 1992, 6: 1-6 [Zhang Naixian. Clay Minerals and Weathering [J]. *Building Geological Magazine*, 1992, 6: 1-6]
 - 21 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 Huanghe, Changjiang, Zhujiang Rivers and their relationship to the climate environment in their sediment source areas [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1988, 19(4): 336-346]
 - 22 范德江, 杨作升, 毛登, 等. 长江与黄河沉积物中黏土矿物及地化成分的组成 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2001, 21(4): 7-12 [Fan Dejiang, Yang Zuosheng, Mao Deng, *et al.* Clay minerals and geochemistry of the sediments from the Yangtze and Yellow Rivers [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2001, 21(4): 7-12]
 - 23 方习生, 石学法, 王国庆. 长江水下三角洲表层沉积物黏土矿物分布及其影响因素 [J]. *海洋科学进展*, 2007, 25(4): 419-427 [Fang Xisheng, Shi Xuefa, Wang Guoqing. Distributions of clay minerals in surface sediments from the Changjiang River subaqueous delta and their affecting factors [J]. *Advances in Marine Science* 2007, 25(4): 419-427]
 - 24 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]
 - 25 Biscaye P E. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans [J]. *Geology Society of America Bulletin*, 1965, 76: 803-831
 - 26 Esquevin J. Influence de la composition chimique des illites sur cristallinité [J]. *Bull Centre Rech Rau-SNPA*, 1969, 3(1): 147-153
 - 27 万世明, 李安春, 胥可辉, 等. 南海北部中新世以来黏土矿物特

- 征及东亚古季风记录[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2008, 33(3): 289-300 [Wan Shiming, Li Anchun, Xu Kehui, *et al.* Clay minerals and Asian monsoon record of Miocene in the northern part of South China Sea [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences 2008, 33(3): 289-300]
- 28 Ehrmann 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
- 29 Krumm S , Buggisch W. Sample preparation effects on illite crystallinity measurements: grain size gradation and particle orientation [J]. Journal of Metamorphic Geology , 1991 9: 671-677
- 30 Rainer Petschick , Gerhard Kuhn , Franz Gingele. Clay mineral distribution in surface sediments of the South Atlantic: Sources , transport and relation to oceanography [J]. Marine Geology , 1996 , 130: 203-229
- 31 吴月英, 陈中原, 王张华. 长江三角洲平原黏土矿物分布特征及其环境意义[J]. 华东师范大学学报, 2005, 1: 92-98 [Wu Yueying, Chen Zhongyuan, Wang Zhanghua. Distribution of clay minerals in the Yangtze delta plain and its paleoenvironmental implication [J]. Journal of East China Normal University 2005, 1: 92-98]
- 32 杨守业, 李从先. 长江与黄河沉积物元素组成及地质背景[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(2): 19-26 [Yang Shouye, Li Congxian. Characteristic element compositions of the Yangtze and Yellow River sediments and their geological background [J]. Marine Geology & Quaternary Geology , 1999 , 19(2): 19-26]
- 33 张宏飞, 靳兰兰, 张利, 等. 西秦岭花岗岩类地球化学和 Pb-Sr-Nd 同位素组成对基底性质及其构造属性的限制[J]. 中国科学: D 辑, 2005, 35(10): 914-926 [Zhang Hongfei, Jin Lanlan, Zhang Li, *et al.* Geochemical and Pb-Sr-Nd isotopic compositions of granitoids from western Qinling belt: Constraints on basement nature and tectonic affinity [J]. Science in China: Series D, 2005, 35(10): 914-924]
- 34 黄湘通. 长江流域宇宙成因¹⁰Be 与地表侵蚀速率估算[D]. 同济大学, 2006 [Huang Xiangtong. Cosmogenic nuclide ¹⁰Be and its application in estimating erosion rates of Yangtze catchment [D]. Tongji University 2006]
- 35 王中波, 杨守业, 王汝成, 等. 长江河流沉积物磁铁矿化学组成及其物源示踪[J]. 地球化学, 2007, 36(2): 176-184 [Wang Zhongbo, Yang Shouye, Wang Rucheng, *et al.* Magnetite compositions of Changjiang River sediments and their tracing implications [J]. Geochimica , 2007 , 36(2): 176-184]

Clay Mineral Assemblages in the Yangtze Drainage and Provenance Implications

HE Meng-ying^{1,2} ZHENG Hong-bo² HUANG Xiang-tong¹
JIA Jun-tao¹ LI Ling²

(1. State Key Laboratory of Marine Geology , Tongji University , Shanghai 200092;

2. School of Earth Sciences and Engineering , Nanjing University , Nanjing 210093)

Abstract The X-rays diffraction analysis (XRD) is applied to measure the clay mineral compositions of the surface sediments in the Yangtze River drainage basin. The results show that the clay mineral compositions of the sediments display a similar pattern along the main stream , with highest content of illite and lowest content of smectite , but they are different from that in the tributary rivers , these can be responded to the heterogeneous source rocks and weathering intensity. The illite crystallinity and the illite chemical weathering index (5 /10 peak ratio) of the main stream indicate a gradually increased weathering from upstream to downstream. In the tributary rivers , the lower illite chemical index in the upper-reaches and the higher index in the middle- and lower-reaches represent a transformation from relative dominance of physical weathering to chemical weathering. Since the upper-reaches tributaries have an important influence to the whole drainage , understanding the weathering intensity does not only rely on the information of main stream , but also on that of the tributaries. Based on the result derived from the clay mineral distributions and the illite indexes , the contribution of sediments from upper-reaches including the Yalong Jiang , the Dadu He , the Min Jiang and the Jialing Jiang is larger , with minor contribution from the Wu Jiang. As for the middle branches , the Han Jiang transports more sediments to the lower-reaches and the Delta , while the Xiang Jiang , Gan Jiang and the Dongting Lake contribute little.

Key words the Yangtze River; clay mineral; provenance; weathering