

樊水森, 金秉福, 王昕, 等. 云母在黄河口段沉积物中的形状系数与等效沉积[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(5): 31-39.

云母在黄河口段沉积物中的形状系数与等效沉积

樊水森¹, 金秉福^{1*}, 王昕¹, 于海洋²

(1 鲁东大学海岸研究所/资源与环境工程学院, 山东烟台 264025; 2 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100)

摘要: 云母有着独特的片状结构和晶形, 为了分析云母与其他粒状碎屑矿物的水力沉积差异, 以黄河口段沉积物为对象, 分粒级进行轻、重矿物鉴定, 挑选出其中的白云母以及不同风化程度的黑云母, 测量了 5 个样点、约 12 000 颗碎屑云母的粒径与厚度, 以此比较片状云母与粒状石英和长石在水体中的等效沉积。结果表明, 黄河口沉积物中云母含量约为 1.8%~9.7%, 其在不同样品和不同粒级之间差异很大, 在 1.5 Φ ~5.5 Φ 粒级之间云母含量由高至低急剧减少; 云母厚度大都 < 20 μm , 平均厚度仅 8.93 μm , 白云母的厚度一般小于黑云母; 薄片状云母体积远小于相同粒径的粒状石英、长石, 约为石英和长石的 16%~55%; 云母体积的变化可由其形状系数——径厚比来反映, 云母的径厚比大都介于 5~60。片状云母与粒状石英和长石在搬运与沉积过程中水力特性差异明显, 等效沉积作用常使较大粒径云母与细粒泥质沉积密切共生。

关键词: 云母; 径厚比; 沉积分异; 沉积速度; 等效沉积; 黄河口

中图分类号: P572; P736.21

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.175

0 引言

地表的岩石经过风化作用产生了大量的碎屑物质, 这些碎屑物质通过坡面流水等方式汇入河流, 与河水一起向下游输送。在搬运过程中, 机械沉积分异作用常使碎屑颗粒发生因粒度、密度及形状等因素造成的聚集或分散, 沉积分异现象蕴含着沉积物的形成机制和水动力等方面的信息^[1]。研究发现, 河流携带的碎屑受到水动力强度和流动方式的影响^[2-5], 在沉积过程中, 近球型的矿物先沉积, 板片状的矿物后沉积^[6-7], 云母类的片状矿物与石英、长石等粒状矿物呈现不一样的沉积规律: 云母容易在弱动力环境中沉积, 常见与细粒质如细砂、粉砂乃至泥质一起沉积, 成为湖海泥质区沉积物中最主要的大粒径碎屑矿物, 其沉积学意义需要区别关注和审视^[8-11]。而在沉积分异的研究中, 相对缺

少对沉积物形状的讨论。云母拥有一组极完全解理, 这使得云母极易碎裂成薄片, 自然状态下通常呈片状、板状。云母族矿物主要包括白云母、黑云母和锂云母^[12-13]。河流碎屑沉积物中云母主要为黑云母和白云母, 在黄河中含量较高, 仅次于石英和长石, 主要赋存在轻矿物里, 重矿物中也常富含云母类矿物^[14-16]。黑云母相对于白云母更易受风化, 可分为弱风化、半风化、强风化, 进一步蚀变可成为水黑云母、蛭石等^[17-18]。由于云母的厚度小, 测量有一定难度, 目前还没有统一的测算方法。前人曾测算过层状矿物的径厚比^[19-20], 但是操作困难, 且耗费时间长。为此, 选择了黄河口的沉积物为研究对象, 借助光学 3D 数码显微镜测量了不同种类云母的粒径、厚度, 并计算其体积和径厚比, 通过径厚比, 计算出与其相同粒径的沉积颗粒(以石英和长石为例)的沉积速度差异, 以及当云母与石英和长石沉速相近即等效沉积时二者之间的粒径差异。本项工作可为分析云母等片状碎屑与其他粒状碎屑矿物的水动力沉积差异提供数据和参考。

1 研究区域概况

黄河多年来平均的人海泥沙量为 6.74 亿 t(利津站, 1950—2015 年), 位于世界第 2 位, 占全球所

收稿日期: 2020-11-04

资助项目: 国家自然科学基金项目“浅海多源沉积物辨析的碎屑角闪石和石英矿物化学标型特征研究”(41576057)

作者简介: 樊水森(1994—), 女, 在读硕士, 主要从事河口海岸过程分析与应用方面的研究工作。E-mail: 13031601693@163.com

* 通讯作者: 金秉福(1963—), 男, 教授, 主要从事海洋沉积地质方面的研究工作。E-mail: bingfu_jin@163.com

有河流泥沙入海通量的 $1/20^{[21-22]}$ 。黄河泥沙约 90% 来自黄土高原^[23-24], 现自西向东注入渤海, 在华北东部和渤海西部形成大型黄河三角洲^[25]。黄河的物源比较单一, 沉积物的矿物组成特征在很大程度上继承了黄土的特点, 即稳定重矿物少而云母多。研究表明, 现代黄河碎屑沉积物普遍富含云母类矿物^[26-28]。入海后的黄河物质在渤、黄海大面积分布, 泥质沉积区碎屑矿物以高含量云母为特征^[28-31]。

2 样品与方法

2.1 样品采集

2017 年 3 月, 在黄河下游河口段, 通过 GPS 定位, 选取了 5 个样点(图 1)进行取样, 样品来自黄河边滩、河床以及河口高滩。

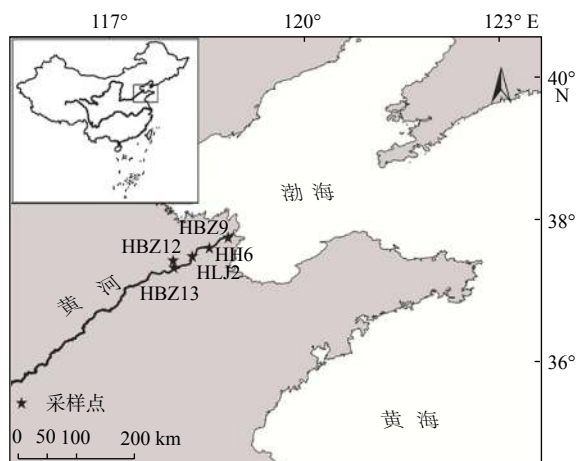


图 1 取样点示意图

Fig.1 Schematic map for sampling points

2.2 分析方法

2.2.1 矿物分离与鉴定

称取原始样品干重约 300~500 g, 以 0.5Φ 为筛分间隔, 将样品水筛分成 $<1.5\Phi$ 、 $1.5\Phi\sim2.0\Phi$ 、 $2.0\Phi\sim2.5\Phi$ 、 $2.5\Phi\sim3.0\Phi$ 、 $3.0\Phi\sim3.5\Phi$ 、 $3.5\Phi\sim4.0\Phi$ 、 $4.0\Phi\sim4.5\Phi$ 、 $4.5\Phi\sim5.0\Phi$ 、 $5\Phi\sim6\Phi$ (1Φ 间隔, 沉降法)和 $>6\Phi$ 多个粒级分样, 计算每个粒级的质量百分比。然后, 对每一粒级分样(其中有的样品 $<1.5\Phi$ 粒级因含量少、所有 $>6\Phi$ 分样颗粒又太小, 故放弃)称出约 2 g, 放入三溴甲烷($\rho=2.88\sim2.89\text{ g/cm}^3$)中进行轻、重碎屑矿物分离, 每隔 15 min 搅拌一次, 共 3 次, 每次搅拌 2 min。将分离好的轻重矿物冲洗、烘干并称重, 计算每个粒级的轻、重矿物重量百分比。

在每个粒级的轻、重矿物中随机挑选 300~400

颗粒, 在双目实体显微镜下进行鉴定, 统计每种矿物在轻、重矿物中各自的百分含量, 从而计算出各粒级轻、重矿物中白云母和黑云母的颗粒数百分比含量。

2.2.2 碎屑颗粒的显微测量

结合黄河沉积物中云母的富集状况, 本文选取 $1.5\Phi\sim4.0\Phi$ 的云母测量粒径与厚度。将 $1.5\Phi\sim2.0\Phi$ 、 $2.0\Phi\sim2.5\Phi$ 、 $2.5\Phi\sim3.0\Phi$ 、 $3.0\Phi\sim3.5\Phi$ 、 $3.5\Phi\sim4.0\Phi$ 粒级不分轻重矿的原始样品, 在体式显微镜下随机挑选出白云母、弱风化黑云母、半风化黑云母与强风化黑云母各 200 颗, 而石英和长石不分粒级随机挑出各 150 颗用做对比。

粒径和厚度的测量依托鲁东大学沉积物分析实验室完成, 使用像素为 210 万的 OLYMPUS DSX110 光学 3D 数码显微镜, 对挑选出来的不同粒级、不同种类的云母拍摄镜下照片, 然后对这些颗粒进行长(D_1)、宽(D_2)、厚(H)测量。云母每组的有效数据约为 120 个, 共 5 组, 合计约 12 000 颗, 石英和长石的有效数据各自约 110 颗。

3 结果

3.1 样品中云母含量

对沉积物在各粒级中的含量以及重液分离后的轻、重矿物百分含量进行统计(见表 1)。样品的粒级主要分布在 $3\Phi\sim5\Phi$ 范围内, 这部分含量超过 95%, 其余粒级的含量很低。碎屑矿物以轻矿物为主, 重矿物含量较低, 不同粒级的轻矿物含量都在 90% 以上, 尤其是在 $<2.5\Phi$ 粒级中, 重矿物含量极少, 甚至含量为零, 几乎全为轻矿物, 而且主要矿物种类为黑云母和白云母, 其他矿物很少。不同粒级分样碎屑矿物鉴定显示, 黄河沉积物中云母总体含量较高(加权平均计算)约为 1.8%~9.7%, 但是粒级之间差异很大, 云母在 $1.5\Phi\sim4.0\Phi$ 内轻重矿物中比较富集, $2\Phi\sim3\Phi$ 粒度区间含量高达 75% 以上, 甚至 99%。粉砂粒级和更细的粒级($>4\Phi$)中云母含量急剧减少, 其中云母含量大多数 $<5\%$, 有的 $<1\%$ 。轻、重矿物中白云母的含量都低于黑云母。

3.2 云母的粒径和厚度

在实际的碎屑沉积物中, 形状规则的颗粒很少, 往往都是非球形, 粒度分布又非均匀一致。对于非球形泥沙颗粒的平均粒径可以用长、中、短 3 轴的算数平均值 $(D_1+D_2+D_3)/3$ 计算, 也可以采用几何平

表 1 黄河口沉积物代表性样品中各个粒级和全样中的云母含量

Table 1 The contents of mica in each fraction and bulk sample of representative sediments in the Yellow River Estuary

								/%
样品编号	鉴定粒级/ Φ	粒级含量	轻矿物含量	重矿物含量	轻矿物中白云母	轻矿物中风化黑云母	重矿物中白云母	重矿物中黑云母
LJ2	<1.5	0.02	100.00	0.00	13.92	8.86	0.00	0.00
	1.5~2.0	0.05	100.00	0.00	0.59	3.26	0.00	0.00
	2.0~2.5	0.03	100.00	0.00	17.25	45.32	0.00	0.00
	2.5~3.0	0.24	97.81	2.19	36.13	50.32	3.83	86.90
	3.0~3.5	1.30	99.61	0.39	11.68	20.96	2.71	48.98
	3.5~4.0	38.86	99.56	0.44	2.13	2.44	0.68	8.54
	4.0~4.5	49.10	99.15	0.85	0.57	1.14	0.00	0.81
	4.5~5.0	6.95	97.82	2.18	1.55	0.62	0.00	0.79
	5.0~6.0	2.06	99.99	0.01	4.00	0.92	0.21	0.00
		$\Sigma=98.61$	云母加权平均值		1.535	1.966	0.001	0.026
HKZ9	<1.5	0.02	100.00	0.00	18.48	31.52	0.00	0.00
	1.5~2.0	0.01	100.00	0.00	36.11	62.50	0.00	0.00
	2.0~2.5	0.02	100.00	0.00	31.07	68.61	0.00	0.00
	2.5~3.0	0.30	96.62	3.38	25.62	68.52	6.09	93.48
	3.0~3.5	0.34	99.01	0.99	21.73	44.09	3.52	89.95
	3.5~4.0	30.20	99.37	0.63	4.44	11.54	0.56	10.06
	4.0~4.5	59.85	98.83	1.17	3.19	3.77	0.38	2.64
	4.5~5.0	5.75	98.57	1.43	1.17	2.05	0.15	2.14
	5.0~6.0	2.61	99.60	0.40	1.99	1.32	0.17	0.34
		$\Sigma=99.10$	云母加权平均值		3.497	6.215	0.005	0.052
HH6	<2.0	0.01	99.63	0.37	37.70	62.30	1.89	96.23
	2.0~2.5	0.02	95.93	4.07	35.08	64.92	2.08	95.83
	2.5~3.0	0.05	95.47	4.53	30.15	60.57	3.74	92.52
	3.0~3.5	2.57	98.66	1.34	3.98	6.82	5.61	69.91
	3.5~4.0	39.01	98.49	1.51	0.24	1.18	0.24	10.12
	4.0~4.5	44.67	94.29	5.71	0.60	1.00	0.15	0.15
	4.5~5.0	4.52	89.07	10.93	2.07	1.81	0.00	0.00
	5.0~6.0	0.30	89.95	10.05	1.06	2.90	0.55	0.91
		$\Sigma=91.16$	云母加权平均值		0.559	1.182	0.007	0.091
HBZ12	<2.0	0.03	99.91	0.09	27.27	70.61	3.55	92.31
	2.0~2.5	0.05	99.89	0.11	25.66	68.80	4.99	93.84
	2.5~3.0	0.12	99.03	0.97	25.29	52.35	7.14	81.68
	3.0~3.5	2.82	99.29	0.71	3.20	6.69	6.29	17.96
	3.5~4.0	36.70	98.20	1.80	2.05	4.28	0.73	2.20
	4.0~4.5	30.42	97.94	2.06	1.13	2.27	0.00	0.26
	4.5~5.0	10.92	98.90	1.10	0.82	1.10	0.00	0.00
	5.0~6.0	1.70	99.29	0.71	1.79	1.79	0.16	0.00
		$\Sigma=82.76$	云母加权平均值		1.336	2.674	0.006	0.021

均 $\sqrt[3]{D_1D_2D_3}$ 来计算^[32-33]。由于云母多呈扁平片状,在粒径的筛分实验中,主要受到 2 长轴 D_1 、 D_2 的影响。本文利用几何平均值计算各粒级白云母和不同风化程度的黑云母的粒径。 $D_{\text{云母}}=\sqrt[3]{D_{1\text{云母}}\cdot D_{2\text{云母}}}$,并且把厚度 $H_{\text{云母}}$ 进行统计。将得出的粒径和厚度按照粒级分类,计算出不同粒级的粒径和厚度平均值。由表 2 可知,同一粒径、不同类型的云母的平均粒径之间相差不大,但是粒径与厚度之间相差很大。云母在外力作用下极易裂成薄片,与粒径相

比其厚度较小,厚度绝大部分<20 μm ,平均厚度约为 8.93 μm 。相同粒径白云母的厚度一般小于黑云母,因为风化后的黑云母层间阳离子的结合力变弱,厚度增加^[34-35]。随着粒径增大厚度大体上逐渐增大,粒径与厚度之间大体上呈正相关。

3.3 云母与石英和长石的体积

黄河的泥沙主要来自中游的黄土高原,泥沙经过流水长距离的搬运、沉积,并且在搬运过程中,泥

表2 各样品云母平均粒径和厚度

Table 2 Average particle size and thickness of mica in each sample

矿物种类	筛分粒级/ Φ	HBZ13		HBZ12		HLJ2		HH6		HKZ9		/ μm
		平均粒径	平均厚度	平均粒径	平均厚度	平均粒径	平均厚度	平均粒径	平均厚度	平均粒径	平均厚度	
白云母	1.5~2.0	303.39	13.26	316.66	10.87	302.01	9.79	299.84	8.34	306.65	12.94	
	2.0~2.5	186.85	10.82	202.29	7.56	208.60	9.14	208.67	9.29	209.86	10.83	
	2.5~3.0	159.04	10.08	157.64	8.74	153.52	8.02	158.77	9.21	159.04	10.08	
	3.0~3.5	115.66	7.44	114.07	5.64	112.92	8.17	113.34	2.30	110.53	7.57	
	3.5~4.0	85.71	4.24	80.56	3.27	79.44	4.15	77.05	4.78	75.83	4.18	
弱风化黑云母	1.5~2.0	297.39	13.32	298.16	14.71	281.32	12.56	303.05	9.32	288.26	14.88	
	2.0~2.5	206.05	10.17	214.80	11.13	214.09	12.61	208.82	11.71	212.76	12.40	
	2.5~3.0	152.69	10.79	158.24	11.14	156.83	12.21	160.19	7.85	163.89	12.99	
	3.0~3.5	106.01	8.41	106.37	7.63	109.60	11.85	120.80	8.14	112.51	7.80	
	3.5~4.0	79.63	7.54	80.37	7.23	79.47	6.13	80.53	6.18	84.83	1.17	
半风化黑云母	1.5~2.0	316.41	10.72	295.39	17.16	293.86	6.65	317.20	10.46	271.37	7.40	
	2.0~2.5	222.24	9.78	198.44	11.52	208.33	7.35	222.24	9.78	201.28	7.19	
	2.5~3.0	164.94	7.59	153.72	9.67	157.89	5.50	164.94	9.37	157.01	6.33	
	3.0~3.5	116.73	7.48	113.43	8.76	117.40	3.45	119.84	9.12	117.15	5.87	
	3.5~4.0	80.51	4.04	82.15	7.63	83.82	1.52	85.08	6.93	84.15	1.25	
强风化黑云母	1.5~2.0	305.10	15.17	284.48	13.79	280.66	14.72	277.12	11.34	267.85	13.02	
	2.0~2.5	211.59	13.77	207.13	9.31	204.71	9.44	203.26	9.30	206.40	8.28	
	2.5~3.0	161.85	11.02	155.60	6.75	152.63	8.57	155.64	8.82	151.19	7.19	
	3.0~3.5	121.18	9.01	110.94	6.53	116.30	5.81	112.00	7.13	111.12	9.48	
	3.5~4.0	80.77	9.84	87.52	6.57	69.71	3.80	87.32	4.56	66.46	1.94	

沙颗粒与河床以及颗粒和颗粒之间不断地发生碰撞、摩擦,因此,黄河口的碎屑矿物颗粒一般都有一定磨圆^[36],其中云母的磨圆度较高,以次圆状为主(图2)。薄圆饼状云母底面积与椭圆面积接近,其体积可用公式 $V_{\text{云母}}=K_1\pi D_{1\text{云母}}D_{2\text{云母}}H_{\text{云母}}/4$ 来计算,石英和长石一般为次棱角状、少量为次圆状,但球度要比云母高得多。石英发育贝壳状断口,整体形状不规正,颗粒表面有凸起也有凹陷^[12],所以石英的体积很难精确计算,长石也有类似状况。当石英与云母的粒径等效时,即 $D_{\text{云母}}=D_{\text{石英}}$,相当于 $\sqrt{D_{1\text{云母}}\cdot D_{2\text{云母}}}=\sqrt{D_{1\text{石英}}\cdot D_{1\text{石英}}}$ 。石英体积最大应为类四方柱状,这时 $V_{\text{石英max}}=K_2D_{1\text{石英}}D_{2\text{石英}}H_{\text{石英}}$;石英体积最小时,应为类椭球体状, $V_{\text{石英min}}=K_3\pi D_{1\text{石英}}D_{2\text{石英}}H_{\text{石英}}/6$ 。其中 K_1 、 K_2 、 K_3 为颗粒的修正系数,取决于颗粒的磨蚀程度,其中 $K_1\approx 0.9\sim 1.1$, $K_2\approx 0.7\sim 0.9$, $K_3\approx 1.0\sim 1.2$,皆为经验估计值。一般情况下,石英和长石的形状和径厚关系不会因为颗粒大小的变化而产生明显的改变,而云母的径厚之间因为解理的存在而会产生很大的变化,因此,为了探讨云母与石英和长石的体积差异,讨论两者的沉积分异,引入径厚比 $M=D/H$ 这一形状系数进行讨论。

当石英视为类四方柱状时,云母与石英体积的

比值简化后为:

$$\frac{V_{\text{云母}}}{V_{\text{石英}}} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{K_1}{K_2} \cdot \frac{M_{\text{石英}}}{M_{\text{云母}}} \quad (1)$$

当石英视为类椭球体状时,云母与石英体积的

比值简化后为:

$$\frac{V_{\text{云母}}}{V_{\text{石英}}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{K_1}{K_3} \cdot \frac{M_{\text{石英}}}{M_{\text{云母}}} \quad (2)$$

云母与石英和长石的径厚比统计之后得到图3。可知云母的径厚比绝大多数分布在5~60之间,石英和长石形状相似,径厚比相对接近,都集中分布在3~20之间。把各项数据代入公式(1),可得 $\frac{V_{\text{云母}}}{V_{\text{石英}}} = 0.30\sim 0.55$;代入公式(2),可得 $\frac{V_{\text{云母}}}{V_{\text{石英}}} = 0.16\sim 0.41$ 。云母体积最小时只相当于石英和长石体积的0.16,最大也只相当于石英和长石体积的0.55。

流体中运动的颗粒受到各种力的作用,其中重力、浮力是主要的作用力:

$$\text{重力 } G = V \cdot \rho_s \cdot g \quad (3)$$

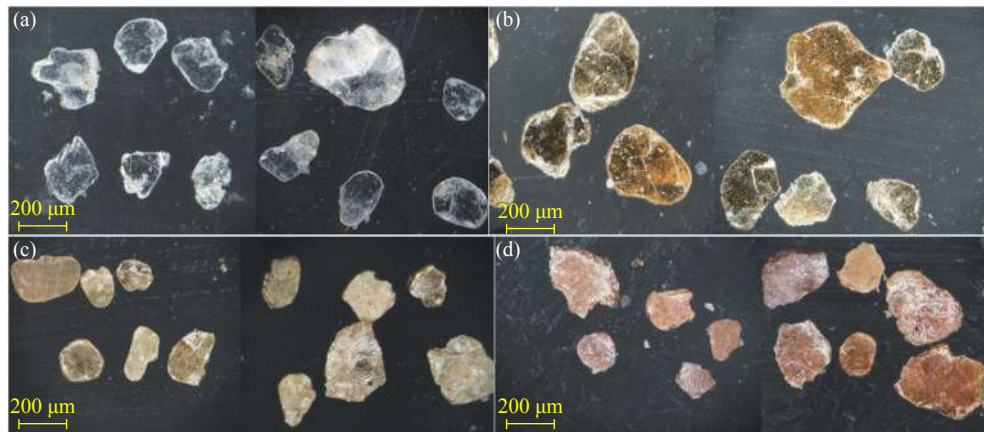
$$\text{浮力 } F = V \cdot \rho \cdot g \quad (4)$$

式中: ρ_s 为沉积颗粒的密度;

ρ 为流体的密度;

g 为重力加速度。

白云母密度约为 $2.7\sim 3.0 \text{ g/cm}^3$,它为抗风化的



(a) 白云母; (b) 弱风化黑云母; (c) 半风化黑云母; (d) 强风化黑云母

图 2 不同种类云母镜下图片

Fig.2 Different types of mica under microscope

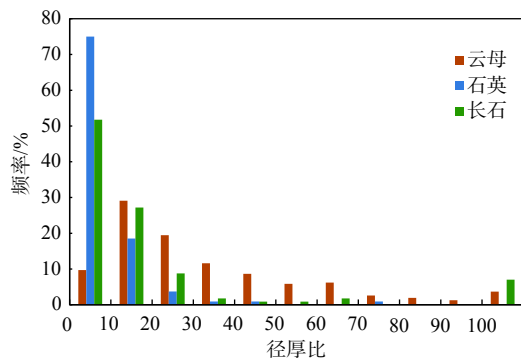


图 3 云母与石英和长石的径厚比分布频率

Fig.3 Frequency distribution of diameter-thickness ratio for mica and feldspar plus quartz

稳定矿物, 密度基本不变; 黑云母由于易风化, 其密度随着风化程度的不同而不同, 一般情况下弱风化黑云母的密度为 $2.8 \sim 3.0 \text{ g/cm}^3$, 半风化为 $2.5 \sim 2.8 \text{ g/cm}^3$, 强风化云母密度 $< 2.5 \text{ g/cm}^3$ 。石英和长石的密度为 $2.6 \sim 2.7 \text{ g/cm}^3$ 。比较结果, $\rho_{\text{云母}}/\rho_{\text{石英}} = 1.14 \sim 0.92$ 。因为体积的比值远小于密度的比值, 不同密度的云母, 代入公式(3)和(4)都有 $G_{\text{云母}} < G_{\text{石英}}$, $F_{\text{云母}} < F_{\text{石英}}$ 。当粒径相等的情况下, 不同密度云母的重力与浮力都比石英和长石要小, 沉积速度也比较慢, 所以, 两者的沉积特征之间存在着很大的区别。两者沉积速度的差异主要是体积差异, 而体积差异实质上就是形状差异, 即粒径与厚度的差异, 径厚比是阐述云母沉积行为的重要指标。

4 讨论

相同水动力条件下云母与石英和长石相比, 云母沉积速度慢、搬运更远, 与云母达成水力等效的石英和长石颗粒的粒度比云母要小^[37-38], 云母富集的粒度与石英和长石富集的粒度存在着差异。

4.1 云母粒径与厚度比值

机械搬运的颗粒在水动力不足的情况下, 会逐渐沉降下来, 所以颗粒的沉积涉及到泥沙颗粒沉速的确定。由上述分析可得, 云母的粒径和厚度是影响沉积作用的重要因素, 因此在研究云母和石英长石的沉积分异作用和计算沉积速度的时候, 要考虑到云母径厚比这一重要的形状系数。把云母的径厚比分粒级进行统计(图 4), 可以看出, 不同粒级的径厚比分布几乎都 < 100 。呈右偏分布, $10 \sim 40$ 之间分布较为集中。85% 左右同样分布在 $5 \sim 60$ 之间。对沉积速度的讨论都在比较理想的层流情况下, 这时的碎屑颗粒的沉降与静水相似, 然而自然界的沉积作用要复杂得多。Corey 公式与 Stokes 公式是沉积速度分析的理论基础, 有重要实际意义, 可以基本展示出沉积作用与颗粒的形状、大小等因素之间的关系^[6]。自然其他流态的流动水中沉积还在研究中, 也给出了许多相应的沉速计算方法和计算公式等, 本文不再多做讨论。

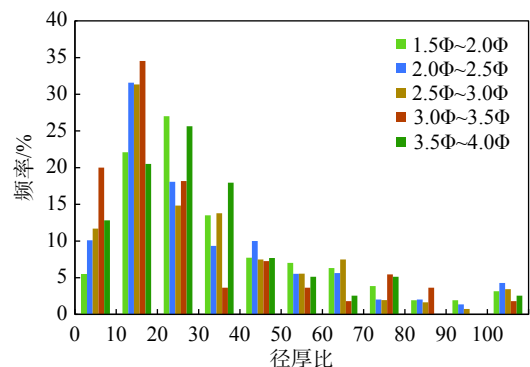


图 4 不同粒级云母径厚比分布频率

Fig.4 Frequency distribution of diameter-thickness ratio for mica of different grain size

4.2 云母的等效沉积

4.2.1 粒径相同时沉积速度的差异

对于云母这种片状矿物,其径厚比与其他矿物有着明显的区别。Corey^[39]引入了形状因子 $CFS = H/\sqrt{D_1 \cdot D_2} = 1/M$ 。Komar和Reimers^[40]根据Corey形状因子得出了一个沉降速度的经验公式,这一公式考虑了颗粒的径厚比:

$$U = \frac{1}{18\mu} \cdot \frac{1}{f(CFS)} (\rho_s - \rho) g \cdot D_n^2 \quad (5)$$

式中: μ 为流体的黏度系数($\text{g}/\text{mm} \cdot \text{s}$);

$$D_n = \sqrt[3]{HD_1 D_2}$$

对本文来说, $CFS = H/\sqrt{D_1 D_2}$ 。当 $0.4 \leq CFS \leq 0.8$,即 $1.25 \leq M \leq 2.5$ 时, $f(CFS) = 0.946(CFS)^{-0.378}$;当 $CFS \leq 0.4$,即 $M \geq 2.5$ 时, $f(CFS) = 2.18 - 2.09CFS$ 。由图可得,云母的径厚比 M 都 > 2.5 ,则 $f(CFS) = 2.18 - 2.09CFS$ 。所以(5)式一般为

$$U = \frac{1}{2.18 - 2.09CFS} \cdot \frac{1}{18\mu} (\rho_s - \rho) g \cdot D_n^2 \quad (6)$$

对于云母来说, $D_n = \sqrt[3]{HD_1 D_2} = D_{\text{云母}}/\sqrt[3]{M_{\text{云母}}}$,把 $CFS = 1/M$ 代入公式(6)得:

$$U_{\text{云母}} = \frac{M_{\text{云母}}}{(2.18M_{\text{云母}} - 2.09) \cdot \sqrt[3]{M_{\text{云母}}}} \cdot \frac{1}{18\mu} (\rho_{\text{云母}} - \rho) g \cdot D_{\text{云母}}^2 \quad (7)$$

慢速沉积的细颗粒石英和长石颗粒的沉积速度一般用下面这个Stokes公式表示:

$$U_{\text{石英}} = \frac{1}{18\mu} \cdot (\rho_{\text{石英}} - \rho) g \cdot D_{\text{石英}}^2 \quad (8)$$

当云母和石英和长石的粒径相等,即 $D_n = D_0$ 时,两者之间的沉降速度之间的存在着差异。将公式(7)与公式(8)进行比较得出:

$$\frac{U_{\text{云母}}}{U_{\text{石英}}} = \frac{M_{\text{云母}}}{(2.18M_{\text{云母}} - 2.09) \cdot \sqrt[3]{M_{\text{云母}}}} \cdot \frac{(\rho_{\text{云母}} - \rho)}{(\rho_{\text{石英}} - \rho)} \quad (9)$$

假设两者密度相等,只考虑径厚关系, M 的范围为 $5 \sim 60$,代入公式(9)可得, $U_{\text{云母}}/U_{\text{石英}} = 0.12 \sim 0.33$,即同粒径云母的沉积速度约为石英和长石沉积速度的 $0.12 \sim 0.33$ 倍。可见,形状差异对颗粒沉积速度有着很大的影响,从而影响河流碎屑物质的沉积分异。

4.2.2 速度等效时的粒径差异

不同的碎屑颗粒拥有相同的沉积速度时,呈现等效沉积。如果石英和长石与云母等效沉积,则 $U_{\text{云母}} = U_{\text{石英}}$,此时石英和长石的粒径和云母的粒径之间肯定存在着很大的差异。当与云母等效沉积时,由公式(7)和(8)得

$$D_{\text{石英}}^2 = D_{\text{云母}}^2 \cdot \frac{M_{\text{云母}}}{(2.18M_{\text{云母}} - 2.09) \cdot \sqrt[3]{M_{\text{云母}}}} \cdot \frac{(\rho_{\text{云母}} - \rho)}{(\rho_{\text{石英}} - \rho)} \quad (10)$$

只考虑径厚比,将表3中的云母平均粒径与径厚比数据代入公式(10),计算出 $D_{\text{石英}}$ 结果。由此可知,当石英和长石与云母等效沉积时,石英和长石与云母粒径之间差异很大:63~88、88~125、125~177、177~250、250~440 μm 粒度的云母对应石英和长石平均粒径分别为22.98~50.57、36.75~70.02、52.27~95.30、64.60~128.41、92.60~183.28 μm 。石英和长石的粒径只有云母粒径的42%~65%。云母的粒级要比石英和长石大约 $1.0 \sim 1.5\Phi$,所以在河流碎屑沉积物中,云母常与更细的石英和长石颗粒一起沉积。

云母有时也会呈厚板状,石英有时也会呈薄板状,在这特殊情况下,等效沉积的石英与云母可能粒级一样没有差别。本文讨论的都是普遍呈薄片状的云母和粒状的石英和长石。沉积速度公式中主要的就是颗粒的形状系数,常用的还有表面积形状系数、体积形状系数等,是指特征直径相同的球形颗粒的表面积、体积与实际颗粒的体积与表面

表3 速度相同时云母与石英和长石粒径差异

Table 3 The particle size difference between mica and feldspar plus quartz at the same speed

$D_{\text{云母}}$			$D_{\text{石英}}$	
粒度/ μm	粒级/ Φ	平均粒径/ μm	平均粒径/ μm	粒级/ Φ
63~88	4.0~3.5	66.40~87.52	22.98~50.57	5.5~4.5
88~125	3.5~3.0	106.31~121.18	36.75~70.02	5.0~4.0
125~177	3.0~2.5	151.19~164.94	52.27~95.30	4.5~3.5
177~250	2.5~2.0	186.85~222.24	64.60~128.41	4.0~3.0
250~440	2.0~1.5	267.85~347.20	92.60~183.28	3.5~2.5

积的关系,对于云母与石英和长石来说本质上都是粒径与厚度的关系^[41]。形状不规则的碎屑颗粒,由于棱角突出,其表面积、体积都比磨圆度最好的球形颗粒大,在沉积过程中受到的阻力也大。阻力增加的使得不规则颗粒的沉降速度比同体积同密度的球形要低,因此不规则颗粒的沉积速度要低于球形颗粒。而且当层流变为紊流时,近球形颗粒的周围的尾流减小,使得颗粒的阻力系数变小,沉积速度更快^[42]。石英和长石的实际沉积速度要比 $U_{\text{石英}}$ 要小,云母实际会更小,也就是粒径相同时,云母的沉积速度与石英和长石沉积速度相比,比值更小。当速度相等时,云母比石英和长石相差的粒级更大。形状不规则对速度的具体影响需要进一步的论证研究。

5 结论

(1)黄河口段沉积物中云母总体含量较高、但粒级之间差异很大,云母在 $<4\Phi$ 的粗粒级范围内含量高,在有些粒级中占接近100%;在 $>4\Phi$ 的细粒级中含量低,但云母总量较高。不论白云母还是黑云母主要分布在轻矿物中,重矿物中含量较低。

(2)云母与石英和长石形状差异明显,相同粒径的云母与石英和长石的体积有着很大的差异,云母的体积约为石英和长石体积的16%~55%,体积的差异与径厚比有着明显的关系,体积导致的重力差异,使云母沉积速度比同粒径的石英和长石要慢得多。

(3)云母的径厚比集中分布在5~60之间,当云母和石英和长石粒径相同时,云母的沉积速度仅为石英和长石的0.12~0.33倍;云母与石英和长石等效沉积时,云母要比石英和长石的粒径大,相差约1.0 Φ ~1.5 Φ 粒径,所以较大粒径云母常与细粒泥质沉积共生。

参考文献:

- [1] 李玉中. 沉积分异作用与河口海洋沉积[J]. 地质学刊, 2014, 38(4): 556-560.
- [2] COLLINS M B, GAO S. Analysis of grain size trends, for defining sediment transport pathways in marine environments[J]. Journal of Coastal Research, 1994, 10(1): 61-70.
- [3] 任韧希子, 陈沈良. 黄河下游至三角洲滨海区表层沉积物分异特征和规律[J]. 海洋科学进展, 2010, 28(1): 24-31.
- [4] 邓程文, 张霞, 林春明, 等. 长江河口区末次冰期以来沉积物的粒度特征及水动力条件[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(6): 185-198.
- [5] 丛静艺, 袁忠鹏, 胡刚, 等. 长江远端三角洲多源沉积分异作用及其动力机制[J]. 沉积学报, 2020, 38(3): 528-537.
- [6] 刘宝珺. 沉积岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1980: 31-40.
- [7] 张连杰, 胡日军, 朱龙海, 等. 文登近岸海域重矿物组合分布及对沉积动力环境的指示[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(1): 127-138.
- [8] DOYLE L J, CLEAHEY W J, PILKEY O H. Mica: Its use in determining shelf-depositional regimes[J]. Marine Geology, 1968, 6: 381-389.
- [9] 张富元, 王秀昌. 东海表层沉积物中重矿物聚类分析及其动力分布特征[J]. 台湾海峡, 1984, 3(1): 68-77.
- [10] 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.
- [11] 于炳松, 梅冥相. 沉积岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2016: 120-126.
- [12] 潘兆麟. 结晶学及矿物学下第3版[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 169-196.
- [13] 方霖, 郭珍旭, 刘长森, 等. 云母矿物浮选研究进展[J]. 中国矿业, 2015, 24(3): 131-136.
- [14] 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.
- [15] JIN B F, WANG M Y, YUE W, et al. Heavy mineral variability in the Yellow River sediments as determined by the multiple-window strategy[J]. Minerals, 2019, 9(2): 85-90.
- [16] TIAN S, LIB Z, WANG C Z, et al. Mineral composition and particle size distribution of river sediment and loess in the middle and lower Yellow River[J]. International Journal of Sediment Research, 2020, 36(3): 392-400.
- [17] 卫晓峰, 潘东, 阴元军等. 新疆阿克塔斯金矿床黑云母花岗岩锆石U-Pb和绢云母³⁹Ar/⁴⁰Ar测年及地质意义[J]. 矿床地质, 2019, 38(2): 251-260.
- [18] 曾广策. 晶体光学及光性矿物学, 第3版[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2017, 208-211.
- [19] 白翠萍. 云母粉径厚比测定方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008: 6-10.
- [20] 乔志川, 刘迪, 刘钦甫. 层状矿物径厚比自动测算研究[J]. 煤炭技术, 2017(5): 306-308.
- [21] TAO S, EGLINTON T I, MONTLUON D B, et al. Pre-aged soil organic carbon as a major component of the Yellow River suspended load: regional significance and global relevance[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2015, 414(1): 77-86.
- [22] 水利部黄河水利委员会. 黄河年鉴[M]. 郑州: 黄河年鉴社, 2019: 5-9.
- [23] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 14-44.
- [24] GAO P, DENG J, CHAI X, et al. Dynamic sediment discharge in the Hekou-Longmen region of Yellow River and soil and water conservation implications[J]. Science of the Total Environment, 2017, 578: 56-66.
- [25] MIKHAILOV V, MIKHAILOVA M. Natural and anthropogenic long-term variations of water runoff and suspended sediment

- load in the Huanghe River[J]. *Water Resources*, 2017, 44(6): 793-807.
- [26] 王臻, 陈振宇, 李建康, 等. 云母矿物对仁里稀有金属伟晶岩矿床岩浆-热液演化过程的指示[J]. *矿床地质*, 2019, 38(5): 1039-1052.
- [27] 陈丽蓉. 渤海、黄海、东海沉积物中矿物组合的研究[J]. *海洋科学*, 1989, 13(2): 1-8.
- [28] LIU J, SAITO Y, WANG H, et al. Sedimentary evolution of the Holocene subaqueous clinoform off the Shandong Peninsula in the Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 2007, 236(3/4): 165-187.
- [29] 张尧, 韩宗珠, 艾丽娜, 等. 黄海全新世泥质体表层沉积物重矿物特征及其指示意义[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(11): 108-118.
- [30] 胡邦琦, 李军, 李国刚, 等. 长江和黄河入海沉积物的物源识别研究进展[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(6): 147-156.
- [31] 秦亚超, 李日辉, 姜学钧. 黄海中北部和渤海东部表层沉积物轻矿物特征及其指示意义[J]. *第四纪研究*, 2014, 34(3): 611-622.
- [32] 张茂根, 翁志学. 颗粒统计平均粒径及其分布的表征[J]. *高分子材料科学与工程*, 2000, 16(5): 1-4.
- [33] 白玉川. 河口泥沙运动力学[M]. 天津: 天津大学出版社, 2011: 9-20.
- [34] 马在平, 姜在兴. 我国热带亚热带部分地区花岗岩和片麻岩中黑云母风化研究[J]. *矿物岩石*, 1996, 16(2): 17-24.
- [35] 王彦华, 罗立峰. 花岗岩中黑云母风化的矿物变化机制[J]. *地球化学*, 1999, 28(3): 239-247.
- [36] 王学潮, 向宏发. 聊城-兰考断裂综合研究及黄河下游河道稳定性分析[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2001: 94-105.
- [37] 陆凯, 秦亚超, 王中波, 等. 东海中南部海域表层沉积物碎屑重矿物组合分区及其物源分析[J]. *海洋地质前沿*, 2019, 35(8): 20-26.
- [38] 张连杰, 胡日军, 朱龙海, 等. 渤海湾碎屑矿物特征及其物源和沉积动力环境指示意义[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(5): 60-70.
- [39] COREY A T. Influence of the shape on the fall velocity of sand grains[M]. Colorado: Colorado State University, 1949: 10-30.
- [40] KOMAR P D, REIMERS C E. Grain Shape Effects on Settling Rates[J]. *The Journal of Geology*, 1978, 86: 193-209.
- [41] 魏德洲. 固体物料分选学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2015: 201-217.
- [42] 袁竹林, 朱立平, 耿凡. 气固两相流动与数值模拟[M]. 南京: 东南大学出版社, 2013: 23-27.

MICA SHAPE FACTOR AND ITS EQUIVALENT SEDIMENTATION IN THE SEDIMENTS OF THE YELLOW RIVER ESTUARY

FAN Shuimiao¹, JIN Bingfu^{1*}, WANG Xi¹, YU Haiyang²

(1 Marine Research Institute/School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 610041, Shandong, China;

2 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Mica has a unique sheet-like structure and crystal form. In order to study the hydraulic difference between mica and other granular detrital minerals, light and heavy minerals were identified for the sediments of different size taken from the Yellow River Estuary. Muscovite and the biotite with different weathering degree were selected as research objects. The particle size and thickness of about 12 000 detrital mica from 5 samples were measured to study the equivalent size for sheet-like mica and granular feldspar and quartz in water. The results show that the content of mica in the Yellow River sediments is about 1.8%~9.7% in general, which vary greatly between different samples and different grain size grades and the content of mica decreases sharply from high to low around the grain size of $1.5\Phi\sim5.5\Phi$. The thickness of mica is mostly less than 20 μm with an average of 8.93 μm . Muscovite is generally thinner than biotite. The volume of sheet shaped mica is approximately 16% to 55% of granular minerals, which is much smaller than those of feldspar and quartz. The volume change of mica can be described with shape factor and the diameter-thickness ratio, which varies between 5~60. According to the Corey and Stokes law, for mica and granular minerals such as feldspar and quartz, the sedimentation rate of mica is only 0.12%~0.33% of that for feldspar and quartz if they are the same in grain size. If the sedimentation rates are same for the two kinds of sediments, the grain size distribution of mica is wider than that of feldspar and quartz, with a difference of about $1.0\Phi\sim1.5\Phi$. Therefore, the hydraulic behavior of sheet-like mica and granular feldspar and quartz are obviously different in the process of transportation and deposition. Equivalent deposition often makes large-particles of mica deposited together with fine-grained muddy deposits.

Key words: mica; diameter-thickness ratio; sedimentary differentiation; sedimentation rate; equivalent sedimentation; Yellow River Estuary