

DOI: 10. 3724/SP. J. 1140. 2010. 04087

碳酸钙对黄河口潮间带沉积物微团聚体的影响

陈友媛^{1,2}, 王俊鹏², 赵文娟², 高来见², 黄涛², 姚紫娟²

(1 海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100; 2 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 青岛 266100)

摘要:黄河口潮间带沉积物团聚体的稳定性直接影响到海岸带的侵蚀过程。采用扫描电镜 SEM、土壤物理和土壤化学领域的多种方法, 对比分析影响黄土和黄河口沉积物团聚的主要物质基本理化性质, 通过测定不同条件下碳酸钙和 Ca^{2+} 对团聚度的影响, 研究了碳酸钙和 Ca^{2+} 的团聚作用和对黄河口沉积物水稳定性的影响。结果表明, 碳酸钙是影响黄河口沉积物团聚的主要物质, 其含量与黄土中的含量相当, 为 10.67%, 而沉积物的平均粒径比黄土小, 说明碳酸钙以微晶态形式胶结黏粒形成小粒径颗粒, 被径流通过河道带到黄河三角洲沉积下来。碳酸钙的团聚呈现出粒级越大碳酸钙含量越高的趋势, 对比碳酸钙与 Ca^{2+} 对黄河口沉积物的团聚作用表明, 碳酸钙对颗粒的团聚作用比 Ca^{2+} 的团聚作用强。黄河口沉积物黏粒基本上不是分散存在的, 而是被碳酸钙团聚成微团聚体存在的, 在长期的往复潮流和波浪的作用下更加明显。

关键词:碳酸钙; 团聚作用; 潮间带; 沉积物; 黄河口

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2010)04-0087-08

黄河口潮滩的稳定性主要取决于表层沉积物团聚体的水稳定性。国内外许多学者把团聚体的水稳性作为评价可蚀性的重要指标, 因为水分是导致团聚体破碎的主要因素^[1-3]。根据 Edwards 和 Bremner 的微团聚体理论, 微团聚体 ($<0.25\text{ mm}$) 由“黏粒-高价金属阳离子-有机质 (分别用 C、P、OM 表示),”即有机-无机复合体所构成 (C-P-OM)^[4]。在黏粒含量和有机质含量低的钙质土壤中, 碳酸钙成为土壤团聚体的重要胶结剂^[5]。

富含碳酸钙是黄土的一大特征, 郭玉文等研究证明黄土团聚体的主要胶结物是碳酸钙, 碳酸钙大约参与了 99% 的团聚体形成^[6]。刘东生认为, 在黄土堆积形成过程中, 次生碳酸盐与黄土粉尘中黏粒物质结合形成微团聚体, 这些微团聚体是形成黄土团粒的前身^[7]。Le Bissonnais 认为碳酸钙对团聚体稳定性的作用可能依赖于碳酸钙颗粒分布和黏粒含量, 黏粒含量高和碳酸钙颗粒小于粉粒大小时对土壤有很好的团聚作用^[8]。王永焱和藤志宏认为, 黄土的团粒是由大量的细粒碎屑和少量的黏粒物质由微晶态碳酸钙胶结而成的^[9]。

沉积物形成以后, 从沉积物到沉积岩以及沉积岩形成后直至遭受风化或变质前, 还要发生一系列

变化, 受到多种作用的改造, 这一系列改造统称为成岩作用^[10]。碳酸钙对沉积物团聚体影响的研究属于早期成岩过程, 早期成岩作用是指沉积物沉积至浅埋藏过程中在沉积颗粒、孔隙水及沉积环境水介质之间发生的一系列物理、化学及生物学作用^[11]。本文结合近年来在黄河口潮间带开展的渗流、工程地质性质等研究的基础上, 采用扫描电镜 SEM、土壤物理和土壤化学领域的多种方法, 研究黄河口沉积物对黄土的继承性, 分析黄河口潮间带沉积物碳酸钙的团聚作用及其团聚机理, 这有助于深化对黄河口沉积物的工程地质性质的认识, 对保护黄河口岸滩的稳定性具有理论价值和实际应用意义。

1 黄土与黄河口沉积物基本理化性质的对比

黄河口沉积物主要来源于黄土高原, 其他为短源的碎屑沉积物。因此, 把黄河口潮间带沉积物的基本理化性质与黄土相对比, 可以借助大量的黄土的知识, 深化对黄河口沉积物的认识。

1.1 矿物成分

黄土在我国分布很广, 堆积很厚, 形成晋、陕、甘等省黄土高原, 有些地区还分布有冲积或洪积黄土。富含碳酸盐类矿物是黄土的一个显著特点, 仅方解石含量约占轻矿物的 8%~10%。片状矿物含量较多, 云母含量约占重矿物的一半以上^[12]。

基金项目:国家自然科学基金项目 (40606020); 国家高新技术研究发展计划项目 (2008AA09Z109)

作者简介:陈友媛 (1966—), 女, 副教授, 主要从事海洋沉积环境研究, E-mail: youyuan@ouc.edu.cn

收稿日期: 2010-02-10; **改回日期:** 2010-04-15. 张光威编辑

黄河口潮间带沉积物的主要矿物为碎屑矿物和黏土矿物(表 1)。碎屑矿物的含量占 75.8%,主要有石英、长石、方解石和白云石。碳酸盐岩中最常见的方解石和白云石约占 11.41%,次生碳酸盐来源于碎屑方解石的溶解,其溶液转入粒间,再因强烈蒸发,重新沉淀形成的^[13]。部分黏土矿物为伊利石、绿泥石、高岭石和蒙脱石,黏土矿物含量占 24.2%,黏粒对团聚的影响取决于其黏土矿物组成。

表 1 黄河口沉积物的主要矿物和黏土矿物成分含量

Table 1 Main mineral and clay composition of sediments in the Yellow River estuary

主要矿物成分/%				
石英	长石	方解石	白云石	碎屑矿物
43.68	20.71	9.47	1.94	75.8
黏土矿物成分/%				
伊利石	绿泥石	高岭石	蒙脱石	黏土矿物
13.67	4.44	5.78	0.31	24.2

1.2 沉积物中碳酸盐的矿物结构特征

通过 X 射线衍射物相分析了沉积物的全矿物成分,确定黄河口沉积物中碳酸盐矿物类型有方解石、白云石 2 种,以方解石为主,白云石少见(图 1)。

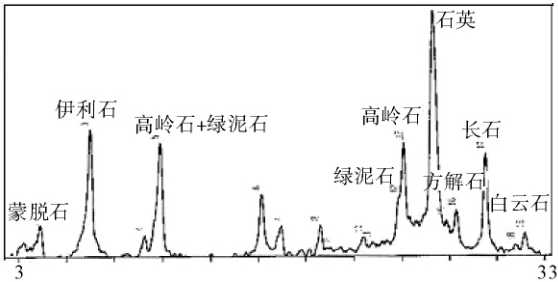


图 1 黄河口沉积物 X 射线衍射谱线

Fig. 1 X-ray diffraction chart of sediments in Yellow River Estuary

X 射线仪为日本产 D/Max-rB 型阳极旋转衍射仪,铜靶(K_α),管电压 40 kV,管电流 100 mA。衍射条件:步进长度 0.01°(2θ),扫描速度 20°/min。

据范德江等对黄河沉积物中碳酸盐组成研究表明,黄河沉积物中的碳酸盐以碎屑碳酸盐为主体,而且方解石含量占绝对优势,碎屑方解石主要晶质结构颗粒呈长条状、树枝状,颗粒边缘为港湾状,偶尔可见与石英颗粒相连,碎屑方解石类型繁多,颗粒棱角有被磨蚀圆化现象^[14]。

1.3 主要物质含量

一般来说有机物质、无机胶体、高价电解质及黏粒是形成团聚体的物质条件,各种环境应力变化是形成团聚体动力学条件^[15]。通过文献和实测资料的整理分析,马兰黄土、典型草原黄土及黄河口沉积物的主要团聚物质有机质、碳酸钙及黏粒的含量见表 2。由表 2 可知,黄河口沉积物的有机质平均含量最低,为 0.32%,这可能与黄河频繁改道,潮间带受冲淤变化的影响较大有关,因此,有机质对黄河口沉积物微团聚体贡献少^[16]。黄河口沉积物的碳酸钙的平均含量为 10.67%与黄土的平均含量 10.87%相近。黄河口沉积物的黏粒含量比马兰黄土和典型草原黄土低,比兰州市郊黄土高,属于黄土黏粒,含量一般为 10%~30%^[17]。在黏粒含量和有机质含量低的钙质土壤中,碳酸钙成为土壤团聚体的重要团聚物质^[5]。

1.4 易溶盐

由于黄河口潮间带受高盐度海水的往复浸泡,致使沉积物中含有大量的易溶盐离子,主要的阳离子有 Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺,阴离子有 Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻,使得黄河口沉积物的易溶盐总量是陕北马兰黄土易溶盐含量的 10 倍(表 3),其中 Na⁺和 Cl⁻的含量远

表 2 影响黄土与黄河口沉积物团聚作用的主要物质含量

Table 2 Main material content of effect aggregation of loess and sediments in Yellow River estuary %

地点	土壤	样品数	有机质		碳酸钙		黏粒		数据来源
			含量范围	平均值	含量范围	平均值	含量范围	平均值	
甘肃临夏北原	马兰黄土	8	0.21~1.38	0.61	11.59~14.43	13.10	19.80~37.00	26.60	赵景波 ^[13]
岐山城西	马兰黄土	6	0.33~0.56	0.48	8.21~12.86	10.43	32.40~38.60	36.20	赵景波 ^[13]
宝鸡何家村	马兰黄土	8	0.20~0.66	0.51	7.48~13.24	9.06	30.60~41.20	38.40	赵景波 ^[13]
宁夏固原	典型草原黄土	19	0.25~4.05	1.83	4.69~17.26	11.82	22.4~32.9	27.99	安韶山 ^[16]
兰州市郊	黄土	28	0.90~4.36	1.76	4.83~13.75	9.94	1.90~11.55	7.43	赵传燕 ^[5]
黄河口潮间带	沉积物	23	0.12~0.64	0.32	4.56~13.78	10.67	8.7~17.2	13.03	本文

表 3 黄土与黄河口地区沉积物易溶盐含量的对比

Table 3 Comparison of salt content between loess and sediments in Yellow River estuary area mg/100g

地区	样品数	易溶盐总量	阳离子			阴离子		
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
陕北晋西马兰黄土 ^[21]	11	92.91	11.00	5.28	7.11	12.67	17.46	38.51
黄河口大王北	4	1373.50	54.30	41.56	469.46	670.18	22.09	19.83
黄河口新滩	4	207.50	24.00	4.80	19.32	112.18	2.84	40.99
黄河口钊口	4	996.00	24.56	12.16	369.36	486.88	37.46	28.98
黄河口海港	4	1161.50	46.06	16.10	410.59	546.35	31.70	27.46

远高于黄土的相应含量。沉积物的碳酸钙的含量仍与黄土碳酸钙含量接近,表明在海洋的沉积环境中,没有因易溶离子的增加而析出形成化学沉积碳酸盐晶体,从而增加了沉积物的团聚作用。

1.5 微结构

通过观察扫描电镜 SEM 照片,高国瑞发现兰州、太原和西安的黄土中黏粒基本上不是分散存在的,而是被胶结成集粒,并通过试验证明,这种集粒是由难溶的微晶状碳酸钙胶结黏粒形成的。他认为微晶碳酸钙的存在,使黏粒胶结得很牢固,与碎屑颗粒共同构成支承结构的骨架,使黄土具有湿陷性^[18]。

为了研究黄河口潮间带沉积物是否也存在碳酸钙团聚,分别对黄河口潮间带沉积物的原状样、加盐酸去除碳酸钙和加易溶盐 CaCl₂ 观察 Ca²⁺ 的团聚作

用的制备样进行 SEM 观察。从原状样的微结构照片图 2a 和图 2b 可以看出,原状土的骨架颗粒多为 0.05~0.01 mm 的粉粒,骨架之间有一定的孔隙,小粒级的粉粒和黏粒团聚体附着在大颗粒骨架上,或者相互团聚在一起,形成更大的团粒填充在孔隙内,但很少有零星分布的单颗粒的黏粒,这与潮流和波浪的往复作用有关。用 0.05 和 0.5 mol/L 浓度 0.5 mol/L 浓度的盐酸溶液配置含水率为 20% 的土,密封放置一个星期左右,使水分均匀,击实得到所要土样,然后制备微结构样图 2c 和图 2d,可以看出,少量的 0.05 mol/L 盐酸溶解就会促进团聚体分散,小粒级团聚体增多,当用 0.5 mol/L 盐酸处理土样后,颗粒排列更加的杂乱无章,黏粒级颗粒多。用同样的方法配制含 3% 和 10% 的 CaCl₂ 溶液的制备样(图 2e,2f),3%CaCl₂ 溶液配制的土中黏粒形成集

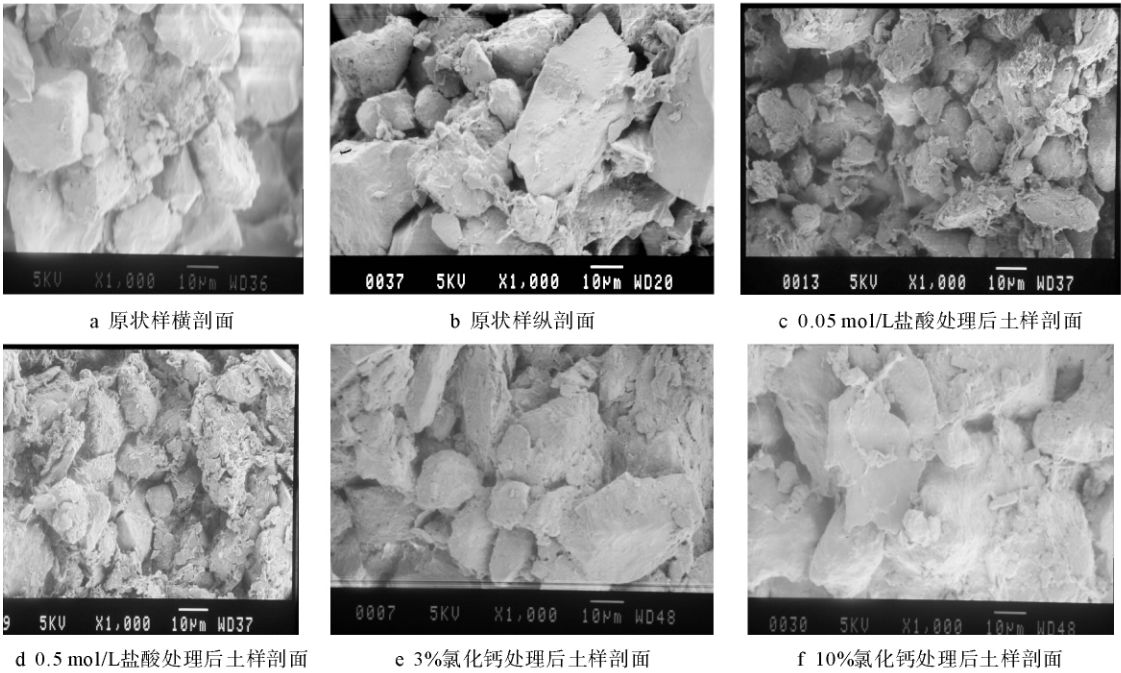


图 2 黄河口沉积物土样扫描电镜照片

Fig. 2 The SEM photos of sediment aggregates in the intertidal zone of the Yellow River estuary

粒程度比 10%CaCl₂ 溶液配制的土少。当然,原状样与制备样的区别还与沉积物上部历史荷载的变迁和受到的潮流和波浪的往复作用有关。

2 对黄河口沉积物团聚作用的影响

2.1 测试方法

土样取自黄河口海港潮间带表层沉积物,碳酸钙对沉积物团聚作用的影响,主要通过测定沉积物团聚体度来衡量。微团聚体的测定采用传统吸管法,具体方法按照土工实验方法标准(GBT50123)进行。微团聚体的分析原理及操作过程基本上与沉积物机械分析(常规颗粒分析的吸管法)相同,只是在土样分散处理时不需加入化学分散剂,进行震荡或超声波处理土样。用酸碱滴定法确定沉积土样中的碳酸钙含量^[19]。

2.2 不同粒级团聚体碳酸钙的含量

将黄河口沉积物土样风干后,过 0.25、0.125、0.075 mm 的筛子,分别测定原样土>0.25、0.25~0.125、0.125~0.075 mm、<0.075 mm 土样中的碳酸钙含量。>0.25、0.25~0.125 mm 粒级团聚体中碳酸钙含量分别为 10.67%、11.29%高于原样土(10.67%),而 0.125~0.075、<0.075 mm 粒级团聚体中碳酸钙含量分别为 10.20%、9.81%均低于原状样土中的含量。说明碳酸钙的含量随粒级的增加呈增加的趋势,可以按黄土胶结的机制解释为胶粒先由微晶碳酸钙团聚形成小粒径的微团聚体(团聚体内部的团聚),这些小粒径的微团聚体经过碳酸钙的进一步团聚成为大粒级的微团聚体(团聚体之间的团聚),因此,大粒级的微团聚体中碳酸钙的含量要多一些。这与郭玉文^[6]分析得出的黄土高原黄土团粒越大,其碳酸钙含量越高的结论一致。

2.3 原状土碳酸钙对微团聚体水稳定性的影响

2.3.1 HCl 去除碳酸钙的用量

将风干的黄河口沉积物土样 20 g 进行饱和,把饱和后的供试土样放进烧杯,分别用 100 ml 中 0.05、0.1、0.3 和 0.5 mol/L HCl 溶液对土样进行碳酸钙溶解,保证水土比为 5:1,静置 12 h 以后,过滤上清液,用酸碱滴定法测定上清液中的 Ca²⁺ 含量,然后换算成碳酸钙的含量(表 4)。用酸碱滴定法测该土样碳酸钙的含量为 8.67%,可见试验土样用 0.5 mol/L HCl 溶液已能溶解 98.2%的碳酸钙了。

表 4 黄河口沉积物 EDTA 滴定上清液中 Ca²⁺ 含量

Table 4 Ca²⁺ content of sediments in the Yellow River delta

HCl 溶液 (mol/L)	0	0.05	0.1	0.3	0.5	酸碱 滴定法
Ca ²⁺ / %	0.008	0.437	0.890	2.535	3.407	3.468
CaCO ₃ / %	0.020	1.092	2.224	6.338	8.517	8.67

2.3.2 对微团聚体水稳定性的影响

将上述用盐酸处理后的土样风干碾碎,称取一定质量的土样,用吸管法测定其机械组成和团聚体组成,平行样至少做 3 组,求其平均值作为最后结果,把 0.01 mm 的微团聚体作为特征微团聚体,以此来分析研究区沉积物微团聚体的团聚度^[14],计算其团聚度值(表 5)。

经过不同浓度的盐酸去除沉积物中碳酸钙之后,<0.002、<0.005 以及<0.01 mm 微团聚体含量增加,其中<0.002 mm 微团聚体的量增加尤为明显,从原来的 1.1%增加到 5.1%,增加将近 5 倍,沉积物微团聚体更多的被分解成胶粒级的微团聚体或单体颗粒。同时,0.05~0.01、0.01~0.005 以及 0.005~0.002 mm 的微团聚体含量减少。随着盐

表 5 黄河口沉积物盐酸处理土样后团聚度的变化

Table 5 Sediment aggregate variation under different HCl concentration

盐酸溶液浓度 (mol/L)	机械颗粒组成/微团聚体组成								mm/%
	0.25~0.075	0.075~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.002	<0.002	<0.005	<0.01	团聚度 /%
0	1.2/1.3	10.8/15.1	70.5/79.2	3.9/2.2	2.9/1.1	10.7/1.1	13.6/2.2	23.0/4.4	19.45
0.05	1.4/1.4	13.1/15.5	68.4/78.5	4.2/2.0	2.0/1.0	10.9/1.6	12.9/2.6	17.1/4.6	13.1
0.1	1.2/1.5	14.6/15.2	67.4/78.3	3.9/1.9	2.3/0.8	10.6/2.3	12.9/3.1	16.8/5.0	12.4
0.3	1.2/1.1	15.0/16.4	67.8/77.1	3.9/1.1	2.4/0.4	9.7/3.9	12.1/4.3	16.0/5.4	11.2
0.5	1.1/1.2	16.1/15.2	70.6/77.0	3.5/1.3	2.5/0.2	6.2/5.1	8.7/5.3	12.2/6.6	6.0

酸溶液浓度的增大,即沉积物中碳酸钙含量的减少,团聚度由最大值 19.45%快速减小,水稳定性降低,当盐酸浓度为 0.5 mol/L 时,团聚度最小为 6%,比原土团聚度减少了 2.24 倍,可见碳酸钙对团聚体水稳性起到了非常重要的作用。

施斌等曾指出难溶盐和非溶性次生矿物常以凝胶形式存在于粒间,使颗粒胶结,增强结构连结^[20]。沉积物中的碳酸钙属于非溶性次生矿物,由于它的存在,使得颗粒间的连接增强,结构连结的增强增大了团聚体的水稳性。张永双和曲永新^[21]研究得出黄土中的碳酸钙在砂粒、粉粒和黏粒各粒级中均有分布,其存在形式既有>0.005 mm 的碎屑颗粒,又有<0.005 和<0.002 mm 附着在其他颗粒上的超细碳酸钙。经过六偏磷酸钠化学分散剂和超声波强力处理后,有些黏土矿物与超细碳酸钙仍呈不可分离的强结合团聚状态。超细碳酸钙对黏土矿物起着不可逆的强胶结作用,使碳酸钙团聚形成的团聚体具有很好的水稳定性。

2.4 制备土 Ca²⁺对微团聚体水稳定性的影响

去除有机质后,在土样中加入不同量的氯化钙,加入量分别为 0、0.1、0.5、1.0、3.0、5.0 mmol,水土比为 5:1,恒温振荡 2 h,静置 24 h 后,吸管法测其微团聚体组成机械组成,并计算其团聚度值,结果见表 6。

由表 6 可见,随着氯化钙加入量的增多,团聚度值先增大后减小,说明 Ca²⁺对胶粒的团聚作用不明显。其原因,一是 Ca²⁺中和了细颗粒沉积物的负电荷,使细颗粒沉积物呈电中性,由于静电引力作用,这些电中性的颗粒发生凝聚作用,团聚在一起,加大了团聚体间的连接,因此,增强了其水稳定性,由于电中性的颗粒之间的静电引力属于近距离作用力,该作用力比较微弱,但随着电解质溶液浓度的加大,

颗粒间发生脱稳,导致水稳性的下降。二是 Ca²⁺没有析出形成化学沉积碳酸盐晶体而增加其团聚作用。

3 讨论

黄河泥沙中<0.01 mm 粒级含量在 45%~51%之间^[19],而黄土中<0.01 mm 粒级含量仅在 20%~35%之间^[20],说明黄河口潮间带沉积物的粒径比黄土的小,且微团聚体多集中在 0.05~0.01 mm 粒级,含量在 68.6%~79.3%之间。但在海洋沉积环境中,碳酸钙的含量没有增加,可以考虑沉积物中的碳酸钙的团聚与其在黄土中的胶结作用一致。即沉积物中的碳酸钙以细分散超细碳酸钙为主,以微晶态形式胶结胶粒或黏粒形成小粒径微团聚体。这些微团聚体被径流通过河道带到黄河三角洲沉积下来,从而形成沉积物中 0.05~0.01 mm 微团聚体较黄土增加,导致沉积物颗粒的粒径比黄土高原土的粒径小,更易侵蚀。

黏粒是黄土团聚的另一个主要因素。Boix-Fayos^[22]对半干旱到半湿润的地区土壤进行研究,认为微团聚体的水稳性与黏粒含量成正相关,而大团聚体的稳定性则与土壤有机质密切相关,且当土壤中有有机质的含量>5%或 6%时,有机碳含量与团聚体稳定性成正相关关系。在有机质含量较少时,而黏粒和高价金属阳离子含量较高的土壤中,主要依靠黏粒的内聚力及高价金属阳离子的团聚,即黏粒通过高价金属阳离子连接、吸附极性有机分子,形成配位络合物和有机无机复合体^[3]。至于黏粒的单独作用对团聚过程的影响,Amezketta 认为黏粒对团聚体的影响取决于其黏土矿物组成,如含蒙脱石高的黏粒有更强的团聚作用,因为有巨大的表面积和高的阳离子交换量而有更强的理化相互作用^[23]。

表 6 黄河口沉积物加入不同氯化钙之后沉积物团聚度的变化

Table 6 The effect of CaCl ₂ on sediment aggregation									mm/%
加入 CaCl ₂ 的量 (mmol)	机械颗粒组成/微团聚体组成								团聚度
	0.25~0.075	0.075~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.002	<0.002	<0.005	<0.01	/%
0	1.3/1.9	16.8/19.4	59.1/68.6	5.9/7.1	3.6/1.4	13.3/1.6	16.9/3.0	22.8/10.1	16.45
0.1	1.4/1.9	13.3/16.4	62.2/71.9	5.9/6.0	5.0/2.2	12.2/1.6	17.2/3.8	23.1/9.8	17.29
0.5	1.7/1.7	12.5/17.2	62.6/74.6	6.0/4.0	5.3/0.8	11.9/1.7	17.2/2.5	23.2/6.5	21.74
1.0	1.6/1.6	13.7/16	61.5/76.2	6.1/3.5	4.9/0.7	12.2/2	17.1/2.7	23.2/6.2	22.14
3.0	1.1/1.1	15.0/16.8	61.9/76.9	6.7/2.1	6.1/1.5	9.2/1.6	15.3/3.1	22/5.2	18.50
5.0	1.5/1.1	15.4/14.7	63.6/79.3	7.0/1.9	5.7/0.5	6.8/2.5	12.5/3.0	19.5/4.9	13.89

黄河口沉积物蒙脱石的含量很低为 0.31%，因此，黄河口沉积物黏土矿物对团聚体稳定性的影响效果很难说有多大。根据我们的试验结果，单独的黏粒基本上没有团聚作用，但是，当与有机物或者无机物相互作用时，黏粒可以影响沉积物的水稳定性。

4 结论

(1) 黄河口沉积物主要来源于黄土，其碳酸盐类矿物的含量基本在 10% 左右，碳酸钙的含量与黄土一致。而从黄河口潮间带沉积物微团聚体多集中在 0.05~0.01 mm 粒级，黄土的微团聚体多集中在较大粒级，也说明碳酸钙以微晶态形式胶结胶粒或黏粒形成微团聚体被径流沿河道带到黄河三角洲沉积下来。

(2) 黄河口沉积物微结构电镜照片说明，碳酸钙具有团聚作用，黏粒基本上不是分散存在，而是被团聚成微团聚体存在的，在长期的往复潮流和波浪的作用下更加明显。

(3) 对黄河口沉积物去除碳酸钙胶结作用后，小颗粒微团聚体含量急剧增加，尤以胶粒级微团聚体增加最多，微团聚体的水稳定性也随之降低，说明了碳酸钙对团聚体水稳性起到了非常重要的作用。

(4) Ca^{2+} 对黄河口沉积物有一定的团聚作用，但与碳酸钙对团聚体的团聚作用相比，其团聚作用较弱，说明碳酸钙的团聚不仅体现在团聚体内部，也包括团聚体之间，并且呈现出团聚体粒级越大碳酸钙含量越高的趋势。

(5) 由于沉积物含有大量易溶盐，沉积物的团聚作用可能受 Na^+ 、 Ca^{2+} 等阳离子交替吸附作用影响，碳酸钙与黏粒、黏粒与有机质的相互团聚的影响有待进一步的研究。

参考文献 (References)

[1] 卢金伟, 李占斌. 土壤团聚体研究进展[J]. 水土保持研究, 2002, 9 (1): 81-85. [LU Jinwei, LI Zhanbin. Advance in Soil Aggregate Study[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2002, 9 (1): 81-85.]

[2] Shinjo H, Fujita H, Gintzburger Gus. Soil aggregate stability under different landscapes and vegetation types in a semiarid area in Northeastern Syria[J]. Soil Sci. Plant Nutr., 2000, 46(1): 229-240.

[3] 文倩, 关欣. 土壤团聚体形成的研究进展[J]. 干旱区研究. 2004, 21(4): 434-438. [WEN Qian, GUAN Xin. Progress in the Study on Soil Aggregate Formation[J]. Arid Zone Research. 2004, 21(4): 434-438.]

[4] Edwards A P, Bremner J M. Micro-aggregates in soils[J]. Soil Sci, 1967, 18(1): 64-73.

[5] 赵传燕, 李林. 兰州市郊区土壤水稳定性微团聚体的组成分析[J]. 兰州大学学报 (自然科学版). 2003, 39 (6): 90-94. [ZHAO Chuanyan, LI Lin. Composition of stable micro-aggregates in the soil of Lanzhou suburbs [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition), 2003, 39 (6): 90-94.]

[6] 郭玉文, 加藤诚, 宋菲, 等. 黄土高原黄土团粒组成及其与碳酸钙关系的研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(3) 362-368. [GUO Yuwen, Kato Makoto, SONG Fei, et al. Composition of loess aggregate and its relationship with CaCO_3 on the loess plateau [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(3): 362-368.]

[7] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985. [Liu T S. Loess and Environmnet (in Chinese)[M]. Beijing: Science Press, 1985.]

[8] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: Theory and methodology[J]. Eur J Soil Sci, 1996, 47: 425-435.

[9] 王永焱, 藤志宏. 中国黄土微结构及其在时代和区域上的变化[J]. 科学通报, 1982, 27 (2): 102-105. [WANG Y Y, TENG Z H. Microstructue and its change during times and around regions of Chinese Loess(In Chinese)[J]. Chinese Science Bulletin, 1982, 27(2): 102-105.]

[10] 余素玉, 何镜宇. 沉积岩石学[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1989. 1-242. [YU Suyu, HE Jingyu. Sediment petrology [M]. Beijing: China geology press, 1989. 1-242.]

[11] 梅洪明. 一个多层的早期成岩作用模型[J]. 科学通报, 1997, 42(9): 947-950. [MEI Hongming. A multiplayer model of early diagenesis[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(9): 947-950.]

[12] 臧运启. 黄河三角洲近岸泥砂[M]. 北京: 海洋出版社, 1996. 26-85. [ZANG Yunqi. Offshore Mud and Sand of Yellow River Delta[M]. Beijing: China Ocean Press, 1996. 26-85.]

[13] 赵景波. 黄土的本质与形成模式[J]. 沉积学报, 2003, 21 (2): 198-204. [ZHAO Jingbo. The Essence and Formation Model of the Loess[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(2): 198-204.]

[14] 范德江, 杨作升, 王文正. 长江、黄河沉积物中碳酸盐组成及差异[J]. 自然科学进展, 2002, 12 (1): 60-64. [FAN Dejiang, YANG Zuosheng, WANG Wenzheng. Composing and difference of carbonate in Yangtse River and Yellow River Estuary[J]. The Evolvment of Natural Science. 2002, 12 (1): 60-64.]

[15] 王益. 黄土高原土壤结构性状及影响因素分析[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2005: 2-10. [WANG Yi. The situation and effect factor of soil structure in loess plateau[D]. Yanglin, Shanxi: Northwest Agriculture and Forest University. 2005: 2-10.]

[16] 安韶山, 黄懿梅, 李壁成, 等. 黄土丘陵区植被恢复中土壤团聚体演变及其与土壤性质的关系[J]. 土壤通报, 2006, 37 (1): 45-50. [AN Shaoshan, HUANG Yimei, LI Bicheng, et al. Characteristics of soil water stable aggregates and rela-

tionship with soil properties during vegetation rehabilitation in a loess hilly region[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(1): 45-50.]

[17] 陈友媛,赵文娟,贾永刚,等. 黏粒和有机质对黄河口潮间带沉积物微团聚体的影响[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(1): 31-36. [CHEN Youyuan, ZHAO Wenjuan, JIA Yonggang, et al. The influence of clay and organic matter on the sediment aggregation in the Yellow River estuary[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009, 29(1): 31-36.]

[18] 高国瑞. 中国黄土的微结构[J]. 科学通报, 1980, (24):945-948. [GAO Guorui. Microstructure of loess soils in China [J]. China Science Bulletin, 1980, (24): 945-948.]

[19] 蔡玉曼,陆丽君,周泳德,等. 酸碱滴定法测定天然石膏中的碳酸盐(无水碳酸)[J]. 江苏地质, 2007, 31(2): 127-129. [CAI Yuman, LU Lijuan, ZHOU Yongde, et al. Determination of carbonate (anhydride carbonate) in natural gypsum by acid-base titration[J]. Jiangsu Geology, 2007, 31 (2): 127-129.]

[20] 施斌,刘志斌,姜洪涛. 论土体结构各层次的功能及其相互关系[J]. 工程地质学报, 2007, 15(5): 577-584. [SHI Bin, LIU Zhibin, JIANG Hongtao. On the functions of seven scale-levels of soil mass structures and their inter-relationship [J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(5): 577-584.]

[21] 张永双,曲永新. 陕北晋西砂黄土的胶结物与胶结作用研究[J]. 工程地质学报, 2005, 13(1): 18-28. [ZHANG Yongshuang, QU Yongxin. Cements of sand loess and their cementation in north Shanxi and west Shanxi[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13 (1):18-28.]

[22] Boix-Fayos C, Imeson A, Soriano-Solo M D. Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators[J]. Catena, 2001, 44: 47-67.

[23] Amezketa E. Soil aggregate stability: a review[J]. Sustainable Agriculture, 1999, 14: 83-151.

THE EFFECT OF CALCIUM CARBONATE ON SEDIMENT AGGREGATION
IN THE INTERTIDAL ZONE OF THE YELLOW RIVER ESTUARY

CHEN Youyuan^{1, 2}, WANG Junpeng², ZHAO Wenjuan², GAO Leijian², HUANG Tao², YAO Zijuan²

(1 Key Laboratory of Marine Environment and Ecology (Ocean University of China), Ministry of Education, Qingdao 266100, China;

2 College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The stability of the sediment aggregation directly impact the erosion process of the Yellow River estuary coast zone. Some methods, including scanning electron microscope, soil physical and chemical analysis, were used to analyze and contrast the basic physical and chemical properties of the loess and the sediments in the Yellow River estuary. A study was implemented on the aggregate influence of calcium carbonate and Ca^{2+} on sediments of the Yellow River estuary by testing aggregation values under different conditions. The results demonstrate that calcium carbonate is the main material of sediment aggregation in the Yellow River estuary. The average calcium carbonate content is 10.67% that consists with Calcium carbonate content in loess. This indicates that calcium carbonate in the form of microcrystals aggregates fine particles, which are carried along the Yellow River and deposited in Yellow River estuary. There exists a tendency that calcium carbonate contents are higher in bigger size particles than in smaller ones. Calcium carbonate shows stronger aggregation than calcium ion. The clay particles in the Yellow River estuary are not basically dispersed and mainly exist in form of microaggregats because of the aggregation of calcium carbonate. This phenomenon is more obvious under the long-term effect of back and forth currents and waves.

Key words: calcium carbonate; aggregate; microaggregation; sediments; Yellow River estuary