第20卷 第2期 海 洋 学 报 Vol. 20, No. 2
1998-03 ACTA OCEANOLOGICA SINICA March, 1998

舟山群岛峡道潮滩动力沉积特性*

蒋 国 俊 陈 吉 余
(杭州大学资源与海洋工程系，杭州 310028) (华东师范大学河口海岸研究所，上海 200062)
姚 炎 明
(杭州大学资源与海洋工程系，杭州 310028)

关键词 潮滩 动力沉积 峡道 舟山群岛地区

1 引言

潮滩研究是现代河口海岸学研究中一直受到重视的重要方面，自德国学者 Hantzschel[1] 首次对全新世潮滩进行了综合性研究以来，世界各国学者对现代潮滩开展了一系列的系统研究，尤以北海沿岸各国对北海潮滩的研究成果为世人所瞩目[2]. 在我国，各地的河口、海岸学家也先后对潮滩开展了系统的研究，如上海市沿岸的河口型潮滩[3]、苏北的平原型潮滩[4]和浙江的港湾型潮滩[5]等，均取得了丰硕的成果. 但纵观现代潮滩研究，迄今为止主要集中在上述三种类型的潮滩和由堡岛掩护的潟湖海岸的淤泥质潮滩，而较少注意到峡道中淤泥质潮滩的研究. 在峡道中，受峡道地形及其效应的影响，其水动力条件有着特殊性，泥沙来源、来量、泥沙性质和水质环境等复杂，峡道淤泥质潮滩有其自身的特点. 同时，随着国际航海事业的发展，国际航运船只向着大型化、集装箱化方向发展，峡道地区以其近岸水深大、进出航道条件好、港域掩蔽性好、风浪小等优良的自然条件而成为重要的深水港址. 峡道潮滩的研究，不仅能丰富潮滩动力沉积和动力地貌理论，加深对潮滩动力沉积和动力地貌特性的认识，全面了解潮滩动力沉积机理和潮滩动力地貌发育过程，而且对于在国民经济运行中起着重要作用的大型深水港址的选择、港池水深的稳定性以及深水航道的规划和布设、航道水深的稳定性等问题的解决，有着重要的意义. 有必要加强这一领域的研究，以加深对峡道淤泥质潮滩的认识.

舟山群岛地区位于浙江省东北部，隔杭州湾与上海浦东新区相望（见图1），是我国最大的群岛区，全区有面积500m²以上的岛屿900余个，依次在杭州湾口门区展布，形成纵横交错的峡道，峡道两侧分布狭窄的淤泥质潮滩，呈现典型的峡道潮滩特性.

本文于1996-06-21收到，修改稿于1997-07-21收到.
* 华东师范大学河口海岸动力沉积与动力地貌综合国家重点实验室开放课题基金资助项目（编号：SKLEC-95012）.
第一作者简介：蒋国俊，男，35岁，副教授，博士，主要从事河口海岸泥沙研究.

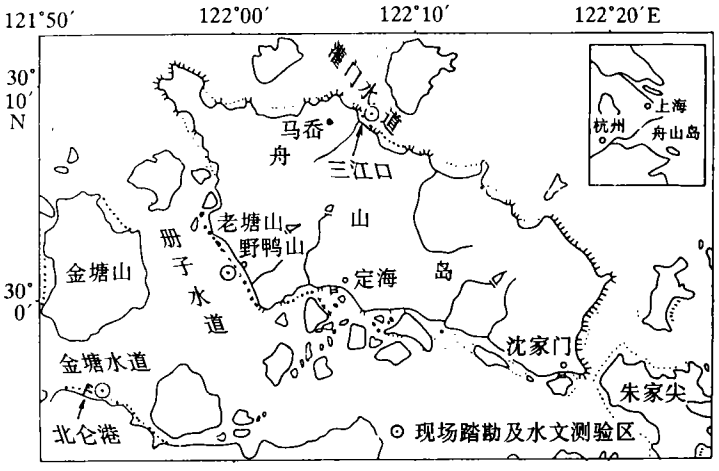

图1 舟山群岛峡道潮滩及观测站位

本文拟根据舟山群岛峡道中马岙三江口潮滩、册子水道野鸭山潮滩和金塘水道南岸潮滩(图1)的现场踏勘和约200个沉积物采样的实验室分析结果，结合峡道潮滩的水文泥沙和水质特性，讨论峡道潮滩的沉积特性和沉积机理.

2 峡道潮滩水动力特性

在平原海岸潮滩或港湾淤泥质潮滩，由于水域开敞，潮滩潮流流向变化相对复杂，除位于小潮高潮位以上的高潮滩带，潮流呈现垂直于海岸等深线的往复流动外，中低潮滩与潮下带相似，潮流运动具有准旋转流的变化特性，潮流流速较小，垂线平均流速不超过0.3m/s，风浪作用较强. 在港湾淤泥质潮滩上，平均波高可达0.5m[8]；在平原海岸潮滩，波高更大，平均可达0.6m，实测最大波高达3.5m1). 在苏北吕四附近，风浪甚至是导致潮滩冲刷的重要动力因素.

但在峡道潮滩上，由于峡道地形的严格限制，峡道内水域有限，峡道潮滩水动力有其自身的特性. 峡道潮流运动即使在潮下带，甚至在深水区也呈现往复流特性，潮滩潮流向更以平行于海岸线的往复流为特征. 图2所示是舟山群岛灌门水道内 M9501 站流速、流向的时间变化过程. 由图可知，在峡道中，不仅潮流向呈现严格的往复，而且涨落潮流转流迅速，涨落潮流速在不到30min 的时间能从近于涨潮流急流迅速转化为落潮流急流；此外，册子水道、金塘水道、虾峙门水道、螺头水道等众多峡道中均呈现类似的水流特性2). 与堡岛掩护条件下潮滩憩流时间达1h，甚至更长[7]相比，峡道潮滩憩流时间十分短暂，不利于悬移细颗粒泥沙的沉积.

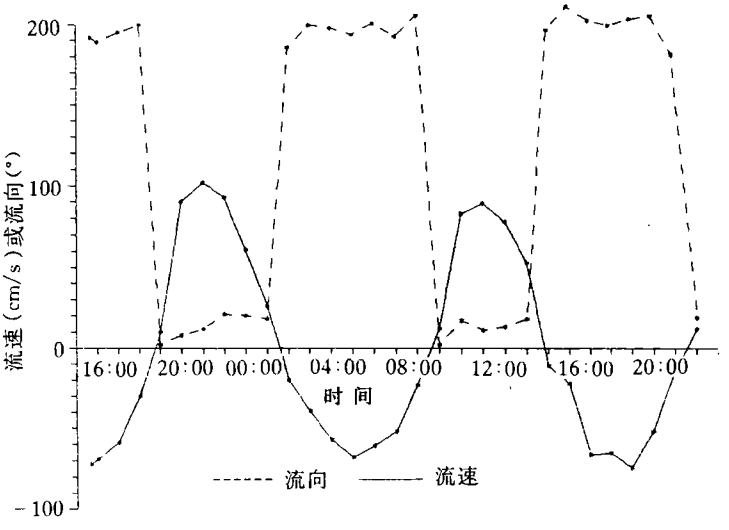

图2 灌门水道 M9501站流速流向变化特征

1) 江苏省海岸带调查报告. 1988，12：37～44.

2) 蒋国俊. 峡道效应研究——以舟山群岛地区峡道为例. 华东师范大学博士学位论文，1996.

仅有细微差别. 总的看来，砂类和粘土类沉积物含量在高低潮滩略多，其他粒级的沉积物在潮滩上基本未显示显著的横向变化规律(表2). 但在潮滩沉积物的平均粒径和中值粒径上，表现出高低潮滩略粗、中潮滩略细的特性，即峡道潮滩沉积物粒径存在着“粗—细—粗”的递变（表3).

表2 峡道潮滩沉积物粒级含量（%）

地区	金塘水道			马岙三江口			潮滩平均
	高潮滩	中潮滩	低潮滩	高潮滩	中潮滩	低潮滩	
粘土	12.60	12.45	24.60	3.61	2.97	3.84	9.51
极细粉砂	16.61	13.37	13.27	12.62	14.10	15.23	14.36
细粉砂	18.79	33.59	14.73	19.28	20.61	21.96	21.83
中粉砂	21.42	22.91	20.60	32.21	31.92	29.03	26.34
粗粉砂	17.90	10.12	16.67	25.86	26.67	23.93	20.19
砂类	12.68	7.56	10.13	6.42	3.73	6.01	7.75

表3 潮滩沉积物粒度参数

地区	金塘水道			册子水道			马岙三江口		
	高潮滩	中潮滩	低潮滩	高潮滩	中潮滩	低潮滩	高潮滩	中潮滩	低潮滩
平均粒径（ϕ）	6.70	7.17	6.85	6.77	6.94	6.75	6.43	6.54	6.58
中值粒径（ϕ）	6.80	7.27	7.16	6.95	7.13	6.91	6.66	6.79	6.87
分选系数 σ	1.16	1.51	1.90	1.11	1.14	1.11	1.11	1.14	1.17
偏态系数 α_3	0.13	0.04	0.10	0.34	0.34	0.34	0.33	0.38	0.42
峰态系数 α_4	2.83	2.19	2.01	2.34	2.38	2.52	2.49	2.37	2.23

3.3 峡道潮滩沉积物分选中等，分选系数大多在1.1左右. 但在金塘水道潮滩上，中低潮滩的分选性略差，尤其是低潮滩，其分选系数可达1.90(表3). 总体来看，分选系数的横向变化不大.

3.4 潮滩沉积物粒度分布呈现接近正态的正偏态分布，偏态系数在0.33～0.42之间. 但金塘水道潮滩更接近于正态分布，其中中潮滩偏态系数仅为0.04，基本上是正态分布. 尽管横向变化较小，偏态系数仍表现出自高潮滩至低潮滩正偏逐渐加强的变化趋势（表3).

3.5 潮滩沉积物粒度分布的峰态系数均小于3.0，表现为低平峰的特性. 横向上，峰态系数表现出自高潮滩至低潮滩逐渐变缓的趋势（表3).

3.6 峡道潮滩新淤沉积物厚度较小，在高潮滩下陷深度相对较大，一般为10～12cm，最大下陷深度可达30～40cm，呈现浅黄褐色高含水可流动的淤泥；中潮滩下陷深度较小，一般仅1～3cm，最大下陷深度不超过5cm，甚至不下陷，出露脱水压实的青灰色淤泥质粘土；低潮滩下陷深度中等，一般为5～8cm，最大深度不超过10cm，亦为浅黄褐色高含水流动性淤泥. 全新世地层浅地层探测显示，峡道潮滩全新世地层厚度较小，一般在5m左右，最大厚度不超过10m[8]，证明潮滩沉积较弱.

3.7 潮滩表面沉积物中见有数量较多的贝壳碎片，一般贝壳碎片直径为2～3mm，偶尔可见比较完整的贝壳；滩面多虫孔蟹穴发育，且孔穴附近多粒状泥粒，表明峡道冲淤稳定的潮滩

沉积环境和活跃的底栖生物掘凿作用.

3.8　从潮滩上发育的微型潮沟切割潮滩而成的剖面上看，潮滩沉积发育有微层理，一般层厚小于1mm，大多为倾向峡道深水区的倾斜状微层理，也见有叠瓦状微层理. 前者系峡道潮滩表面沉积的产物，后者可能系峡道潮滩发育的潮沟沉积的结果.

3.9　在低潮滩附近，继续发育有含水量极高的浮泥，浮泥层厚度一般为3～5cm，最大不超过10cm. 在波浪作用下，这些浮泥极易再悬浮.

4　峡道潮滩沉积机理

对细颗粒泥沙的动水絮凝沉积试验研究显示，影响细颗粒泥沙沉降主要包括水动力强度（水流速度或紊动强度）、介质条件（介质类型、浓度、温度和酸碱度）和泥沙成分（粒度、浓度、粘度、矿物丰度和电荷密度）等三大因素，10个变量. 其中，对泥沙絮凝沉积起着重要作用的是水流速度、介质浓度和泥沙粒度. 在流动水流作用下，流速较大时，絮凝团粒受剪切破碎，不易发生聚凝沉积，但水流流速一旦小于21cm/s，细颗粒泥沙形成的絮凝团粒能迅速增大，发生聚凝沉积[9]；当水溶液中阳离子浓度为60～500mmol 时，细颗粒泥沙均能发生絮凝沉降，其中浓度为90～250mmol 时，细颗粒泥沙的动水絮凝沉降强度最大[10]；大多数情况下，粒径小于32μm 的细颗粒泥沙在适宜的介质环境和动力条件下均能发生絮凝沉积.

实测资料显示，舟山群岛地区峡道中，主要水动力是周期性变化的潮流. 尽管峡道潮流强度较大，但由于水流的往复流特性，在涨落潮流憩流前后，大约有30～60min 时间，潮流速小于细颗粒泥沙的絮凝沉降临界流速，具备细颗粒泥沙絮凝沉积的动力条件；实测水体盐度在23～28之间变化，属河口高盐混合水体，对应的阳离子浓度约为330～500mmol，具备发生细颗粒泥沙絮凝沉积的介质条件；实测水样的粒度分析显示，水体悬沙中粒径小于32μm 的细颗粒泥沙占悬沙总量的90%以上，且其粘土矿物成分组合和粒度成分与长江口泥沙具有十分明显的共同性. 因此，在舟山群岛峡道内，具有细颗粒泥沙发生絮凝沉积的充要条件.

对舟山本岛北部马岙三江口海区的悬沙粒度分析显示，不同粒级悬沙的相对含量，随潮流速的变化有着相当清晰的规律性（见图3）. 粒径小于32μm 的中粉砂以细颗粒，在涨落潮憩流时，所占悬沙的相对含量较低；在涨落潮急流时，含量较高（见图3a～d）. 粒径大于64μm 的极细砂以粗颗粒，则随潮流速的减小而减小，在涨落潮流憩流时含量最小（见图3f）. 但粒径在32～64μm 间的粗粉砂粒级，其相对含量在涨落潮流急流时相对较低，随着涨落潮流流速的减小反而有所上升，在涨落潮流憩流时达最大值（见图3e）. 这表明，在涨落潮流流速较小时，粒径小于32μm 的细颗粒泥沙，发生了比粒径大于32μm、小于64μm 的粗粉砂类沉积物更迅速的沉积，也即发生了细颗粒泥沙的聚凝沉积，粒径较粗的砂级物质则发生了单颗粒的重力沉积. 因为从单颗粒泥沙的沉降规律来看，随着粒径的增大，泥沙的沉速逐渐增大，沉降量也应相应地增加. 因此，在涨落潮流憩流时，泥沙颗粒越粗，其在悬沙中的相对含量应减少越多越快. 马岙三江口海域悬沙中，粒径小于32μm 的细颗粒泥沙相对含量，在涨落潮流憩流前后，迅速减小，表明其发生了集团沉降，这只能是细颗粒泥沙的聚凝沉积，相对较粗的粗粉砂类悬沙，则由于细颗粒泥沙的迅速减少，导致其相对含量的上升；从泥沙的起动角度来看，粒径在40～100μm 的粗粉砂至极细砂类泥沙，其临界起动流速最小[11]，因此在潮流的

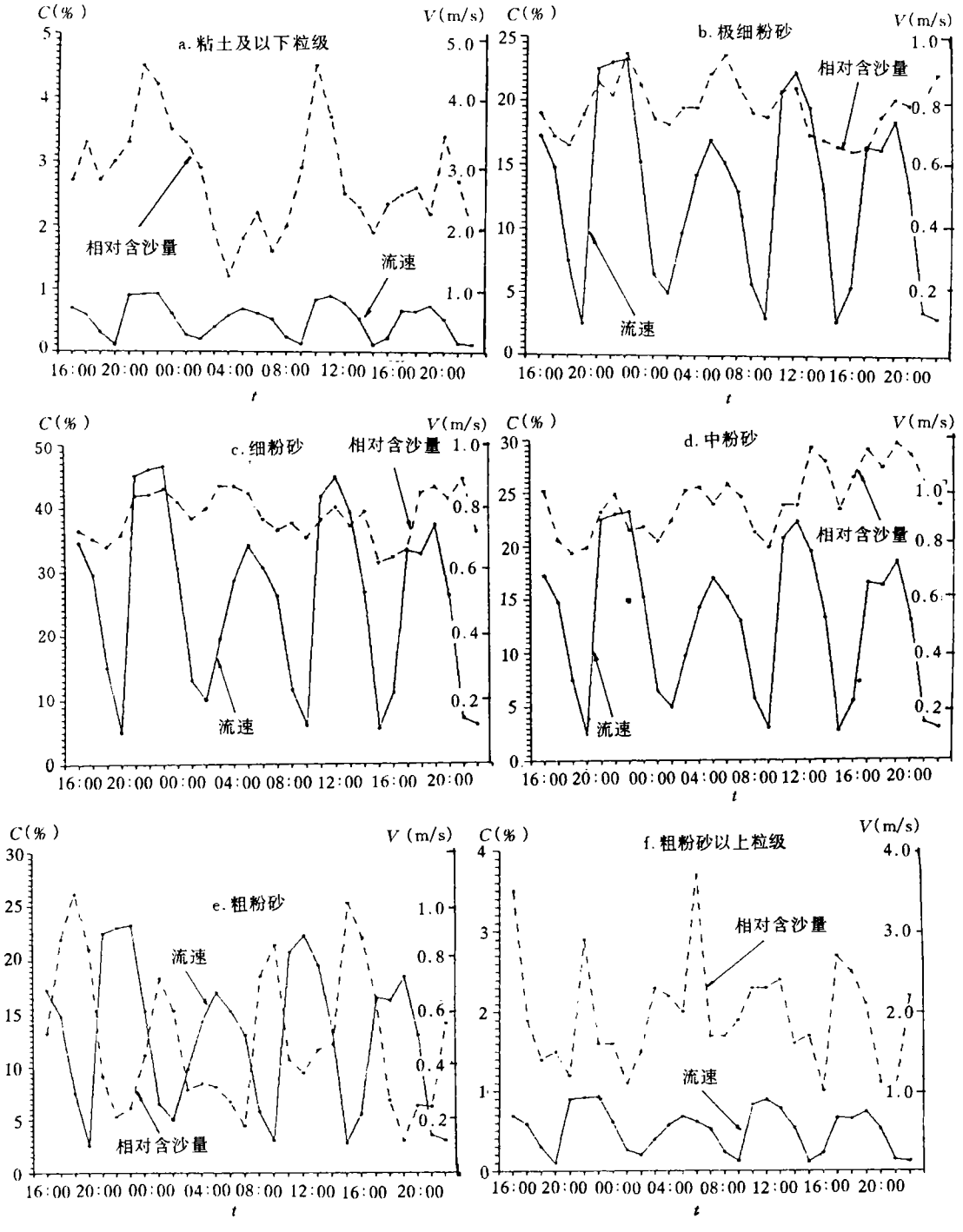

图3 峡道不同粒级悬沙相对含量随流速变化过程线

涨落过程中，当潮流速大于泥沙的临界起动流速时，易于起动的粗粉砂和极细砂在悬沙中的相对含量应明显增加. 但图3中不同粒级悬沙相对含量随流速的变化却显示，粗粉砂类随流速

增大，相对含量减小，极细砂以上粒级随流速增大相对含量增加．这表明，峡道潮流在对床面泥沙进行冲刷改造时，由于底部沉积物粗细混杂，相互之间有着较大的粘结力，在起动时以集团形式成片起动，并在紊动悬扬过程中分散，成为单颗粒泥沙．但由于沉积物中粒径较细的细颗粒泥沙含量较高，一旦起动悬扬，悬沙中细颗粒泥沙的含量迅速增大，从而使粗粉砂类泥沙含量相对减小．到涨落潮流憩流时，由于大量细颗粒泥沙聚凝沉降，粗粉砂类含量则相对上升．这证明舟山群岛峡道内细颗粒悬沙发生了聚凝沉积，粒径较粗的沉积物发生了单颗粒的重力分选沉积．在1995年7月马岙三江口水文测验期间，对马岙三江口潮滩的现场踏勘发现，在低潮滩附近，断续发育有含水量极高的浮泥，其厚度一般在3～5cm，吨位在50t左右的渔船通过所产生的船行波的扰动就能使之大片起动，进入悬浮状态．这证明峡道悬沙在低流速作用时发生了细颗粒泥沙的聚凝沉积，高含水聚凝体在潮滩表面聚集发育浮泥．但这些泥沙抗冲能力低，极易在水动力作用下再悬浮，因而在潮滩上断续出现，并在水动力的扰动作用下再悬浮．将马岙三江口水域憩流前后采集的悬沙样品，分别作超声波分散和不作超声波分散两种分析方法进行处理．然后分析的结果显示，不作超声波分散处理的悬沙粒度级配曲线比较低平，分选性较差，粗粒端含量相对升高；作超声波分散处理的悬沙级配曲线，相对较陡，分选较好，峰态较陡，粗粒端含量相对较低（图4），这表明悬沙沉降过程中，细颗粒泥沙以聚凝团粒的形式沉降．由此可见，舟山群岛峡道潮滩的发育是在涨落潮憩流前后，由细颗粒悬沙聚凝沉积和粗颗粒泥沙重力分选沉积共同作用的结果，并由于粗细颗粒泥沙同时沉积，为峡道潮滩无粒度分带沉积特性的发育提供了前提．

但在大多数潮滩上，悬移泥沙均能发生聚凝沉积[10]，受后期水动力的改造作用，往往发育自低潮滩向高潮滩逐渐细化的沉积物粒度分带[3,4]．在峡道潮滩上，无粒度分带沉积特性的发育，是在峡道环境中特定的地形和水动力作用的结果．

在舟山群岛地区，峡道宽度一般不超过10km，峡道中部最大水深在60～70m，个别峡道最大水深可超过百米．受此影响峡道潮滩坡度较陡，平均坡度为2.0%～2.5%，最大坡度可达3.5%．据实测潮位资料统计，舟山群岛地区属中潮海区，峡道内平均潮差在2m左右，最大潮差不超过4m．受峡道地形和峡道潮差的共同影响，舟山群岛峡道潮滩宽度较小，平均潮滩宽度为200～300m，最大宽度不超过500m．因此，峡道潮滩沉积物只能在有限的空间范围内，在水动力作用下进行分选改造，限制了沉积物在潮滩横断面上的动力分异，不利于潮滩沉积物形成粒度分带．

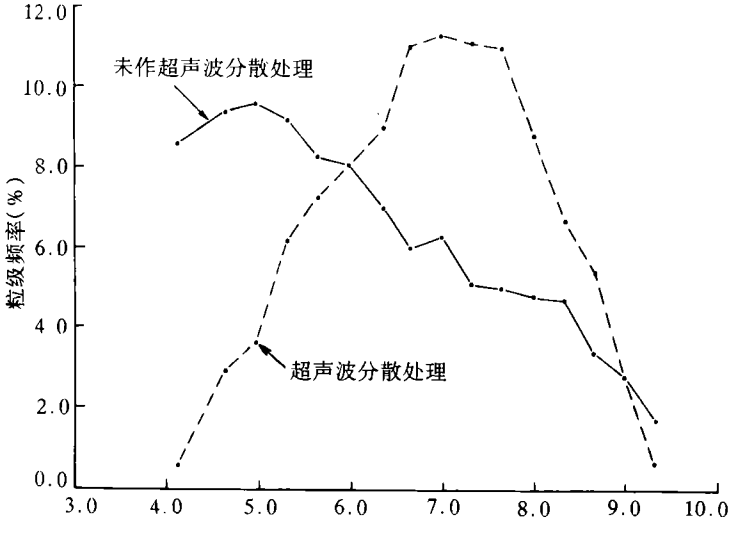

图4　灌门水道M9501站悬沙级配曲线

受峡道地形的作用，峡道水流湍急，流速较大，潮期平均流速一般为0.6～0.7m/s，涨落潮急流

流速可达1.5m/s，最大实测急流流速可超过3m/s. 如前所述，峡道潮滩水动力具有平行于海岸线作往复流动的特性，根据实测资料计算，三江口潮滩岸线走向为180°左右，实测涨落潮急流流向分别为8°和185°，与海岸线夹角不超过10°（见图1和图2）. 对金塘水道涨落潮流流向和等深线走向的分析显示，金塘水道中等深线走向与涨落潮流流向的夹角约为4°；册子水道中部，实测涨落潮流流向分别为336°和167°，与0米等深线夹角为12°～14°. 受此水流作用，峡道潮滩沉积物一旦进入悬浮状态，基本上作平行于潮滩的输移，并沿潮滩纵向作沉积分选. 在潮滩横向，由于水动力分量十分有限，沉积物极少作沉积分选. 因此，限制了潮滩沉积物横向上的粒度分异，促成了峡道潮滩沉积物无粒度分带沉积的发育.

波浪是潮滩沉积物粒度分带发育的重要动力因子，受波浪掀沙作用，潮滩沉积物起动，并在潮流的作用下，沿潮滩横向作输移分选沉积，形成横向粒度分带. 但是，峡道潮滩波浪作用较弱，除台风或寒潮作用下形成的波浪能对潮滩沉积物进行分选改造外，正常天气条件下产生的波浪，因其波高小、周期短、波能弱，较少对潮滩沉积物进行分选改造. 尽管如此，波浪作用对涨落潮憩流聚凝沉积发育的浮泥仍能进行有力的扰动改造，促使其再悬浮，从而有效地维持了潮滩冲淤基本平衡的状态. 峡道潮滩广泛发育的蟹穴虫孔，从地貌学角度证明了潮滩的稳定；对当地海塘管理人员的调查访问显示，马岙三江口潮滩外海塘，自60年代中期开始建造以来，到1974年塘外潮滩淤宽约30～50m，70年代中期以来，潮滩保持稳定；对潮滩现场的踏勘也发现，80年代初所作块石护坡、塘脚附近的护坦，至今仍有30cm 左右出露于潮滩滩面之上，基本未受潮滩沉积物的掩埋，证明潮滩与水动力之间处于相对平衡状态. 但是，受峡道内平行于等深线走向的往复水流作用，波浪掀沙悬浮的潮滩沉积物，沿等深线走向作分选沉积，横向上因分选空间和动力分量的制约，未形成峡道潮滩的沉积物粒度分带，基本维持其沉积后的粗细混合状态.

应当指出，潮滩沉积特性的变化还受到沉积物补给、水化学环境和水动力条件的影响. 在金塘水道南岸潮滩上，出大小黄蟒即为开敞的杭州湾，往西不远则为甬江入海口. 由于本区盛行偏北风，杭州湾水域在盛行风作用下，产生了较大的偏北向风浪. 受其影响杭州湾湾底沉积物被淘动悬扬，使杭州湾南部悬沙中粒径较粗的砂类含量增加，因与钱塘江、杭州湾和甬江毗邻，来自陆域的粘性细颗粒泥沙主要经由金塘水道落出，为金塘水道潮滩沉积提供了物质条件；受科氏力的影响，杭州湾及钱塘江口落潮主流偏向东南，在金塘水道内受峡道地形、潮流向和科氏力的共同影响，呈现出涨潮流偏北、落潮流偏南的流路分歧，在南岸落潮流起了主导作用，使杭州湾落潮流指向金塘水道潮滩，为上述金塘水道潮滩沉积特性的发育提供了动力条件；甬江口、钱塘江口以及长江口输出径流，对杭州湾海水进行了有效的稀释，使金塘水道平均盐度在25左右，落潮流憩流时的盐度为20，为粘性细颗粒泥沙的沉积提供了良好的介质环境. 在此诸多优良条件的共同影响下，悬沙中的粘性细颗粒泥沙和砂级泥沙在金塘水道潮滩沉积，形成了金塘水道潮滩粘土和砂类泥沙较舟山群岛峡道其他潮滩明显升高的沉积特性.

5 结语

峡道是海岸的重要组成部分，峡道潮滩受峡道水动力和地形效应的共同影响，有其自身的动力沉积和动力地貌特性. 根据上述舟山群岛地区峡道潮滩动力沉积特性的研究，对峡道

潮滩动力沉积过程有以下几点认识：

5.1　受峡道地形的影响，峡道潮滩水动力以平行于等深线作往复运动的潮流作用为主，基本不发生垂直于海岸线的潮流运动；峡道中波浪作用相对较弱，除台风和寒潮作用时的波浪略强外，正常天气条件下的波浪作用较弱，但对峡道潮滩上新发育的细颗粒泥沙聚凝沉积浮泥，能有效地扰动，并使之再悬浮，对于维持峡道潮滩的冲淤平衡有着重要的影响.

5.2　峡道潮滩沉积物以粒径小于32μm的细颗粒悬移泥沙沉积为主，沉积物分选中等，峰态低平，正偏分布，与平原海岸潮滩和河口潮滩形成明显的沉积物粒度分带不同，峡道潮滩沉积物呈现粗细混杂无粒度分带的分布特性. 沉积物的这种分布特性，是细颗粒泥沙发生动水聚凝沉积，后期又较少受到水动力横向分选改造而形成的.

参考文献

1 Hantzschel, Tidal flat deposits. Holocene Tidal Sedimentation (Klein, G. dev. ed.), Halsted Press, Stroudsburge, Pennsyvania, 1976, 14～24

2 Klein, G. dev.' ed. Holocene Tidal Sedimentation. Halsted Press, Stroudsburge, Pennsyvania, 1976

3 邵虚生. 上海潮滩沉积. 地理学报, 1982, **38** (3): 241～249

4 Ren Mei'e *et al*. Sedimentation on tidal mud flat of China——with special reference to Wanggang area, Jiangsu Province. Sedimentation on the Continental Shelf, with Special Reference to the East China Sea. China Ocean Press, Beijing, 1983, Vol. **1**, 1～19

5 Ren Mei'e ed. Modern Sedimentation in Coastal and Nearshore Zone of China. China Ocean Press, Beijing, 1985, 120～145

6 蒋国俊，冯怀珍. 浙江台州湾金清潮滩水力泥沙特性. 杭州大学学报（自然科学版），1992, **19**(2): 215～222

7 Postma, H. Transport and accumulation of suspended matter in the Dutch Wadden Sea. Netherland Jour. Sea Research, 1961, **1**(1,2):148～190

8 宋连清，陈锡士. 野鸭山海域浅地层结构及晚更新世古海面特征. 宁波——舟山深水港域自然环境与建港条件，北京：海洋出版社，1991, 179～187

9 蒋国俊. 浙江台州湾潮滩不同粒级悬沙的动力沉积. 海洋通报，1993, **12**(5):51～55

10 蒋国俊，张志忠. 长江口阳离子浓度与细颗粒泥沙絮凝沉积. 海洋学报，1995, **17**(1):76～82

11 钱　宁，万兆惠. 泥沙运动力学. 北京：科学出版社，1983, 346～364

Characteristics of dynamic sedimentation on tidal flat in channels of Zhoushan Islands

Jiang Guojun,[1] Chen Jiyu,[2] Yao Yanming[1]

1. *Department of Resources and Oceanic Engineering, Hangzhou University, Hangzhou* 310028

2. *Institute of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai* 200062

Key words　Tidal flat, dynamic sedimentation, strait channels, Zhoushan Islands area