

试论伶仃洋射流结构和沉积类型的关系^{*}

范 信 平

(广州地理研究所)

一、前 言

珠江三角洲有五河八门(五河是西、北、东江,潭江和流溪河,八门自东北向西南依次为虎门、蕉门、洪奇沥、横门、磨刀门、虎跳门、鸡啼门、崖门),各口门的迳流、潮流组合不同;加以岛屿错落,口门形态、深浅各异,水文地理十分复杂。如要全面而详尽地了解珠江三角洲生成、发育和演变的特性,以便兴利除弊,必需各方面的专家通力合作才能奏效。

过去对珠江三角洲的研究,多着重于沉积地貌形态,而忽略了决定沉积形态的水动力条件。对于水和沙之间的矛盾,不是把握住矛盾的主要方面即迳流和潮流的运动,而是着眼于泥沙的冲淤变化。例如,有人认为“底沙运移,无从论述”^[1];又有人认为“泥沙如何沉积还是一个谜”^[2]还有人由于不承认三角洲沉积类型的多样性,忽视了水流结构和沉积类型之间的对应关系,主张凡是不具备底积、前积、顶积三元结构的就不算是三角洲,因而不恰当地把三角洲的最北海岸线位置定为黄埔—顺德—江门一线^[1]。

60年代,沈灿桑开始系统研究珠江三角洲潮汐问题。70年代中,赵焕庭等为了摸清黄埔出海航道冲淤特性,引入了优势流的概念^[3]。此后又有应秩甫等研究了伶仃洋咸淡水混合的特征^[1]这些都可说明三角洲的研究已开始走上了把握住主要矛盾的正确道路。

本文是利用1975年广州航道局主办的伶仃洋航道调查,1978、1979年广东科委主办的伶仃洋水文调查的部分资料,分析伶仃洋口门射流结构和沉积类型的关系。

二、伶仃洋概况

伶仃洋是珠江溺谷湾堆积剩下未完的部分。水域面积2110方公里,是一个南宽北窄的漏斗形浅海湾。一般从湾顶向南逐步增深,从赤湾经内伶仃岛南到澳门以南的九澳岛,延伸5米等深线,在此以北,除深槽外均浅于5米。湾口澳门到香港,宽58公里,湾顶大虎仅4公里。

注入伶仃洋的河流有东江和流溪河,从虎门出口;也有西、北江部分迳流,从伶仃

^{*} 本文初稿完成后,经罗开富、王祥珩师披阅,作者根据所提宝贵意见作了重大修改。另外,李平日、乔彭年、陈琴德同志热情提供资料,对此一一表示深切谢意。

1) 李春初等:珠江三角洲的形成发育和演变,1979。

2) 应秩甫、陈世光:珠江口伶仃洋水体混合及其对河口环流的影响,(油印本),中山大学地理系,1980。

洋西边的蕉门、洪奇沥、横门出口。虎门属于强潮汐弱径流类型的河口,蕉门、洪奇沥、横门属于强径流弱潮汐类型的河口;这是位置加形态的结果。

水下地形大致可分为二槽三滩①:西滩,包括鸡抱沙、孖沙、万顷沙、沙仙尾滩、横门滩、进口浅滩等,连成一大片。具体表现为滩槽相间;由于西滩有西北江泥沙注入,扩淤迅速。②:中滩,即伶仃拦江沙和矾石浅滩的复合结构,其西有伶仃水道(西槽),其东有矾石水道(东槽),以内伶仃岛为核心,5米以浅的等深线向北26公里,向南约10公里,最宽6.5公里。③:东滩,自虎门交椅角向南直达赤湾,是一条长约32公里,宽1—2公里的潮间带,近年扩淤不大,比较稳定。

④:西槽即西航道,从舢舨洲东面开始,经内伶仃岛西侧到桂山岛和大濠岛之间出外海,虽然比较顺直,但受西滩扩淤的压迫,历年靠疏浚才能勉强维持通航。⑤:东槽从舢舨洲东经大铲、赤湾,由铜鼓岛向东转入急水门。据赵焕庭等调查认为,目前的发展趋势是“西槽缩、东槽张”^[5]。

关于伶仃洋的潮流特性,前人的著作已有全面系统的论述,现将其与本文所讨论问题有关的列举如下:

按 $\frac{W_{M1} + W_{M2}}{W_{M2}}$ 比值,伶仃洋的潮流属不正规半日潮流。一日两潮不等现象比较显著,从几个口门的比较可以看出,由于上游径流来量不同,涨落潮历时受影响也不同:洪季,上游来水多,径流对涨潮流有顶托作用,使涨潮历时缩短,落潮历时加长。另外,径流量与涨潮量的比值自小而大,排列次序是:金星门、内伶仃、赤湾、大虎、南沙、冯马庙、横门;涨潮历时自大而小的排列也是这样的相同次序。

伶仃洋是一个指数收缩的喇叭湾,潮差随着向湾内深入而递增。根据文献,赤湾平均潮差1.36米,舢舨洲1.59米,大虎1.69米。据J.L.戴维斯的分类,属弱潮港湾。

涨落潮流方向是比较稳定的,涨潮流约为335°,落潮流为155°,基本上是往复流的性质。

三、射流的计算

在河口处,水流摆脱了两边河岸的束缚,一面作扇形扩散,一面减速,成一种自由射流(free jet)而前进。在典型情况下(不考虑风力、科氏力、及原有水体的运动)依惯性力、摩擦力、浮力的对比不同,分为浮力射流、紊流射流、超密度射流。

紊流和层流的分界是由雷诺数Re决定的,当雷诺数在1500~2500时³⁾,即产生紊流。在自然界的河流中,总是有足以产生紊流的水流速度的。但如果河水流入海湾,因河水轻而海水重,有明显的密度分层,这时浮力可以增大到阻止紊流的程度,水流作为一层相对分离的水层被展开、摊薄,河水浮在海水上面,就象油浮在汤上一样。

紊流射流和浮力射流的分界,由密度修正弗罗德数F'决定。计算F'的式子是:

3)对于真实的粘性液体,可能有两种本质上不同的运动状态,即层流和紊流。运动状态的变换与一个实验数据,称为雷诺数Re有关。计算雷诺数的式子为 $Re = \frac{Vd}{\nu}$,其中V—液体速度 d—管径 ν —运动粘滞系数,雷诺数有上临界值和下临界值两种,这里指的是下临界值。

$$F' = \frac{V_1}{\sqrt{(\frac{\Delta \rho}{\rho}) g \cdot h}}$$

(1)

V_1 ——淡水的流速。

$\frac{\Delta \rho}{\rho}$ ——海水淡水密度差对海水平均密度的比值。

g ——重力加速度。

h ——界面的深度，有时可用水道深代替。

(1) 式中除了重力加速度之外，其余 3 个数都是变化的。不同的河口，或同一河口不同时候都不同。如果它们的组合使 F' 小于 1，则紊流被抑制，浮力射流得以建立；如果 F' 增大，则紊流抬头， $F' > 16.1$ 为全紊流。

利用伶仃洋水文调查报告（以下简称“报告”）⁴⁾及其附表的资料，作者计算了大虎、南沙、冯马庙、横门、金星门五个断面各两个 F' 值，一是第 2 组合的第 8 潮期，即 1978 年 7 月 9 日（农历 6 月初 5），代表洪水机遇大潮；另一是第 5 组合第 2 潮期，即 1979 年 3 月 7 日（农历 2 月初 10），代表枯水机遇小潮，计算是列表进行的（表 1）。

表 1

大虎等五个站 F' 值计算

站 名	自然水深 (米)	采用水深 (米)	流 速 (米/秒)	盐度 (‰)	$\frac{\Delta P}{P}$	F'	备 注
大 虎	10.0	10	0.63	0	0	∞	每个站上行的数字是 78 年 7 月 9 日的，下行的数字是 3 月 7 日的。
		10	0.43	6.35	0.005	0.61	
南 沙	6.4	7	0.68	0	0	∞	
		7	0.43	9.84	0.002	1.16	
冯马庙	5.4	5	0.55	0	0	∞	金星门断 8
		5	0.31	0.02	0	∞	
横 门	5.7	6	0.71	0	0	∞	
		6	0.41	0.02	0	∞	
金星门	5.5—6.0	5.2	0.42	3.71	0.003	1.07	
		6.2	0.30	20.14	0.015	0.31	

自然水深，大虎、南沙、冯马庙、横门取自“报告”的表 13，金星门的也采自表 13，参考了海图略有改动；流速从附表的“各断面各潮期潮差、高低潮位、流速、流量、含沙量、输沙率对照表”中按上面所选的日期查出，采用落潮流的平均值，采用水深是对照测速时间查“附表”的“各测站断面水位要素对照表”，如时间不一致，则用直线插补选相应水位，自然水深加相应水位等于采用水深。所以要这样处理是考虑到在求 F' 公式中，水深的改变对 F' 值影响甚大，故力求水深和流速相应；盐度是从“报告”表 34 中

4) 伶仃洋水文调查领导小组：伶仃洋水文调查报告，1980 年 11 月。

查取氯度换算。换算是根据H.H.朱波夫著“海洋学常用表”中的表7^[4]进行的。从盐

度求 $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ 也是列表来求的,步骤是 $S_{\text{‰}} \rightarrow [\sigma_t] \rightarrow \rho_s \rightarrow \frac{\rho_t}{\rho_s} \rightarrow 1 - \frac{\rho_t}{\rho_s}$ 、分 $T = 30^\circ\text{C}$ (洪季用), $T = 20^\circ\text{C}$ (枯季用)两种表。

计算结果令人相当满意,例如大虎7月9日的 F' 值是 ∞ ,表示紊流射流,而3月7日的 F' 值少于1.0,表示浮力射流。对照“报告”90—91页的含氯度纵向等值线图,从

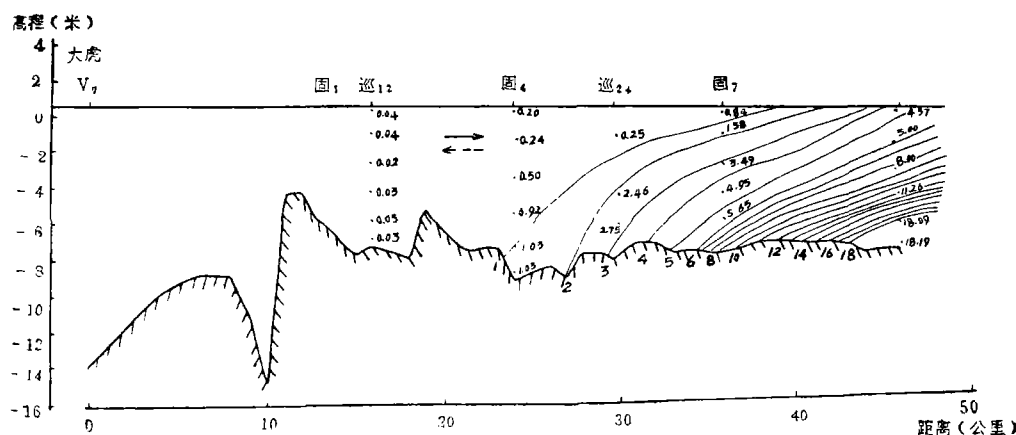


图1a 含氯度纵向等值线, 1978年7月9日13时涨憩(引自伶仃洋水文调查报告p90)

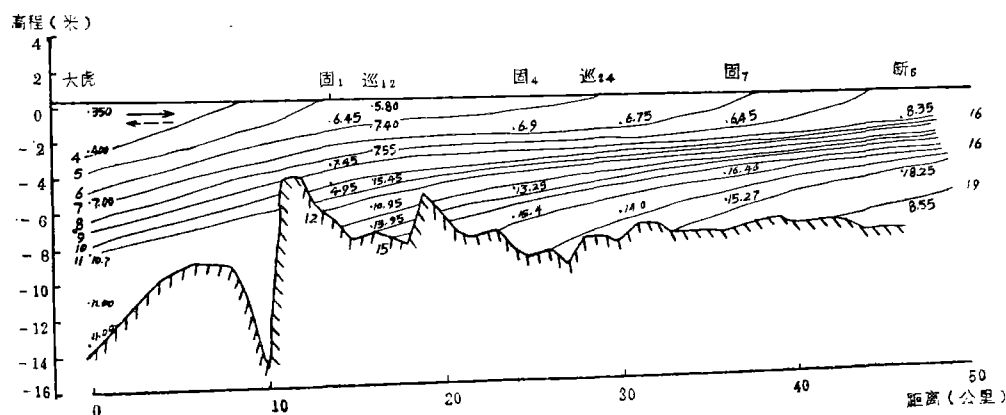


图1b 含氯度纵向等值线, 1979年3月7日18时涨憩(引自伶仃洋水文调查报告p91)

7月9日的图上等氯度线可知, 盐水楔端已退至固4, 在固4上游的大虎, 为淡水控制, 故径流到达口门外是紊流射流; 相反, 3月7日的纵剖面图上, 等氯度线表示水体有明显分层, 所以发展了浮力射流。金星门的情况和大虎相类似。从理论上说, 对于一定的口门形态和咸淡水密度比率来说, 浮力射流和紊流射流的分界决定于流速。这样一来, 对于某个一定的河口而言, 因洪水期和枯水期流速不同, 可以洪期为紊流射流, 枯季为浮力射流。从大虎、金星门的实行情况看来, 这种理论在伶仃洋亦得以证实。西边3个口

门, 无论洪季、枯季, 以紊流射流为主。对照“报告”图 19 之 1、2、3, 因迳流强大, 口门附近洪、枯季都是淡水, (1% 氯度等值线在外), 射流结构都是紊流射流。

四、沉积类型

在河流进入与河水同温度而又充分混合的湖泊时, 发生最理想的紊流射流。这种紊流射流可产生底积、前积、顶积三元结构的三角洲堆积, 吉尔伯特 (Gilbert) 就是研究瑞士的湖泊 (那里湍急的山溪性河流注入深淡水湖之中) 而归纳出上面 3 种沉积类型的。这种紊流射流在河口湾亦可以发生, 其最大特点是边扩散、边减速前进, 同时发生涡漩于水流边界, 涡漩引起流水和静水之间动能交换, 流速变慢, 搬运力下降, 于是泥沙发生堆积作用 (如图 2)。

从图 2 可见, 从口门向外, 依次为紊流生成区、过渡区、紊流区三部分, 过渡区是很窄的, 其实是不变速核尖灭的地方, 是开始减速处, 它的位置是口门宽 4 倍。正是这种射流结构, 能很好地解释拦门沙为什么开始形成于口门宽 4 倍处附近。伶仃拦江沙的北端点, 距大虎的直线距离约 16 公里, 是大虎断面宽 4 公里的 4 倍。这可能不是简单的数字巧合, 而是与射流结构相对应的一种拦门沙。

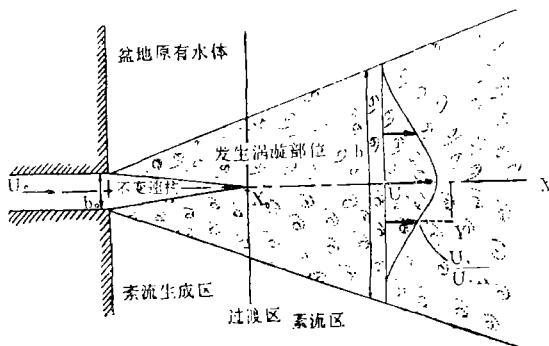


图 2 紊流射流图式 (引自 Wright)

请看图 2: 扩散水流侧边界是速度梯度最急的地方, 所以其下有水下天然堤发育。在珠江三角洲河口, 大量的沉积形态是沙咀, 沙咀的前身是水下天然堤。从前面的计算可知, 蕉门、洪奇沥、横门是以紊流射流为主的口门; 而万顷沙、横门沙都是沙咀, 并且向外伸展迅速。特别是万顷沙, 自清朝道光 (1827 年) 以来, 从无到有, 从小到大, 今已伸展至十五冲。赵焕庭估计, 万顷沙每年延伸约 100 米, 番禺县农区办报告, 1965 到 1971 年向海延伸 1000 米, 每年平均 166 米。万顷沙已围垦 150 多年, 因水利与农业的需要, 原始的微小地貌形态已破坏无遗, 但万顷沙在形成初期, 明显有一条中心沟, 中心沟与沙体延伸方向平行, 直到 1950 年版的旧地图上, 这条中心沟还是保留着的 (图 3)。结合射流结构的分析, 我们的结论是, 万顷沙是蕉门水道右岸沙咀与洪奇沥水道左岸沙咀合并的结果。叶汇指出, 除万顷沙及其水下延伸部分的暗沙 (称为沙仙尾滩) 外, 还有一条进口浅滩, 成长条形伸到淇澳岛北面, 是“夹槽生滩”的结果。⁵⁾ 这种解释和紊流射流在侧边界上形成水下天然堤的说法正是相类似的。

尽管西滩在发育过程中受到台风、暴潮、科氏力影响, 情况的确复杂; 但夹槽生滩的特点还是顽强地表现出来, 说明它是蕉门、洪奇沥、横门三大口门基本上以紊流射流为主而共同塑造的。像相邻的洪积扇可连接成为洪积平原一样, 沙咀的发展合并, 使目

5) 叶汇: 内伶仃洋三角港西侧棋门、洪奇沥、蕉门口外滩槽发育和演变的模式, 1979。

前的西滩连成一大片，其间只保留一些不深的槽，用以排洪和返潮。

浮力射流产生的沉积和紊流射流的是不同的，这要从浮力射流的水流结构说起。当 F' 小于 1 的时候，浮力上升到限制紊流的程度，这时，轻的淡水层有了一个超高，引起侧向静水压力，使淡水扩张和变薄。从口门向海，到大约比口门宽 4 倍处，即以浮水流层侧向扩张和垂直变薄为特征。过此，水流急剧减速（因为有激烈的内波活动、卷吸活动、和与周围原有水体的混合）而引起沉积，这里限于篇幅，不打算详细介绍浮力射流的内部结构。但要指出，因为表面上的水流向侧边散开，相伴发生近底水流的辐合，

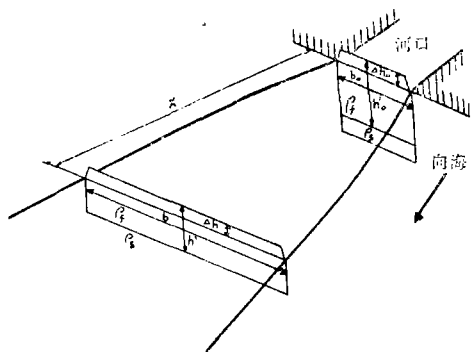


图4 浮力射流（引自Wright）

关于伶仃拦江沙和矾石浅滩的形成，有几种不同的说法：有人认为是盐水楔经常往返而引起悬移质絮凝沉积的结果^[6]，有人认为是紊流射流所形成的新月状沙坝^[7]，也有人认为是受到涨潮汇流点的影响。其实要弄清楚中滩的成因，首先要弄清楚水动力条件。作者结合射流和潮流特性，初步分析出一个结果如下：

伶仃洋是喇叭形河口，潮流在塑造河口形态上起重要作用。李春初认为，虎门属于淤进型潮汐作用为主的河口，这类河口在潮差不大的背景下，仍然有大的进潮量^[7]。因上游迳流变率大，河槽容积大，汛期由洪水充满的河槽至枯季空出，改由海水倒灌充填；所以迳流变率越大，越有利于进潮量的增加。虎门的涨潮量，是4个口门之冠（表2）。

潮汐作用为主河口还有潮波变形大的特点。南海潮波长为384公里，而桂山岛至大虎为70公里，不到全波长的1/4，是具备发展驻立波条件的。表现为涨潮流历时缩短，落潮流历时加长；也表现为最大涨潮流速时间先于最高潮位时间。亦即水位峰谷时，水

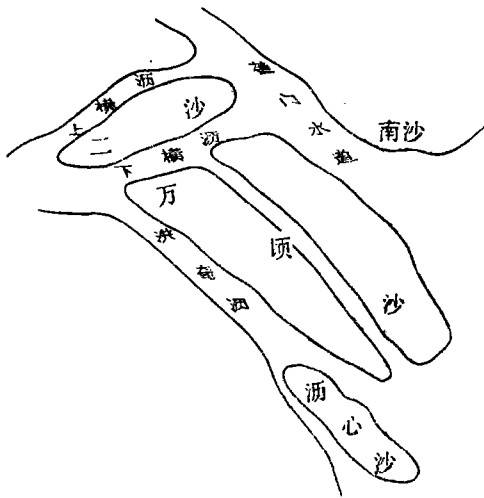


图8 1950年旧版地图表示的万顷沙
（注意沙咀的行将合并）

而近底水流的横向辐合又限制了单个沙体的横向展开。

对比了上面关于紊流射流和浮力射流，我们注意到两种射流的主要沉积都开始于河口之外距离为口门宽4倍处。

一个河口，因为洪水期和枯水期的流速不同，也因为潮流的强弱不同，可以有时是紊流射流，有时又是浮力射流（上面分析的虎门就是这样）口门处的沉积形态，是两者共同塑造的。

6) 李富桐：珠江口拦门沙的形成及其演变（油印本）。

7) 李春初：潮汐作用为主河口（三角洲）的特征，中山大学地理系，1980年油印本。

表2 上 边 界 涨 潮 量 分 配 (引自“报告”表15)

组 合	分 配 百 分 比			
	大 虎	南 沙	冯 马 庙	横 门
1	93.3	5.6	0.99	0.07
2	87.8	9.4	1.80	0.9
3	76.7	15.2	3.5	4.6
4 ¹	78.7	14.8	3.14	3.4
4 ²	90.2	7.6	1.6	0.6
5	75.7	15.4	3.97	4.89
6 ¹	74.8	13.8	3.3	3.2
6 ²	75.5	15.8	3.8	4.9

流是松弛的，易于在湾头引起淤积。鸡抱沙的发育，在一定程度上和这种驻立波有关。
根据“报告”附表资料，作者计算了大虎洪季5个组合，枯季3个组合的混合指数MI值（表3）。

表3 大 虎 站 M.I.值 计 算 (资料选自“伶仃洋水文调查报告”)

洪 季	组合	1	2	3	4—1	4—2
	0	43,874	36,985	44,860	38,298	34,702
季	R	8,334	3,647	3,081	4,481	7,147
	M.I.	0.2	0.1	0.06	0.12	0.26
枯 季	0					29,995 29.170 41,221
	R					— 3,150 1,533
	M.I.					— 0.11 0.03
	组合					5 6—1 6—3

0是潮棱体体积 R是上游迳流体积

从上表可见，有6个M. I. 值小于0.1或接近0.1。M. I. 值小,说明迳流潮流对比中，潮流量大而力强。⁸⁾
综上所述，伶仃洋的东槽和虎门无疑是潮汐作用为主的河口。
伶仃拦江沙和矾石浅滩是一个巨大的沙体，纵向长达40公里，最大宽度接近10公里，其延伸方向基本上和潮流方向一致。文献记载，中滩有灰色粉砂淤泥，富含海绵骨针和珊瑚碎屑，^[9]这是海域有来沙的佐证。最近广州地理所陈琴德等在矾石浅滩采了泥沙样，在矾石尾，水深6.5米，进钻深354公分，总的看来是灰色粘土质粗砂，分层如下：

8) 据西蒙斯的定义，混合指数为在一个潮周期里注入河口海域的迳流量与潮棱体之比。

这个发现使人耳目一新，过去认为中滩是盐水楔往返逡巡引起絮凝沉积的看法，看来是要重新修改了。

根据：①矾石浅滩，伶仃拦江沙的延伸方向和潮流流向基本一致；②有海生生物残体堆积；③主要物质组成是中砂到粗砂，作者认为它有可能是一个潮成砂脊。但这个潮成砂脊又不是十分典型的，因为潮汐作用为主的河口平均流速一般大于1米/秒，但大虎、内伶仃、赤湾断面，流速以0.3—0.6米/秒为普遍，极少数达0.7米/秒。所以在这样的流速背

景下，这个巨大的复合砂体，又具有反映射流结构的拦门沙特性。赵焕庭曾经注意到，原在伶仃拦江沙附近有东、中、西3条槽，但25年来（1950—1974），中槽逐渐消亡，作者认为这或者是拦门沙随着河口的东南移而东南移，追上了相对稳定的潮成砂脊，二者合并而成为一个巨大的复合砂体。

看来沉积类型有和射流结构对应得很好的例子，如万顷沙；也有和射流结构对应得不太好的例子，如中滩。有人把现阶段珠江三角洲河口浅滩发育形式概括为6类：即沿岸浅滩、岛缘淤积、沙咀、沙垅、沙岛（拦门沙）、湾头淤积。形态和沉积部位的多样性，暗示着成因类型的多样性，用理想的射流结构解释全部三角洲沉积类型是不够的。但如果结合潮流的特性，以至风浪、科氏力各种因素，作比较详细的研究，泥沙沉积之“谜”，总是可以解得开的。

厘米	
22	粘土质粗砂
68	粗砂质粘土
115	粘土质中砂
230	粗砂，含少量粘土

五、结 语

口门形态、迳流潮流特性，受水盆地的深度决定着射流结构，伶仃洋西侧3个口门一般情况下是紊流射流，虎门则是不太典型的潮汐为主的河口，前者控制西滩的生长发育，后者塑造伶仃拦江沙和矾石浅滩。

参 考 文 献

- 〔1〕 赵艳冰等：黄埔航道疏浚整治，人民珠江，1，1981。
- 〔2〕 侯晖昌：珠江三角洲演变规律问题初探，人民珠江，1，1980。
- 〔3〕 赵焕庭等：伶仃洋航道选线问题调查报告，南海海岸地貌学论文集第三集，中国科学院南海海洋研究所，1978。
- 〔4〕 H.H.朱波夫：海洋学常用表，科学出版社，1958。
- 〔5〕 徐君亮等：伶仃洋的盐水入侵及盐水楔的活动规律，热带地理，3，1981。
- 〔6〕 伶仃洋泥沙来源初步调查研究报告，中国第四纪委员会第三届学术会议论文摘要汇编，1979。
- 〔7〕 Richard A. Davis, Coastal Sedimentary Environments, New York, 1978.
- 〔8〕 Charles C. Bates, Rational Theory of Delta Formation, 美国石油地质学会简报 37卷9期，1953。