

杭州湾潮混合的初步研究 I. 上湾区*

毛漢礼 甘子鈞 沈鴻書

(中国科学院海洋研究所)

河口区域,上連淡水源(江河),下接咸水源(海洋)。上游的淡水既要通过这里輸向海洋,下游的海水也将以这一种或那一种方式,进入本区(詳見第一节)。咸、淡水既在这里交汇,它們之間便要发生混合交換。而在有潮河口区域内,則由于涨、落潮的作用,使海水周期性侵入这一区域,这不但加強了咸、淡水的交換作用,而且,其混合的过程也极为明显。因此,这类区域一向被認为是研究咸、淡水交換并了解其混合过程的一个理想区域。海洋学上,并特将有潮河口区域咸、淡水的交換过程,称之为“潮泛混合”(tidal flushing),或“潮混合”(tidal mixing)。

潮混合問題的研究,無論在理論上,还是在生产实践上,均具有重要的意义。早先的研究,多半是从实践观点(特别是从卫生工程的观点)出发的,主要是为了解决与城市排污和工业排污有关的問題。近十余年来,实践研究的課題,已扩展到和交通运输有关的泥沙洄汙問題,以及和农田水利有关的海水侵入問題等等。基于这些实践研究的成果,近年来,在有潮河口区域混合問題的理論研究方面,亦做了不少工作,取得了一些成績,使我們对河口区域咸、淡水的混合过程,有了一定的認識。

从海洋科学本身來說,這項研究的成果,特别是、如果将它与河口区域环流研究的成果結合起来,对于闡明这一区域的水文和水化学要素的分布、水生生物的生态、魚卵、浮游生物以及悬浮物質的分布和移动等等,都是极其重要的。

杭州湾是我国东南沿海最重要的海湾之一,周围的杭州、嘉兴、湖州、宁波、紹兴等县市,人口密集,經濟意义很大。而杭州湾本身,則潮流很強,錢塘江涌潮,更是举世聞名。可以預期,这里的混合过程,必甚強烈。因此,这里是我国研究这一問題的理想地点。

這項研究的目的是,在于試图根据現有的杭州湾及錢塘江下游的一些水文觀測資料(主要是氯度資料),对杭州湾的潮混合問題,作一初步研究。本文报导的,只是关于上湾区¹⁾的研究成果,而下湾区的研究成果,将另文报导。

現有的河口区域的混合理論,一般均是建立在极其簡化(理想化)的假定基础上的。杭州湾的自然条件很复杂,这类簡化的模式理論,在这里是否适用,是值得探討的一个問題。为此,本文将先探討这些理論在本区的应用問題并对它們进行适当的評价(第二节);

* 中国科学院海洋研究所調查研究报告第 257 号。

本文曾于 1963 年 10 月在武汉召开的中国海洋湖沼学会第二届全国代表大会暨 1963 年学术年会上宣讀过。在工作过程中,承浙江省水电厅水利科学研究所热情地提供資料;本所蓝淑芳、傅秉照两位同志参加資料的收集、整理和部分計算工作,任允武先生和袁业立等同志提供宝贵意見,謹此一并致謝。本文脫稿后,又承山东海洋学院水文系动力学教研組全体教师审阅討論,提供了若干宝贵的修改意見,謹此致以最衷心的謝意。

1) 在关于河口問題研究的很多文献中,一般均将漏斗型河口区域分为上、下两段;并分別称之为“上湾区”及“下湾区”(“河段”与“湾段”)。本文以海盐为界,将杭州湾相应分为两段,詳見正文第三节。

然后,再寻求比较适合于杭州湾上湾区具体情况的一个解决办法(第三节)。

一、河口区域潮混合的类型

河口区域潮混合的强度,与潮振动的振幅及径流量的大小直接有关。观测结果表明:由于各河口区域的潮汐和径流强弱不一,那里潮混合的情况,大体上可以分为三种类型(Stommel, 1953; Pritchard, 1960)^[11,10]。为了阐明本文研究区域的潮混合问题,现将这三种类型以及杭州湾上湾区的有关特点,先作说明。

1. 弱混合型 (negligible mixing type) (图 1a) 这一类型,多见于潮汐较弱、或径流量远大于涨潮潮量的河口区域。在这样的河口区域内,海水自底层呈楔状逆河侵入,且几乎呈静止状态;表层河水和底层海水的交界面(或盐跃层)清晰可辨,混合过程甚为微弱;垂直横断面上的平均流动,仅见于表层,其情形如图 1a 中的矢端曲线所示。至于底层海水入侵的上限,则视交界面上的摩擦阻力及河槽坡度而定。

2. 缓混合型 (moderate mixing type) (图 1b) 一般而论,潮汐中常的河口区域,多属这一类型。在这样的河口区域内,由于潮流和底摩擦的作用,使河水和海水的交界面出现不稳定的波状扰动,部分海水即与河水相混合。在这种情况下,下层海水通过涌输(entrainment)升到上层^[12],增加了整个水域中的不稳定势能,从而产生水平压力梯度,而这一压力梯度又随深度而异。这样一来,这一势能增量,又将转变为水体运动的动能,从而便在河口区域内,出现了上、下两层方向相反的流动(在河口区域的下游,上、下两层的流量,甚至都超过河流本身的径流量),其平均流速的分布,如图 1b 中的矢端曲线所示。

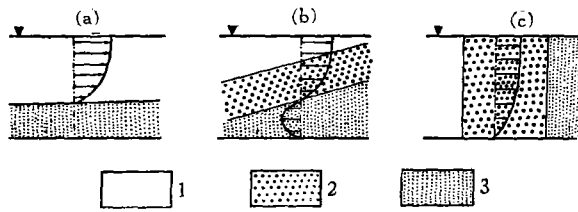


图 1 河口区域潮汐混合类型示意图

1. 河水 (fresh water); 2. 混合水 (mixing water);
3. 海水 (salt water).

a. 弱混合型; b. 缓混合型; c. 强混合型。

Fig. 1. A schematic representation of types of tidal mixing
(a) Negligible mixing type; (b) Moderate mixing type;
(c) Intense mixing type.

3. 强混合型 (intense mixing type) (图 1c) 这一类型,多见于径流较弱、而潮汐和潮流又相当显著的河口区域。在这里,由于潮汐、潮流的强烈作用,河水与海水几乎完全混合,盐度(从而密度)的垂直梯度很小,甚至完全消失;但在河口区域的纵向上,则仍然可以观测到较显著的盐度(和密度)的水平梯度。此时,海水中的溶解盐类或其它物质,可以通过纵向的水平混合而深入上游。由于这一纵向混合过程与河槽的坡度无关,因此,海水的入侵,甚至比前述两种类型的情况还要深入。

对于大多数的有潮河口区域来说,弱混合型比较少见,一般多为缓混合型或强混合型。

应该指出:上述分类,仅适用于水体结构侧向均匀的狭长河口区域。但对横向尺度较大的河口区域来说,由于克氏力及地形等等因素的作用,水体的侧向结构可能是不均匀的,因此,侧向混合便将占有一定的比重。而上述的分类,对于这样的河口区域便不很适用了。

本文研究的杭州湾上湾区内,潮汐和潮流都很强,涌潮现象尤为显著。潮波进入杭州湾以后,由于海湾的宽度向上游急剧收缩,潮能迅速集中;自湾口至激浦这一段,潮差越来越大(图 2)。根据已知的历史资料,激浦的最大潮差达到 8.93 米。潮波进入激浦上游以

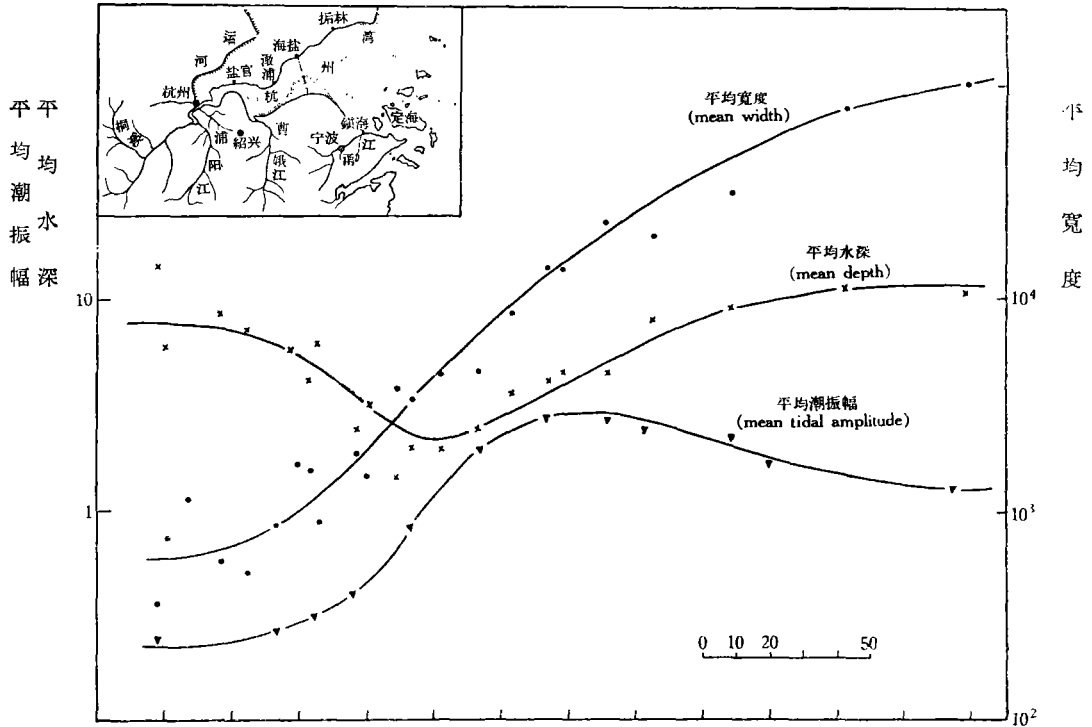


图 2 杭州湾的平均宽度、水深及潮振幅的沿程分布概况

Fig. 2. Mean width, mean depth and mean tidal amplitude along longitudinal axis in the estuary of Hangchow Bay.

后,由于河槽显著变浅,潮波的波谷速度更形减缓;及至尖山附近,潮波波顶赶上波谷,波前陡立,波顶卷倒而成为世界著名的钱塘江涌潮^[1]。

在这种情况下,上、下层水体得以充分混合,盐度(从而,即密度)的垂直分布(图 3),几呈均匀状态^[3];而且由于横向尺度较窄,水体盐度和密度的侧向分布亦近似均匀。因此,可以认为,杭州湾上湾区的潮混合,应列属强混合型。

至于下湾区,则由于横向尺度骤然加大(几和纵向尺度可比),因此即使从现有的为数不多的观测资料也可看出,盐度分布具有明显的侧向梯度(图 4);水系和环流,也比较复杂(关于杭州湾的盐度分布、水系及环流,将另文报导)。

在湾口附近的一些测站上,还观测到比较明显的层化现象。由此看来,为了合理阐明杭州湾下湾区的潮混合

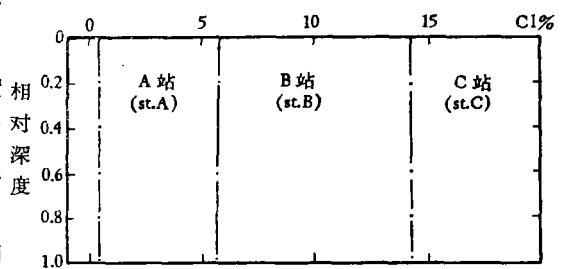


图 3 杭州湾上湾区三个测站的平均盐度垂直分布

Fig. 3. Variation of mean salinity with depth at three shore stations in the upper estuary of Hangchow Bay.

过程,似应将侧向和垂向混合效应这两项作用或两者之一考虑在内。这项研究,目前正在进行中。而本文则仅就已有较多观测资料的上湾区部分,进行初步探讨。

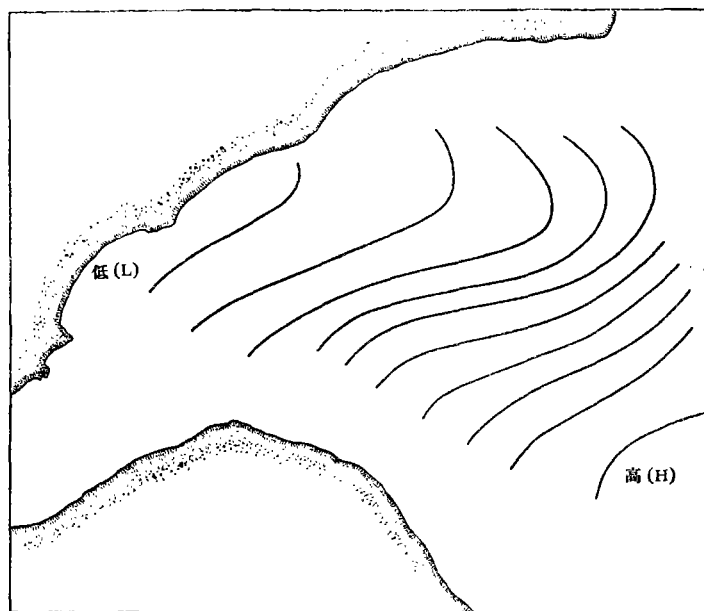


图 4 杭州湾下湾区表层盐度的典型分布

Fig. 4. Typical surface salinity distribution in the lower estuary of Hangchow Bay.

二、关于强混合型河口区域的潮泛混合理论及其在杭州湾上湾区的应用问题

现有关于河口区域混合过程的理论,大体说来,可集为两大类。一方面, Pritchard (1954, 1960)^[9,10]、Bowden (1962)^[5] 等分别根据美国 Chesapeake 河口区域和英国 Mersey 河口区域的研究结果指出:这些河口区域的盐度分布,大体上可用纵向的平流作用和垂直方向的扩散(混合)作用的平衡来说明;即是说,他们均强调了垂向混合的重要性。Tully (1958)^[12]研究了加拿大 Alberni 浦和 Juan de Fuca 海峡的盐度分布以后,又着重指出了涌输过程的重要意义。另一方面, Ketchum (1951)^[6]、Arons and Stommel (1951)^[4]、以及 Maximon and Morgan (1955)^[8]等人关于强混合型河口区域的潮泛混合理论,则都认为:纵向平流和纵向混合是导致这类河口区域盐度分布的最主要过程;即是说,他们认为,纵向混合是最重要的。

为了进行潮混合过程的研究,按理说,需要详尽地了解河口区域沿程各垂直横断面上某种参与混合的物质及流速的平均分布,以及它们的随机变化。但就目前情况而论,这样的要求显然还不能满足;因此,当我们对这种过程尚未知其详时,只好限于宏观地研究某种溶质在河口区域内的沿程分布和变化;或者,根据河口区域的地形、径流量、潮汐等方面的知识,引入某些描述这一过程的特征量(如纵向扩散系数,交换比,等等),从而推定溶质的沿程分布。

如前所述, 本文所研究的区域——杭州湾上湾区, 即钱塘江涌潮所在之处, 潮流也很强, 盐度和密度的分布, 几乎完全垂直均匀; 这里的潮混合似应属于强混合型。因此, 我们拟首先来探讨一下关于强混合型河口区域的潮混合理论在本区的应用问题。

目前, 对于强混合型河口区域的潮混合问题, 大体上有两种处理方法。首先, 从实用方面(例如, 供水、排水、卫生等方面)来说, 主要目的是: 要求获得解决象海水的入侵上限以及某种溶质进入河口区域发生混合后的沿程分布等实际问题的实用方法。而从理论方面来说, 则是把主要的注意力集中于了解潮混合过程本身, 以期根据河口区域的径流、潮汐、和某种溶质源的强度等有关知识, 来阐释潮混合过程及其后果。上述 Ketchum 的理论(经验理论), 即属于前一种处理方式; 而 Arons 和 Stommel 的理论(混合长度理论)以及 Maximon 和 Morgan 的理论(Arons 和 Stommel 混合长度理论的推广), 则属于后一种处理方式。

Ketchum(1951)^[6]在其关于“有潮河口区域咸、淡水的交换”这一工作中, 推广了早先河口工程学家们所应用的“潮稜”(tidal prism)¹⁾概念, 并基于河口区域内水体的潮运动可比拟为活塞运动的假定, 提出了强混合型河口区域内咸、淡水交换的一个经验理论。

根据 Ketchum 的经验理论, 对任一强混合型河口区域来说, 只要确切得知潮界(即潮位开始为 0 的地点)所在, 并有沿程的潮位、地形、和径流量这三类资料, 即可基于“活塞比拟”的假定来划分该河口区域的混合体积段(这一步骤, 可以通过简单的图算方法来实现), 并从而计算各段的交换比及河水积聚量; 而当河口区域外侧盐度为已知时, 则更可进而算出沿程的盐度分布。根据这一理论, 混合体积段的段长应等于涨潮期间水质点的平均上溯距离——潮冲程²⁾, 因此, 除了利用实测盐度沿程分布而外, 我们还可以根据河口区域实际观测到的潮流资料, 来检验这一经验理论所给出的计算结果。

Ketchum^[6] 和 Ketchum and Keen^[7] 曾先后将这一经验理论, 应用于美国和加拿大等地五个自然条件各异的河口区域, 都得到了比较满意的结果。

我们也曾应用这一经验理论, 试图计算杭州湾河段在 (a) 特大洪水(百年一遇)、(b) 一般较大洪水(两、三年一遇)、(c) 多年平均径流量、和 (d) 枯水径流量(地形资料则取近年的测深结果)这四种情况下沿程各混合体积段的段长, 但结果很不理想。除根据枯水径流量资料算出的混合体积段之长与实测潮流资料, 尚比较接近外, 其它各项计算结果, 均与实测资料相差很大。分析此种原因, 我们认为可能是由于: (i) 这一理论, 是建立在径流量为一恒量的假定上的; 但钱塘江的径流量, 变异巨大, 不但洪水季的平均流量与枯水季的相应量, 相差达几十倍, 就是月际、日际的分配, 也极不均匀。而沿程的水位和盐度的变化, 对径流量变异的反应, 也都很不一致。(ii) 这一理论本身要求, 潮界的位置必须是确切已知的。但是, 在我们所讨论的这一区域中, 验潮站的配置及相应的观测结果, 尚不足以满足这种要求, 加之沿程又有若干小河的径流注入; 而径流量的大小及潮界的具体位置却是划分混合体积段的依据, 因此, 径流量及潮界位置确定得正确与否, 对整个计算结果影响至巨。(iii) Ketchum 的理论, 实质上还蕴含着沿程各地潮汐是同位相的这一假定;

1) “潮稜”一词的意义是: 一个河口区域, 在涨潮期间, 水位从低潮升到高潮所需的水量(体积); 亦即一个河口区域的高潮体积与低潮体积之差。高潮时间每一(体积)段的“潮稜”体积, 称为“局部潮稜体积”(local intertidal volume)。

2) 等于 $(2/\pi) \times (\text{最大潮流流速值的平均值}) \times 0.5 (\text{潮周期})$ 。

但是,在我們所研究的区域中,潮波却具有前进波的性质。

应该指出: Ketchum 这一经验理论,巧妙地将河口区域内水体的潮运动与活塞作用过程相比拟,使河口区域得以划分为若干混合体积段,并指出混合体积段之段长与潮流流速的关系,因此,即使在沒有沿程盐度(或其它溶质含量)观测的条件下,也可以进行必要的计算和验证。这是这一理论的主要优点之一。但还应指出遗憾的是:在 Ketchum 的理论中,对于海水入侵上限(盐度开始从 0 变成大于 0 的地点)虽然给出了正确的定义,但却从这一定义出发,对潮界断面上的淡水输运过程,作了一个牵强的规定,即:在河口区域涨潮的半个潮周期内,必需通过潮界断面注入一个潮周期的径流量;而在退潮的半个周期内,潮界断面上则无径流注入。这也就是说,潮界断面上的淡水输运过程是间歇性的。而这显然是不合理的。我们认为,在这一经验理论中,如果从一开始就明确地引进活塞作用过程的比拟,则可对潮界断面上的淡水输运过程作出合理的解释。事实上,只要指出:在低潮时,海水入侵上限这一断面,将往下游移动这样的一个距离,使在这一距离内的低潮体积,全部为淡水所盘踞,且等于半个潮周期内的径流量。及至涨潮时,这一断面将又回潮至其原来在高潮时的位置;同理,在海水入侵上限下游的各混合体积段的界限,也按同一方式随潮时而移动。这样一来,潮界断面上的淡水输运过程,便是连续的了。因此,在这里我们也顺便指出: Ketchum 这一经验理论所定义的混合体积段及相应的各项计算,只是对于高潮的情况而言,而不适用于其他潮时的情况。

Arons 和 Stommel (1951)^[41] 一方面鉴于 Ketchum 这一简单的经验理论在 Raritia 等三个河口区域的成功应用,另一方面则又感到根据这一理论所给出的沿程盐度分布是一个阶梯式的不连续函数这一重大缺陷,因而试图将 Ketchum 的潮冲程概念,转变为物理学上连续的混合长度概念。他们基于潮泛混合长度与潮冲程成比例的假定,引进了一个纵向扩散系数,来求理想模式河口区域的盐量扩散方程之解,获得了一个盐度的沿程分布函数。这一理论,称为“潮泛混合长度理论”。

Arons 和 Stommel 考虑的是一个等深、等宽、沿程各地潮汐位相及潮差均相等的强混合型理想模式河口区域,在这样的河口区域中,盐度的侧向分布可以认为是均匀的。因此,在稳定情况下,按一个或若干个潮周期平均的盐度 S 的分布,可由如下形式的盐量平衡方程确定:

$$u \frac{\partial S}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) \quad (1)$$

式中, x 为自海水入侵上限(平均盐度开始从 0 变成大于 0 值处)起算的距离,并以指向下游为正; $u = \text{const}$, 即流经河口区域的稳定流速; A_x 为纵向的盐量扩散系数。

若假定潮流为迭置于稳定流动之上的湍流运动,则由量纲分析可知,方程(1)中的纵向扩散系数 A_x 可表为

$$A_x = 2B\xi_0(x)U_0(x), \quad (2)$$

式中, $2\xi_0(x)$ 为水质点在一个潮周期内的水平位移距离(即“潮冲程”); $U_0(x)$ 为潮流流速的振幅; B 为一无量比例系数。

可以证明,在等深(H)、等宽(W)以及潮振幅(ζ_0)和初位相(α)不变的河口区域内,由式(2)所定义的 A_x 可表为:

$$A_x = 2B\zeta_0^2\omega x^2/H^2, \quad (3)$$

式中 ω 为潮汐的角频率。

在这里, 应该指出, 直接由量纲分析或由 $\xi_0(x)$ 和 $U_0(x)$ 的关系, 我们可以得到

$$A_x = \frac{2B}{\omega} U_0^2(x), \quad (2')$$

式中, $U_0^2(x)$ 可看作为表征潮流动能的一个量。由此便可更直接地看出, 纵向的水平扩散系数 A_x 系与潮流的动能成正比。故式(2')或(3)合理地表达了潮泛混合强度应与潮流强度成正比这一事实。

Arons 和 Stommel 以 A_x 的表达式(3)代入方程(1), 解得盐度的纵向分布为:

$$S/S(L) = \exp F(1 - 1/\lambda), \quad (4)$$

式中,

$$\lambda = x/L,$$

$$F = uH^2/2B\zeta_0^2\omega L;$$

这里的 L , 可取为整个河口区域的纵向长度; Arons 和 Stommel 并将 F 称为“泛数”(flushing number), 它是表征河口区域潮泛混合的一个特征量。

Arons 和 Stommel 曾将他們所得到的解(4)和 Raritia 等两河口区域河段内的实测盐度分布加以比较, 获得了令人满意的结果。但当时令人诧异的是, 他们对这两个不同河口区域计算得到的 B 值, 相差竟达一个量级之巨。

关于 B 值在不同河口区域之所以会有巨大差异之原因, 已由 Maximon 和 Morgan (1955) 在稍后建立的理論^[8] 作了一个说明。这两位作者从如下简单的模式出发: 假定河口区域在高、低潮时发生完全的垂直混合, 但在其它时刻, 水体则是分为两层的(下层的面积为 σ_1 , 上层的面积为 σ_2)。根据质量连续原理, 可以直接导出一个河口区域的特定的扩散方程; 而从这一方程的解, 可以导出: 潮泛混合长度理論中待定的无维系数 B 与上、下两水层的面积之比值成正比 ($B = \sigma_1/\pi\sigma_2$)。由于河口区域的地形、径流和潮汐等有所不同, 在不同的河口区域内, 上、下层面积之比相差很大, 是完全可能的; 此外, 我们还可以指出: 如果河口区域内各地的潮流并非同相, 则按量纲分析可知, 式(2)或(2')中的系数 B 将为该河口区域的潮流初位相 $\alpha(x)$ 的一个函数 $B(\alpha)$; 因此, 对于不同的河口区域来说, 系数 B 有所不同、甚至相差悬殊, 也不是没有可能的。

按潮泛混合理論的处理方法, 对于地形比较复杂(即可变断面)、沿程各地的潮差及潮汐位相又不相等的河口区域, 我们可取用如下形式的平均盐量平衡方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\sigma u S) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma A_x \frac{\partial S}{\partial x} \right), \quad (1')$$

式中, σ 表示河口区域横断面的面积, 而 σu 即为径流流量; A_x 由式(2)或(2')定义, 且其中的无维因子 B 将为 α 的函数, 须根据观测资料求定。对方程(1')求积分, 并根据边界条件

$$S(0) = \left[A_x \frac{\partial S}{\partial x} \right]_{x=0} = 0,$$

$$S(L) = S_L,$$

即可得出平均盐度的纵向分布为

$$S/S_L = \exp \left[\int_x^x (u/A_x) dx \right] / \exp \left[\int_x^L (u/A_x) dx \right] = \exp \left[- \int_x^L (u/A_x) dx \right]. \quad (5)$$

由此不难看出,若河口区域为等深、等宽、沿程潮位相及潮差相等,则式(5)便归结为 Arons 和 Stommel 的解(4)。

但遗憾的是,目前我们尚无本区海水入侵上限的观测资料,且沿程地形、盐度分布、流速及潮汐等观测资料,亦嫌不足,因此,上述潮泛混合长度理论尚未能在本区直接应用。至于 Maximon 和 Morgan 的理论,虽然给出了计算可变断面河口区域纵向盐度分布的工作公式,而且对于不稳定状态下理想模式河口区域的纵向盐度分布也给出了一个逐步逼近解;但是,由于在涨、落潮过程中,上下两水层的界限及面积,在一般的技术条件下难以确定,因此,在实际应用这一理论时,更感困难。因而,我们认为,在目前情况下,为了阐明杭州湾上湾区的潮混合问题,似应从分析现有一个水文年度内沿程几个测站的氯度观测资料入手,从而首先推定本区海水入侵上限的位置,以期对这一区域内的潮泛混和过程的认识有所启示。

三、关于本区的海水入侵上限以及潮泛混合过程的初步分析

根据近年的观测资料和研究结果^[1]得知:本区自上游闻家堰到杭州湾杨子角——镇海断面这一长约 200 公里的区域内,沿程氯度随潮汐强弱和上游径流量的消长而有显著的变化,而且这一变化的性质及幅度,亦随季节和地段而异。就氯度变化的性质和幅度来看,整个杭州湾,可取海盐为界,分为两个部分——上湾区和下湾区。

在上湾区内,氯度随潮汐和径流这两项作用因素的消长而变化。在潮汐作用显著时期,氯度变化具有明显的潮汐周期:低潮憩流前后氯度最小,高潮憩流附近氯度最大。但在洪水时期,由于径流量大增,沿程氯度随即显著减小,氯度随潮汐位相的变化便不明显。由于本区上游雨量的季节分配不均,洪水暴涨暴落,最大与最小径流量之比,可高达千余倍。潮汐的强弱,除了具有长周期的变化外,还受到季节性的气象变化、径流变化、及河床冲淤变迁的影响,因此,其年度变化及季节性变化亦颇显著。据近年实测资料统计结果^[2],本区某一断面在一个潮周期内的涨入潮量,最大可达一亿多公方,但全年平均却有一百余天没有观测到涨潮流。在变幅如此巨大的径流量和潮汐这两项作用因素的不同组合情况下,上湾区的氯度,随着潮时、月相、季节及年度的不同而出现大幅度的急剧变化。

在海盐以下的下湾区,氯度的分布和变化,主要受潮汐和海流的控制,径流(长江和钱塘江)的影响则较小。在这里,氯度基本上没有显著的月相变化,换言之,即大、小潮的氯度变异已不显著,同时,由于下湾区的横向尺度较大,与纵向尺度可比,故无论是纵向或侧向的氯度分布,均有显著的差别。特别是靠近湾口北岸的地方,可能由于受长江径流的影响,氯度随潮汐位相的变化,与上述上湾区的情况恰恰相反,即:高潮憩流前后,氯度最小;低潮憩流前后,氯度最大。至于下湾区内的氯度分布,看来和长江及钱塘江两者径流量的相互消长,也有一定关系。例如,近岸观测表明:下湾区东北岸湾口附近的氯度分布,在钱塘江洪水期间,是向下游递增的;但在长江径流强盛期间,氯度的分布趋势则恰恰相反。

近年来,关于杭州湾区域的氯度分布和变化这一问题,浙江省水电厅水利科学研究所做了不少观测和研究工作。最近,我所也在下湾区内进行了有关咸、淡水交换和潮泛混合

的資料搜集工作; 這項觀測資料, 正在分析研究中, 詳情將另文報導。在這裡, 我們僅擬利用上灣區內幾個岸邊測站的氯度觀測結果, 對該區內的氯度沿程變化及潮泛混合問題, 作一初步討論。

我們根據 1958 年 5 月至 1959 年 4 月這一個水文年度內, 杭州灣上灣區岸邊測站月平均氯度觀測資料, 試圖確定本區域的氯度分布的經驗表達式; 結果表明: 這一分布, 可近似地用如下簡單的对数变形双曲綫來表示, 即:

$$\ln \text{Cl}(x') = \frac{x'}{a + bx'} + \ln \text{Cl}(0), \quad (6)$$

式中, x' 為自上游開始有記錄的第一個測站起算的距離, 以指向下游為正; $\text{Cl}(x')$ 及 $\text{Cl}(0)$ 分別表示在 x' 及 $x' = 0$ 處的氯度; a 及 b 為待定常數, 可由觀測資料來確定。

式(6)表明:

$$\begin{aligned} \text{當 } x' = 0 \text{ 時,} & \quad \text{Cl}(x') = \text{Cl}(0); \\ \text{當 } x' = -a/b \text{ 時,} & \quad \text{Cl}(x') = 0; \\ \text{當 } x' \rightarrow \infty \text{ 時,} & \quad \text{Cl}(x') = \text{Cl}(0)e^{1/b}. \end{aligned}$$

由此可見, 在我們這樣初步取定的坐標中, $x' = -a/b$ 這一地點, 即為海水入侵上限的平均位置; 而在離此上限足夠遠處, 氯度將趨於一定值 $\text{Cl}(0)e^{1/b}$ 。

為便於驗證起見, 我們將上述經驗關係(6)改寫為如下形式

$$\frac{x'}{\ln \left[\frac{\text{Cl}(x')}{\text{Cl}(0)} \right]} = a + bx', \quad (7)$$

並根據各月的平均氯度觀測結果, 用平方逼近法確定了式(7)中的常數 a 和 b 。

圖 5 表示出經驗關係(7)和實測平均氯度沿程分布的近似情況。

由圖 5 可以看出: 圖中按觀測值換算得出的點子, 大多數都位於由經驗關係(7)所確定的直綫附近。如果考慮到觀測資料本身所可能涵有的誤差, 我們可以認為, 利用經驗關係(7)來近似地描述月平均氯度的沿程分布, 是可以接受的。應該指出, 我們在求定式(7)的常數 a 、 b 時, 曾舍棄了個別顯著不合理的觀測記錄。

根據各月氯度沿程分布的經驗常數 a 和 b , 我們即可進而外推確定各月海水入侵上限的平均位置(記為 $\Delta = -a/b$)。計算結果, 如圖 6 所示。為比較起見, 圖 6 上

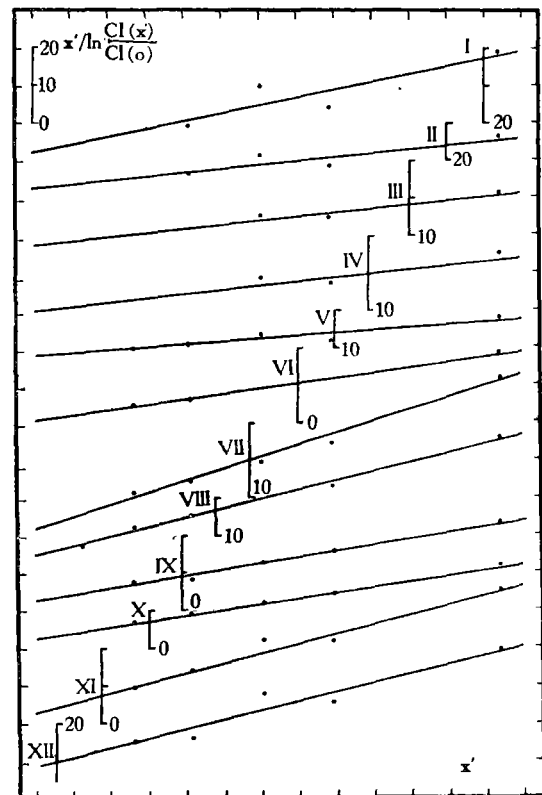


圖 5 按式(6)所確定的綫性關係
Fig. 5. Linear correlation as determined by eq.(6).

各月的 Δ 值,均化为从某一固定地点起算的距离。

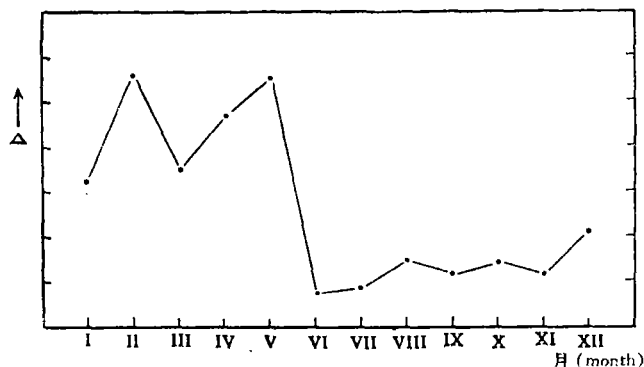


图 6 杭州湾海水入侵上限位置(Δ) (自某站起算) 的年变化
Fig. 6. Annual variation of the position of salt water intrusion (Δ) (measured from a certain station) of Hangchow Bay.

不难看出,我們用以近似地描述氯度的沿程分布、并从而推定海水入侵上限的經驗关系式(7),与上节所述潮泛混合长度理論对理想模式河口区域求得之理論解(4),是完全可以比拟的。

事实上,在公式(4)中,若以 $x = x' + \Delta, L = l + \Delta$ 代入(这里, l 为 $x' = 0$ 处至上湾区最末一测站的距离),盐度 S 用氯度 Cl 置換,并对左右两端取对数,即可得出:

$$\ln Cl(x') = F \left(1 - \frac{1}{\lambda} \right) + \ln Cl(L) = F \left(1 - \frac{l + \Delta}{x' + \Delta} \right) + \ln Cl(L). \quad (8)$$

令 $x' = 0$, 又得:

$$\ln Cl(0) = F \left(1 - \frac{l + \Delta}{\Delta} \right) + \ln Cl(L). \quad (9)$$

从式(8)和(9)中消去常数 $\ln Cl(L)$, 便得:

$$\ln Cl(x') = F \left(\frac{l + \Delta}{\Delta} \right) \left(\frac{x'}{x' + \Delta} \right) + \ln Cl(0), \quad (10)$$

或

$$\frac{x'}{\ln \left[\frac{Cl(x')}{Cl(0)} \right]} = \frac{\Delta(x' + \Delta)}{F(l + \Delta)} = a + bx'. \quad (11)$$

由此可见,式(11)和經驗关系式(7)是完全一致的;换言之,即經驗关系式(6)与潮泛混合长度理論关于理想模式河口区域之理論解(4)是等价的。因此,我們有理由认为:按經驗关系(6)外推确定海水入侵上限这一处理方式,是合理的;并且,根据式(11)所給出的

$$a = (\Delta)^2 / F(l + \Delta), \quad b = \Delta / F(l + \Delta)$$

中之任一关系,即可确定泛数 F 。

由是可見,在我們所討論的这一区域中,潮泛混合过程可以近似地由理想模式河口区域的潮泛混合长度理論來說明。或者,更确切地說,本区的混合系以潮混合为主;并且,纵向平流和纵向涡动扩散混合则是导致本区平均氯度分布的最主要过程。

为了更直观地表明上述推論的合理性,我們利用相应各月的 Δ 值及平均氯度沿程分布的观测数据,代入潮泛混合长度理論关于理想模式河口区域之解(4)的对数式(8),并从而确定各月的泛数后;結果得到图 7。图中的直綫,系按如下关系式繪出:

$$\ln \left[\frac{Cl(L)}{Cl(\lambda)} \right] = F \left(\frac{1}{\lambda} - 1 \right). \quad (8')$$

图上氯度的实测分布和理論分布的符合程度,是令人十分鼓舞的。这表明了: (i)

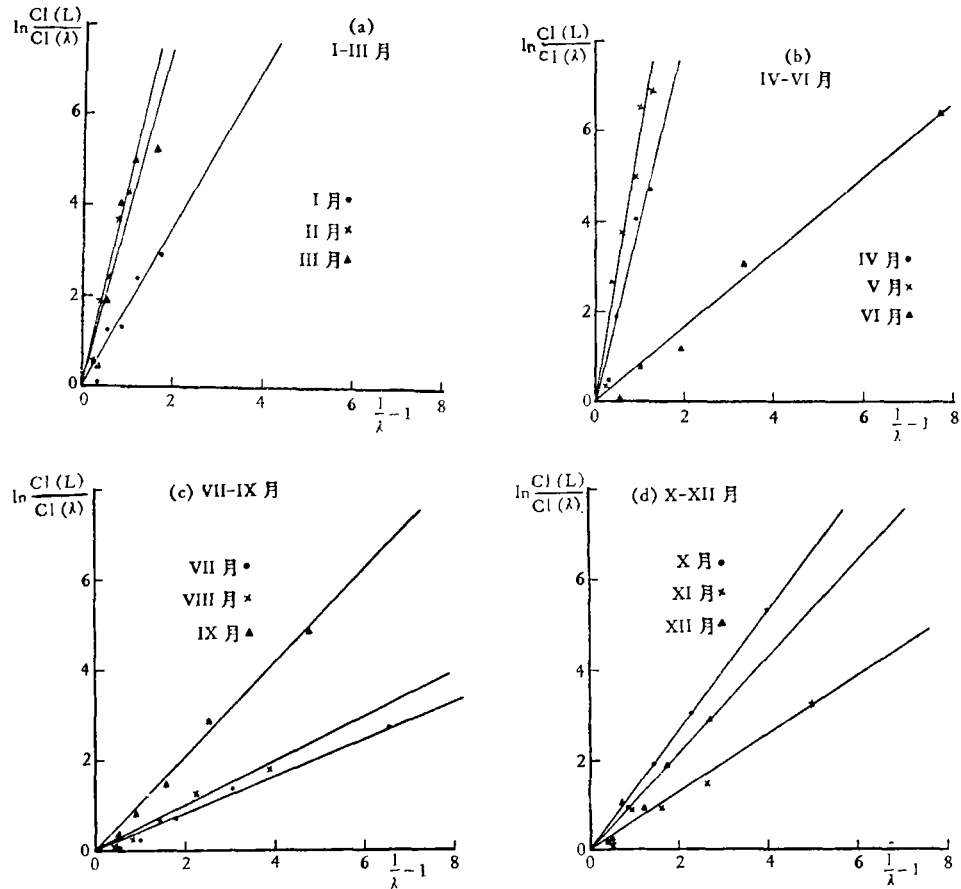


图7 杭州湾上湾区沿程氯度分布的理论计算和实测结果的比较

(a) I~III 月 (b) IV~VI 月 (c) VII~IX 月 (d) X~XII 月

Fig. 7. Comparison of the theoretical chlorinity distribution along longitudinal axis in the upper estuary of Hangchow Bay with those of the observed results.

(a) I~III month. (b) IV~VI month. (c) VII~IX month. (d) X~XII month.

Arons 和 Stommel 的潮泛混合长度理论关于理想模式河口区域的解,可近似地描述杭州湾上湾区氯度的沿程分布; (ii) 本文根据一个水文年度内岸边几个测站氯度观测资料外推确定海水入侵上限的处理方式,是合理的。由于这一位置的确定,乃使 Arons 和 Stommel 的潮泛混合长度理论,得以在本区具体应用。可以预料,在取得了足够的地形、潮汐及径流量的观测数据之后,我们取用在上节中导出的、适用于可变断面河口区域的工作公式(5)来计算氯度沿程分布,可望获得更好的结果。

前面我们曾经指出,钱塘江径流量的多变性,是 Ketchum 经验理论在本区未尽适用的可能原因之一。似乎令人不解的是, Arons 和 Stommel 的混合长度理论,也同样假定了径流量及沿程潮汐的初位相为恒量,而且更进而将河口区域简化为等深、等宽、等潮差的,但其结果却与实测资料符合得如是之好。我们认为,这可能是由于在这一理论中,对径流量、地形和潮差这三项作用因素,巧妙地将之作为描述河口区域内盐度(氯度)沿程分布的扩散方程中的参数来处理,并最后把它们组合为一个描述潮泛混合的特征量——泛数 F 。

这样一来,尽管这一理论所取用的模式是如此简单,但在与实测分布相配合(或比较)时,便具有一定的灵活性。因此,在实用意义上来说,这一简化理论模式的解(4),可以看做是表征强混合型河口区域盐度(或氯度)分布的一个方便的半经验公式,只要适当选定其泛数 F 之量值,即可望得到与实测分布近似一致的结果。

这里应该着重指出:在我们以上的计算中,由于观测资料的限制,不得不有保留地设定上湾区某一测站为河口区域的下限;因此,我们按式(8)来配合

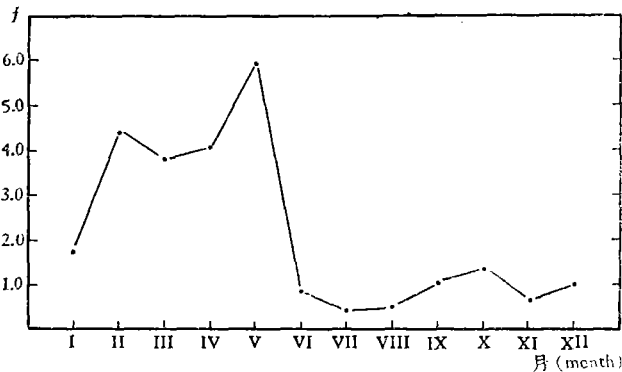


图8 杭州湾上湾区“条件泛数”(f)的年变化

Fig. 8. Annual variation of the "conditioned flushing number" (f) in the upper estuary of Hangchow Bay.

测定上湾区某一测站为河口区域的下限;因此,我们按式(8)来配合实测氯度分布时所确定的泛数,并非整个河口区域的泛数。为有所区别起见,我们拟将这里确定的这一泛数,称为上湾区的“条件泛数”,并记为 f_0 。

按实测氯度沿程分布以平方逼近法算得各月的 f 值,如图8所示。

由图8可以看出:在同一上湾区内,“条件泛数”的逐月变化

是相当巨大的(其最大值和最小值可差达一个量级以上),而且,出现最大值的月份(5月)和出现最小值的月份(7月)在时间上相差甚近。总的说来,本区河段的条件泛数,以2—5月为最大,秋冬季为最小。仅就趋势而论,这与本区的径流量及潮汐的消长情况是大体相符的。而令人诧异的是,比较图6、8可以看出,条件泛数的年变化与海水入侵上限年变化之间,却又似有一定的相似性。

我们曾根据手头为数不多的观测资料,试图确定本区海水入侵上限位置 Δ 及“条件泛数” f 这两特征值与平均潮差、平均径流量之间的某些半经验关系;但所得的初步结果,却不尽令人满意。这有待取得更多、更好的观测资料后,作进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] 南京水利科学研究所、浙江省水利厅水利科学研究所钱塘江河口研究站, 1958。钱塘江河口自然概况及潮力资源的开发问题(内部资料)。
- [2] 南京水利科学研究所、浙江省水利厅水利科学研究所钱塘江河口研究站, 1959。钱塘江河口河床演变初步分析(内部资料)。
- [3] 浙江省水电厅水利科学研究所, 1962。钱塘江河口含氯度变化的特性(内部资料)。
- [4] Arons, A. B. and H. Stommel, 1951. A mixing-length theory of tidal flushing. *Trans. Amer. Geophys. Union.*, **32**(3):419—421.
- [5] Bowden, K. F., 1962. Estuaries and coastal waters, *Proc. Roy. Soc. series A*, **256** (1322):320—325.
- [6] Ketchum, B. H., 1951. The exchanges of fresh and salt water in tidal estuaries, *J. Mar. Res.*, **10**(1):18—38.
- [7] Ketchum, B. H. and J. K. Keen, 1953. The exchanges of fresh and salt waters in the Bay of Fundy and in Passamaguddy Bay. *J. Fish. Res. Bd. Canada*, **10**(3):97—124.
- [8] Maximon, L. G. and G. W. Morgan, 1955. A theory of tidal mixing in a "vertical homogeneous" estuary. *J. Mar. Res.*, **10**(2):157—175.
- [9] Pritchard, D. W., 1954. A study of the salt balance in a coastal plain estuary. *J. Mar. Res.*, **13**(1):133—144.

- [10] Pritchard, D. W., 1960. The movement and mixing of contaminants in tidal estuaries. Proc. 1st Inter. Conf. Waste disposal in the marine environment (edited by E. A. Pearson). Pergamon Press, p. 512—525.
- [11] Stommel, H., 1953. The role of density currents in estuaries. Proc. Minnesota Inter. Hyd. Convention, p. 305—312.
- [12] Tully, J. P., 1958. On structure, entrainment, and transport in estuarine embayments. *J. Mar. Res.*, 17(3):523—535.

A PRELIMINARY STUDY OF THE TIDAL FLUSHING IN HANGCHOW BAY (I) UPPER ESTUARY

MAO HAN-LEE GAN ZI-JUN SHEN HONG-SHU

(*Institute of Oceanology, Academia Sinica*)

(ABSTRACT)

Hangchow Bay (the estuary of the Chientang River) is the largest bay of the south-east China. It is well known for its world famous bore (the Chientang-kiang Bore). Recent observations revealed that tidal currents here are also considerably strong. It is therefore reasonable to expect that the tidal flushing here ought to be very strong, and thus this area affords an ideal location for studying the flushing problems (the exchange of fresh and salt waters, of dissolved and suspended materials, the distribution of planktons, etc.). This paper, however, only intends to deal with the exchange of fresh and salt waters in the upper part of the Bay, i.e. the upper estuary. It is the wish of these authors that this preliminary study may give some insight into the detailed mechanism involved in the tidal flushing of the whole Bay area. Such knowledge, particularly if combines with the knowledge of estuarine circulation, no doubt, will have great interests, both theoretically and practically.

The main body of this article is divided into three parts. In the first section, the essential features of the three fundamental types of mixing in a tidal estuary—i.e. the negligible mixing type, the moderate mixing type, the strong mixing type—are briefly reviewed, and the general characteristics of salinity (or chlorinity) distributions of Hangchow Bay are outlined. It is found that the distribution pattern of chlorinity in the upper estuary is rather simple—the vertical as well as lateral variations are small compared to the longitudinal variation—and, for a good first approximation, this area may be regarded as an estuary of strong mixing type. On the contrary, the salinity distribution in the lower estuary is much more complicated, therefore, further studies should be made and those results will be reported later.

In the second section, the existing theories of strong mixing type are critically reviewed and their applicabilities to the upper estuary of Hangchow Bay are discussed in full detail. Results show that the empirical theory of B. H. Ketchum cannot be applied to this area, though Ketchum claimed that his theory fitted remarkably well to the observed data of five estuaries of different nature in North America. It is these author's opinion that the inapplicability of Ketchum's theory in this area may partially be accounted for

by the large fluctuation of the fresh water flow of the Chientang River, the lack of detailed informations on topography and tides of the investigated area, etc. The mixing length theory of tidal flushing advanced by A. B. Arons and H. Stommel for a model estuary (of constant depth, constant width, and equal tidal range) may, in principle, be extended to a real estuary through the introduction of a certain working formula. By so doing, however, the upper limit of salt water intrusion (which is the origin of the coordinate system in the fundamental equation of the mixing length theory) must be known. Owing to the lack of sufficient observations of chlorinity in this area, this upper limit cannot be ascertained. Under these circumstances, in order to examine whether the mixing length theory can actually be applied to this area or not, we must first determine location of this upper limit.

In the third section of this paper, we first derived an empirical formula (in the form of logarithmic deformed hyperbolic curves) for expressing the longitudinal chlorinity distribution in the upper estuary of Hanchow Bay, by employment of available chlorinity data at shore stations (twelve months in total). By so doing, we are able to determine the approximate location of the upper limit of salt water intrusion of Hanchow Bay, by means of extrapolation.

It can be shown that our empirical distribution of chlorinity is analogous to the analytical solution of Arons and Stommel's mixing length theory for a model estuary. It is rather striking to find that with exception of a few points, all of our twelve calculated curves fit the observed data so well. It proves that Arons and Stommel's mixing length theory for a model estuary is applicable to our investigated area, and that the means which we used to determine the upper limit of salt water intrusion is justified. Following this, we are also able to determine a "local flushing number" describing the monthly tidal flushing in the upper estuary of Hangchow Bay. The variation of this "local flushing number" with fluctuation of fresh water flow and tidal regime is under investigation.