



密度變化對河口環流、鹽分分佈與水質之影響

The Influence of Density Variation on Estuarine Circulation, Salinity Distribution and Water Quality

國立臺灣大學農業工程研究所博士
水工試驗所技士

柳文成

Wen-Cheng Liu

國立臺灣大學農業工程研究所教授
兼水工試驗所特約研究員

許銘熙

Ming-Hsi Hsu

美國維吉尼亞州威廉瑪麗大學
海洋學院物理科學系教授

郭義雄

Albert Y. Kuo

國立臺灣大學土木工程研究所教授
兼水工試驗所特約研究員

郭振泰

Jan-Tai Kuo

摘要

本研究之主要目的利用數值試驗應用於探討淡水河河口因密度變化對河口環流、鹽分分佈與水質之影響。橫向平均垂直二維水理暨水質數值模式已發展並應用於淡水河複雜河系。數值試驗採用兩種密度情形用於探討密度不同對河口環流、鹽分分佈與水質所產生之影響；首先考慮河口有密度變化產生，即為一般河口所使用之狀況，另一則假設河口密度為定常值(無密度變化)，此兩種情形於模式中均使用相同係數值及河道地形狀況。數值試驗所採用之係數值已經過模式檢定與驗證程序，此係數包括曼寧係數，紊流混合擴散項及計算各水質變數所採用之係數。數值試驗結果顯示此兩種河口密度之改變對河口環流、鹽分分佈及水質狀況會有重大差異產生。

關鍵詞：數值試驗，水理與水質模式，河口環流，密度變化，淡水河河系。

ABSTRACT

The main purposes of this study apply the numerical model experiments which are carried out to investigate the influence of density variation on residual current, salinity

distribution and water quality in the Tanshui estuary. The vertical (laterally averaged) two-dimensional, real-time hydrodynamic and water quality models, which has been developed and applied to the Tanshui River system, is outlined. A detailed analysis of residual circulation, salinity distribution and water quality is made for two cases. One case involved density variations while the other assumed a constant density. Both cases used the same coefficient and bathymetric schematization. The coefficients, having been calibrated and verified with observational data, including Manning's friction coefficient, constants in turbulent mixing terms in the vertical direction and water quality rate constants. The modeling results show that residual current, salinity distribution and water quality are significantly different between the two numerical experiments.

Keywords: Numerical model experiment, Hydrodynamic and water quality models, Estuarine circulation, Density variation, Tanshui River system.

一、前言

台灣四面環海大部份的河川最終都注入海洋，而河川下游河口段及感潮河段的平原地帶因地勢較為平坦、資源豐富及交通方便等因素，成為人口匯集的精華區，但由於感潮河段內的水位隨潮汐變動及鹽分入侵作用對於水生生態、用水資源及水質、河床演變及地下水質及水位等產生重大的影響，必須對河口及感潮河段深入探討，方能對其水資源、水質及河口生態做最有效的利用與保護。

感潮河川是連接河川與海洋這兩個水理特性差異甚大水體之過渡水域，並同時承受兩者動力因素的交互作用，河川段來自上游的淡水受到下游河口處週期性漲落的海水作用而使得水位、流速、鹽分濃度及水質呈現週期性的變化，再加上淡水及鹽水的密度差異而產生複雜水流特性。

感潮河川下游鹽分入侵段稱之為河口，河口區之水理動力主要是受到潮流、河川流及密度流交互作用之影響。潮流是受到外海潮汐作用，使得河水有漲、落潮的現象，當僅有潮汐作用時，感潮段水流形態較為單純，漲潮時水深增加流速減緩，退潮時水深減小且漲潮時進入河川的河水釋出，使得流速增加。河川流是上游的淡水流，有阻止潮波上溯，減小漲潮流速和增大退潮流速

的作用，淡水流也受到洪水期、枯水期等季節性流量的變化而有不同，通常豐水期漲退潮歷時差異較大，枯水期時差異較小。密度流是進入河口區的淡水流與鹽水潮流因密度不同而產生水體的相對運動，密度大的海水由底部進入河口區，密度小的淡水在上層流動，由於上層淡水與下層鹽水界面間的摩擦力，形成二層流現象(two-layer flow)，在漲潮期間鹽分上溯，亦增加底層上溯流動作用，退潮時有阻止底層水流且增大表層淡水流動之作用，形成密度環流(density circulation)或稱重力環流(gravitational circulation)。密度環流會加大底部漲潮流速，減小落潮底部流速，上游河川淡水流量之大小及下游河口潮汐變動對於密度環流會產生重大影響(許等，1996、1997)。

在河口區因海水與淡水間之交互作用，導致鹽分分層現象，又因密度差而產生密度流。大多數的一維數值模式(陳,1984、Brown and Branwell, 1987、Ambrose et al., 1989、Khan, 1989、柳, 1990、Kuo, 1994 等)及水平二維數值模式(Leendertse, 1970, 1977、Johson, 1980, Bengue et al., 1982、Spaulding, 1984、Sheng, 1986、Stelling et al., 1986、Baker, 1992、Willemse et al., 1995、Muin and Spaulding, 1996、Nguyen and Ouahsine, 1997 等)並未能將密度變化的影響納入水理或水質模式中加以考慮。本研究將以目前所發展並且應用於淡水河系之垂直二維水理與水質數值

模式，探討在河口區潮汐動力及鹽分入侵作用下，有、無考慮密度變化對河口環流、鹽分分佈及水質所產生之影響。

二、模式之建立

模擬河川流況，在寬度方向的變化不顯著，且為了探討縱向(沿河道方向)速度及速度、壓力及濃度等變量在垂直(深度)方向的變化時，如感潮河段及河口鹽水與淡水混合作用，可將三維之水流連續方程式、動量方程式及質量守恆方程式沿寬度(河寬)方向積分，即利用寬度平均將三維的複雜問題簡化為二維形式。

本研究採用 Park and Kuo (1993)所發展的垂直(寬度平均)二維水理水質模式為主要架構，此模式適用於受感潮作用之水體，可模擬潮汐作用下的非恆定流況，以及在海水及淡水混合作用下鹽分濃度的變化與水質傳輸狀況。

(一) 水理動態傳輸模式

Park and Kuo (1993)發展之二維水理暨水質模式，其水理模式可用以模擬流場狀況(包括水位及流速)與鹽分濃度，採用二維直角座標系統，以向河口方向為 x 軸，垂直向上為 z 軸(如圖 1 所示)，其基本控制方程式如下所示：

1. 橫向平均連續方程式：

$$\frac{\partial(uB)}{\partial x} + \frac{\partial(wB)}{\partial z} = q_p \dots\dots\dots(1)$$

2. 斷面平均連續方程式：

$$\frac{\partial}{\partial t}(B\eta) + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-H}^{\eta} (uB) dz = q \dots\dots\dots(2)$$

3. 橫向平均動量方程式：

$$\frac{\partial(uB)}{\partial t} + \frac{\partial(uBu)}{\partial x} + \frac{\partial(uBw)}{\partial z} = -\frac{B}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (A_x B \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z B \frac{\partial u}{\partial z}) \dots\dots(3)$$

4. 靜壓方程式：

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho g \frac{\partial \eta}{\partial x} + g \int_{z}^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \dots\dots\dots(4)$$

5. 橫向平均鹽分質量守衡方程式：

$$\frac{\partial(sB)}{\partial t} + \frac{\partial(sBu)}{\partial x} + \frac{\partial(sBw)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (K_x B \frac{\partial s}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z B \frac{\partial s}{\partial z}) + S_o \dots\dots\dots(5)$$

6. 狀態方程式：

$$\rho = \rho_o(1 + ks) \dots\dots\dots(6)$$

7. 紊流閉合模式：

$$A_z = \alpha Z^2 (1 - \frac{Z}{h})^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| (1 + \beta R_i)^{-\frac{1}{2}}$$

$$K_z = \alpha Z^2 (1 - \frac{Z}{h})^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| (1 + \beta R_i)^{-\frac{3}{2}} \dots\dots\dots(7)$$

式中， t 為時間； q_p 為單位面積之側流量； q 為單位河川長度之側流量； η 為自由水面高於平均海平面之高度； u 與 w 分別表示在 x 及 z 方向之橫向平均速度； s 為橫向平均鹽分濃度； B 及 B_η 分別表示河寬及自由水面寬度； H 為平均海平面下總深度； p 與 ρ 分別表示壓力及水密度； g 為重力加速度； A_x 與 A_z 分別表示 x 及 z 方向之紊流黏滯係數； K_x 與 K_z 分別表示 x 及 z 方向之紊流擴散係數； S_o 為鹽分之生成或消失項； ρ_o 為淡水密度及 k 為密度與鹽分濃度之相關係數 ($k = 7.5 \times 10^{-4} \text{ ppt}^{-1}$)； Z 為離水面之距離； $h = \eta + H$ ，為總水深； α 及 β 為待檢定之常數； R_i 為局部李察森數 (local Richardson number)。

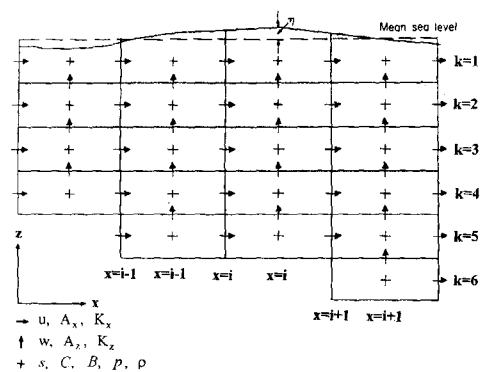


圖 1 網格單元變數位置示意圖

(二) 水質動態傳輸模式

水質動態傳輸模式是以質量守恆定律為基礎，其控制方程式表示如下：

$$\frac{\partial(CB)}{\partial t} + \frac{\partial(CBu)}{\partial x} + \frac{\partial(CBw)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}(K_x B \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_z B \frac{\partial C}{\partial z}) + BS_s + BS_r \dots\dots\dots(8)$$

式中，C 為寬度平均之各水質濃度變數；S_i 為內在生成或消失項及 S_e 為外在生成或消失項。

水質模擬系統共分八種水質變數，分別為碳生化需氧量(CBOD)、溶氧量(DO)、有機氮(ON)、氨氮(NH₃-N)、硝酸-亞硝酸態氮(NO₂-N、NO₃-N)、葉綠素(Chl)、有機磷(OP)及三磷酸(PO₄)，以上各水質變數均可以橫方向平均水質濃度質量守恆方程式表示之，但最後的內在及外在生成或消失項，將依照所模擬的對象不同而改變。本文僅針對溶氧量加以討論，以下就溶氧量之內在及外在生成或消失項加以說明。

水體中溶氧量(DO)的反應，包括光合作用、表面曝氣及外來負荷等生成反應；消失反應包括有CBOD的衰減、硝化作用、藻類呼吸以及底泥需氧量。這些反應之表示如下：

$$S_i = -K_c CBOD - a_{no} \frac{K_{n23} N_2}{K_{h23} + N_2} \frac{DO}{K_{nit} + DO} + a_c a_{co} (PQ \cdot G - \frac{R}{RQ}) Chl \dots\dots\dots(9)$$

$$S_e = \frac{WDO}{V} + (1 - \lambda_1) K_r (DO_s - DO) - \frac{SOD}{\Delta Z} \frac{DO}{K_{DO} + DO} \frac{B_k - \lambda_2 B_{k+1}}{B_k} \dots\dots\dots(10)$$

式中，

- λ₁ = 0 (當 k = 1，頂層)，
- = 1 (當 2 ≤ k ≤ N，N 為各河段分層數)；
- λ₂ = 0 (當 k = N，底層)，
- = 1 (當 1 ≤ k ≤ N - 1，N 為各河段分層數)；

- DO: DO 的濃度(mg/l)；
- CBOD: CBOD 的濃度(mg/l)；
- N₂: 氨氮濃度(mg/l)；
- Chl: 葉綠素的濃度(μg/l)；
- K_{n23}: 氨氮硝化成硝酸態氮速率(mg l⁻¹ day⁻¹)；

- K_{h23}: 硝化作用半飽和濃度(mg/l)；
- a_c: 浮游生物碳/葉綠素比(mg C / μg Chl)；
- a_{co}: 需氧量與循環有機碳量比=2.67；
- K_{nit}: 硝化作用氧限制下之半飽和濃度(mg/l)；
- a_{no}: 每一單位氨氮硝化所消耗氧(4.57mole O₂/mole NH₃)；
- K_c: CBOD 一階衰減反應(day⁻¹)；
- G: 光合性浮游生物生長率(day⁻¹)；
- R: 光合性浮游生物呼吸率(day⁻¹)；
- PQ: 光合作用(mole O₂/mole C)；
- RQ: 呼吸作用(mole CO₂/mole O₂)；
- ΔZ: 垂直方向分層厚度(cm)；
- V: 分層體積(liter)；
- K_r: 再曝氣係數(day⁻¹)；
- SOD: 底泥需氧量(g m⁻² day⁻¹)；
- K_{DO}: CBOD 底泥通量的半飽和濃度(mg/l)；
- DO_s: DO 的飽和濃度(mg/l)；
- WDO: DO 的外來負荷(mg/day)(包括點源與非點源)。

其中，CBOD 通量項內之 SOD 在低溶氧量時會受抑制。再曝氣係數 K_r 包含底部磨擦所產生的亂流曝氣及表面風所造成的再曝氣，可由下式求解：

$$K_r(20) = \left(K_{ro} \sqrt{\frac{u_{eq}}{h_{eq}}} + W_{rea} \right) \frac{1}{\Delta Z} \dots\dots\dots(11)$$

$$W_{rea} = 72.8U_w^{\frac{1}{2}} - 31.7U_w + 3.72U_w^2 \dots\dots\dots(12)$$

式中，

- K_r(20): 20°C 時之再曝氣係數(day⁻¹)；
- K_{ro}: 比例常數(393.3, CGS 單位)；
- u_{eq}: 橫斷面上的加權速度 = $\frac{\sum u_k B_k h_k}{\sum B_k h_k}$ ；
- h_{eq}: 橫斷面上的加權深度 = $\frac{\sum B_k h_k}{B_\eta}$ ；

W_{rea} : 風造成的再曝氣作用($cm\ day^{-1}$);
 U_w : 水面上 10 公尺高度處之風速(m/s);
 u_k, B_k, h_k : 第 k 層之縱向速度、寬度及深度。

再曝氣係數與溫度 T 相關, 其關係式為,

$$K_r = K_r(20) \cdot \theta_9^{T-20} \dots\dots\dots(13)$$

式中, θ_9 : DO 再曝氣係數的溫度校正係數。

飽和溶氧量(DO_s)與水溫及鹽度 s (單位為 ppt)有關, 以下式表示之:

$$DO_s = 0.146244 \times 10^{-2} - 0.367134T + 0.4497 \times 10^{-2} T^2 - s(0.966 \times 10^{-1} - 0.205 \times 10^{-2} T - 0.2739 \times 10^{-3} s) \quad (14)$$

因原模式只能模擬單一河道之感潮河段, 無法模擬如淡水河系有主、支流匯流交互作用之感潮河川。本研究即針對淡水河主、支流之特性, 將原模式加以擴充改良, 對主支流匯流條件加以考慮, 即對於主、支流交匯處另立連續方程式、動量方程式及質量守恆方程式加以處理(許等, 1996、1997), 並利用兩時間段(two-time level)有限差分法求解水理、鹽分濃度及水質變數, 所採用之有限差分法是以顯式法處理連續方程式以求解水面高程(η); 垂直擴散項以隱式差分法處理, 水平擴散項則予以保留; 並以 QUICKEST scheme (Leonard, 1979)求解鹽分濃度及各水質變數。本模式以有限差分法在空間中劃分均勻網格求解, 模式中格網系統之幾何形狀及格子內之變數位置如圖 1 所示。模式演算為尋求淡水河系潮流之合理邊界條件, 將演算區域延伸至淡水河各支流上游不受潮汐影響之河段, 模式之運用係將淡水河及大漢溪視為主流, 新店溪與基隆河分別為第一及第二支流(見圖 2 所示)。

三、上下游邊界條件

模式建立後, 其適用性必須經過檢定(calibration)與驗證(verification), 本模式中需要檢定與驗證之參數包括有曼寧係數(n)、紊流混合擴散項及計算各水質變數所採用之參數, 水理模式參數檢定與模式驗證之詳細過程與結果見報告及已發表之文章(許等, 1996、1997、1999);

水質模式參數檢定與模式驗證之結果及採用之參數值見論文(柳, 1998)。對於上述參數經檢定與驗證後即予以固定不變, 以作為數值試驗與應用之基本依據。

潮汐為驅動淡水河系感潮段水流漲落之主要動力, 故其鹽分濃度及水質亦受到潮汐傳播之控制作週期性之變化, 數值試驗時於淡水河系上游邊界分別採用平均流量及 Q_{75} 低流量(表示歷年歷時百分之 75 流量)之情形下, 考慮河口區有、無密度變化時, 模擬演算河川中之水理、鹽分濃度及水質狀況。

在模式演算時下游邊界條件河口站潮位採用九個分潮振幅及相位角所形成之綜合潮, 分別為 M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_1 、 S_a 、 O_1 、 K_2 、 P_1 及 M_4 分潮, 其分潮振幅及相位角見表 1 所示。河口綜合潮位表示如下:

$$\eta_p(t) = \bar{\eta} + \sum_{k=1}^m a_k \cos(\omega_k t - \theta_k) \dots\dots\dots(15)$$

式中, $\bar{\eta}$ 為平均水位; ω_k 為分潮之角速度(angular velocity), 即是 $\frac{2\pi}{T_k}$, T_k 為分潮週期, a_k 及 θ_k 分別為潮位調合分析所得之分潮振幅及相位角, m 為使用之分潮數目。由河口站之歷年之實測資料分析得到平均水位高程($\bar{\eta}=6.53$ 公分), 圖 3 為河口潮位之變化情形, 河口產生之綜合潮可以反應出大潮與小潮水位之變動。

表 1 河口站九個分潮振幅及分潮相位角

分潮名稱	分潮週期 (時)	分潮振幅 (a_k)	分潮相位角 (θ_k)
M_2	12.42	104.87	35.60
S_2	12.00	27.85	-7.18
N_2	12.66	21.33	-43.76
K_1	23.93	19.94	-133.79
S_a	8765	17.06	-143.32
O_1	25.82	16.22	-47.96
K_2	11.97	7.17	131.50
P_1	24.07	7.14	-110.58
M_4	6.21	2.83	47.44

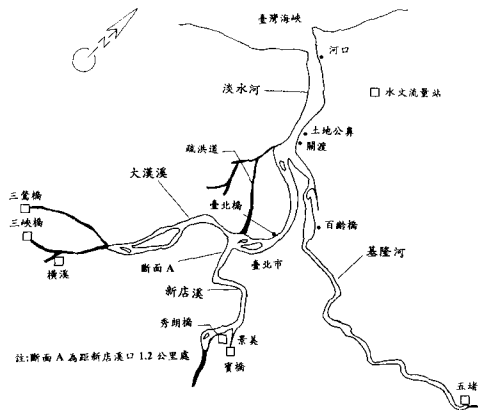


圖 2 淡水河系平面示意圖

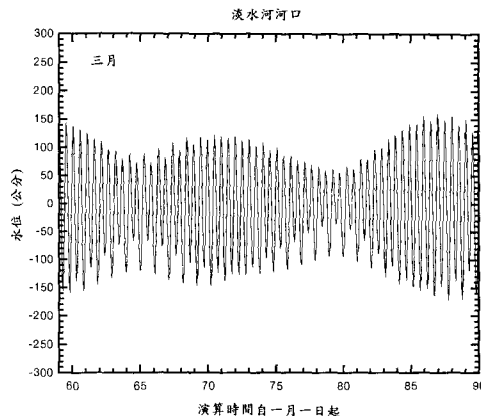


圖 3 綜合潮形成之河口潮位歷線

上游邊界條件於大漢溪上游、新店溪上游及基隆河之五堵站採用歷年統計資料之長期平均流量，大漢溪上游為 62.1 cms、新店溪上游為 72.7 cms、基隆河五堵站為 26.1 cms； Q_{75} 低流量時，大漢溪上游為 8.15 cms、新店溪上游為 20.2 cms、基隆河五堵站為 3.61 cms。分析歷年河口站之實測鹽分濃度資料，估計河口於不同流量時之鹽分濃度，平均流量下，下游邊界河口站之鹽分濃度在高潮位時採用 25 ppt； Q_{75} 低流量下，則鹽分濃度則採用 32 ppt。在水質部份，下游邊界河口站之水質濃度採用歷年採樣分析資料之平均值，上游邊界濃度採用河川水質與流量之關係式，根據 Hydrosience Inc. (1976) 曾於美國 Potomac River 研究水質時發現，河川水質濃度與流量有指數的迴歸關係，亦即水質濃度與上游河川流量，呈現以下之迴歸關係：

$$C = a \cdot Q^b \dots\dots\dots(16)$$

式中， Q 為上游河川流量； C 為水質濃度； a 、 b 則為常數。

行政院環境保護署於民國 82 至 85 年間委託代檢驗機構在淡水河系每月進行之水質觀測採樣，故根據其採樣資料做迴歸分析，以瞭解上游河川流量與水質濃度之關係，包括有大漢溪(浮洲橋)、新店溪(秀朗橋)、基隆河(五堵)，圖 4 僅繪出大漢溪、新店溪及基隆河上游之 DO 與河川

流量間之關係，圖中顯示當低流量時 DO 濃度較低，高流量時因流量稀釋及曝氣作用使得 DO 濃度較高；根據實測資料顯示以大漢溪浮洲橋之溶氧量較低。模式模擬一年(705 潮汐週期)之水理與水質狀況。

四、結果與討論

為了評估密度變化所產生之影響，首先必須探討驅動河口環流之動力因素，在數值試驗中壓力梯度作用力為其主要之驅動力，在方程式(4)式中壓力梯度($\frac{\partial p}{\partial x}$)可以分解為兩項，一為水位梯度所引起之壓力梯度變化($\rho g \frac{\partial \eta}{\partial x}$)，又稱為正壓項(barotropic mode)；另一項為水平方向之密度差所引起之壓力梯度變化($g \int_z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz$)，又稱為斜壓項(baroclinic mode)，此兩項作用力是隨著時間及空間而改變，圖 5 為平均流量下，模擬所得關渡、台北橋及百齡橋之壓力梯度變化，當有考慮密度變化時，密度與鹽分濃度之相關係數 $k = 7.5 \times 10^{-4}$ ，由方程式(6)式知密度是隨鹽分濃度而變，亦即隨時間及空間而改變；當無考慮密度變化時 $k = 0.0$ ，由方程式(6)式可得 $\rho = \rho_0$ ，河水密度等於淡水密度，即表示密度為定常值。圖 5 顯示當有考慮密度變化時，水位梯度所引起之壓力梯度變化之絕對值遠大於密度差引起之壓

力梯度變化，水位梯度引起之壓力梯度變化是隨著潮位振幅而波動，漲潮時流向內陸，退潮時流向河口；密度差所引起之壓力梯度則永遠指向河口方向。當密度為定常值時，密度差所引起之壓力梯度為零。比較關渡站、台北橋及百齡橋之壓力梯度結果顯示，在下游之關渡站水位梯度引起之壓力梯度變化的絕對值較台北橋及百齡橋為大。

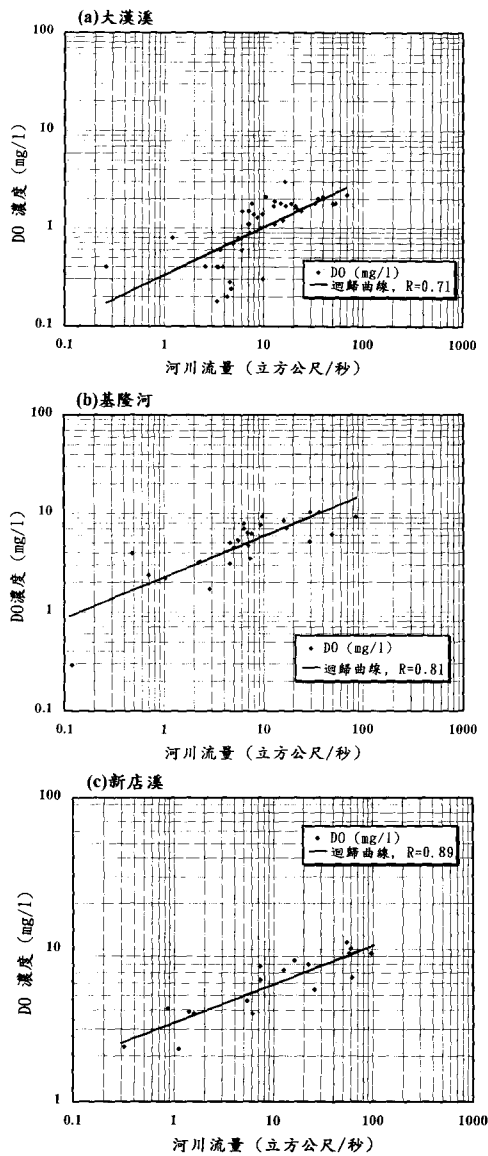


圖 4 上游河川流量與水質(溶氧量)之關係
 (a)大漢溪 (b)基隆河 (c)新店溪

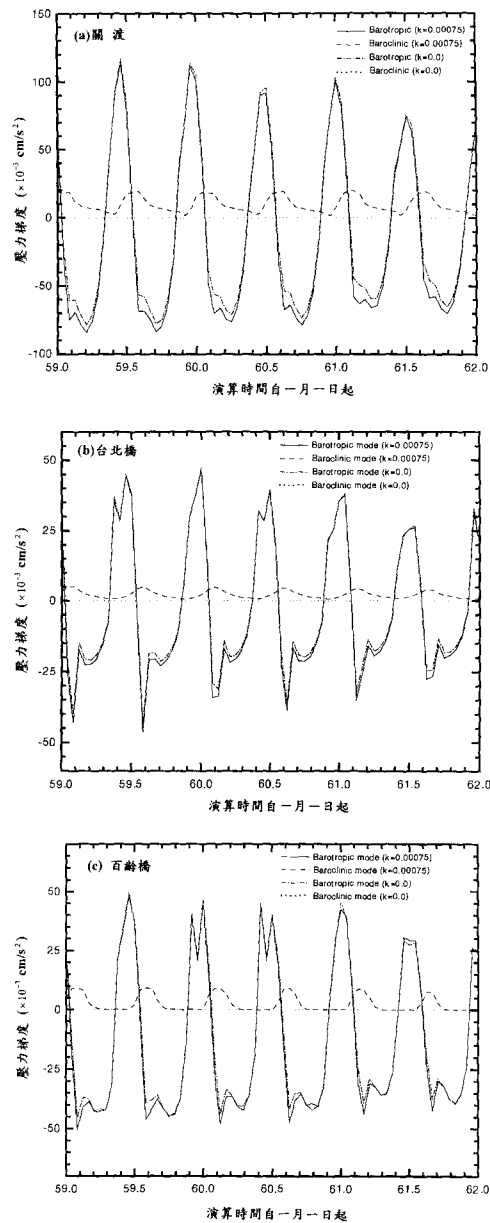


圖 5 有、無密度變化對壓力梯度之影響(平均流量時) (a)關渡橋 (b)台北橋 (c)百齡橋

圖 6 為平均流量下，有、無考慮密度變化對關渡站潮位之影響，結果顯示兩者的差異甚微，有、無密度變化對潮差(高潮水位與低潮水位之差)、相位差而言，則並不產生改變。圖 7 僅顯

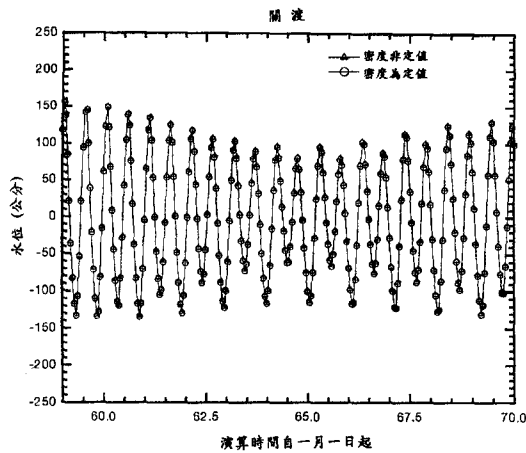


圖 6 有、無密度變化對關渡潮位之影響

示 Q_{75} 流量下，有、無考慮密度變化對淡水河一大漢溪潮週平均速度分佈之影響，當無密度變化時，所有河段之速度均為正值，表示水流流向河口方向，當有密度變化時，則產生二層流況，為進一步瞭解此兩種密度條件不同所產生之差異性，故以垂直速度剖面表示之。圖 8 及圖 9 分別為平均流量及 Q_{75} 低流量下，於關渡、台北橋、百齡橋及距新店溪口 1.2 公里處等站，有、無考

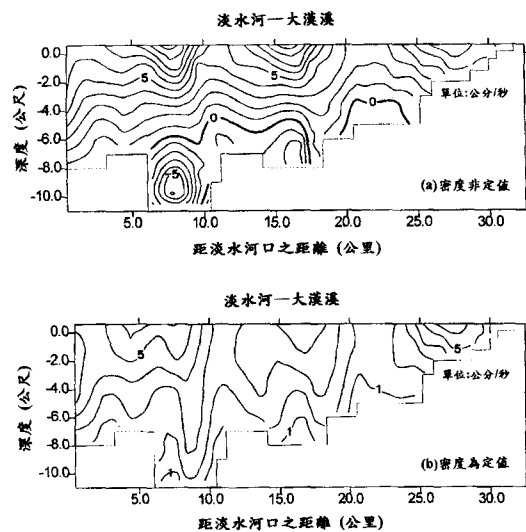


圖 7 有、無密度變化對淡水河一大漢溪潮週平均速度分佈之影響 (Q_{75} 流量時) (a)密度非定值 (b)密度為定值

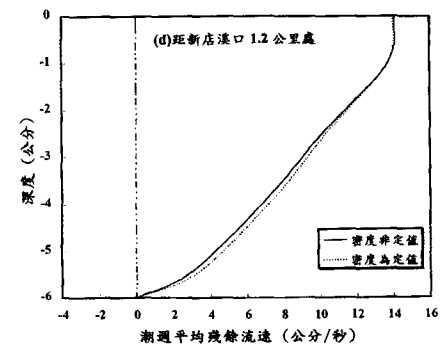
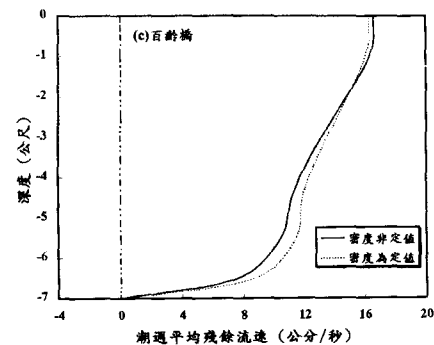
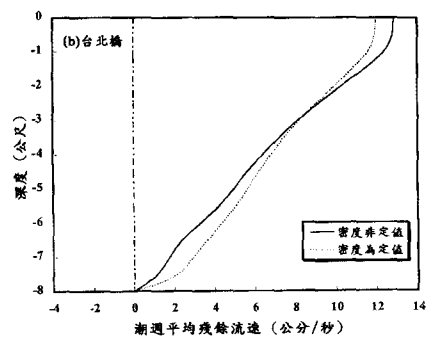
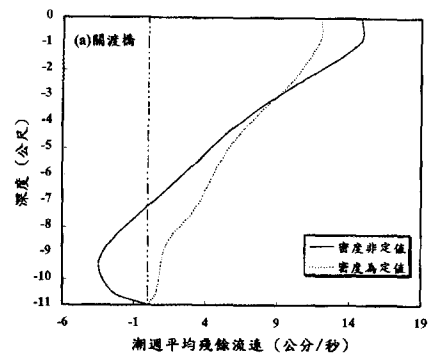


圖 8 有、無密度變化對重力環流之影響(平均流量時) (a)關渡橋 (b)台北橋 (c)百齡橋 (d)距新店溪口 1.2 公里處

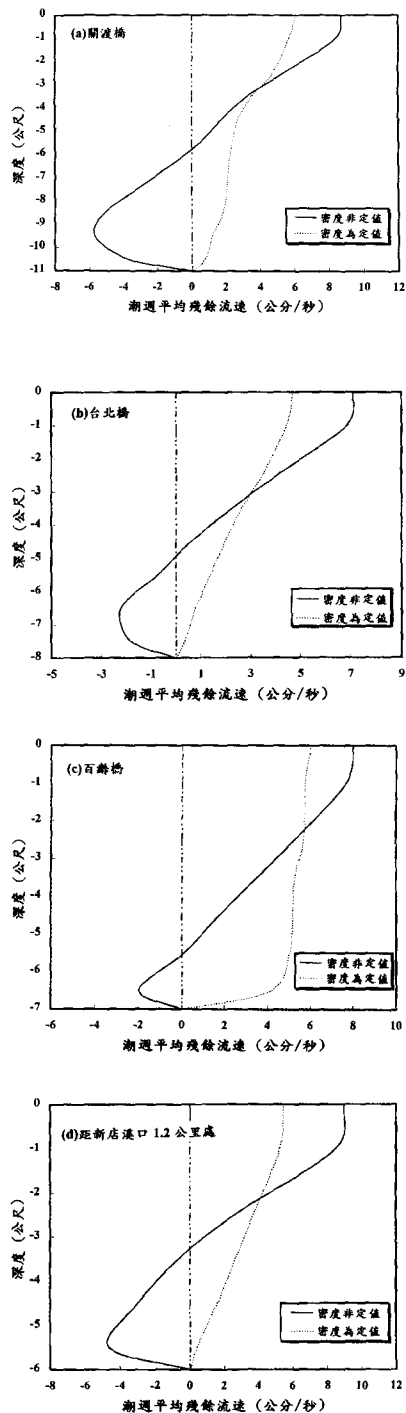


圖 9 有、無密度變化對重力環流之影響(Q_{75} 流量時) (a)關渡橋 (b)台北橋 (c)百齡橋 (d)距新店溪口 1.2 公里處

慮密度變化對河口環流之影響，圖中為 58 個潮汐週期平均殘餘流速(residual current)。當考慮密度變化時，模擬結果可正確反應出重力環流之現象，即正值潮週平均殘餘流速表示退潮，負值潮週平均殘餘流速表示漲潮時期，其中以關渡站之重力環流作用最強。當密度為定常值時，潮週平均殘餘流速永遠為正值，即表示水流方向永遠指向河口處，無重力環流作用。河口環流亦受到上游淡水流量高低之影響，當平均流量且考慮密度變化時，台北橋、百齡橋及距新店溪口 1.2 公里處之潮汐週期平均殘餘流速皆為正值(指向河口方向)，當 Q_{75} 流量且考慮密度變化時，關渡、台北橋、百齡橋及距新店溪口 1.2 公里處等站之潮汐週期平均殘餘流速則呈現二層流(河口環流)現象。當平均流量且考慮密度變化時，關渡橋呈現微弱二層流作用，係因為該站底床較低之故。

圖 10 及圖 11 分別表示平均流量及 Q_{75} 低流量下，有、無考慮密度變化對淡水河一大漢溪、基隆河及新店溪潮週平均鹽分濃度分佈之影響。當有考慮密度變化時，模擬結果可反應出河口區鹽分濃度產生垂直分層之現象，即為底層之鹽分濃度高於表層之鹽分濃度，此現象與淡水河河口區之實測結果相同，當低流量時，表層與底層鹽分分層現象較平均流量時更加明顯；且低流量時鹽分入侵距離較平均流量為長。若密度為定常值時，鹽分濃度產生倒轉之現象，即底層之鹽分濃度低於表層之鹽分濃度，此現象不同於一般河口區鹽分分佈的結果。

圖 12 為平均流量下，有、無考慮密度變化對淡水河一大漢溪、基隆河及新店溪水質(溶氧量)之影響。圖中顯示當河口區密度為定常值時，底層流速較河口區有密度變化時為大，因為河水流動較快，水中溶氧耗損率減低，導致溶氧量增加。有、無密度變化時，於表層之溶氧量差異並不大。

五、結論

本研究利用目前所發展並且應用於淡水河系之垂直二維數值模式，探討河口區有、無密度流對潮流、河口環流、鹽分分佈及水質之影響，

經數值模式模擬結果可獲得以下之結論：

- (1) 有、無考慮密度變化對潮位之影響甚微，對潮差及相位差則幾無改變，因此可知河口水理模式中若未考慮密度流的影響是可以接受的，但若加入質量守恆方程式求解污染物傳輸程序時，則河口密度流的影響應不可被忽略。
- (2) 河口區若未考慮密度流的作用，則河口重力環流現象即消失；若考慮密度流之作用時，仍以近河口處所受之重力環流較強，且受潮流及上游淡水流量之控制。
- (3) 河口區若未考慮密度流之作用，鹽分分佈則呈現倒轉的情形與一般河口垂直鹽分分層現象不同；河口區因有鹽分入侵作用，必定會產生密度環流現象，故河口區密度流在數值模式中的考慮更形重要。

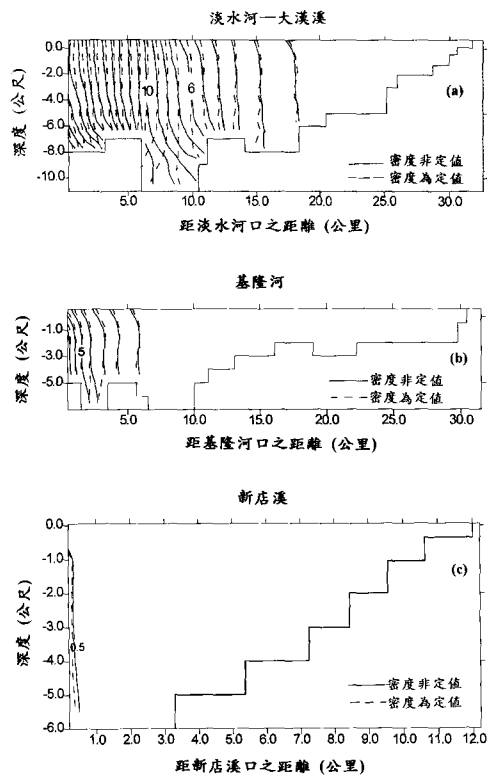


圖 10 有、無密度變化對鹽分分佈之影響(平均流量時) (a)關渡橋 (b)台北橋 (c)百齡橋 (d)距新店溪口 1.2 公里處

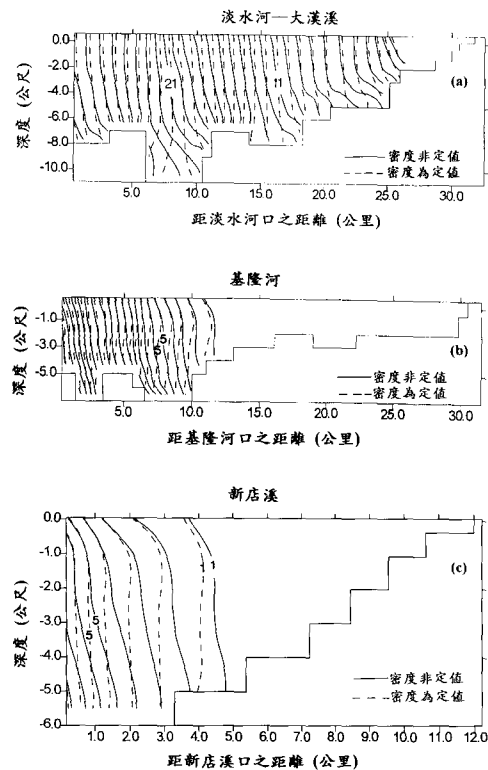


圖 11 有、無密度變化對鹽分分佈之影響(Q_{75} 流量時) (a)關渡橋 (b)台北橋 (c)百齡橋 (d)距新店溪口 1.2 公里處

- (4) 密度與鹽分濃度之相關係數 k 值的大小會影響河口重力環流及垂直混合作用，若未考慮密度流作用時，底層水流動速度增高，將導致底層溶氧量增加較大，於表層之溶氧量差異並不明顯。

六、謝誌

本研究所使用之淡水河系垂直二維數值模式之發展，承蒙行政院國家科學委員會經費補助 (NSC86-2621-E-002-013 及 NSC87-2211-E-002-056) 之部份研究成果，謹致謝忱。

七、參考文獻

1. 陳樹群，「河川動態水質數學模式之建立與應用」，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文，1984。

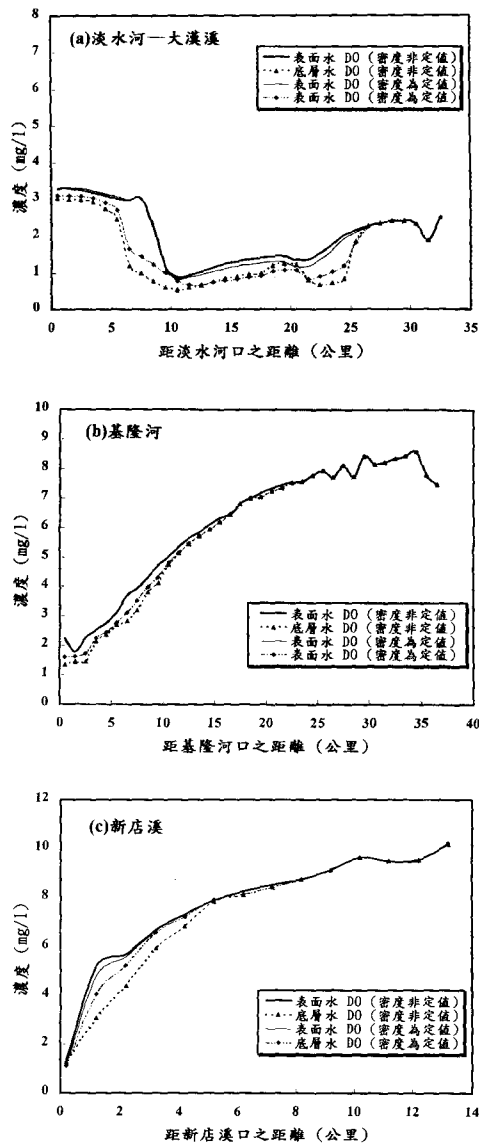


圖 12 有、無密度變化對溶氧量之影響(平均流量時)
(a)淡水河-大漢溪 (b)基隆河 (c)新店溪

2. 柳文成, 「截流系統對基隆河水質影響之研究」, 國立台灣大學農業工程學研究所碩士論文, 1990。
3. 柳文成, 「感潮河系之水理與水質動態傳輸模擬研究」, 國立台灣大學農業工程學研究所博士論文, 1998。

4. 許銘熙、郭義雄、郭振泰、柳文成, 「淡水河系潮流、河口環流與鹽分分佈之研究(一)、(二)」, 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告, 1996、1997。
5. Ambrose, Jr., R. B., Wool., T. A., Connolly, J. P. and Schanz,, R. W., "WASP 4, a hydrodynamic an water quality model-model theory, user's manual, and programmer's guide" EPA/600/3-87/039, ERL, Office of Research and Development, U.S. EPA, Athens, Georgia, 1988.
6. Bengue, J. G., Hanguel, A. and Viollet, P. L., "Flow in river" *Engineering Applications of Computational Hydraulics*, 2: 106-112, 1982.
7. Brown L. C. and Branwell, T. O., "The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: documentation and user manual" U.S. Environmental Agency Technical Report EPA-600/3-87/007, Athens, Georgia, 1987.
8. Baker, R. W., "Solving the shallow water equations using a non-orthogonal curvilinear coordinate system" *Proc. 2nd Int. Conf. On Hydr. And Envir. Modelling of Coast., Estuarine and River Waters, U.K.*, 1, 469-480, 1992.
9. Hydrosience Inc., "Water quality analysis of Potomac River" *Report to the Interstate Commission on Potomac River Basin*, 1976.
10. Hsu, M. H., Kuo, A. Y., Kuo, J. T. and Liu, W. C., "Procedure to calibrate and verify numerical models of estuarine hydrodynamics" *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 125(2), 166-182, 1999.
11. Johson, B. H., "VAHM-A vertically averaged hydrodynamic model using boundary-fitted coordinates" *MP HL-80-3, U.S. Army Egnrgs. Waterway Experiment St. Vicksburg, Miss.*, 1980.
12. Khan, L. A., "Calibration of salinity intrusion

- model of the Karnuafl river with sparse field data”, *Hydraulic and Environmental Modelling of Coastal, Estuarine and River Waters, Proceedings of the International Conference*, 1989.
13. Kuo, A. Y., Neilson, B. J., and Park, K., “A modelling study of water quality of the upper tidal Rappahannock river” *Special Report in Applied Marine Science and Ocean Engineering No. 314*, Virginia Institute of Marine Science, Gloucester Pt. VA, 1994.
 14. Leendertse, J. J., “A water quality simulation model for well-mixed estuaries and coastal seas: Vol. I, principles of computations”, *Memorandum RM-6230-RC, Rand Corporation, Santa Moinca California*, 1970.
 15. Leonard, B. P., “A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 19, 59-98, 1979.
 16. Muim, M. and Spaulding, M., “Two-dimensional boundary-fitted circulation model in spherical coordinates” *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 122, NO. 9, 512-521, 1996.
 17. Nguyen, K. D. and Ouahsine, A., “2D numerical study on tidal circulation in Strait of Dover” *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 123, NO. 1, 8-15, 1997.
 18. Park, K. and A. Y. Kuo, “A vertical two-dimensional model of estuarine hydrodynamics and water quality”, *Spec. Rep. App. Mar. Sci. and Ocean Engrg.* 321, Virginia Institute of Marine Science, Gloucester Pt. VA. 47p, 1993.
 19. Spaulding, M. L., “A vertically averaged circulation model using boundary-fitted coordinates” *J. Physical Oceanography*, 14, 973-982, 1984.
 20. Sheng, Y. P., “Numerical modeling of coastal and estuarine process using boundary-fitted grids” in *3rd Int. Symp. On River Sedimentation*, 1426-1442, 1986.
 21. Stelling, G. S., Wiersma, A. K. and Willemse, J. B. T. M., “Practical aspects of accurate tidal computations” *J. of the hydraulic division, ASCE*, 112(9), 1986.
 22. Willemse, J. B. T. M., Stelling, G. S., and Veboom, G. K., “Solving the shallow water equations with an orthogonal coordinate transformation” *Int. Symp. on Computational Fluid Dyn., Delft Hydr. Communication No. 356, Jan. 86, Delft Hydraulics Laboratory, Delft, The Netherlands*, 1995.

收稿日期：民國 87 年 12 月 29 日

修正日期：民國 88 年 3 月 11 日

接受日期：民國 88 年 3 月 15 日