

# 連雲港污染物擴散數值類比

龔政<sup>1</sup> 葉姍霈<sup>2</sup> 陳永平<sup>3</sup> 高家俊<sup>4</sup>

## 摘要

應用沿深平均二維潮波模型對海州灣及其南部連雲港水域進行了數值類比，分析了連雲港水域的潮波特性。在此基礎上，應用沿深平均二維擴散方程對連雲港水域的污染物擴散進行了數值類比，得到了港池域內水體的半交換期，並比較分析了大、小潮及西大堤對此的影響。最後，選擇了 COD 作臨洪口的污染指標，建立了臨洪口點源連續排放遠區擴散模型並進行了類比，得到了高、低潮的濃度場，比較分析了西大堤對灣頂平均濃度的影響。

## Numerical modeling of pollutant dispersion in Lianyun Harbor

Zheng Gong Sun Pei Yeh Yong Ping Chen Chia Chuen Kao

## ABSTRACT

On the basis of the depth-averaged 2-dimensional tidal model, flow field in Haizhou Bay and Lianyun Harbor is simulated and the tide feature is also analyzed. Based on the depth-averaged 2-dimensional dispersion equation, pollutant dispersion in Lianyun Harbor is simulated. The half-exchange-period of water in Lianyun Harbor is presented and the effects of spring tide, neap tide and west embankment is considered. At last, COD is selected as the pollution index of Lin Hongkou, where the point source continuous discharge far-region model is used and pollutant concentration field at high level and low level is simulated. Also, the effects of West Embankment on average pollutant concentration in bay-head is analyzed.

## 一、緒論

連雲港位於江蘇省東北角、海州灣的南側，是我國重要的海港之一，受東西連島掩護形成東、西口門。1984 年的港口擴建方案確定建造西大堤將西口門封堵，形成半封閉的港域。隨著航運事業的發展，貨物集散量大、頻繁，在港內和港外出現船隻事故的潛在可能性大，若船隻裝有可溶性有毒物生時，出現泄漏或傾泄入海，有毒物質隨潮流輸移擴散，則釀成海洋污染事故；另外，位於西口門西側

的臨洪口是城市生活的主要排污口，其附近水域的物理自淨能力的強弱直接影響到該水域的水環境質量。鑒於上述原因，有必要研究港內及臨洪口排污口水域的污染物擴散輸移機制及其物理自淨能力。

在連雲港擴建工程前後，曾對連雲港局部的潮流場進行了大量的研究(趙、張,1990;張等,1990)，建立了有效的二維潮流數學模型，筆者也曾應用三維潮流數學模型研究了海州灣大範圍及連雲港局部的潮流特性。隨著連雲港附近水域及港池內污染狀況的日趨嚴重，本文採用 ADI 法對連雲港附近水域及港池內的潮流及污染物擴散進行了數值類比，進一步研究環境工程措施提供技術支援。

## 二、數學模型

1. 南京河海大學交通與海洋工程學院博士班研究生
2. 國立成功大學水利及海洋研究所碩士班學生
3. 南京河海大學交通與海洋工程學院碩士班研究生
4. 國立成功大學水利及海洋研究所教授兼系主任

## 2.1 潮波模型及其差分格式

由於本文關心區域的水深較小，流速垂向分佈較均勻，因此，依據 Leendertse, J.J. (1970) 的非線性二維潮波模式建立了潮波數學模型，沿深平均的二維水流運動方程和連續方程為：

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV + g \frac{\partial \xi}{\partial x} - A_h \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) + \frac{gU \sqrt{U^2 + V^2}}{(\xi + h)C^2} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU + g \frac{\partial \xi}{\partial y} - A_h \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) + \frac{gV \sqrt{U^2 + V^2}}{(\xi + h)C^2} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(\xi + h)U] + \frac{\partial}{\partial y} [(\xi + h)V] = 0 \quad (3)$$

$$\text{岸邊界條件：}(U, V)_n = 0 \quad (4)$$

$$\text{水邊界條件：}\zeta = \zeta(X_w, Y_w, t) \quad (5)$$

其中， $(X_w, Y_w)$  水邊界點的座標，本文由二維東中國海潮波模型(張、張，1996)提供水邊界水位。本文不考慮風的作用，底摩擦應用二次方率，即：

$$\tau_{x,y}|_{z=-h} = \frac{g}{C^2} (U, V) \sqrt{U^2 + V^2}$$

$$C = \frac{1}{n} H^{1/6}$$

$C$  為 Chezy 係數， $n$  為 Manning 係數， $H$  為全水深。 $U, V$  為沿深平均的水平向流速， $A_h$  為自海面至海底平均的水平紊動粘滯係數。由於水平混合項比海底摩擦力小，計算時可將水平混合項自運動方程中剔除，隔一定時間(文中取  $12 \Delta t$ ) 後另行計算、發揮光滑化作用，差分計算式

$$U^{n+1/2} = (1 - 4D)U^{n+1/2} + 4D \cdot \overline{\overline{U^{n+1/2}}} \quad (6)$$

$$V^{n+1} = (1 - 4D)V^{n+1} + 4D \cdot \overline{\overline{V^{n+1}}} \quad (7)$$

式中， $n$  表示時間層， $\cdot$  表示流速點周圍相應流速的四點平均， $\overline{\overline{\cdot}}$  表示因水平混合項經光滑後的流速， $D$  為光滑函數

$$D = \frac{A_h \Delta t}{\Delta s^2}, \quad A_h = \varepsilon \cdot (\Delta s)^{4/3}$$

常數  $\varepsilon$  取 100， $\Delta s$  為網格步長。

潮流場的計算採用的差分方法，隱式方向交法替法 (ADI 法)，是目前廣泛使用的一種差分近似演算法，採用交錯網格進行離散，最後形成具有三對角矩陣的線性代數方程組，採用 TDMA(金，1989) 演算法進行求解。

## 2.2 物質擴散模型基本方程

沿深平均的二維物質擴散方程：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} [(\xi + h)C] + \frac{\partial}{\partial x} [(\xi + h)UC] + \frac{\partial}{\partial y} [(\xi + h)VC] \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\xi + h)K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\xi + h)K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right] + R \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{岸邊界條件：} K_n \frac{\partial C}{\partial n} = 0$$

水邊界條件：

a、流出計算域時，

$$\frac{\partial}{\partial t} [(\xi + h)C] + \frac{\partial}{\partial x} [(\xi + h)UC] + \frac{\partial}{\partial y} [(\xi + h)VC] = 0$$

b、流入計算域時，根據域內濃度場一般呈指數分佈的規律，由域內的濃度值外插得到邊界線的域外濃度，插值公式：

$$C^* = C_M \text{Exp} \left[ -(\ln C_M - \ln C_D) \left( \frac{D + \Delta s}{D} \right)^2 \right]$$

式中， $C^*$  為邊界上風點的入流濃度， $C_M$  為域內沿某一方向的濃度最高值， $C_D$  入流邊界上的濃度， $D$  入流邊界點至域內濃度最高點的距離， $\Delta S$  空間網格步長。

初始條件：

$$C = C_0(x, y)$$

其中， $C$  為物質的濃度

$$C = \frac{1}{H} \int_h^z \rho_A dz, \quad R = \int_h^z S_A dz$$

$K_x, K_y$  是物質擴散係數。

$\rho_A$  為海水中汙物密度，即單位體積海水中所含汙物質量； $S_A$  為污染源函數，即單位體積水中汙物質量的生成速度，它是由污染源排出，或是由化學變化生成，本文只考慮前者。 $(K_x, K_y)$  為在垂直平均意義下汙物的擴散係數在  $x, y$  方向的分量， $K_n$  其在岸界法線方向的分量。本文採用 Elder 公式：

$$K_x = 5.9H|U|g^{1/2}C, \quad K_y = 5.9H|V|g^{1/2}C$$

其中， $C$  為 Chezy 係數。擴散方程差分方法與流場計算差分方法類似，採用隱式方向交替法進行離散。

### 三、計算實施

#### 3.1 計算區域及計算網格

本文類比區域為：東西向  $119^{\circ}10' - 120^{\circ}03' E$ ，距離  $80.5 km$ ；南北向  $34^{\circ}24' - 35^{\circ}28' N$ ，距離  $118.6 km$ 。整個計算域應用三重矩形交錯網格進行離散，其尺度分別為  $1' \times 1', 0.5' \times 0.5', 0.1' \times 0.1'$  (圖 1)。

#### 3.2 計算中選用的參數

Manning 係數  $n=0.025$ ；

潮波計算時間步長  $\Delta t=15$  秒；

為了計算方便，擴散方程與潮波動力方程同時計算，採用相同時間步長  $\Delta t=15$  秒。

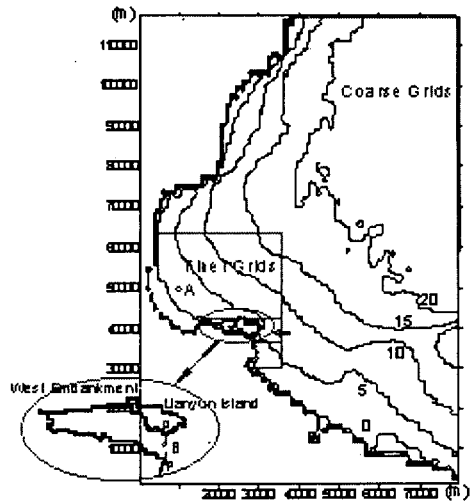


圖 1 計算區域及網格式示意圖

### 3.3 潮型選擇

大潮：2000 年 9 月 29 日 21 時~30 日 21 時 45 分；

小潮：2000 年 10 月 6 日 2 時~7 日 3 時 45 分。

## 四、計算結果

### 4.1 潮波模型驗證

流速驗證點位於連雲港口門 P-P 斷面深槽(圖 1 中的 B 點)，水位驗證點位於 P-P 斷面南岸側(圖 1 中的 C 點)，大潮和小潮流場分別進行驗證。從圖 2~圖 7 中可以看出，潮位和流速的計算值和實測值均吻合較好，而且，通過觀察大、小潮的潮位、流速過程線(圖 8、圖 9)可以看出，在高、低潮位時流速最小，而在平潮時流速達到最大值，表明港池內的潮波顯示出駐波的性質，該結論與文獻(Gong)中的結果是一致的。良好驗證結果進一步進行潮流場計算和污染物擴散計算提供了保證。圖 10、圖 11 分別為連雲港港內水域漲急和落急的流場圖。

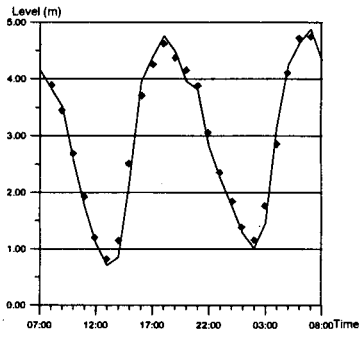


圖 2 大潮水位驗證

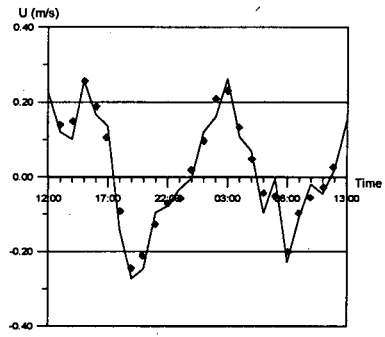


圖 6 小潮流速 U 驗證

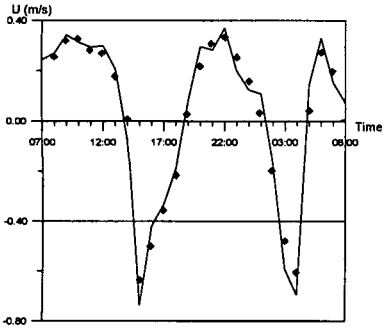


圖 3 大潮流速 U 驗證

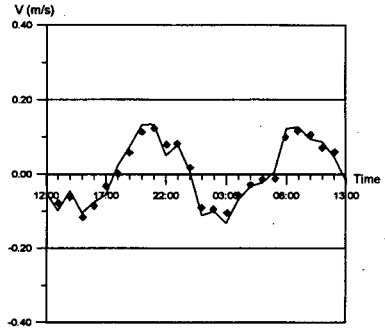


圖 7 小潮流速 V 驗證

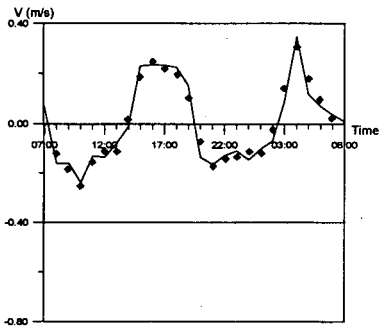


圖 4 大潮流速 V 驗證

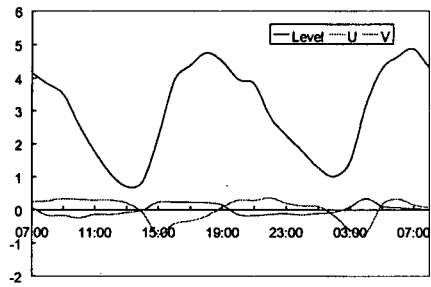


圖 8 大潮潮位、流速過程線

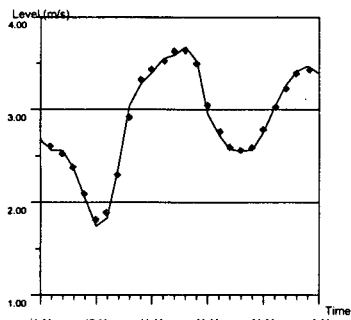


圖 5 小潮水位驗證

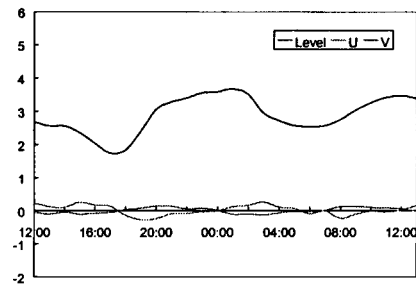


圖 9 小潮潮位、流速過程線

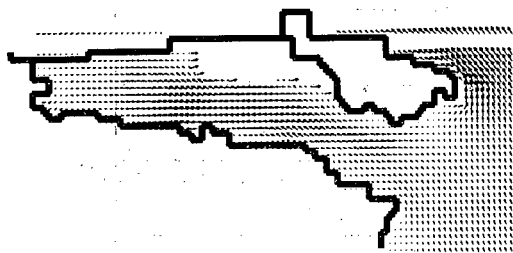


圖 10 大潮漲急流場圖

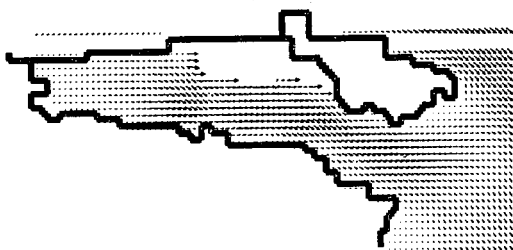


圖 11 大潮落急流場圖

#### 4.2 連雲港半封閉水域水交換周期

水體自淨有三種類型：物理淨化、化學淨化和生物淨化，其中，物理自淨在基建專案選址中相當重要，它是由於水體的稀釋、混合、擴散、沈積、沖刷、再懸浮等作用而使污染物濃度降低的過程。對於海灣之類的半封閉水域引進水交換周期的概念，能客觀地比較水域水體更新的快慢程度，在實用中，多採用半交換周期。因此，本文考慮物理自淨作用下的水體半交換周期(張等，1998)。

為了分別研究大潮和小潮對連雲港水域水體半交換周期的影響，本文分別採用大潮潮周期迴圈和小潮潮周期迴圈計算。文中以圖 1 中 P—P 斷面將該水體劃分為西部灣內水體和東部灣外水體。假設灣內原水初始濃度  $C_{i0}$  為均勻分佈，且  $C_{i0}=1.0$ ；灣外新水的初始濃度  $C_{e0}$  也均勻分佈，且  $C_{e0}=0.0$ 。在水交換的過程中，灣內的水質不斷更新，濃度逐漸小，灣內平均濃度變為： $0 < \bar{C}_t < 1$ 。圖 12 和圖 13 中曲線 a 分別為大潮和小潮連雲港域內水體平均濃度的歷時曲線。可以看出，大潮時濃度降低較快，半交換大約是 80 個潮時；小潮時濃度降低要慢得多，半交換期大於 140 個潮時，這也表明了大潮對連雲港域內水體物理自淨能力的作用遠強於小潮的

作用。

為了研究西大堤對域內水體交換的影響，暫時不考慮無西大堤時港內地形的變化(即採用的地形與有西大堤時一樣)，文中類比了在沒有西大堤情況下大潮、小潮時(圖 12、13 曲線 b)水體交換情況。可以看出，沒有西大堤時域內水體交換強度會大大增強，同時，大潮對水體的交換作用仍強於小潮。

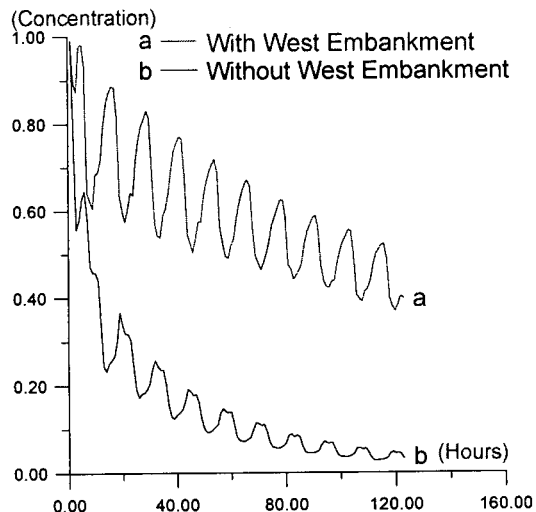


圖 12 大潮港池內濃度歷時取曲線

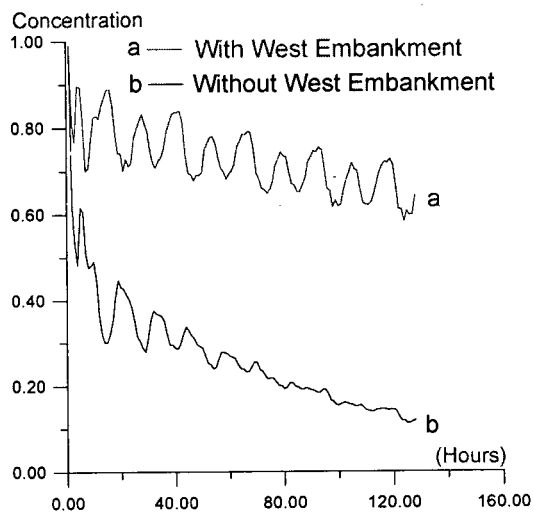


圖 13 小潮港池內濃度歷時曲線

#### 4.3 臨洪口點源連續排放的遠區擴散類比

臨洪口是連雲港地區工業和生活污水的一個主要排放口（位置見圖 1 中點 A，水深理論基準面以下 20cm），直接影響到人們的日常生活和海洋養殖業等經濟活動。因此，有必要研究該排放口附近的濃度場分佈狀況。計算採用點源連續排放方式，COD 為本文選的液體污染指標，排放流量為  $100\text{ g/s}$ 。圖 14 和 15 分別為大潮、連續投放第 5 個潮周期的高潮、低潮時濃度分佈。由文獻可知，在臨洪口附近的灣頂地區，潮流基本為往復流，漲潮流為 W-S 方向，落潮流為 N-E 向，而且在漲潮時近岸地區產生沿岸流。從圖中可以看出，高潮時漲潮流使濃度等值線向岸邊推進，並由沿岸流的攜帶作用使濃度沿岸線分佈開，另外，與低潮時相比，排放點附近的濃度較低，這主要是由於排放點靜水深很小，高潮 5m 的振幅極大得減小了排放點附近的濃度；低潮時落潮流將濃度等值線作離岸拉伸，沿岸流的作用明顯減小，此時排放點的水深達到最小值（約 0.5m），因此在排放點附近出現了相對於高潮時的高濃度區。

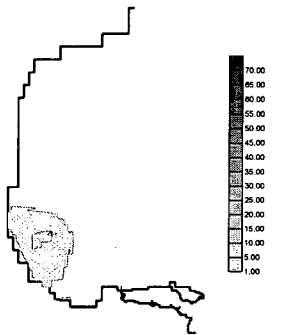


圖 14 臨洪口高潮濃度分佈

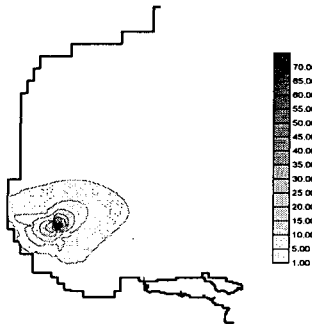


圖 15 臨洪口低潮濃度分佈

爲了研究西大堤對臨洪口附近水域物理自淨能力的影響，本文對無堤情況下臨洪口水域濃度分佈進行了類比，大潮高、低潮時的濃度分佈分別見圖 16、17。與有西大堤情況比較可以看出，高潮漲潮流時總體濃度分佈變化不大，只是由於港內的東向流對灣頂漲潮流起到了分流的作用，使濃度等值線略微向 S-W 方向偏移；低潮落潮流時港內的西向流動有助於污染物離岸運移，因此，岸邊附近的濃度明顯降低。因此，沒有西大堤時有助於污染物的離岸輸移。

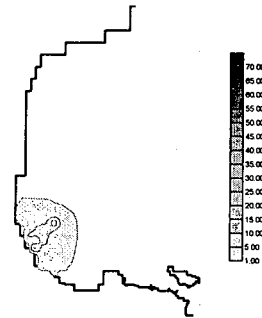


圖 16 高潮、無堤臨洪口濃度分佈

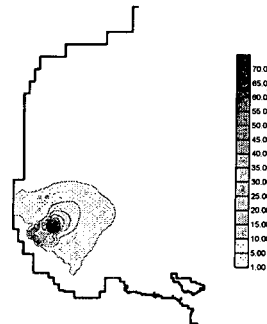


圖 17 低潮、無堤臨洪口濃度分佈

爲了研究西大堤對灣頂平均濃度的影響，本文將有堤、無堤兩種情況下的灣頂平均濃度進行了對比（圖 18），可以看出，兩條曲線基本重合，說明西大堤對灣頂平均濃度的影響很小。

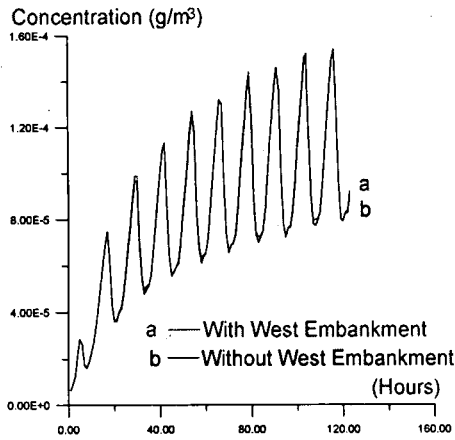


圖 18 有、無西大堤灣頂平均濃度歷時曲線

## 五、結論

綜上所述，可得如下結論：

1. 修建西大堤後，連雲港港內潮波特性基本為駐波型。
2. 潮對連雲港港內水體的淨化作用強於小潮；無西大堤時港內水體物理自淨能力明顯強於有西大堤時。
3. 洪口灣頂地區漲潮留在岸邊產生沿岸流有助於污染物作沿岸輸移；漲潮時污染物向岸輸移，落潮時離岸輸移。
4. 若無西大堤，漲潮時濃度場變化不明顯，港內東向流略微使污染物向 S-W 運移；落潮時變化相對較大，港內西向流使污染物遠離岸邊。
5. 有堤和無堤情況下灣頂平均濃度基本一樣，西大堤對灣頂平均濃度的影響很小。

## 參考文獻

1. 趙士清、張鏡潮(1990) "連雲港潮流的數值類比"，連雲港回淤研究論文集，河海大學出版社，133 頁-140 頁。
2. 張二駿、張東生、高飛、華祖林(1990) "連雲港水域流場數值類比"，連雲港回淤研究論文集，河海大學出版社，141 頁-153 頁。
3. 張東生、張君倫(1996) "黃海輻射沙洲的  $M_2$  潮波"，河海大學學報，24(5)：35。
4. 金忠菁(1998) "N-S 方程數值解和紊流模型"，南京河海大學出版社。

5. 張東生、徐靜琦、王震(1998) "環境工程"，人民交通出版社。
6. Gong, Z. "A 3-Dimensional Numerical Model of Haizhou Bay", *The 29th IAHR Congress Proceedings*, Vol (Student Paper Competition) : 273
7. Leendertse, J. J. (1970) "A water-quality simulation model for well-mixed estuaries and coastal seas," Vol.I, Principles of Computation.