

# 珠江河口潮能及其耗散的空间分布\*

倪培桐<sup>1,2</sup>, 韦 惺<sup>3</sup>, 刘 欢<sup>1</sup>

- (1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510630;  
2. 中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275;  
3. 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州 510301)

**摘 要:** 基于 SELFE 的珠江河口 3D 数学模型, 统计了珠江河网-河口湾的能量通量与能量耗散。从能通量和能耗分布特征看, 珠江河口可以分为伶仃洋-虎门水域、磨刀门河口水域区、黄茅海-潭江水域、网河区水域。潮能通量与耗散特征与珠江口滩槽地形分布特征大体一致。上述各区域存在‘门’等高能耗局部地貌单元, 其单位面积能耗比附近水域的高数倍甚至 1~2 个数量级。

**关键词:** 珠江河网; 河口湾; 能量通量与耗散

**中图分类号:** TV148 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2012) 01-0128-05

## Distribution of Energy Flux and Dissipation of the Pearl River Estuary

NI Peitong<sup>1,2</sup>, WEI Xing<sup>3</sup>, LIU Huan<sup>1</sup>

- (1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510630, China;  
2. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;  
3. CAS Key Laboratory of Tropical Marine Environmental Dynamics, Guangzhou 510301, China)

**Abstract:** Based on a 3D hydrodynamic model developed on SELFE, the tidal energy fluxes and dissipation of the Pearl River estuary were discussed. The results showed that the tidal energy flux distribution corresponded to the topography beneath water in the estuary, and the Pearl River estuary can be divided into four zones: Lingdingyang-Humen zone, Modaomen estuary zone, Huangmaohai-Tanjiang zone, and river net zone. There existed a hot spot zone (called “men” in Chinese) with high energy dissipation, about 1~2 order magnitude higher than the nearby water area, in these zones.

**Key words:** the Pearl River delta; estuary; tidal energy flux; dissipation

在近岸河口区域, 由于地形边界对海洋和河流动力的重塑作用, 使得动力场和能量场的空间重新分布, 河口区能量的耗散特点等受到了巨大改变。能量耗散主要通过底摩擦实现, 底摩擦能耗表示为拖曳系数与摩阻流速三次方的乘积, 这表明摩阻流速的微小变化将导致底摩擦能耗较大甚至是数量级的变化。河口海岸深槽和浅滩流速分布的不均匀, 导致深槽和浅滩能耗的巨大差异。特殊地形与潮流的相互作用及其在区域能量耗散中占的地位逐渐成为人们关注的热点问题。Zhong 和 Li<sup>[1]</sup>在对切萨皮

克湾 (Chesapeake Bay) 的潮能耗散研究中发现进入湾内约 40% 的能量消耗在湾口岬角、Rappahannock 基岩地形、Bay Bridge 附近收窄段和湾顶缩窄段等 4 个高能耗区。Foreman 等<sup>[2]</sup>对 Vancouver 岛附近水域的 M<sub>2</sub> 潮能耗散研究发现能量主要耗散在湾内峡谷、圣胡安群岛 (San Juan Islands)、Juan de Fuca 海峡等地形形态极具变化的区域, 进一步表明了形态对能量耗散影响的重要性。Argot M. L. 等、Carbajal 等对 Gulf of California 的研究表明大部分潮能耗散在 Colorado 河三角洲的浅水地区,

\* 收稿日期: 2010-12-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41006050); 广东省科技计划资助项目 (2010B03080004)

作者简介: 倪培桐 (1971 年生), 男, 高级工程师; E-mail: nipeitong@163.com

如 Ballenas Channel、Salsipuedes Sill、Colorado 三角洲是高耗能区<sup>[3-4]</sup>。文献 [5] 则发现北太平洋东部的海底山附近浅水区的动能耗散是远离海底山处的 100 ~ 1 000 倍。文献<sup>[6]</sup> 等研究了 Columbia Sechelt Inlet 基岩潮能耗散，潮流经过水深较浅的基岩，潮位振幅减小和相位滞后，能量主要通过摩擦作用耗散，5% 的能量通过潮汐表面射流耗散，0.5% 的能量通过内潮耗散。

珠江河口和三角洲基岩岛屿众多、地形边界复杂是其有别于世界其他河口的重要特征之一（图 1）。这些复杂的地形边界形成八大口门，控制径流、潮流的传播形式，产生了复杂的平均流结构，影响其微结构及湍流特性，并形成稳定的能量耗散模式<sup>[7-11]</sup>。本文基于 SELFE，建立三维水动力模型，从宏观上分析珠江河口的潮能通量和耗散的空间分布规律及能耗特性<sup>[12]</sup>。

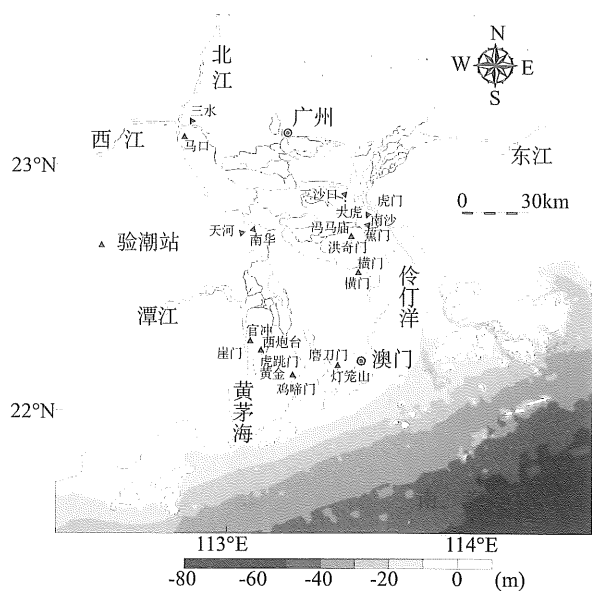


图 1 珠江河口三角洲网河-河口湾系统  
Fig. 1 The Pearl River Estuary System

## 1 模型建立及验证

为探讨珠江河口能量通量与耗散空间分布特征，本文基于 SELFE 建立了珠江河口三维数值模型。SELFE 是 M. Baptista 等发展的半隐式欧拉-拉格朗日有限元模型<sup>[13]</sup>，其水动力模块是一个基于静压和 Boussinesq 近似的三维斜压原始方程模式，垂向采用 S-Z 坐标。模型计算范围包括河网区、河口湾区和近海水域，计算范围及网格见图 2。模型采用三角形网格，网格数约 21.5 万，节点数约 12.5 万，

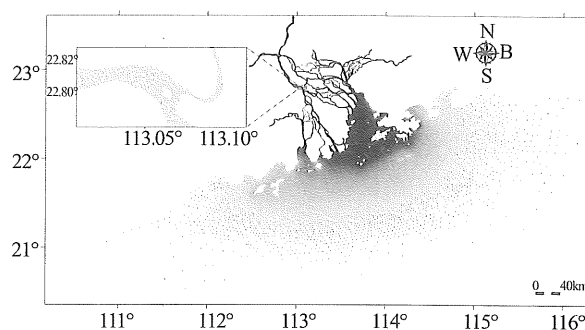


图 2 模型计算网格

Fig. 2 Computing grids of the model

垂向分 10 层。网河区地形资料采用 1997 和 1999 年 1:5 000 河道地形图、河口区及大陆架区采用 2001 年 1:10 000 水下地形图及海图。模拟时段为 2001 年 2 月 7 日 14:00 - 16 日 8:00。期间马口、三水流量为 2 085 m<sup>3</sup>/s、667 m<sup>3</sup>/s，接近马口、三水进入珠江三角洲的多年平均枯水流量。外海边界条件采用 MIKE21 Toolbox 的潮位预报数据；上游边界采用同步实测水位或流量数据。湍流相关系数采用 GOTM 代码计算。床面糙率高度取值取 0.001 4 m，计算时间步长 60 s。

选取珠江水利委员会水文局 2001 年 2 月珠江三角洲网河河道同步水文测验 24 个潮位站和 16 个流量站对计算结果进行水位和流量验证，验证站点分布见图 1，验证结果参见文献 [12]。验证结果显示，水动力模型模拟的水位过程，包括潮差、涨落潮历时等方面，都与实测值较为接近，流量过程线也与实测值较为吻合。各站点的水位平均绝对误差在 0.03 ~ 0.1 m，不超过 0.1 m，计算的落潮流量相对误差在 0.03% ~ 0.27%，涨潮流量的相对误差在 0.01% ~ 0.36% 之间。表明模型较好地反映该区域的水动力特性，为进一步分析河口地区的能量通量和能量耗散数值基础。

## 2 潮波传播特征

潮汐调和分析显示  $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$  为珠江三角洲最主要的 4 个分潮，其中又以  $M_2$  分潮所占的比重最大，其次为  $K_1$ 、 $O_1$  分潮。潮波在传播过程中所表现的特征主要为：受河道摩擦的非线性作用及上游下泄径流的阻尼作用，潮波发生变形、衰减，且越往上游，这种影响越明显；而不同频率的潮波衰减的程度不同，其中高频潮波衰减得较快，频率较低的波衰减得相对较慢，即半日潮波衰减得快，全日潮波衰减得相对较慢。

图 3 中的  $M_2$ 、 $K_1$  分潮潮波传播即表现出这一规律：总体上， $M_2$  和  $K_1$  分潮的振幅都是口门附近及狮子洋段变化较小，越往三角洲的上游受河道摩擦的非线性作用及径流的作用越大，潮波快速衰减；只是不同位置其振幅减小幅度不同，不同分潮，其潮波振幅减小不同。从潮波振幅的大小来

看，狮子洋附近站点振幅最大，其次为崖门；从空间的变化率来看，等振幅线密集区主要包括西北江三角洲网河上段、紫洞下段区域、三善溜下段区域、天河下段区域。两分潮的衰减速率相比较， $M_2$  分潮振幅从口门到三角洲顶点的衰减速率比  $K_1$  分潮快。

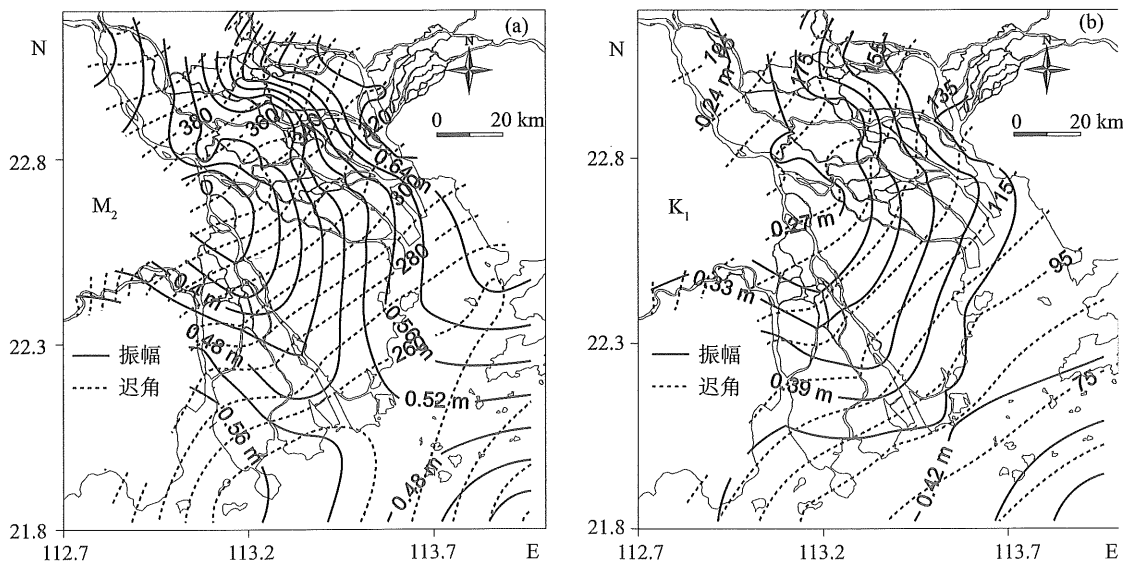


图 3  $M_2$ 、 $K_1$  分潮等振幅、迟角线图

Fig. 3 The map of the amplitude (solid line) and epoch (dash line) of  $M_2$  and  $K_1$  constituent

### 3 潮能通量与耗散分布

#### 3.1 潮能通量

潮能通量，又称能通量密度，是单位时间通过自海底至海面单位宽度断面的潮能<sup>[8-9]</sup>。潮能通量与流速、水深、水位有关。表示为

$$\rho \vec{U} D (\vec{U}^2 / 2 + g \eta) \quad (1)$$

其中， $\rho$  为水体密度， $D$  为海底自海面的总水深， $\vec{U}$  为速度， $\eta$  为水面围绕静止水面的波动值， $g$  为重

力加速度。

将 7 个潮周期的潮波进行平均并对潮能通量进行统计。从能量通量的空间分布上看，潮能通量在主槽大，滩地潮能通量较小，潮能通量传播方向与河口地形走向基本一致。统计结果显示：外海向伶仃洋、黄茅海、磨刀门潮能通量分别约为 219.7、47.5 和 20.82 MW，大部分潮能在河口湾区耗散，通过八大口门向上游传播的潮能只有外海输入能量的 1/3 (表 1)。

表 1 能量通量统计 (MW)<sup>1)</sup>

Table 1 The data of energy flux in the Pearl River Estuary

项目	横门	洪奇沥	蕉门	虎门	崖门	虎跳门	磨刀门	马口	三水
2001.2 枯水	6.19	4.37	11.06	48.24	19.68	2.74	11.92	-1.97	-0.35
“98.6” 洪水	-40.25	-29.95	-75.9	-23.06	-1.04	-3.84	-38.41	-1 922.25	-737.74

1) 方向指向上游为正

潮能传播受局部地形的影响较大。“伶仃洋-虎门”水域潮能沿东槽和西槽往北传播，在虎门口门川鼻水道汇聚后，进入狮子洋。潮能通量在虎门

口门处最大，往北潮能通量缓慢回落，一直到黄埔潮能通量仍然较高。“磨刀门河口”水域潮能的传播方向、大小与磨刀门河口地形走向基本一致。潮

能沿河口深槽自南往北传播，往北潮能通量缓慢回落。磨刀门河口两侧及拦门沙浅滩水体较浅，潮流流速低滩能量通量也很小。黄茅海-潭江水域，表现为在河口湾湾顶、河道主槽、峡口区域潮能通量都较大，滩地较小，潮能通量传播方向与河口地形走向大体一致。枯季潮能通量沿黄茅海河口湾主槽往北传播，随着黄茅海河口湾水面宽度从湾口到湾顶逐渐束窄，沿程过水面积逐渐减小，导致能量集聚。能量通量从三角山向崖门逐渐增大，在崖门附近由于边界突然缩窄，能量通量出现明显峰值。在进入银洲湖后能量通量逐渐降低。由于纵剖面地形形成波动变化，能量通量沿程变化也非常复杂。

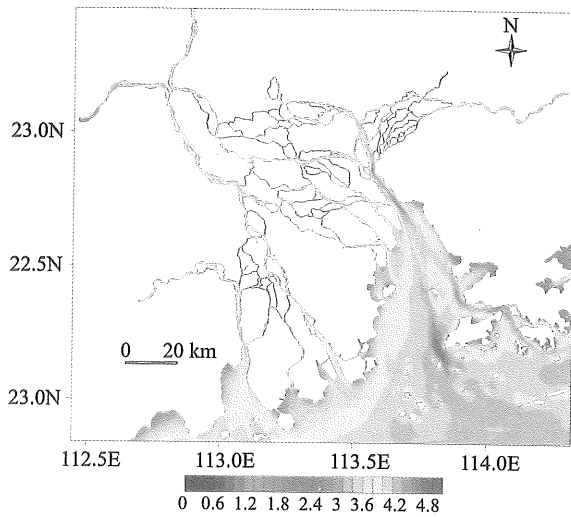


图 4 珠江河口三角洲潮能通量分布  
Fig. 4 Distribution of energy flux of the Pearl River estuary

### 3.2 潮能耗散

将能量方程对自由表面  $S$  包围的控制体积  $V$  积分，可以分析潮平均条件下控制体的能量耗散构成<sup>[1]</sup>，分别为：

- 1) 水体表面和床面底摩擦耗散：

$$\iint [\vec{u}_s \cdot \vec{\tau}_s - \vec{u}_b \cdot \vec{\tau}_b] dS;$$

- 2) 垂向涡动扩散有关的能耗：

$$\iint \left\{ \frac{1}{T} \int_{-H}^{\eta} K_v \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] dz dt \right\} dS;$$

- 3) 正压潮能水平扩散：

$$- \iiint \rho \left[ K_H \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \right] dV。$$

其中， $u(x, y, z)$ 、 $v(x, y, z)$  为水流速度， $\vec{\tau}_s$  和  $\vec{\tau}_b$  分别表示表面和床面摩擦力， $K_H$  是水平涡动粘滞系数， $K_v$  垂向涡动粘性系数，角括号代表潮平均。 $\eta(x, y, t)$ ，自由水面高程； $h(x, y)$ ，地形深度；

$\rho(x, y)$  水流密度。

河口三角洲 7 潮平均能耗的空间分布 (图 5) 显示：总能耗分布总体上与地形分布一致，深槽能耗大，浅滩能耗相对小。伶仃洋-虎门水域，自内伶仃岛到-黄埔纵剖面能量耗散纵向上湾顶逐渐增大，到虎门口能量耗散最大，向狮子洋变小。黄茅海-潭江水域，三角山附近的河口湾区单位面积耗散率较低 (约  $0.1 \text{ MW}/\text{km}^2$ )，单位面积总能量耗散到崖门口附近达到最大值 (约  $0.26 \text{ MW}/\text{km}^2$ )，向崖门水道变小，进入石咀上游弯曲水道能耗率变大 (约  $0.09 \text{ MW}/\text{km}^2$ )，然后向上游减小。磨刀门水域，河口能量耗散率较低，到挂定角附近最大，

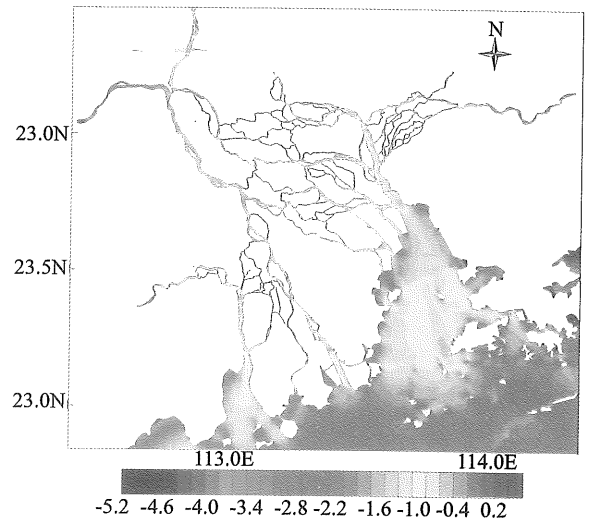


图 5 珠江河口三角洲能量耗散分布 (7 潮平均)  
Fig. 5 Distribution of energy dissipation per unit area of the Pearl River estuary

向上游变小，灯笼山附近 (江心洲地形) 能量耗散率又变大。三项能耗项中，底摩擦能耗是最重要的能耗项，约占总能耗的 70% 以上，垂向扩散能耗约占 25% 左右，水平扩散能耗与其余两项相比是小量。

### 3.3 潮能通量与能耗空间分布的影响因素

1) 地形因素。南海潮波从陆架传入珠江河口的能量主要消耗在河口湾区，仅小部分通过口门向上游河网传播，潮汐能量通过床面摩擦、内摩擦等作用逐渐耗散，其中地形影响能通量和耗散的空间分布。从潮能通量和耗散的空间分布上，可以把珠江河口分为伶仃洋-虎门-狮子洋水域、黄茅海-潭江水域、磨刀门河口水域、网河区水域。从数学与物理上看，能量过程与动力过程可以互相解释，是一个过程的不同解释。

珠江河口4个能量通量与能耗的分区表明, 潮波珠江河口的传播与变形存在空间差异。事实上, 虽然“伶仃洋-虎门”水域与“黄茅海-潭江”水域地形与动力结构方面有部分共同点, 如都有喇叭形的河口湾、潮流作用较强、平均水位较低、存在“门”的双向射流等; 但潮差的沿程分布特点有较大差别, 伶仃洋-虎门-狮子洋水域的潮差湾口到湾顶增大, 然后向上游降低。而“黄茅海-潭江”水域潮差自湾口到湾顶减小, 然后向上游增大。从地形上看“伶仃洋-虎门”水域相对较深, 且东西深槽水深都超过10 m, 有利于潮波传播。“黄茅海-潭江”水域地形较浅, 中部拦门沙仅2.4~3.0 m。

磨刀门河口湾地形较浅, 部分拦门沙已经成陆。磨刀门河口湾是珠江三角洲主要泄洪通道, 径流作用相对较强, 无论洪、枯季节平均水位都较高, 潮差从口门向上游衰减, 磨刀门落潮单向射流明显, 这些特点与“黄茅海-潭江”水域、“伶仃洋-虎门”水域明显不同。

2) 动力因素。珠江河口能量通量与能耗还受动力因素的影响, 如径流、风、潮汐等。以伶仃洋-虎门水域为例, 枯季能量通量都是从伶仃洋向上游传播, 潮汐能量是广州前、后航道-狮子洋-虎门水域的主要能量, 能通量的方向向上游传播。而在大洪水期间(“98.6”洪水), 上述区域的能量通量方向指向下游。在强东北风(风速9.8m/s)条件下, 垂向涡动耗散项能耗增强, 垂向涡动耗散项能耗为总能耗的35%~53%, 底摩擦能耗项能耗占总能耗46%~64%<sup>[12]</sup>。

## 4 结 论

基于珠江河口三维数值模型, 本文分析了珠江河口潮能通量与耗散的空间分布。珠江河口的能量通量与耗散受地形影响较大, 潮能通量传播方向与河口地形走向大体一致。能量耗散以底摩擦能耗为主, 垂向扩散耗散次之。从能通量和能耗分布特征看, 珠江河口可以分为伶仃洋-虎门水域、磨刀门河口水域区、黄茅海-潭江水域、网河区水域。上述各区域存在“门”等高能耗局部地形, 其单位

面积能耗比附近水域的高数倍甚至1~2个数量级。

## 参考文献:

- [1] ZHONG L, LI M. Tidal energy fluxes and dissipation in the Chesapeake Bay [J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(6): 752-770.
- [2] FOREMAN M G G, SUTHERLAND G, CUMMINS P F. M2 tidal dissipation around Vancouver Island; an inverse approach [J]. *Continental Shelf Research*, 2004, 24: 2167-2185.
- [3] ARGOT M L, AMADOR A, LAVIN M. Tidal dissipation and stratification in the Gulf of California [J]. *J Geophys Res*, 1995, 100(C8): 16103-16118.
- [4] CARBAJAL N, BACKHAUS O. Simulation of tides residual flow and energy budget in the Gulf of California [J]. *Oceanologica Acta*, 1997, 21(3): 429-446.
- [5] LUECK R G, MUDGE T D. Topographically induced mixing around a shallow seamount [J]. *Science*, 1997, 276: 1831-1833.
- [6] SCOTT W T, STEPHEN P. Tidal energy dissipation at the sill of sechelt inlet, British Columbia [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2001 (31): 3365-3373.
- [7] 吴超羽, 包芸, 任杰, 等. 珠江三角洲及河网形成演变的数值模拟和地貌动力学分析: 距今6000~2500 a [J]. *海洋学报*, 2006, 28(4): 64-80.
- [8] 吴超羽, 何志刚, 任杰, 等. 珠江三角洲中部子平原形成演变机理研究—以大鳌平原为例 [J]. *第四纪研究*, 2007, 27(5): 814-827.
- [9] 吴超羽, 任杰, 包芸, 等. 珠江河口“门”的地貌动力学初探 [J]. *地理学报*, 2006, 61(5): 537-548.
- [10] 刘欢. 珠江河口地形致高能耗区的消能特点和机理研究 [D]. 广州: 中山大学, 2009.
- [11] 刘欢, 吴超羽, 许炜铭, 等. 珠江河口底边界层湍流特征量研究 [J]. *海洋工程*, 2009, 27(1): 62-76.
- [12] 倪培桐. 地形致动力场对珠江河口能量耗散及其作用机制 [D]. 广州: 中山大学, 2010.
- [13] ZHANG Y L, BAPTISTA A M, MYERS E P. A cross-scale model for 3D baroclinic circulation in estuary-plume-shelf systems: I. Formulation and skill assessment [J]. *Continental Shelf Research*, 2004, 24: 2187-2214.