

珠江口岛屿地貌单元的能量耗散和过程机制*

倪培桐, 陈卓英

(广东省水利水电科学研究院//广东省水动力学应用研究重点实验室//
河口水利技术国家地方联合工程实验室, 广东 广州 510630)

摘要: 珠江河口及三角洲岛屿众多, 岛屿地貌单元是沉积物及污染物的滞留区域。基于三维湍流精细模型, 建立岛屿地貌单元的能耗分区模式, 研究了不同分区的动力结构、湍流特性、能量转化、能量耗散特征及其驱动机制。结果表明, 岛屿地貌单元的能耗空间分布特性可分为汉道区、湍流混合区、上游远区和下游区。湍流混合区主要为正压力项、水平对流项、底摩擦项和湍流应力项之间的平衡, 其他区域的动力平衡主要是正压力、水平对流项和底摩擦项之间的平衡。研究成果有助于理解珠江河口及三角洲的现代动力过程及其发育演变过程。

关键词: 岛屿地貌单元; 时均与湍流特性; 能量耗散; 能耗分区

中图分类号: P743.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2017)04-0161-08

Energy dissipation and mechanism induced by island topography of the Pearl River estuary

NI Peitong, CHEN Zhuoying

(Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower//Hydrodynamic Research
Key Lab of Guangdong Province//State-Province Joint Engineering Laboratory of
Estuarine Hydraulic Technology, Guangzhou 510630, China)

Abstract: The Pearl River estuary is distinguished from other estuaries by its numerous rocky islands and complicated topography. Its energy dissipation and mechanism induced by island topography were studied based on three dimensional turbulent model in this area, including the dynamic structure, turbulence characteristic, energy transformation, energy dissipation in different local areas. The results showed that island-induced energy dissipation can be divided into branch zone, turbulent mixing zone, upstream zone and downstream zone, and their dynamic balance is between pressure term, horizontal advection term and turbulent stress term in the turbulent mixing zone, and between pressure term and horizontal advection term in the other zones.

Key words: island morphological unit; the average flow and turbulent flow; turbulent energy dissipation; subarea of the energy dissipation zone

与世界其他河口相比, 基岩岛屿众多、地形边界复杂是珠江河口的重要特征, 这些复杂的地形边界控制着径流与潮流的运动形式, 产生了复杂的平均流结构, 并影响其能量耗散^[1]。对于河口物质、

能量输运而言, 岛屿地形单元改变了珠江河口的能量空间分布, 岛屿后方往往是污染物或悬浮物的滞留区域, 并促使形成沉积核心, 是珠江河口三角洲发育过程中的重要特征^[2]。研究珠江河口岛屿地

* 收稿日期: 2016-06-27

基金项目: 广东省水利科技创新项目(2016-12)

作者简介: 倪培桐(1971年生), 男; 研究方向: 河口动力学; E-mail: nipeitong@163.com

貌单元的能量耗散及过程机制, 对于理解珠江河口动力过程及发育演变, 有重要的理论和实践价值。

随着观测技术的发展, 河口海岸水域的湍流观测、湍流能耗的估计逐渐成为可能, 并成为河口学研究的热点问题^[3]。由于局部突变地形水域通过产生复杂的动力结构影响湍流强度及能耗, 其湍流问题是河口动力学研究的热点之一^[3]。近年来很多学者对岛屿地貌单元的湍流特征问题进行了研究。Furukawa 等^[4]研究了岛后尾流的浅水效应, Neill 等^[5]观测并模拟了苏格兰福思湾岛后尾流现象。Foreman 等^[6]基于数学模型研究了 Vancouver 岛附近水域的 M₂ 潮能耗散, 指出能量主要耗散在 Gulf 海湾内, San Juan Islands, Juan de Fuca Strait 及 Vancouver Island 东北部的渠道内。Zhong 等^[7]研究了 Chesapeake Bay 能量消耗。

岛屿作为珠江河口重要的地貌形态, 在河口发育演变、泥沙、能量输运转化中起着重要的作用^[1-2]。目前主要通过原体观测、物理模型试验、数值模拟等方法研究典型地貌单元湍流能耗问题。文献 [8] 利用高频 ADV 实测了珠江河口底边界层湍流积分尺度、湍流微结构、湍流能量平衡和湍流特征量的时空变化。倪培桐等^[1]建立了岛屿、峡口概化地貌单元的湍流能耗特性物理模型试验, 分析了地貌形态对微动力结构的影响。

为弥补物理模型试验及原体观测的不足, 本文建立 RNG $k - \varepsilon$ 湍流模型研究岛屿概化地貌单元湍流能耗与过程机制。结果表明岛屿地貌单元存在能耗的空间分区模式, 不同分区的动力结构、湍流特性、能量转化、能量耗散特征及其驱动机制不同。

1 数学模型

与标准的 $k - \varepsilon$ 模型相比, RNG $k - \varepsilon$ 模型在 ε 的传输方程中增加了一个 R 项, 可以更好地模拟应变大和流线弯曲度大的流动问题^[9]。

1.1 控制方程

湍流数值模拟的 Reynolds 平均方法 RANS (Reynolds Average Navier-Stokes, 简称 RANS) 中, Reynolds 时均方程组见下式^[9]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) &= \\ - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) + S_i \end{aligned} \quad (1)$$

式中 u_i 为流速, ρ 为密度, μ 分子粘性系数,

$-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 为湍流应力项, S_i 为源项。

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} =$$

$$v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + v_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (2)$$

δ_{ij} 为“Kronecker delta”符号 (当 $i = j$ 时, $\delta_{ij} = 1$; 当 $i \neq j$ 时, $\delta_{ij} = 0$), k 为湍流动能, v_t 为涡粘系数。

湍流动能及其耗散率控制方程为

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} =$$

$$v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k v_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} +$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon v_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (4)$$

其中,

$$R = \frac{c_\mu \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right) \varepsilon^2}{(1 + c_3 \eta^3) k} \quad (5)$$

$$v_{eff} = v_t \left(1 + \sqrt{\frac{c_\mu k}{\mu \sqrt{\varepsilon}}} \right)^2 \quad (6)$$

$$\eta = \sqrt{\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{k}{\varepsilon}} \quad (7)$$

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

k 为湍流动能, ε 为耗散率, $c_{\varepsilon 1} = 1.42$, $c_{\varepsilon 2} = 1.68$, $c_3 = 0.012$, $\eta_0 = 4.38$, $c_\mu = 0.085$, $\alpha_k = 0.7194$, $\alpha_\varepsilon = 0.7194$ 。模型求解过程详见文献^[10]。

1.2 模型设定

根据河口潮平均能耗方程^[11], 水体能耗与流体性质 (水体密度、涡动粘性系数)、地形的几何尺寸 (河道长、宽、深、糙率)、流动条件 (水流速度、风速) 等参数有关。本文通过对比分析, 研究明渠内岛屿平面形态引起的能耗特征变化。由于珠江河口围垦形成的岛屿及部分天然岛屿具有矩形特征, 倪培桐等建立了岛屿地貌单元概化形态的物理模型试验^[1,11], 并研究了其能耗特征。试验中岛屿宽度为 14 cm, 岛屿两侧汉道宽度分别为 18 cm, 与下游河道宽度之比为 1:3.57^[11], 类似受边界约束的渠道内岛屿单元的动力结构。本文数学模型与物理模型范围一致, 均为长为 14 m、宽 0.5 m、高 0.3 m。计算区域网格设定为 639 × 23 × 14; X-Y、X-Z、Y-Z 平面相邻网格最大步长比率为 2.057、2.235、1.104^[11]。模型为恒定流, 设定上游流量 0.02 m³/s, 下游水深为 0.2 m。

1.3 计算与实测结果比较

采用文献 [1] 的试验数据对数学模型进行率定验证。图 1 为 x 方向流速垂向分布比较验证。除 $y = 25 \text{ cm}$ 垂线实测值较计算值大外，其余位置流速计算值与实测值吻合较好。图 2 为岛屿下游 20 cm 位置湍流动能计算值与实测值比较，湍流动能峰计算值约为 $30 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ ，实测值在约为 $50 \text{ cm}^2/\text{s}^2$

s^2 ，湍流动能计算值较实测值略小，湍流动能分布形态总体一致。由于物理模型仅仅采集有限的垂线数据，无法获得流场的完整信息（如岛后双湍流动能峰值中心），而数学模型则较好地捕捉到这一现象。但从总体上看，模型计算结果较好地反映了岛屿形态对水流微结构的影响。

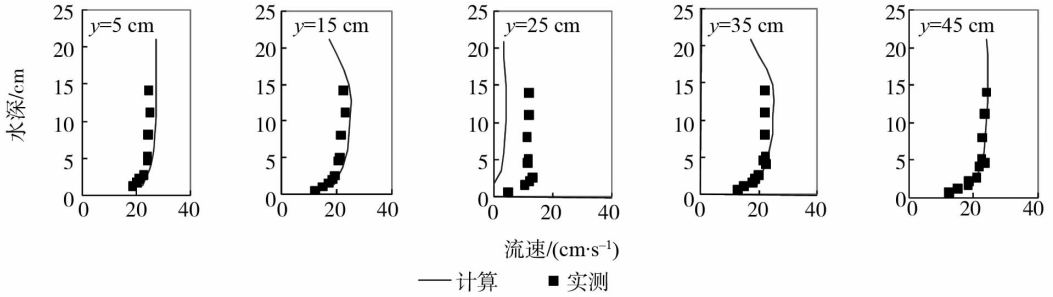


图 1 X 方向流速在断面不同位置垂向分布（岛后 20 cm）

Fig. 1 Validation of velocity in X direction behind of the island topography

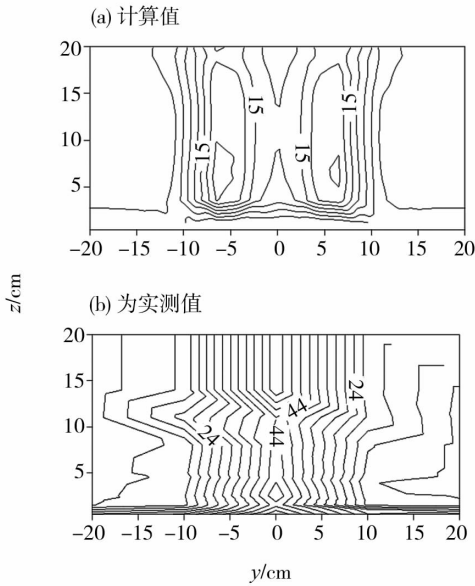


图 2 湍流动能计算值与实测值比较（单位： m^2/s^2 ）

Fig. 2 Validation of turbulent kinetic energy

2 结果与讨论

2.1 平均流结构

根据水流特征，含岛屿水流可分为汉口段、分汊段、汇流区等部分。在分汉口，水流受岛屿地形阻挡水流流速减弱，水流顺岛屿两侧加速流向下流；两股水流在岛屿后方汇集，水流速度减弱。岛屿前方水流向下俯冲形成了立柱涡旋，水流分向两侧（图 3a - c）；在汇流区，两侧水流向中部挤压，

岛后形成方向相反的双回流结构（图 3d）。

在岛屿地形附近，水体的流速梯度明显变大（图 4），距离岛屿越远，流速梯度量值越小。图 4 显示流速梯度场沿岛屿地形向下游延伸，在主流与回流区之间流速梯度相对较大。3 个方向的流速梯度相比较，纵向流速 u 在横向（ y 方向）的水流流速梯度较大，其次是垂向（ z 方向）的流速梯度，主流方向（ x 方向）的流速梯度相对较小。

2.2 湍流特性

由于湍流动能及其耗散率的物理意义分别表示湍流强度和小尺度涡的机械能转化为热能的速率。在 $X - Y$ 平面上，湍流动能最大值出现岛后回流区，高湍流动能区与高流速梯度区分布位置一致（图 5a）。 $X - Z$ 和 $Y - Z$ 平面（岛后 20 cm）底部湍流动能相对较大，最大湍流动能约为 $30 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ ，并出现双高湍流动能中心。表明由于回流区水流的脉动强度大，而紊动切应力是脉动流速的二次相关矩，回流区紊动切应力也较大。

岛屿分汊水流高紊动动能耗散率区主要出现岛屿周围与回流区流速等流速梯度大的位置，高湍动能中心、高能耗率中心、双回流区位置基本一致（图 5a, b）。岛后回流区湍动能耗散率可达 $25 \text{ cm}^2/\text{s}^3$ ，比明渠水流能耗率高 1 ~ 2 个数量级，表明岛屿局部地形改变了水流结构，表现在流速回流区流速梯度、紊动动能大，从而使湍流动能耗散率增强。

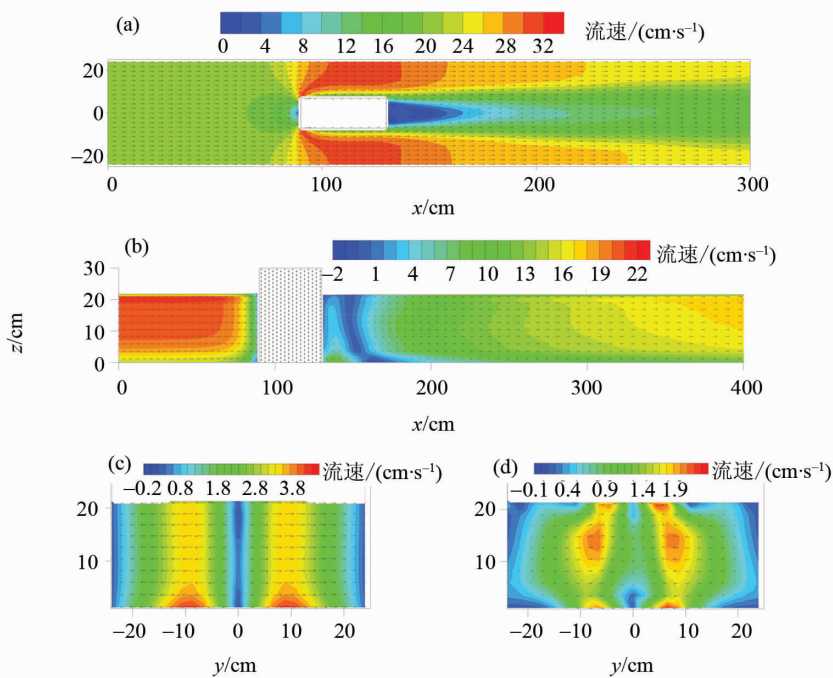
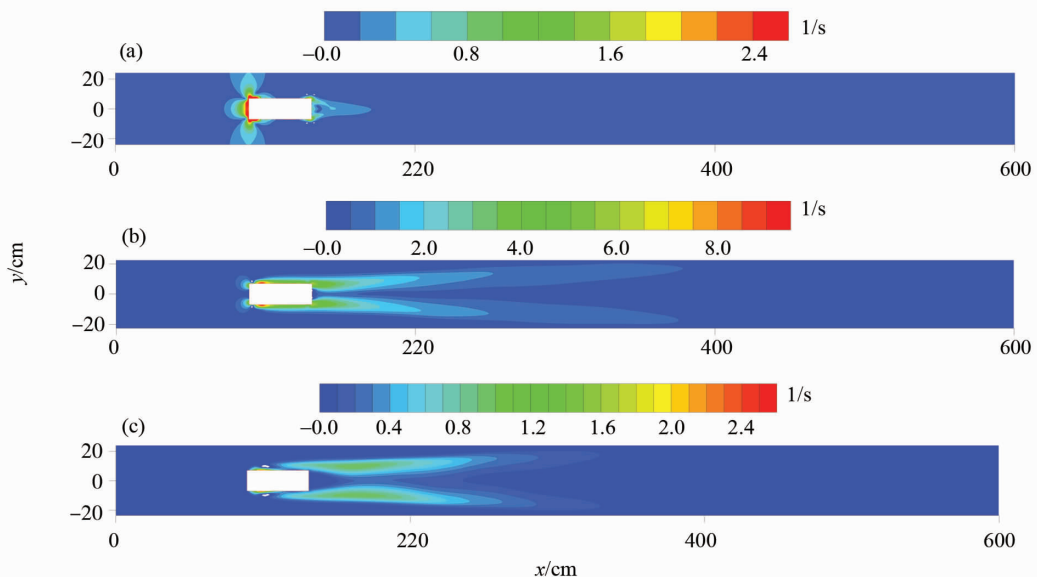


图 3 典型剖面流速场

Fig. 3 The velocity of typical section near the island

图 4 $X-Y$ 平面流速梯度场 ($z = 15$ cm)Fig. 4 The $X-Y$ plane velocity derivative at $z = 15$ cm

动力粘性系数反映湍流粘性特征,远大于分子粘性系数。岛屿周围湍流动能耗散率峰值出现在岛屿周围和岛后回流区,动力粘性系数峰值相对较小;在岛后约 20 倍岛宽距离位置,湍流动能耗散率明显变小,而湍流动能仍然较高,导致动力粘性系数出现狭长的峰值带(图 5c)。在水深为 15 cm 的 $X-Y$ 平面动力粘性系数最大可达 $6.5 \text{ g}/(\text{cm} \cdot$

s),是岛前部水流的近 3 倍。动力粘性系数在横断面上分布不均匀,在岛后 20 cm 位置,轴线动力粘性系数比两侧高 1 个数量级。

2.3 能量转化

势能变化主要体现在自由水面的变化。岛屿地形附近水域自由水面的表现为:岛屿地形上游和下游距离岛屿较远的断面水流平顺,水面在横向上几

乎没有比降；岛屿地形附近自由水面出现明显的三维特性，横向比降显著。与明渠水流相比，岛屿上游水位壅高，动能转化为势能；水流向两侧分流，水位中间高，两侧低，动能转化为势能；而岛屿下游，水流势能转化为动能。汇流区位于岛后，水体

从两侧汇道向主流区运动，两侧水位高，中间水位低，从而能维持岛后回流区的存在。与岛屿上游远区、下游远区相比，岛后回流区湍流掺混强度增加，水流动能部分转化为水体的湍流动能，并通过微尺度涡转化为热能（图 6a - c）。

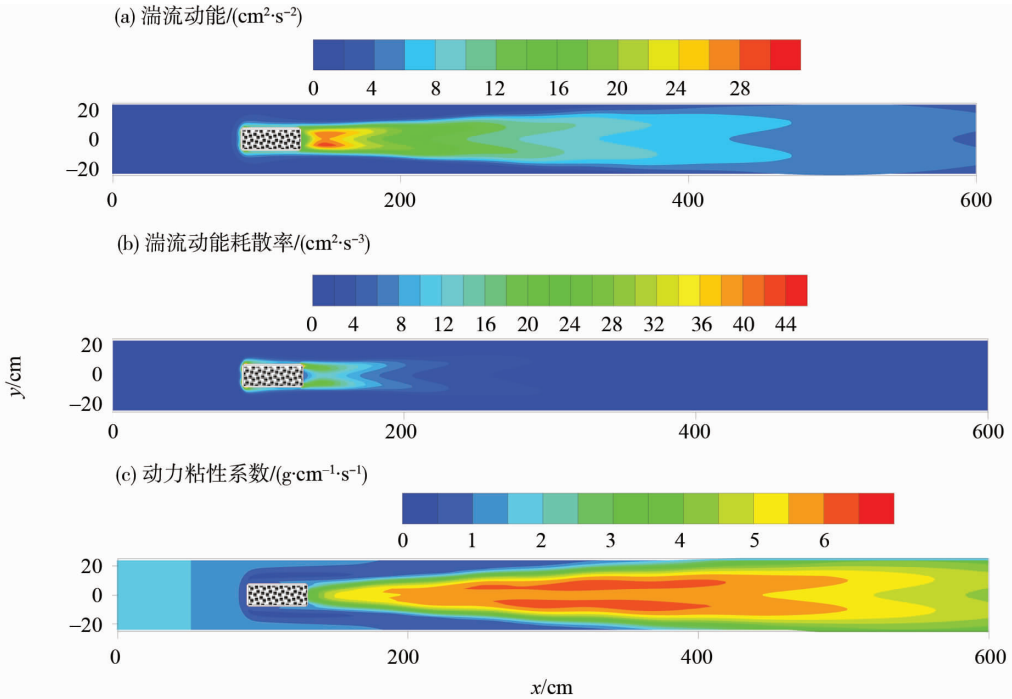


图 5 X - Y 平面水流湍流特性分布 ($z = 15 \text{ cm}$)

Fig. 5 Distribution of turbulence characteristics at X - Y plane ($z = 15 \text{ cm}$)

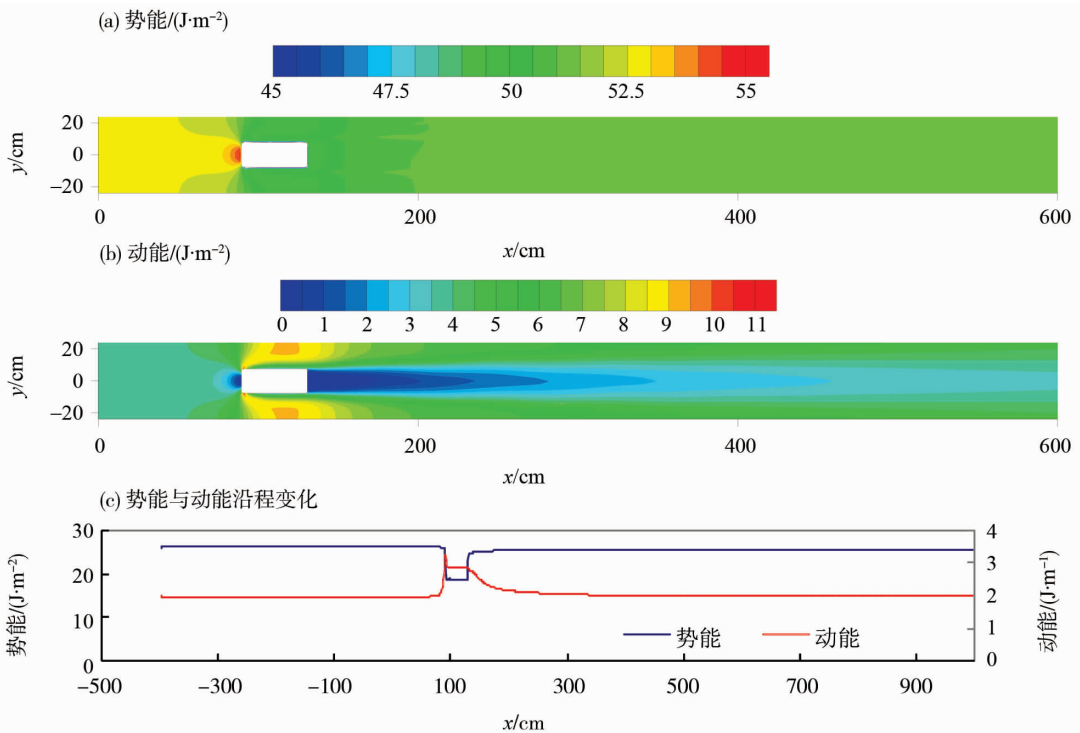


图 6 水流能量转换

Fig. 6 Transformation of mechanical energy over Island topography along the channel

2.4 能耗分区及机制分析

1) 能耗空间分布。湍流能耗可分为垂向涡动能、水平涡动能、底摩擦能耗^[12], 表示为:

垂向涡动有关的能耗项:

$$\iint \rho_0 \int_{-H}^{\eta} K_V \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] dS \quad (11)$$

水平涡动耗散项:

$$\iiint \rho_0 K_H \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right] dV \quad (12)$$

底摩擦能耗:

$$\iint \mathbf{u}_b \cdot \boldsymbol{\tau}_b dS \quad (13)$$

岛屿地貌单元附近水域垂向湍流能耗、水平湍流能耗分布与回流混合区位置的相关性高 (图 7a - c)。底摩擦能耗与床面切应力、摩阻流速有关, 与本文试验所选择的混凝土床面材料有关, 床面摩擦能耗空间分布主要与流速的空间分布有关 (图 7d)。底摩擦与湍流能耗累计总能耗分布见图 7e。

2) 能耗分区及动力机制分析。表 1 统计了不同分区的动力及能耗特性。其中, A1 单位能耗为

0.184 J/m², 单位面积能耗最大, 属于高能耗区。根据动力场、能量耗散差异, 可以在空间上把岛屿附近水域分成若干单元即: A1、A2、A3、A4 区分别对应于汉道区、混合区、岛屿上游远区、岛屿下游远区 (图 8)。表明岛屿地形边界控制径流或潮流的运动形式, 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。图 9 是 x 向动力方程不同项统计值, 反映了水流驱动机制的空间差异。

A1 分区: 位于左右汉道, 岛屿缩窄作用及分流作用, 有效过流面积减小, 水体在上游壅高, 上游水体势能增加。在汇流口处水流的坡降大, 势能转化为动能。由于 A1 区流速大, 底摩擦能耗较大。动力平衡中, 主要动力平衡项是正压力与水平对流、床面摩擦力的平衡。

A2 分区: 位于岛屿周围, 由于岛屿与水流作用形成涡旋, 水流流速梯度大、水体湍流强度高。本分区水流流速相对较低, 底摩擦能耗相对较小, 湍流动能耗散相对较大。主要动力平衡项是正压力与水平对流、床面摩擦力、湍流应力的平衡。

表 1 岛屿地形能耗分区特征表

Table 1 Energy dissipation in subareas of the island topography

项目	A1(汉道区)	A2(混合区)	A3(远区)	A4(远区)
面积/m ²	0.317 0	0.107 6	4.053 0	2.52
能耗特征	高能耗区	高能耗区	平均状态	平均状态
水平涡动能/J	0.000 7	0.010 1	0.009 4	0.010 2
垂向涡动能/J	0.000 5	0.000 7	0.006 9	0.002 0
摩擦能耗/J	0.057 1	0.005 2	0.529 2	0.194 0
单位面积水平涡动能/(J·m ⁻²)	0.002 3	0.093 8	0.002 3	0.004 1
单位面积垂向涡动能/(J·m ⁻²)	0.001 6	0.006 1	0.001 7	0.000 8
单位面积摩擦能耗/(J·m ⁻²)	0.180 3	0.047 9	0.130 6	0.077 0
总能耗/J	0.058 4	0.015 9	0.546 0	0.206 4
单位面积能耗/(J·m ⁻²)	0.184 1	0.147 8	0.134 6	0.081 8
机械能转化	上部势能转化为动能, 下部动能转化为动能	动能转化为势能, 部分动能转化为湍流动能	岛屿附近动能转化为势能, 下游势能转化为动能为	上游势能转化为动能, 岛屿附近动能转化为势能
能量耗散	底摩擦能耗增大	水平与垂向涡动能耗增大	一般	一般
动力平衡	正压力与水平对流	正压力、水平对流、水平涡动与垂直涡动	正压力、水平对流	正压力、水平对流

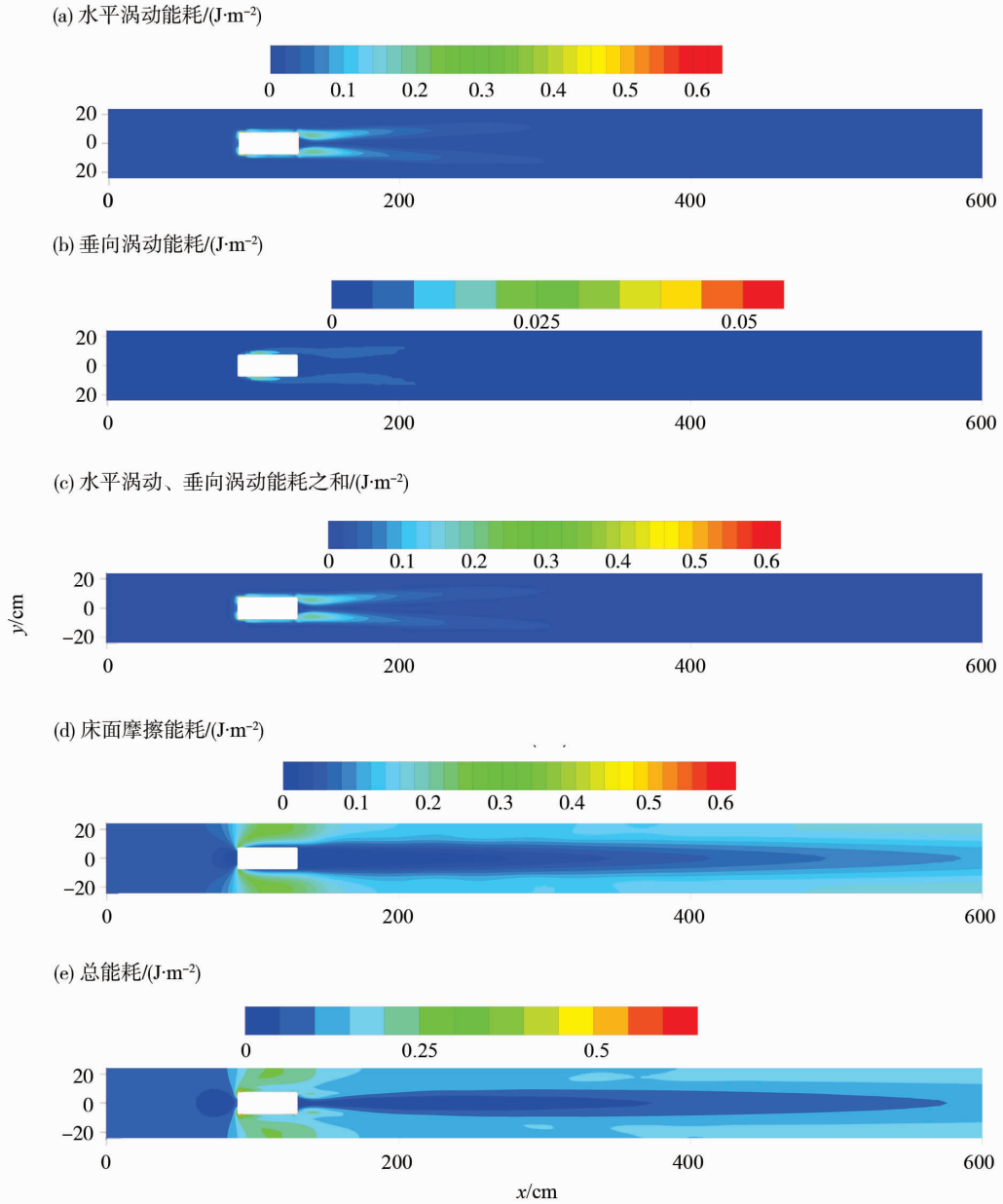


图 7 水流能耗分布

Fig. 7 Distribution of energy diffusion of island topography

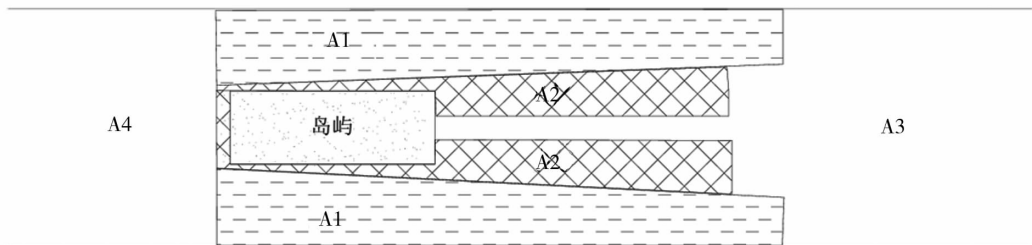


图 8 能耗分区示意图

Fig. 8 Energy dissipation zone of the Island topography

(本文算例 A4 的纵向范围为 -400 ~ 80 cm, A3 为 130 ~ 1 000 cm)

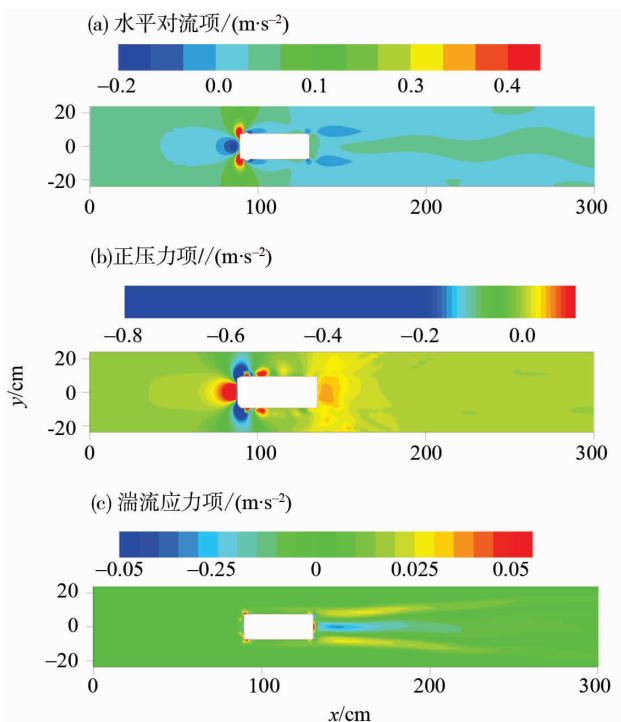


图9 动量方程动力平衡项量值 (x 方向)

Fig. 9 Dynamic equilibrium section in the x direction

A3、A4 分区：代表了受岛屿影响较小的下游及上游明渠水流。与 A1、A2 区相比较，A3、A4 分区属于相对低能耗区。能量耗散以底摩擦能耗为主。主要动力平衡项是正压力、水平对流、床面摩擦力的平衡。

由于本文设计的岛屿地形相对较窄，由于模型剖分的网格不够精细，过多将回流区中低流速区域划入 A2 分区，致使 A2 分区单位面积总能耗略大于 A3 水域。

3 结 论

本文基于 RNG $k - \varepsilon$ 的 FLOW3D 流体计算模型建立了岛屿地貌单元的能耗分区模式，不同分区的动力结构、湍流特性、能量转化、能量耗散特征及其驱动机制不同。

1) 岛屿地形分流、汇流动力结构伴随不同类型能耗区。汉道区 (A1 区) 上部势能转化为动能，下部动能转化为势能，能量耗散以底摩擦能耗为主；混合区 (A2 区) 湍流混合作用强度高，湍流紊动混合能耗增大。上游远区 (A4 区) 主要为动能转化为势能。下游远区 (A3 区) 主要为势能转化为动能。

2) 岛屿地形 (A1 区) 为汉道区，由于岛屿地形阻碍作用水位壅高致使正压力增大，从而导致

流速增大，底摩擦能耗变大。该区 (A1 区) 主要是正压力项、水平对流项及底摩擦项的平衡。湍流混合区 (A2 区) 流速梯度大，与其他分区相比，湍流混合强度增大，湍流能耗大。湍流混合区 (A2 区) 主要为正压力项、水平对流项、底摩擦项和湍流应力项之间的平衡。A3、A4 区为上游、下游远区为明渠水流，该区的动力平衡主要是正压力项、水平对流项及底摩擦项的平衡。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] 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 aBP[J]. 海洋学报, 2006, 28(4): 64 - 80. WU C Y, BAO Y, REN J, et al. A numerical simulation and morphodynamic analysis on the evolution of the Zhujiang River Delta in China: 6 000 ~ 2 500 a BP[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006, 28(4): 64 - 80.
- [3] UNCLE R. Estuarine physical processes research: Some recent studies and progress[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2002, 55: 829 - 856.
- [4] FURUKAWA K, WOLANSKI E. Shallow-water frictional effects in island wakes[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1998, 46(4): 599 - 608.
- [5] NEILL S P, ELLIOTT A J. In situ measurements of spring-neap variations to unsteady island wake development in the Firth of Forth, Scotland [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004, 60(2): 229 - 239.
- [6] FOREMAN M G G, SUTHERLAND G, CUMMINS P F. M_2 tidal dissipation around Vancouver Island: An inverse approach [J]. Continental Shelf Research, 2004, 24: 2167 - 2185.
- [7] ZHONG L, LI M. Tidal energy fluxes and dissipation in the Chesapeake Bay [J]. Continental Shelf Research, 2006, 26(6): 752 - 770.
- [8] 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 - 69. LIU H, WU C Y, XU W M, et al. Research on turbulent features of the bottom boundary layer in the Pearl River [J]. The Ocean Engineering, 2009, 27(1): 62 - 69.
- [9] 王福军. 计算流体力学分析—CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [10] FLOW - 3D User's Manual, V1, ver 9.3 [EB/OL]. Flow Science Inc, 2008.
- [11] 倪培桐, 吴超羽, 刘欢, 等. “门”地貌单元的能量耗散和过程机制[J]. 热带海洋, 2012, 31(2): 34 - 40. NI P T, WU C Y, LIU H. Energy dissipation and its mechanism induced by “gate” topography [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2012, 31(2): 34 - 40.