

# 珠江河口夏季缺氧现象的模拟

罗 琳<sup>1</sup>, 李适宇<sup>2</sup>, 王东晓<sup>1</sup>

(1. 中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境动力学重点实验室, 广东 广州 510301; 2. 中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275)

**摘要:** 夏季底层水体缺氧现象是珠江河口存在的环境问题之一。使用三维水动力-生态耦合模型来分析珠江口缺氧现象的分布状况和产生原因。模拟结果表明: 模型能很好的再现珠江口的缺氧敏感性区域和强度。珠江口存在的底层水体缺氧现象是水体强烈层化和生化耗氧过程共同作用的结果。缺氧现象的发展与减退受潮汐涨落的影响。珠江口盐度-潮汐混合锋面和层化作用控制低氧水团的范围和强度。

**关键词:** 缺氧; 珠江口; 层化作用; 潮汐混合

**中图分类号:** P342      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2008)05-0729-07

大部分海洋生物均需依赖溶解在水中的氧气来维持生命, 适量的氧是鱼类和好氧菌生存和繁殖的基本条件。缺氧, 即“低氧”现象的出现会改变生物群落的组成和结构, 改变沉积物环境, 对整个河口区的水生生态系统会产生严重的影响。由于鱼类和贝类在溶解氧低于 3 mg/L 的水体中开始死亡, 本研究中将海水中溶解氧含量低于 3 mg/L 的现象定义为“缺氧”(Hypoxia)现象<sup>[1]</sup>。研究普遍认为, 缺氧现象存在和发展是水体的自然物理条件和富营养化共同作用的结果。

珠江口是中国著名的三大河口之一, 珠江水系主要干流西江、北江和东江流经珠江三角洲经济发展区, 汇合后由虎门、蕉门、洪奇门、横门、磨刀门、鸡啼门、虎跳门和崖门八大口门分流进入南海, 在夏季丰水期径流量可超过 20 000 m<sup>3</sup>/s。珠江口地形复杂, 滩槽交错。在地形、径流和潮汐的共同作用下, 水动力条件十分复杂。而且, 随着近几十年来珠江三角洲地区的快速城市化与工业化发展, 大量的污染物通过河流或直接排放到珠江口, 致使河口水质恶化, 原有生态环境遭到破坏, 富营养化、赤潮、缺氧等环境问题丛生<sup>[2]</sup>。作为水生态环境的重要参数, 了解珠江河口水体溶解氧(DO)的影响因素和缺氧现象的形成原因, 对珠江口的可持续发展具有重要意义。对珠江口底层水体缺氧现象的观测可上溯到 20 世纪七八十年代进行的大规模海岸带和海涂资源综合调查, 随后进行的多次调查都发现这一现象<sup>[3,4]</sup>。通过对水体的 DO 浓度及环境因子的监测分析, 有学者从营养盐循环利用的角度提出缺氧出现的壁垒条件和环境效应等<sup>[5]</sup>, 但目前尚无对河口沿岸底层水体缺氧现象的专门模拟研究。海洋监测是获取水质信息的可靠手段, 但数据的有限性和不连续性不能反映缺氧的动态过程。因此本文构建一个三维水动力-生态模型, 模拟再现珠江口的物理、生态过程, 调查缺氧现象的形成原因。

## 1 模型的建立

根据珠江口的地形和水动力环境特征, 本研究选择不同来源的水动力模型和生态模型进行联接和改进, 对 DO 的分布进行模拟。

### 1.1 模型简介

区域水动力模型在三维斜压水动力模式(ECOM)基础上建立。ECOM 是基于著名的普林斯顿海洋模型(POM)发展的适用于浅水环境——河流、海湾、河口沿海、水库和湖泊等的模型, 能够真实模拟空间尺度 1 ~

收稿日期: 2007-07-25

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目“南海北部海洋生态动力学特征研究”(kzcx-sw-227); 广东省重大科技专项规划项目“基于卫星遥感的珠江口咸潮预测技术模型开发”(2007A032600002)

作者简介: 罗琳(1978-), 女, 广西柳州人, 博士, 主要从事河口区水质模拟研究。E-mail: luolin@scsio.ac.cn

100 km, 时间尺度 30 个潮周期过程的河口和沿海区域。模型计算的变量包括流速三维分量, 温度、盐度、湍流动能和湍流混合长度。其主要特征包括: 适用于真实的岸线和真实的底地形的平面正交曲线坐标和垂向坐标系; 提供较为真实垂向混合过程的湍流封闭模式; 采用分裂算子技术, 分别计算体积输运和垂向速度剪切等。模型方程和数值解法等可参考文献[6]。ECOM 模型在研究河口和浅海动力学上有着悠久的历史, 在程序的编写上也具有良好的模块化特点, 便于本研究中生态动力模块的插入。

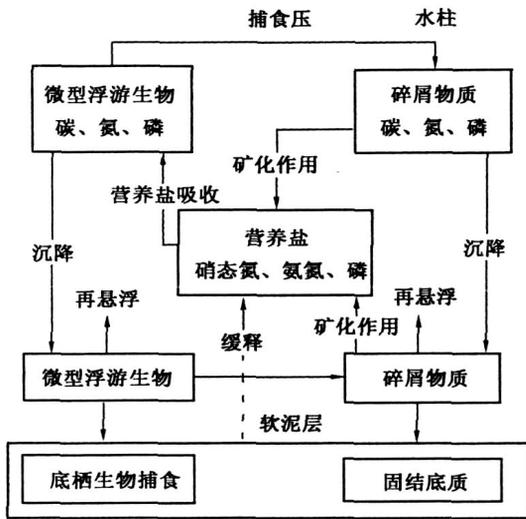


图1 生态模块的生化转化过程示意

Fig. 1 Schematic biological processes of the biological model

生态模型主要模拟各生态因子的生物化学转化过程, 以子模块的形式链接入水动力模型, 与三维斜压水动力模式联立运行, 二者采用相同的空间网格和时间步长。水动力模式为生态模式提供物理参数, 但生态模式并不反馈于水动力模式。本研究使用的生态模型源于 Tett1990 年基于氮限制的 C-N 浮游生物-碎屑物模型, 其源代码由欧盟于 1990 - 1998 年研发的大型沿岸与陆架海区多目标三维数值模型 COHERENS 中开发。根据珠江河口为营养元素磷限制的特点, 本文将模型发展为浮动最小因子限制的 C-N-P 模型。模型主要特点有: 使用一个“微型浮游生物箱”概括所有 < 200 μm 的微型浮游有机体, 从而简化了微生物链发生的复杂生物过程, 由于该量级的微型生物周转率 (0.1/d) 远小于模拟时间, 不会对模拟精度造成影响; 基于浮游植物细胞的营养盐比例变化决定了营养盐的吸收和生长速率的观点, 以微型浮游植物和碎屑物质的营养元素与碳的比例为参数来控制生物过程的进行速率<sup>[7]</sup>。模型概

念结构如图 1 所示。

生态模型模拟的物理输送、化学和生物过程的数学表达通式为

$$\frac{\partial}{\partial t} + \bar{v} \nabla + W \frac{\partial}{\partial z} + s \frac{\partial}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_H \frac{\partial}{\partial z} \right] - \frac{\partial}{\partial x} \left[ A_H \frac{\partial}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ A_H \frac{\partial}{\partial y} \right] = p(\ ) - S(\ ) \quad (1)$$

式中 为各项生态模型变量; 左边第 1 项为时变项; 第 2、3 项为水平和垂直方向的对流项, 第 4 项为垂向“非物理沉降项”, 即有机生物体自身的沉降调整;  $s$  由与有机生物体营养元素含量比例有关的经验公式决定; 第 5、6、7 项为垂直和水平方向上的扩散项; 右边第 1 项为所有正的增加“源”项; 第 2 项为所有负的消耗“汇”项。

溶解氧的生化过程可表示为

$$(O) = ({}^0q^B \mu + {}^0q^{NO} \cdot {}^{NO}u - {}^0q^C e G) B - {}^0q^{NH} \cdot {}^{NH}r \cdot {}^{NH}S - {}^0q^C \cdot {}^C r C \quad (2)$$

式中  $O$ 、 $B$ 、 ${}^{NH}S$ 、 $C$  分别代表变量溶解氧、浮游生物碳、铵态氮和碎屑碳;  ${}^0q^B$ 、 ${}^0q^{NO}$ 、 ${}^0q^C$ 、 ${}^0q^{NH}$  分别为浮游生物生长、营养盐吸收、碎屑物质呼吸以及硝化过程中光合作用减去呼吸作用的氧净生成率;  $\mu$  为浮游生物生长率;  ${}^{NO}u$  为硝态氮的吸收率;  ${}^0q^C$  为浮游生物碳、氮、磷遭中型浮游动物捕食后被同化的比例;  $e$  为被同化后的氮立刻经代谢以氨氮形式排泄出来的比例;  $G$  为中型浮游动物的捕食压;  ${}^{NH}r$  为硝化作用率;  ${}^C r$  为碎屑态碳的再矿化率。其余生态变量的生化转化过程见表 1。各状态参数参与的生长、吸收、再矿化、硝化等过程均为次网格化过程<sup>[8]</sup>, 在本模拟中参照前人的经验进行取值<sup>[9,10]</sup>。

模型的应用范围为东经 113 00 ~ 115 06, 北纬 21 25 ~ 23 01, 模拟范围包括伶仃洋水域、磨刀门水域、鸡啼门水域、黄茅海、大鹏湾、大亚湾和南海 50 m 以浅水域(图 2)。模型采用正交曲线坐标, 研究范围在水平方向上分为 100 × 100 网格, 最小网格在东四口门处, 网距 500 m, 从口门向外海网距逐渐增大, 最大网格在陆架海域, 网距约 2000 m。对于本研究重点关心的伶仃洋水域网距小于 1 km, 水平分辨率相对较高, 可满足河口

区域的冲淡水、潮汐混合以及锋面等中小尺度现象的模拟精度；垂直方向上分为 9 个“ ”层，临近表层和底层的网格较密。时间步长外模 80 s、内模 8 d。

表 1 各生态变量的定义及源汇过程

Table 1 Biological processes and definitions of parameters

变 量	代表符号	源 (+) / 汇 (-)
溶解硝态氮	$NO_3^-$	$(NO_3^-) = -NO_{in}B + NH_r \cdot NH_S$
溶解铵态氮	$NH_4^+$	$(NH_4^+) = -NH_{in}B - NH_r \cdot NH_S + e \cdot GN + M_r M$
活性磷酸盐	$PO_4^{3-}$	$(PO_4^{3-}) = -PO_{in}B + e \cdot G \cdot P + PD_r \cdot PD$
浮游生物碳	$B$	$(B) = (\mu - G) B$
浮游生物氮	$N$	$(N) = (u - GQ) B$
浮游生物磷	$P$	$(P) = PO_{in}B - G \cdot P$
碎屑态碳	$C$	$(C) = (1 - ) \cdot CB - C_r C$
碎屑态氮	$M$	$(M) = (1 - ) \cdot GN - M_r M$
碎屑态磷	$PD$	$(PD) = (1 - ) \cdot G \cdot P - PD_r \cdot PD$
无机颗粒物	$A$	$(A) = 0$

注：1.  $M_r$ 、 $PD_r$  为碎屑态氮、磷的再矿化率；2.  $Q = N/B$  为浮游生物的氮/碳比，无机颗粒物仅作为保守态的惰性物质，在水中随潮汐作用周期性的沉降和再悬浮，起影响真光层的光衰减度的作用。3. 除无机颗粒物单位为  $g/m^3$  外，其余均为  $mmol/m^3$ 。

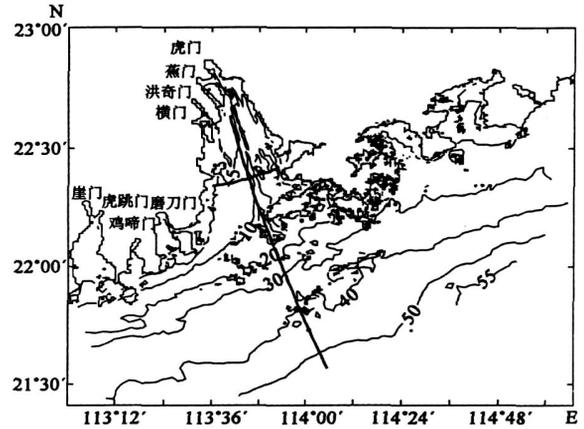


图 2 研究区域地形(等值线)及纵、横剖面示意图

Fig. 2 Topography (contours) of the study area and two chosen transects in longitudinal and transverse directions

1.2 模型校验

模式达稳定状态后，采用国家 863/818-09-01 课题

1999 年 7 月在珠江口的实测水文的大面站和连续站资料进行验证，验证结果如表 2 所示。结果显示模型对水动力和生化因子的模拟精度较高，能够准确地反映珠江口水环境和研究的 DO 状况。

表 2 模型结果验证

Table 2 Comparisons between simulated and observed values

平均误差		大 面 站					连续站 1	连续站 2
		相对误差/ %						
水位/cm	盐度/psu	硝态氮	氨氮	无机磷	叶绿素	溶解氧	溶解氧	溶解氧
5.5 ~ 14.1	2	13.7	34.7	17.0	50.0	11.2	13.0	13.3

2 结果分析

2.1 DO 的分布

模拟结果表明，珠江口表层 DO 的含量集中在 5.0 ~ 8.0 mg/L 之间，分布趋势为由北向南含量逐渐增加，东侧高于西侧，浓度的高值区出现在香港岛以东和以南。底层含量在 1 ~ 5 mg/L 之间，分布格局为近口门处和外海较高，湾内水域较低，河流淡水和陆架入侵底层的高盐水溶解氧含量稳定于较低的水平，位于其交汇带的伶仃洋底层水体浓度明显低于河流淡水和陆架高盐水，出现浓度小于 3 mg/L 的缺氧区域。垂向分布层化现象明显，表层的浓度高于底层。河口内 DO 垂向浓度差由北至南逐渐增加，外伶仃洋水域底层等值线密集，显示区域性耗氧带的出现(图 3)。模拟结果与实测结果相当吻合<sup>[11]</sup>。

2.2 缺氧的概率统计区域

为了找出珠江口及邻近海域容易产生底层水体缺氧现象的区域即敏感区域，利用一个简单的统计模型对模拟结果进行概率统计。

底层水在一个潮周期内出现的缺氧概率可表示为<sup>[2]</sup>

$$P_{oh} = 100 N_h / N_T$$

式中  $P_{oh}$  为计算网格内缺氧现象(浓度 < 3 mg/L)出现的概率， $N_h$  为计算时段内发生缺氧时间的次数，以 1 h 为计次步长； $N_T$  为总时间步长， $N_T = 24$ 。

如果以缺氧概率绘制等值线,伶仃洋缺氧敏感性区域有两个,一个在淇澳岛以南延伸至大横琴岛以南的西浅滩水域,一个在内伶仃岛周围水域。缺氧的规模和控制面积与潮汐涨落有关,高潮时面积减小,低潮时面积增大。

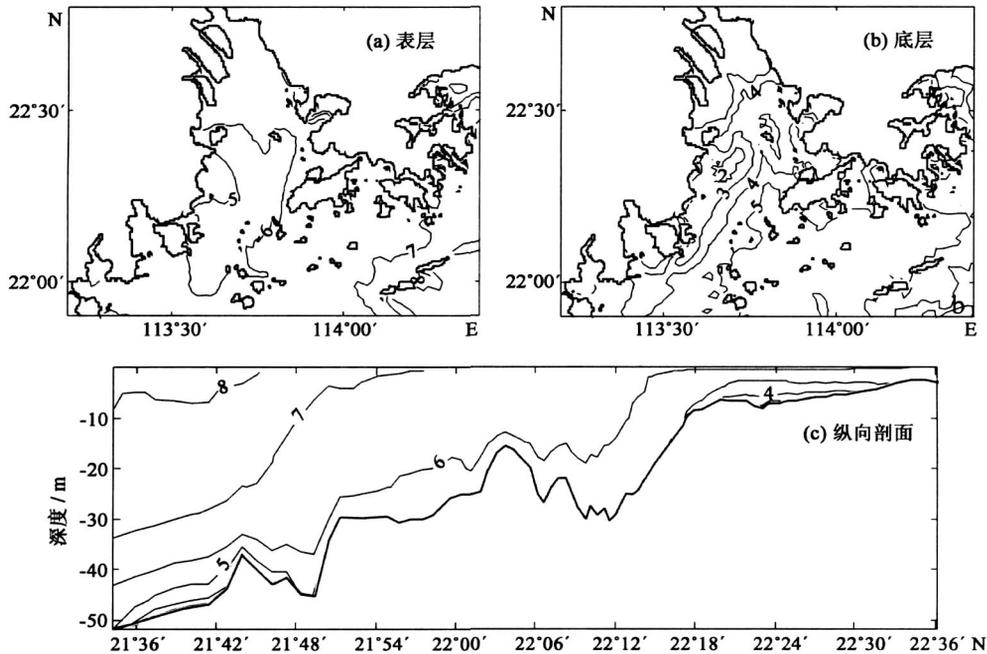


图3 溶解氧的水平分布(mg/L)

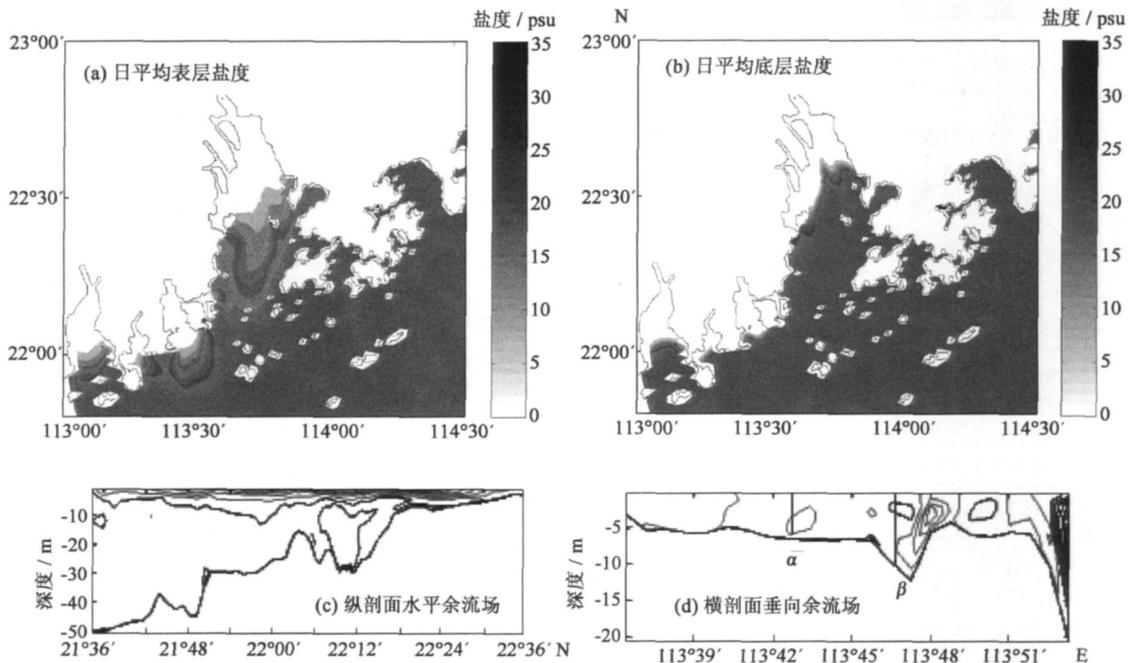
Fig. 3 Concentrations of simulated day-averaged DO

### 3 讨 论

DO的含量受诸多因素影响。一方面大气复氧和浮游植物的光合作用为其“源”,水体和底泥有机物质的耗氧生化作用为其“汇”;另一方面,水体的水平和垂向输送影响DO的分布,特别是氧的垂向补给是影响底层DO含量的关键因素。对1999年夏季珠江口的盐度、温度、溶解氧、营养盐等水质调查结果进行的统计分析显示,底层水体溶解氧含量的一个主要影响因素是咸淡水交汇形成的盐度层化作用,潮汐混合通过影响层化作用从而影响溶解氧的浓度<sup>[13]</sup>。为了探讨缺氧产生和消减的原因,以及容易发生缺氧现象的水域,有必要了解珠江口水动力特征对DO及各生化因子的影响。

夏季,由于珠江河水通量远远大于局地潮汐作用,径流冲淡水占据了几乎整个河口表面,并向陆架区域漂浮很远的距离,密度大的南海高盐水沿海底向陆作补偿运动,形成河口区域的重力环流(图4)。在潮汐的作用下,陆架上的盐水在涨潮时入侵河口,与河口的淡水混合后,在退潮时流入陆架而形成低盐羽毛状带<sup>[14]</sup>。带内水的盐度在垂直和水平方向上成较均匀的分布,层化现象明显,而在与陆架水相接的边缘处产生了盐度的急剧变化,即低盐锋面。同时锋区的伸退与强度受控于潮汐的涨退。当潮汐强流进入浅水区域时,海底摩擦造成水平流速的垂直切变,从而导致湍流能量以及潮汐能量耗散增大,海水发生混合,在混合水与层化水之间产生潮汐混合锋面。因此,受冲淡水强度、潮汐和地形的共同作用,珠江口的锋面既具有潮汐混合锋面的特性,又具有低盐锋面的特性。这种混合在河口中部西槽最为显著,盐度的分布显示,锋面在表层和底层的位置和强度成不对称分布,底层的盐度成舌状向口门方向突出,在冲淡水舌覆盖下,锋面在水平方向上沿10m等深线的河口中部深槽延展,在垂直方向上呈倾斜状与地形相交。同时,流速在跨锋面断面上达到极值,在两侧随与锋面

的距离增加而迅速递减(图 4)。根据锋面存在的位置,观察盐度和湍流混合扩散系数在西滩层化区和西槽锋区的垂向廓线在一个潮周期内的变化(图 5),涨潮时潮汐作用强烈,湍流紊动作用也较强,混合层上方呈现盐度的急剧过渡带;退潮时,潮汐混合作用较弱,盐跃层的强度也较小。西槽( )的垂向混合作用远比西滩( )的强烈。



(c) 和 (d) 等值线间隔分别为 0.1 和  $5e-5$ , 黑线为正值, 灰线为负值

图 4 盐度和余流场分布

Fig. 4 Distributions of simulated salinity and residual flow

研究区域内的 DO, 表层浓度与大气氧含量相仿甚至更高, 显示了浮游植物的光合作用是其重要来源。但由于泥沙含量高, 水体的透明度不足 1 m, 光合作用无法达到底层, 因此底层 DO 的来源只能依靠上层溶解氧的向下扩散补充; 同时, 底层碎屑物质的再矿化作用、氨氮的硝化作用和底泥的耗氧作用都需要消耗大量的氧。上层输送溶解氧的速率与底层消耗的速率, 决定了底层 DO 的含量。当上层输送的溶解氧不足以弥补底层所消耗的时, 底层的 DO 就会逐渐降低, 最终导致缺氧现象的发生。如图 5 所示, 一个潮周期的时间内, 西部浅滩( )受潮汐影响较小, 冲淡水覆盖在高盐水之上, 形成稳定的层化结构, 盐度垂向廓线随时间变化很小, 除了贴近底部的垂向混合稍强外, 整体混合程度微弱。这种物理环境为该水域内的营养盐、浮游植物以及碎屑物质等生态因子提供了良好的滞留时间, 为底层水体缺氧现象的出现创造了条件。与物理因子的结构相似, DO 及各生态因子浓度分布成层现象明显。表层浮游植物产生的氧向下输送的渠道受到限制, 底层浮游植物无法通过光合作用产生内源性的氧, 积聚的高浓度碎屑物质及氨氮成为耗氧的主要因子, 导致了缺氧现象的产生; 而西槽的锋面区( )受潮汐混合的周期性影响较大, 盐度廓线随时间产生很大的波动, 水体的中-下层垂向混合强烈, 湍流紊动扩散系数比层化区域大约 2 个量级。生态因子垂向浓度差异远不如层化区显著, 在表、底层水体交换条件良好的情况下, 底层溶解氧得到补充, 浓度较层化区的高。因此, 潮汐的周期性混合运动成为打破层化壁垒, 阻止缺氧大面积发展的主要因素。

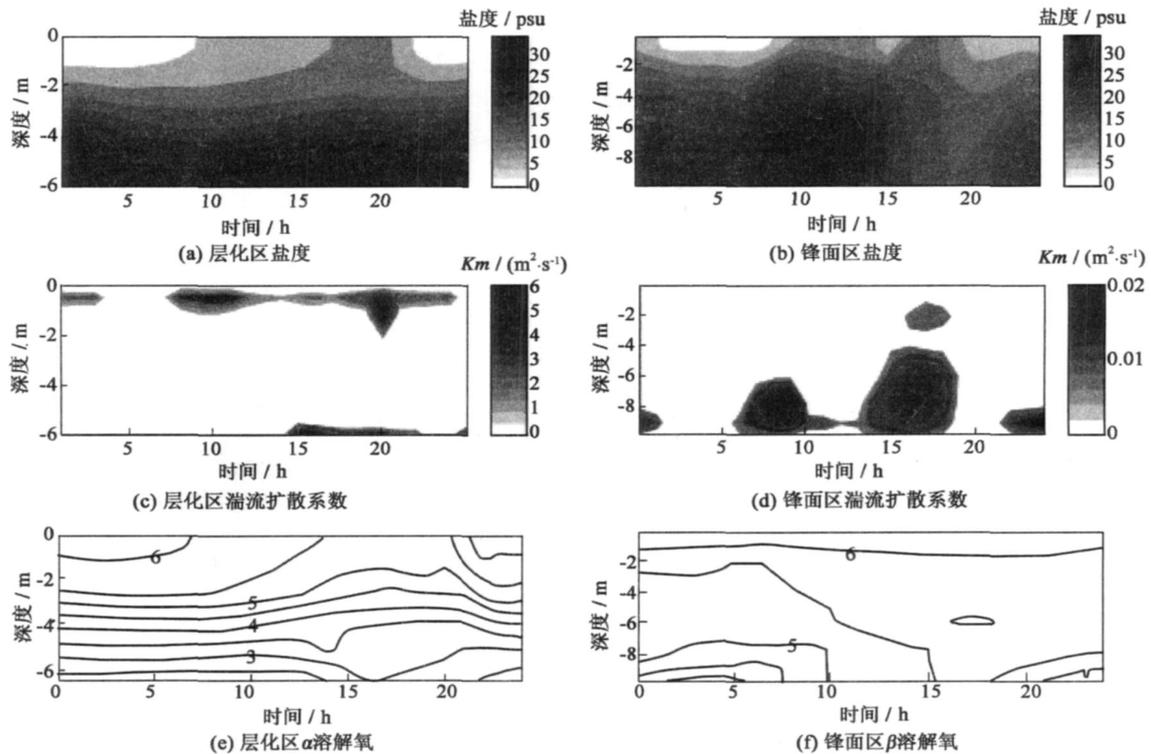


图5 一个潮周期内盐度、湍流混合扩散系数及溶解氧垂向分布的时间序列

Fig. 5 Diurnal evolutions of simulated physical factors and DO in vertical profiles of west shallow water (stratification zone) and trough (frontal zone)

## 4 结 论

本文使用一个三维水动力-生态模型对珠江口底层水体缺氧现象的形成和原因进行了模拟和分析。分析主要考虑了河口区潮汐和斜压特征对缺氧的影响。通过模拟，再现了珠江口底层水体两个明显的缺氧敏感区域，及区域内的物理和生化条件。研究认为，过量的营养物质和有机物质的输入和淡水径流导致的强烈层化作用是底层低氧水体出现的主要原因，而由潮汐和锋面提供的垂向混合阻止了缺氧现象的大面积发展。

珠江河口的生态环境状况与整个珠三角地区的社会经济发展息息相关，因此，在明确了缺氧形成机理的基础上，未来的研究要着眼于进一步探讨营养物质的输入量增加及营养盐结构的变化、地形的变化以及全球性海平面升高导致的珠江口水动力条件变化等问题对缺氧现象乃至整个河口生态环境的影响。

致谢：部分监测数据由香港科技大学海岸与大气研究中心提供，特此致谢。

### 参考文献：

- [1] Ecological Society of America. Hypoxia [EB/OL]. <http://www.esa.org/education/diversity/pdfDocs/hypoxia.pdf>, 2005.
- [2] 林卫强, 李适宇. 珠江口水环境可持续发展的探讨[J]. 海洋环境科学, 2002, 21(4): 54-58. (LIN Wei-qiang, LI Shi-yu. Research of the sustainable development of water environment in Pearl River estuary[J]. Marine Environmental Science, 2002, 21(4): 54-58. (in Chinese))
- [3] 广东省海岸带和海涂资源综合调查大队. 广东省海岸带和海涂资源综合调查报告[R]. 北京: 海洋出版社, 1987. (Committee of comprehensive investigation of coastal and tidal-flat resources in Guangdong Province. Report of comprehensive investigation of coastal and tidal-

- flat resources in Guangdong Province[R]. Beijing: Marine Publishing Company, 1987. (in Chinese))
- [4] 林洪瑛, 刘胜, 韩舞鹰. 珠江口底层海水季节性缺氧现象及其引发CTB的潜在威胁[J]. 湛江海洋大学学报, 2001, 21: 25 - 29. (LIN Hong-ying, LIU Sheng, HAN Wu-ying. The potential threat of seasonal hypoxia phenomena and associated CTB in the bottom layer of Pearl River Estuary[J]. Journal of Zhanjiang Ocean University, 2001, 21: 25 - 29. (in Chinese))
- [5] YIN K, LIN Z, KE Z. Temporal and spatial distribution of dissolved oxygen in the Pearl River estuary and adjacent coastal waters[J]. Continental Shelf Research, 2004, 24, 1935 - 1948.
- [6] HYDROQUAL, INC. A primer for ECOMSED[M]. New Jersey: Mahwah, 2002.
- [7] TETT P, WILSON H. From biogeochemical to ecological models of marine microplankton[J]. Journal of Marine Systems, 2000, 25: 431 - 446.
- [8] LUYTEN P J, JONES J E, PROCTOR R, *et al.* COHERENS-A coupled hydrodynamical-ecological model for regional and shelf seas: User documentation[R]. MUMM: Management Unit of the Mathematical Models of the North Sea, 1999. 914.
- [9] 管卫兵, 王丽娅, 许东峰. 珠江河口氮和磷循环及溶解氧的数值模拟 I. 模式建立[J]. 海洋学报, 2003, 25(1): 52 - 60. (GUAN Wei-bing, WANG Li-ya, XU Dong-feng. Modeling nitrogen and phosphorus cycles and dissolved oxygen in the Zhujiang River estuary Part I. Model development[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2003, 25(1): 52 - 60. (in Chinese))
- [10] 石峰, 王修林, 石晓勇, 等. 东海沉积物-海水界面营养盐交换通量的初步研究[J]. 海洋环境科学, 2004, 23(1): 5 - 8. (SHI Feng, WANG Xiulin, SHI Xiaoyong, *et al.* Benthic flux of dissolved nutrients at the sediment-water interface in the East China Sea[J]. Marine Environmental Science, 2004, 23(1): 5 - 8. (in Chinese))
- [11] 李炎, 董礼先. 珠江水域污染研究计划课题研究报告: 珠江河口水质研究[R]. 香港: 香港科技大学, 2002. (LI Yan, Dong Lixian. Water quality research of PRE, report of Pearl River estuary pollution research[R]. Hong Kong: The Hong Kong University of Science & Technology, 2002. (in Chinese))
- [12] KARIM M R, SEKINE M, UKITA M. Simulation of eutrophication and associated occurrence of hypoxia and anoxic condition in a coastal bay in Japan[J]. Marine Pollution Bulletin, 2002, 45: 280 - 285.
- [13] 罗琳, 李适宇, 厉红梅. 夏季珠江口水域溶解氧的特征及影响因素[J]. 中山大学学报, 2005, 44(6): 118 - 122. (LUO Lin, LI Shi-yu, LI Hong-mei. The characteristics of dissolved Oxygen and its affecting factors in Pearl River Estuary in summer[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2005, 44(6): 118 - 122. (in Chinese))
- [14] 陈长胜. 海洋生态系统动力学与模型[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. (CHEN Chang-heng. Marine ecosystem dynamics and modeling[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. (in Chinese))

## Modelling of hypoxia in the Pearl River estuary in summer

LUO Lin<sup>1</sup>, LI Shi-yu<sup>2</sup>, WANG Dong-xiao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Tropical Marine Environmental Dynamics, South China Sea Institute of Oceanology, CAS, Guangzhou 510301, China;

2. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** Hypoxia is one of the environmental problems existing in the Pearl River estuary (PRE). In this paper a coupled 3-D hydrodynamic-ecological numerical model is used to investigate the distribution and causes of the hypoxia phenomena in the PRE in summer. Hypoxia at the bottom layer of the major regions is well reproduced by this model, and in complete agreement with the observed pattern. The main results of the simulation show that the hypoxia phenomena in the PRE are caused mainly by the coupled dynamics of the water stratification and biochemical processes. The simulated hypoxia phenomena develop during the neap tide and disappear during the spring tide. The front and salinity stratification impact greatly on the range and intensity of the low oxygen water in the PRE.

**Key words:** hypoxia; Pearl River estuary; stratification; tidal mixing